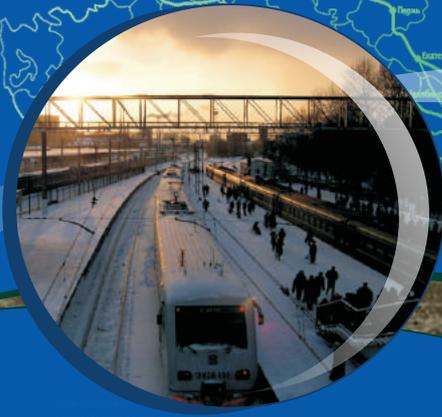


ИЗВЕСТИЯ

№ 3(31)

2017

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. **Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. **Бокарев Сергей Александрович** – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. **Демин Юрий Васильевич** – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТ, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. **Каргапольцев Сергей Константинович** – первый проректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
9. **Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
10. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
11. **Сидоров Олег Алексеевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
12. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
13. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
14. **Харламов Виктор Васильевич** – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, 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 Yuriy Vasilyevich** – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
8. **Kargapol'tcev Sergey Konstantinovich** – vice-rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
9. **Kosarev Alexander Borisovich** – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
10. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
11. **Sidorov Oleg Alexeevich** – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
12. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
13. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
14. **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

- Алтангэрэл Энх-Амгалан Выбор рода тока для электрификации Улан-Баторской железной дороги 2
- Блинов А. П., Блинов П. Н., Бернс П. А. Разработка математической модели совместной работы топливной аппаратуры высокого давления и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля 12
- Курманова Л. С. Повышение эффективности работы тепловозов путем применения газомоторного топлива 22
- Орленко А. И., Елисеев А. В., Вьонг К. Ч. Особенности вибрационного состояния транспортного объекта. Динамическое гашение колебаний по двум координатам: новые подходы 31
- Плаксин А. В., Швецов С. В. Пути повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов при эксплуатации на равнинных участках железных дорог 43
- Солоненко В. Г., Махметов Н. М., Бекжанова С. Е., Коптлеуов И. С. Динамические характеристики грузовых вагонов производства ТОО «КВК» на тележках модели 18-9996 54
- Трофимович В. В., Кузьмичев Е. Н., Попов М. А. Сравнительный анализ взаимодействия колес тележек локомотивов ТГ16 и ТГ16М в кривых участках пути 61
- Нехаев В. А., Николаев В. А., Лукс Е. Ю. Исследование влияния параметров нелинейной системы «вагон – путь» на динамику железнодорожного экипажа 69
- Харламов В. В., Хлопцов А. С., Найден С. Н. Разработка программного обеспечения для автоматической обработки термограмм и расчета интенсивности нагрева скользящего контакта в коллекторно-щеточном узле тягового электродвигателя 79
- Шантаренко С. Г., Капустян М. Ф., Супчинский О. П. Определение норм запасных частей и материалов при ремонте локомотивов новых серий с учетом случайно возникающих отказов в эксплуатации 85

Транспортная энергетика

- Горькин А. В. Применение реле-дифференциального шунта с задержкой времени его срабатывания 95
- Лесников Д. В., Паранин А. В. О подходе к расчету электрического сопротивления железобетонных конструкций 102
- Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Комякова Т. В. Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций 114
- Сидоров О. А., Смердин А. Н., Голубков А. С. Совершенствование вероятностных моделей прогнозирования отказов элементов инфраструктуры электроснабжения железных дорог 123
- Черемисин В. Т., Незевек В. Л., Эрбес В. В. Результаты оценки режимов работы активных и пассивных постов секционирования в системе тягового электроснабжения с целью выбора параметров накопителей электроэнергии 132

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Хабаров В. И., Красникова К. В. Создание имитационной модели движения поездов с использованием мультиагентного и дискретно-событийного подходов на примере Западно-Сибирской железной дороги 143

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения»

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 621.331

Алтангэрэл Энх-Амгалан

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ВЫБОР РОДА ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ УЛАН-БАТОРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

***Аннотация.** Рассмотрены опыт электрификации железных дорог России и представлено обоснование выбора рода тока для электрификации Улан-Баторской железной дороги. Выполнен расчет максимальной массы состава вагонов грузовых поездов электровоза переменного тока 2ЭС5К и электровоза постоянного тока 2ЭС6 в условиях Улан-Баторской железной дороги.*

***Ключевые слова:** тяга поездов, электроподвижной состав, постоянный ток, переменный ток.*

Altangerehl Ehn-Amgalan

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

THE CHOICE OF THE CURRENT TYPE FOR ULAN-BATOR RAILWAY ELECTRIFICATION

***Annotation.** The experience of the railways electrification in Russia and the justification of the current type choice for the electrification of the Ulan-Bator Railway are considered. The calculation of the maximum mass of the wagons of freight trains of an AC electric locomotive of 2ES5K and an electric locomotive of direct current 2ES6 in the conditions of the Ulan Bator Railway is performed. The rationale for choosing the kind of current for the electrification of the Ulan Bator railway is presented.*

***Keywords:** traction of trains, electric rolling stock, direct current, alternating current.*

В соответствии с Энергетической стратегией Монголии на период до 2010 г. и на перспективу до 2040 г. перспективными направлениями развития являются повышение энергетической эффективности и ресурсосбережение.

Одним из важнейших вопросов при принятии решения об электрификации участка железной дороги или строительства новой электрифицированной линии является выбор рода тока. Исторически сложилось, что электрификация железных дорог на первом этапе осуществлялась на постоянном токе, что было обусловлено существовавшим в тот период уровнем развития науки и техники. В последующем при электрификации железных дорог стала широко применяться система переменного тока. В настоящее время доля систем тягового электроснабжения (далее – СТЭ) постоянного и переменного тока на сети железных дорог мира составляет соответственно 43 и 57 % [1], а решение о выборе той или иной системы для вновь электрифицируемых участков принимается с учетом рода тока смежных электрифицированных участков. В случае электрификации протяженных участков железных дорог, граничащих с участками постоянного и переменного тока, в последнее время применяют СТЭ переменного тока.

Мировой опыт применения различных систем электрической тяги постоянного и переменного тока однозначно свидетельствует о преимущественном использовании системы переменного тока промышленной частоты напряжением 25 кВ. Подтверждает это и многолетний опыт эксплуатации электрифицированных железных дорог России.

Так, капитальные затраты на электрификацию, даже с учетом реконструкции линии связи, при переменном токе на 15 – 18 % ниже, чем при постоянном. Число тяговых подстанций меньше в два – три раза, они существенно проще, в результате чего значительно ниже расходы на их техническое обслуживание и эксплуатацию. Легче контактная подвеска – экономия меди составляют более 2 т на 1 км. Полностью снимается проблема износа контактных проводов и их периодической замены, исключается электрокоррозия опор контактной сети и подземных сооружений.

Опыт российских железных дорог показывает, что электрифицированные участки переменного тока имеют более высокую энергетическую эффективность, меньшие на 5 – 6 % суммарные потери энергии на тягу; на них практически не ограничивается весовая норма поездов. При равных объемах работы на участках переменного тока требуется на 15 – 20 % меньше локомотивов и локомотивных бригад. Повреждаемость устройств электроснабжения и электроподвижного состава (с бесколлекторным приводом) также заметно ниже. В результате себестоимость перевозок на участках переменного тока почти на 20 % меньше, чем при электротяге постоянного тока.

Для каждой из названных систем тягового электроснабжения существует своя «ниша» по объему перевозок (на рисунке 1 эти «ниши» заштрихованы), в которой перевозочный процесс реализуется с оптимальной энергетической эффективностью. Границы этих «ниш» зависят от многих факторов и прежде всего от стоимостных, но для каждого конкретного участка эти границы вполне определены. Далее будет показано, что эти границы связаны с обеспечением максимальной провозной способности электрифицируемого участка.

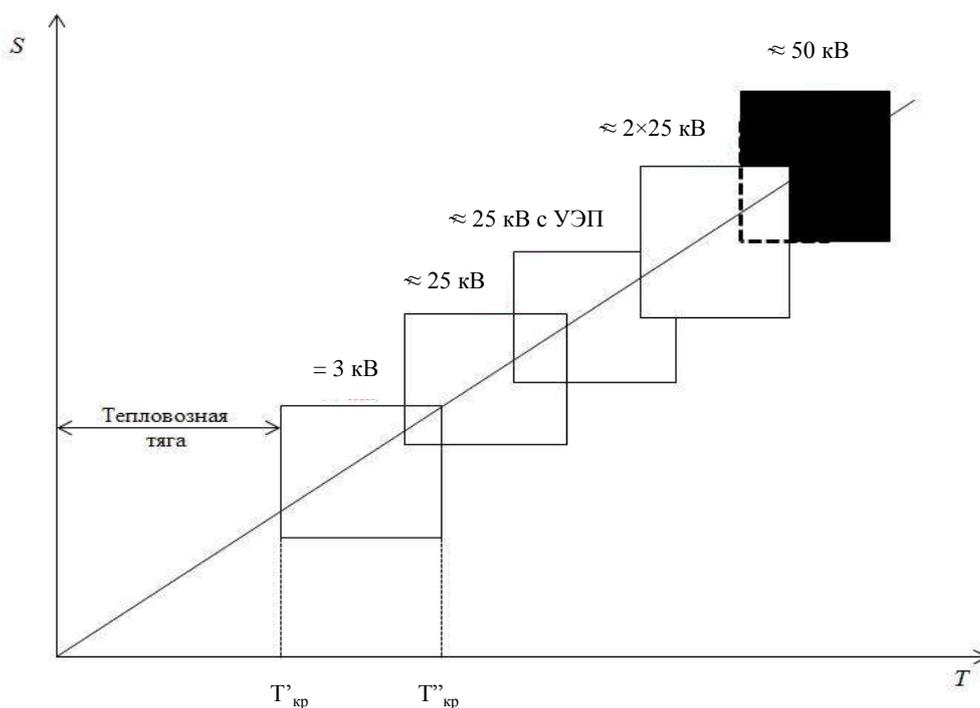


Рисунок 1 – Зоны целесообразного применения различных систем тягового электроснабжения по условиям оптимальной энергетической эффективности:

$T'_{кр}$, $T''_{кр}$ – критический грузооборот, при котором целесообразен перевод соответственно с тепловозной тяги на электрическую и с постоянного тока на переменный;

S – среднегодовое потребление электроэнергии на 1 км электрифицированной линии

Энергетическая «гибкость» системы электроснабжения переменного тока была подтверждена в процессе ее реализации на Байкало-Амурской магистрали (на БАМе). Спроектированная первоначально для БАМа система электроснабжения (2×25 кВ) была рассчитана на максимальные размеры перевозок; она оказалась избыточной при их спаде, что объясняется повышенными потерями энергии холостого хода в автотрансформаторах. Консервация автотрансформаторов и переход на систему 27,5 кВ с экранирующими и усиливающими проводами (УЭП), в качестве которых используются провода системы 2×25 кВ, позволили оптимально согласовать по энергетическим показателям систему электроснабжения с грузонапряженностью участка. На постоянном токе таких возможностей нет [1].

Исходя из очевидных преимуществ электрической тяги переменного тока в ряде стран начали переводить отдельные «старые» участки с постоянного тока на переменный (Франция, Индия и др.). Пример подала Россия, где впервые в мировой практике был осуществлен перевод с постоянного тока на переменный на участке Транссибирской магистрали Зима – Слюдянка

(длина – 386 км), работающем в условиях высокой грузонапряженности. Уникальная технология перевода этого участка на переменный ток достойна внимания специалистов. Провода контактной сети переменного тока расположили на вновь установленных опорах.

Тяговые подстанции на постоянном токе размещаются на расстоянии 10 – 25 км одна от другой, тяговые подстанции на переменном токе – на расстоянии 40 – 60 км.

При условии, что тяговые подстанции постоянного тока будут расположены на расстоянии 20 км друг относительно друга, выполним расчет ориентировочного количества тяговых подстанций при электрификации Улан-Баторской железной дороги (УБЖД) на постоянном токе. Общая протяженность линий составляет 1100 км, тогда ориентировочное количество тяговых подстанций составит

$$1100 \text{ км} : 20 \text{ км} = 55,5 \approx 56 \text{ шт.}$$

При условии, что тяговые подстанции переменного тока будут расположены на расстоянии 50 км друг относительно друга, выполним расчет ориентировочного количества тяговых подстанций при электрификации УБЖД на переменном токе. Общая протяженность линий составляет 1100 км, тогда ориентировочное количество тяговых подстанций составит

$$1100 \text{ км} : 50 \text{ км} = 22,2 \approx 22 \text{ шт.}$$

Схема УБЖД с указанием мест расположения тяговых подстанций в случае электрификации на переменном токе приведена на рисунке 2.

В результате электрификации на переменном токе потребуется в 2,5 раза меньшее количество тяговых подстанций. Более высокое напряжение в контактной сети и соответственно меньшие токи позволяют увеличить расстояние между тяговыми подстанциями. Однако необходимость подачи на тяговые двигатели постоянного тока приводит к удорожанию электроподвижного состава из-за установки тяговых трансформаторов и выпрямителей.

Постоянное повышение надежности и экономичности работы устройств электроснабжения на действующих грузонапряженных электрифицированных линиях, своевременное оптимальное изменение параметров устройств в соответствии с нуждами перевозочного процесса – важнейшие задачи как эксплуатационного персонала всех уровней, так и отраслевой науки.

Электрифицированная железная дорога является частью общегосударственного электроэнергетического комплекса и, естественно, подчиняется общим законам его развития. Одно из основных направлений технического прогресса в энергетике – поэтапное повышение ступеней напряжения. Чем выше напряжение линии электропередач, тем выше ее технико-экономические показатели. Это положение справедливо и для тяговых сетей электрифицированных железнодорожных участков.

Анализ показателей работы УБЖД свидетельствует о том, что объемы перевозок ежегодно возрастают (рисунки 3, 4), при этом средняя масса поезда также увеличивается. Исходя из существующей тенденции для освоения возросшего объема перевозок через пять лет, т. е. в 2022 г., среднюю массу поезда потребуется увеличить до 4700 – 5200 т. Вождение поездов такой массы используемые на УБЖД в настоящее время тепловозы серий 2ТЭ116УМ и 2М62 не смогут обеспечить из-за недостаточной мощности и силы тяги.

Возможно применение сдвоенной тяги для вождения поездов большой массы, однако при этом значительно возрастают эксплуатационные расходы на тепловозную тягу в основном из-за увеличения расхода топливно-энергетических ресурсов [2].

Исходя из проведенного анализа мирового опыта электрификации эффективность применения участков переменного тока выше, чем на постоянном токе. Однако требуется выполнить научное обоснование выбора рода тока применительно к УБЖД. Для этого необходимо выполнить ряд тяговых и электрических расчетов исходя из реальных условий и особенностей Улан-Баторской железной дороги. В качестве примера рассмотрен участок с самым сложным профилем пути Улан-Батор – Зуунхараа. Расчеты по данному участку окажутся лимитирующими в плане мощности тягового подвижного состава, а также параметров системы тягового электро-

снабжения. По примеру самого сложного участка нетрудно рассчитать необходимые условия при работе и на других участках УБЖД.

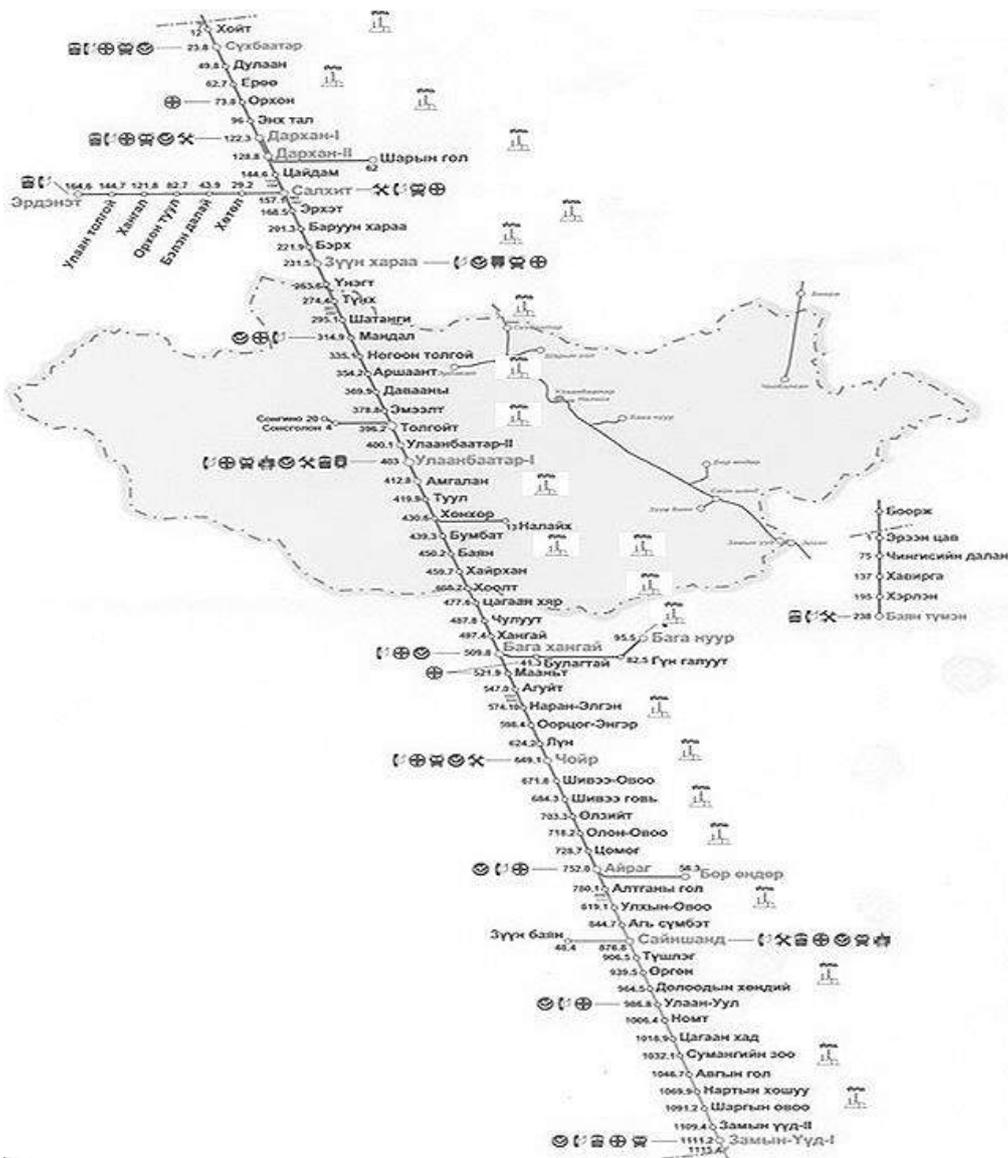


Рисунок 2 – Схема Улан-Баторской железной дороги с указанием мест расположения тяговых подстанций в случае электрификации на переменном токе

Тяговое плечо Улан-Батор – Зуунхараа (рисунок 5) общей длиной 173 км имеет холмистый профиль пути с подъемами крутизной до 15 – 17 % на перегоне Толгойт – Эмээлт и спусками крутизной до 10 – 11 % в нечетном направлении. При этом общая длина затяжного подъема, расположенного в начале тягового плеча, составляет около 20 км, а на остальной части тягового плеча расположен затяжной спуск длиной около 150 км. В четном направлении тягового плеча Зуунхараа – Улан-Батор расположены преимущественно подъемы крутизной до 10 – 11% общей длиной около 150 км спуски большой крутизны до 15 – 17 %. Спряmlенный и приведенный профиль пути тягового плеча Улан-Батор – Зуунхараа представлен на рисунке 5.

Режим движения поезда на спусках зависит от их крутизны и протяженности, но в любом случае скорость движения на них не должна превышать максимально допустимую. На коротких спусках сравнительно небольшой крутизны i , которая меньше или равна сумме удельного основного сопротивления движению поезда w_0 и дополнительного сопротивления движению от кривых w_r , т. е. $|i| \leq (w_0 + w_r)$, целесообразно использовать режим выбега. На спусках большой крутизны и длины при $|i| > (w_0 + w_r)$, как правило, необходимо использовать режим торможения, при этом рациональным является режим электрического торможения, позволяющий под-

Подвижной состав железных дорог

держивать максимально допустимую скорость движения. Ко всему прочему рекуперативное торможение обеспечивает значительную экономию электроэнергии. Расчетные и экспериментальные данные показывают, что за счет применения рекуперативного торможения грузовых поездов массой 3000 т и более на участках с холмистым профилем пути, имеющих протяженные уклоны крутизной до 17 %, экономия электроэнергии может достигать 20 – 30 % и более [3].

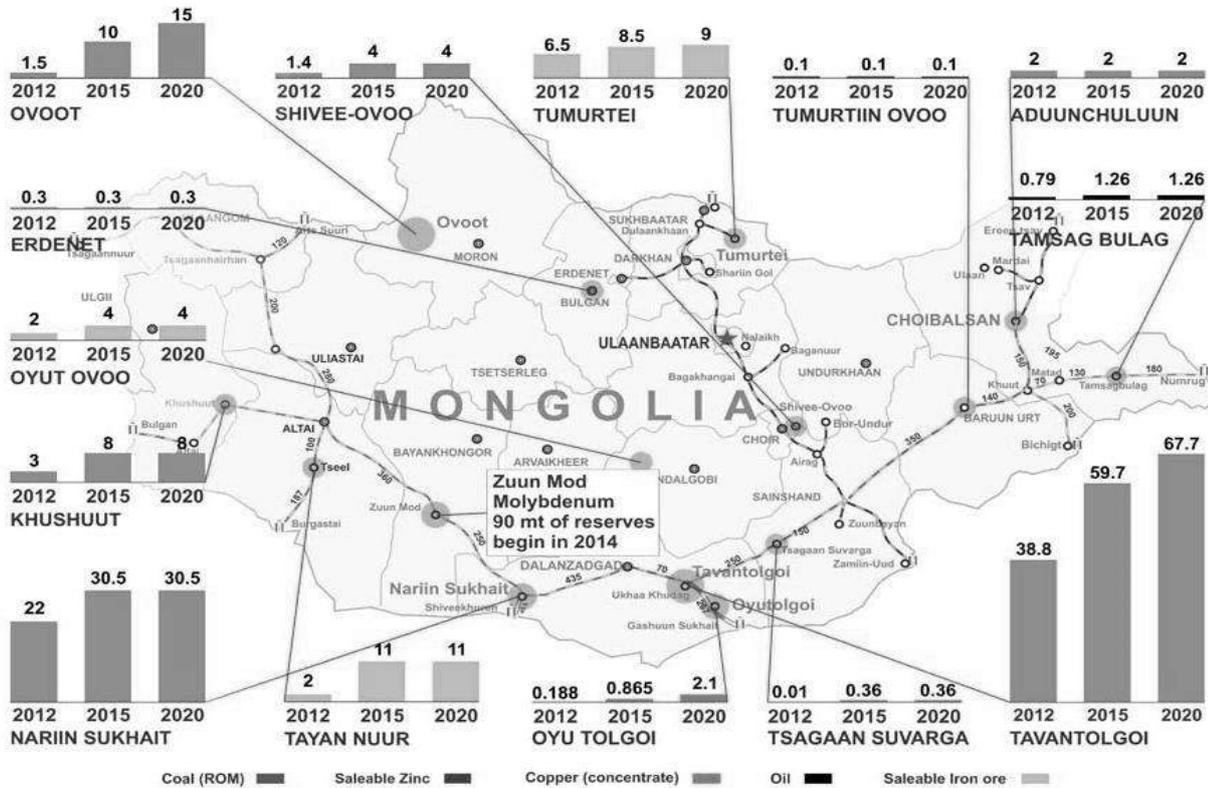


Рисунок 3 – Планируемые внутренние объемы перевозок железнодорожным транспортом добывающей отрасли Монголии

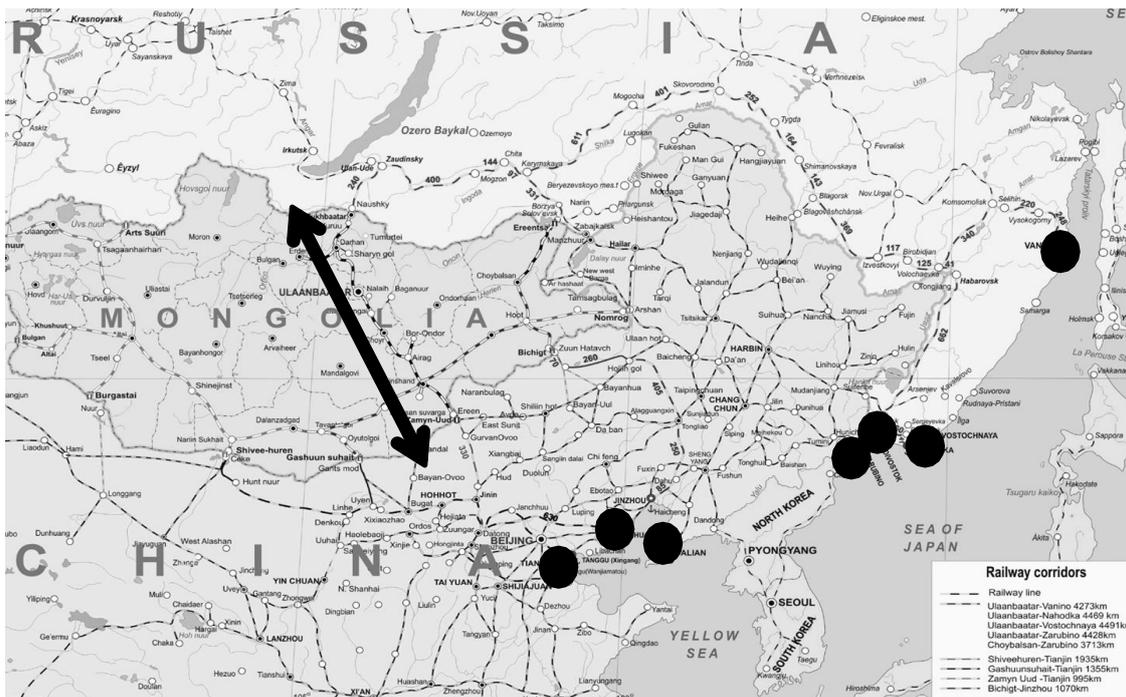


Рисунок 4 – Схема экспортных направлений перевозки железнодорожным транспортом

Для оценки эффективности применения электрической тяги на участке Улан-Батор – Зуунхараа были выполнены тяговые расчеты с учетом Правил тяговых и тормозных расчетов [3 – 6] с помощью компьютерной программы «КОРТЕС» [7].

Расчеты выполнены для безостановочного движения грузовых поездов с электровозами 2ЭС5К и 2ЭС6 с установленной скоростью на перегонах и главных путях станций, с минимальным временем хода по участкам с ограничением скорости, с максимальным применением электрического рекуперативного торможения, при нормальных метеорологических условиях.

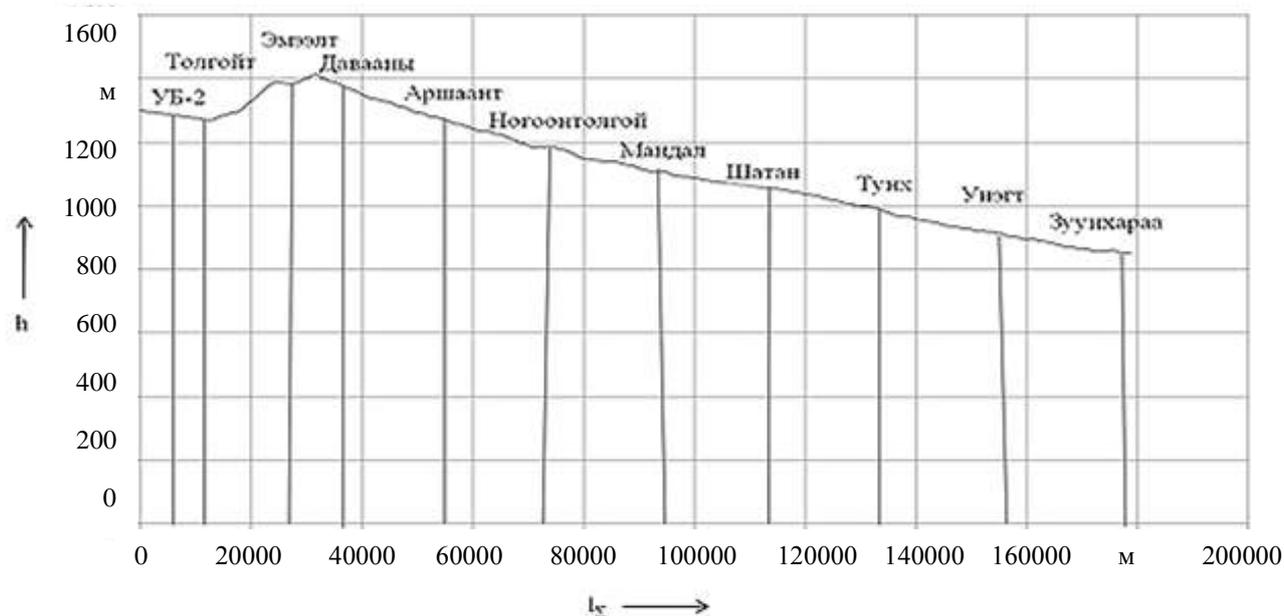


Рисунок 5 – Профиль пути тягового плеча Улан-Батор – Зуунхараа

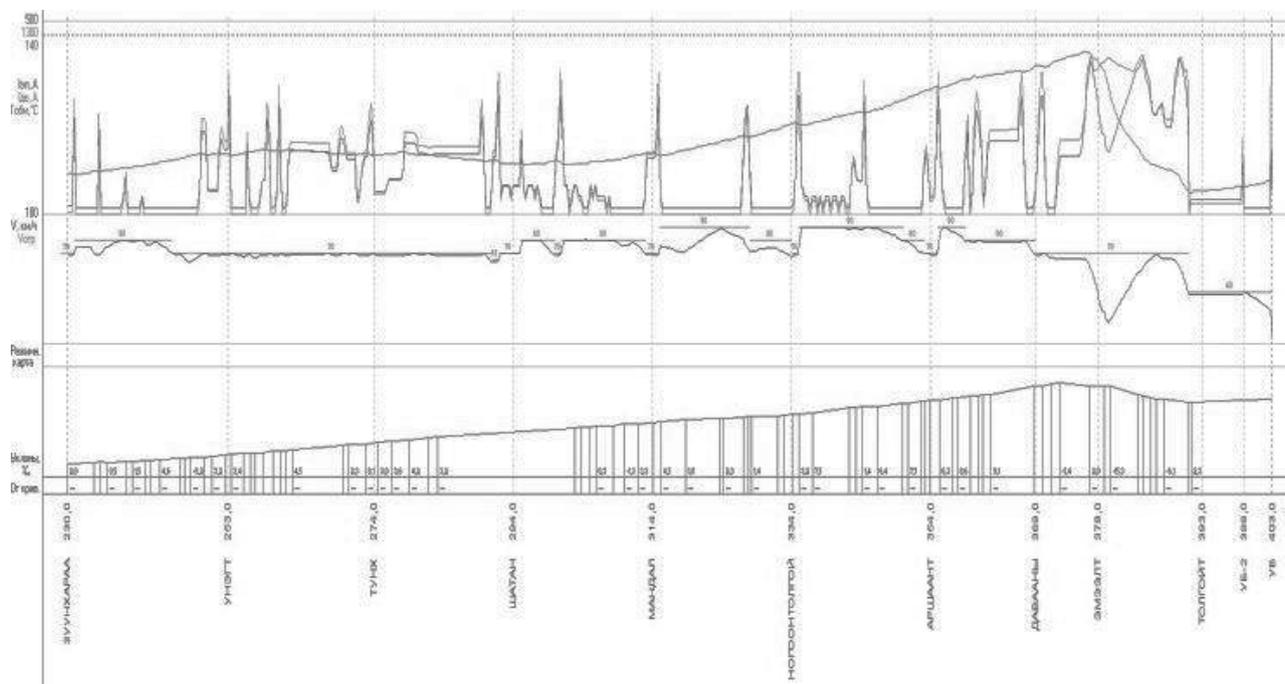
Параметры и характеристики электровозов 2ЭС5К и 2ЭС6 приняты согласно техническим данным при напряжении на токоприемнике 25000 и 3000 В, диаметр колес – 1250 мм [3, 8].

Расчетные кривые движения грузовых поездов массой 4500 т с электровозом 2ЭС5К переменного тока в нечетном и в четном направлениях на участке Улан-Батор – Зуунхараа приведены на рисунке 6. Расчетные кривые движения грузовых поездов массой 4500 т с электровозом 2ЭС6 постоянного тока в нечетном и в четном направлениях на участке Улан-Батор – Зуунхараа представлены на рисунке 7.

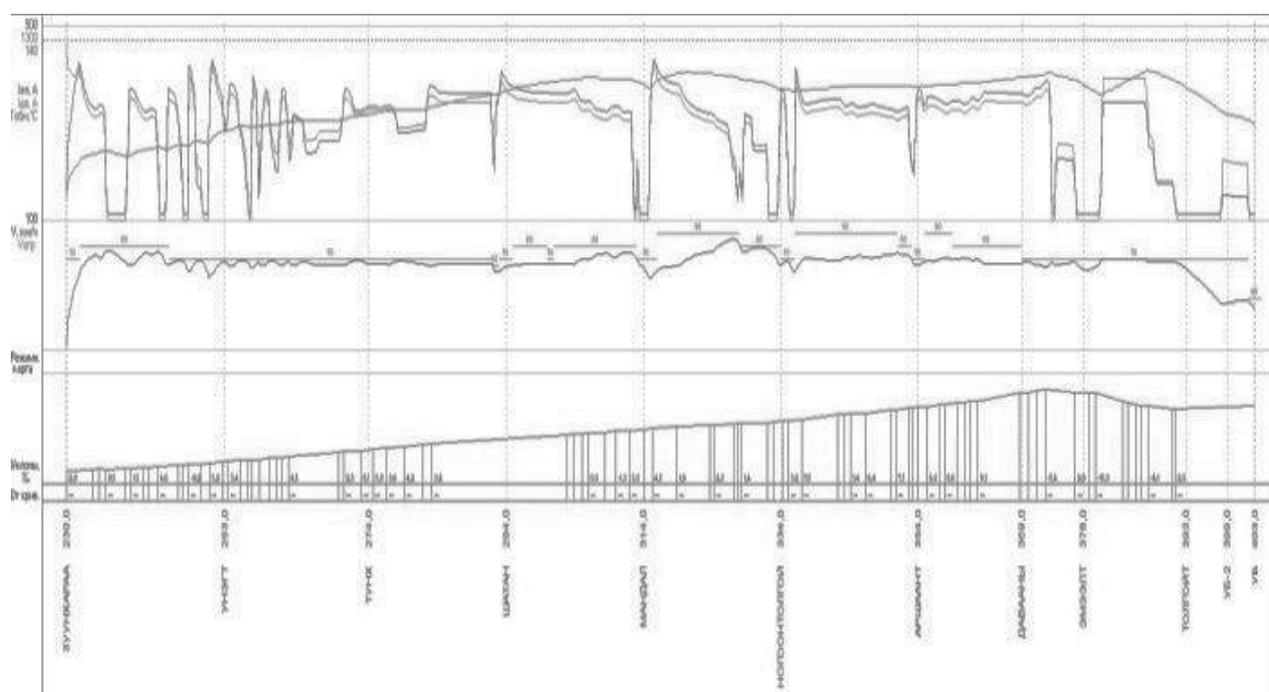
На рисунках 6 и 7 показаны отдельные пункты, крутизна i спрямленных и приведенных элементов профиля пути участка, допускаемая и фактическая скорость движения поезда V , ток тягового двигателя $I_{дв}$, потребляемый из контактной сети в режиме тяги ток электровоза $I_{эл}$, температура нагрева обмоток тягового двигателя $T_{обм}$. Из кривых движения видно, что максимальная скорость поезда достигает 90 км/ч, максимальный ток тягового двигателя не превышает 1300 А, максимальный нагрев тягового двигателя не превышает 130 °С. Анализ расчетных кривых показывает, что использование системы переменного тока позволит вести поезд общим весом 4500 т, а в случае системы постоянного тока работы с весом поезда 4500 т возможно лишь при использовании подталкивающего локомотива.

По результатам выполненного моделирования ток электровоза 2ЭС5К, потребляемый из контактной сети на участке Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении с грузовыми поездами массой 3000 – 4500 т на перегоне Толгойт – Эмээлт с лимитирующим подъемом крутизной 16 – 17 ‰, достигает 320 – 350 А, а в режиме рекуперативного торможения на спусках крутизной до –8 – –9 ‰ достигает –70 – –110 А. На участке Улан-Батор – Зуунхараа в четном направлении с грузовыми поездами массой 3000 – 4500 т максимальный ток электровоза в режиме тяги с лимитирующими подъемами крутизной 8 – 9 ‰ достигает 300 – 330 А, а в режиме рекуперативного торможения на спусках крутизной до –16 – –17 ‰ достигает –150 – –180 А.

На участке Улан-Батор – Зуунхараа максимальный ток электровоза 2ЭС6, потребляемый из контактной сети с грузовыми поездами массой 3000 – 4500 т на перегоне Толгойт – Эмээлт с лимитирующим подъемом крутизной 16 – 17 ‰, достигает 3000 – 4800 А, а в четном направлении с грузовыми поездами массой 3000 – 4500 т максимальный ток электровоза в режиме тяги с лимитирующими подъемами крутизной 8 – 9 ‰ достигает 5500 – 6400 А. Такое расхождение токов обусловлено разной протяженностью подъемов лимитирующей крутизны: в четном направлении лимитирующий подъем имеет длину 140 км, в нечетном – 30 км.

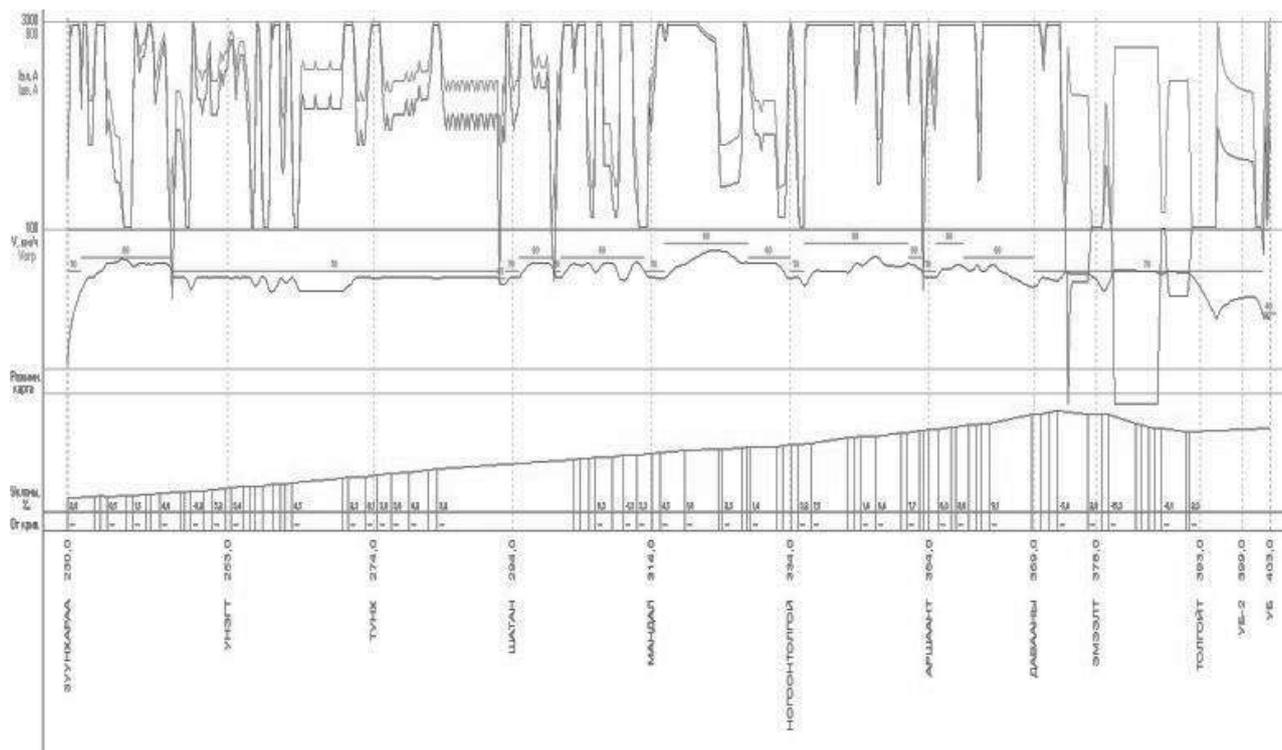


а

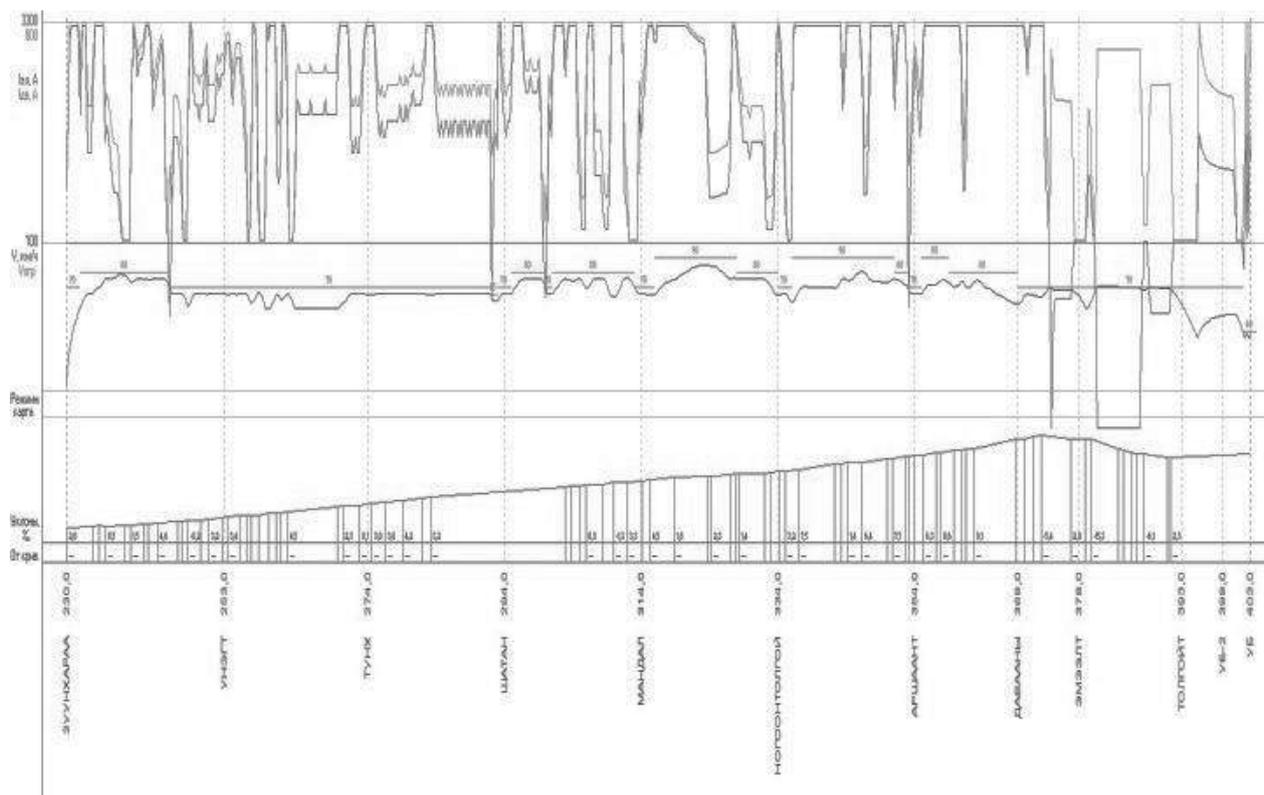


б

Рисунок 6 – Расчетные кривые движения грузовых поездов массой 4500 т на участке Улан-Батор – Зуунхараа с электровозом 2ЭС5К в нечетном (а) и в четном (б) направлении



а



б

Рисунок 7 – Расчетные кривые движения грузовых поездов массой 4500 т на участке Улан-Батор – Зуунхараа с электровозом 2ЭС6:

а – в нечетном направлении (с подталкиванием по ст. Толгойт – Давааны); б – в четном направлении

Результатирующие энергетические показатели движения грузовых поездов с электровозами 2ЭС6К приведены в таблице 1. В этой таблице указаны масса состава m_c , техническая скорость V_t , потребление электроэнергии в режиме тяги $A_{э.т.}$, возврат электроэнергии в режиме рекупера-

тивного торможения $A_{э,р}$, результирующий расход электроэнергии на тягу $A_{э}$, удельный расход электроэнергии на тягу $a_{э}$, коэффициент возврата электроэнергии $\beta_{э,р}$. Значения показателей V_t , $A_{э}$, $a_{э}$ и $\beta_{э,р}$ рассчитаны по следующим формулам:

$$V_t = L/T; \quad (1)$$

$$A_{э} = A_{э,т} - A_{э,р}; \quad (2)$$

$$a_{э} = \frac{A_{э} \cdot 10^4}{m_c L}; \quad (3)$$

$$\beta_{э,р} = \frac{A_{э,р} \times 100}{A_{э,т}}. \quad (4)$$

Таблица 1 – Результирующие энергетические показатели движения грузовых поездов с электровозом переменного тока 2ЭС5К на тяговом плече Улан-Батор – Зуунхараа

Тяговое плечо, длина	m_c , т	V_t , км/ч	$A_{э,т}$, кВт·ч	$A_{э,р}$, кВт·ч	$A_{э}$, кВт·ч	$a_{э}$, кВт·ч/10 ⁴ т км	$\beta_{э,р}$, %
Улан-Батор – Зуунхараа, 173 км	3000	67,5	3271	1036,9	2234,1	43,0	31,7
	4500	64,8	4544,3	1552,4	2991,9	57,6	34,2
Зуунхараа – Улан-Батор, 173 км	3000	69,3	9774,3	382,6	9391,7	181,0	3,9
	4500	65,4	14445,4	481,2	13238	255,1	3,4

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением массы поезда удельный расход электроэнергии на тягу снижается. Объясняется это в основном тем, что удельный расход электроэнергии на тягу обратно пропорционален массе поезда, кроме того, при увеличении массы поезда возрастает возврат электроэнергии в режиме рекуперативного торможения. Поэтому с целью снижения энергозатрат на тягу целесообразно увеличивать массу поездов и максимально применять электрическое рекуперативное торможение, при котором на спусках поддерживается наибольшая скорость движения, близкая к допустимой.

При переменном токе на участке Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении для движения поездов массой свыше 4600 т требуется подталкивание или распределенная (кратная) тяга. При этом в расчетах предусмотрено равномерное распределение нагрузки между электровозами и секциями. На участке Зуунхараа – Улан-Батор в четном направлении для движения поездов массой свыше 5300 т также требуется подталкивание или распределенная (кратная) тяга. При этом в расчетах предусмотрено равномерное распределение нагрузки между электровозами и секциями.

На тяговом плече Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении выработанная тяговыми двигателями электровоза при рекуперативном торможении электрическая энергия $A_{э,р}$ составляет 46 – 52 %.

При постоянном токе на участке Улан-Батор-Зуунхараа в нечетном направлении для движения поездов массой свыше 3500 т требуется подталкивающий локомотив или распределенная (кратная) тяга. При этом в расчетах предусмотрено равномерное распределение нагрузки между электровозами и секциями. На участке Зуунхараа – Улан-Батор в четным направлении для движения поездов массой свыше 3000 т также требуется подталкивающий локомотив или распределенная (кратная) тяга.

Результирующие энергетические показатели движения грузовых поездов с электровозами 2ЭС6 приведены в таблице 2. Если предположить, что электровозом постоянного тока 2ЭС6 можно провести грузовые поезда такой же массы, как и электровозом 2ЭС5К, и с такой же средней скоростью, то получим энергетические показатели, приведенные в таблице 2. В этой таблице указаны масса состава m_c , техническая скорость $V_t = L/T$, потребление электроэнергии в режиме тяги $A_{э,т}$, удельный расход электроэнергии a_t .

Таблица 2 – Результирующие энергетические показатели движения грузовых поездов с электровозом постоянного тока 2ЭС6 на тяговом плече Улан-Батор – Зуунхараа

Тяговое плечо, длина	m_c , т	V , км/ч	$A_{эт}$, кВт·ч	$A_{эп}$, кВт·ч	$A_э$, кВт·ч	$a_э$, кВт·ч/10 ⁴ ткм	$\beta_{эп}$, %
Улан-Батор – Зуунхараа, 173 км	3000	65,3	3933,9	1350,6	2583,3	49,8	34,3
	4500 (с толкачом)	65,0	6257	2401,8	3855,2	74,3	38,3
Зуунхараа – Улан-Батор, 173 км	3000	68,3	11387,4	665,8	10721,6	206,6	5,8
	4500	65,6	16095,4	1130,6	14964,8	288,3	7

Сравнение данных таблиц 1 и 2 показывает, что при вождении одинаковых поездов в одних и тех же эксплуатационных условиях энергозатраты при постоянном токе на 660 – 1700 кВт·ч выше, чем при переменном токе.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что с точки зрения обеспечения минимальных энергозатрат на тягу поездов для электрификации Улан-Баторской железной дороги оптимальной будет система электрической тяги однофазного переменного тока с номинальным напряжением в контактной сети 25 кВ частотой 50 Гц, при этом наиболее подходящими являются грузовые электровозы серии 2ЭС5К и пассажирские электровозы серии ЭП1 с плавным регулированием напряжения тяговых двигателей и рекуперативным торможением, позволяющие обеспечить минимальные энергозатраты.

Список литературы

1. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы [Текст] / А. В. Котельников. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.
2. Отчет 2014 г. Монголо-Российское акционерное общество «Улан-Баторская железная дорога» [Текст]. – М.: Ганзам пресс, 2014. – 232 с.
3. Бакланов, А. А. Теория электрической тяги. Тяговые расчеты [Текст] / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – 40 с.
4. Осипов, С. И. Теория электрической тяги [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. – М.: Маршрут, 2006. – 434 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Временные методические указания по обеспечению безопасности движения грузовых поездов повышенного веса и длины. Утверждены Фадеевым Г. М. 09.06.96 № ЦД-ЦТ-ЦЛ-4805.
7. Комплекс расчетов тягового электроснабжения «КОРТЭС» [Текст] / ВНИИЖТ. – М., 2011.
8. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенного веса на участках обслуживания локомотивных эксплуатационных депо Кузбасского отделения Западно-Сибирской ж.д. от 25.12.2008 г., утвержденная НОД-3 А. А. Фомичевым.

References

1. Kotelnikov A. V. *Elektrifikaciy jeleznyh dorog. Mirovie tendentsi i perspektivi* (Electrification of the railways. Global trends and prospects). Moscow, 2002, 104 p.
2. *Otchet 2014 g. Mongolo-Rossiiskoe aktsionarnoe obshchestvo «Ulan-Batorskaia zheleznaia doroga»* (Report of 2014 Mongolian-Russian Joint Stock Company Ulaanbaatar Railway). Moscow: Ganzam press, 2014, 232 p.
3. Baklanov A. A. *Teoriia elektricheskoi tiagi. Tiagovye rascheti* (The theory of electric traction. Traction calculations). Omsk: OSTU, 2015, 40 p.
4. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teoriia elektricheskoi tiagi* (Theory of electric traction). Moscow: Route, 2006, 434 p.
5. *Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty* (Rules of traction for train work). Moscow: Transport, 1985, 287 p.
6. *Vremennye metodicheskie ukazaniia po obespecheniiu bezopasnosti dvizheniia gruzovykh poezdov povyshennogo vesa i dliny. Utverzhdeny Ts Fadeevym G.M. 09.06.1996 g. № TsD-TsT-TsL-*

4805 (Temporary guidelines for ensuring the safety of freight trains of increased weight and length. Approved by G. M. Fadeev. 09.06.1996. № ЦД-ЦТ-ЦЛ-4805).

7. *Kompleks raschetov tiagovogo elektrosnabzheniia «KORTES»* (Complex of calculations of traction power supply of KORTES). Moscow: VNIIZhT, 2011.

8. *Instruktsiia po organizatsii obrashcheniia gruzovykh poezdov povyshennogo vesa na uchastkakh obsluzhivaniia lokomotivnykh ekspluatatsionnykh depo Kuzbasskogo otdeleniia Zapadno-Sibirskoi zh.d. ot 25.12.2008 g., utverzhdennaia NOD-3 A. A. Fomichevym* (Instruction on the organization of handling of freight trains of increased weight in the areas of servicing the locomotive operating depots of the Kuzbass Branch of the West Siberian Railroad. dated 25.12.2008, approved by the GCD-3 A. A. Fomichev).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Алтангэрэл Энх-Амгалан

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: (+976) 99192520.

E-mail: amгаа_02_03@yahoo.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Altangerel Enkh-Amgalan

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: (+976) 99192520.

E-mail: amгаа_02_03@yahoo.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Энх-Амгалан Алтангэрэл. Выбор рода тока для электрификации Улан-Баторской железной дороги [Текст] / Алтангэрэл Энх-Амгалан // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 2 – 12.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Enkh-Amgalan Altangerel The choice of the current type for Ulan-Bator railway electrification. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 2 – 12. (In Russian).

УДК 629.424.3:621.436.03.001.42

А. П. Блинов¹, П. Н. Блинов², П. А. Бернс³

¹Филиал «Западно-Сибирский» ООО «ТМХ-Сервис» г. Новосибирск, Российская Федерация,

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

³Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДИЗЕЛЯ

Аннотация. В статье рассмотрено математическое моделирование топливной аппаратуры высокого давления и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля. Проанализированы факторы, влияющие на работу топливной аппаратуры, произведено математическое моделирование процесса подачи топлива в цилиндры, а также математически описан регулятор частоты вращения коленчатого вала тепловозного дизеля. Разработана совместная математическая модель работы топливной аппаратуры и регулятора частоты вращения. Представлены алгоритм и программа расчета процесса подачи топлива в цилиндры дизеля с учетом обобщенных гидравлических характеристик элементов топливной аппаратуры и положения исполнительного механизма регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля. В работе использованы математическое и имитационное моделирование, методы системного анализа, сравнительный метод, методы теоретического познания (формализация), общелогические методы и приёмы исследования (анализ, обобщение, классификация, аналогия).

Ключевые слова: тепловоз, дизель, топливная аппаратура, топливный насос высокого давления, нагнетательный трубопровод, форсунка, производительность насоса, регулятор частоты вращения, математическая модель, процесс подачи топлива, рабочий ход плунжера, режимы работы

Aleksandr P. Blinov¹, Pavel N. Blinov², Pavel A. Berns³

¹West-Siberian Filial LLC «ТМН-service», Novosibirsk, Russian Federation,

²Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation,

³The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE JOINT WORK OF FUEL EQUIPMENT OF HIGH PRESSURE AND REGULATOR OF THE ROTATION FREQUENCY OF THE CRANKSHAFT OF THE DIESEL ENGINE

Abstract. In the article the paper considers mathematical modeling of fuel equipment of high pressure and regulator of the rotation frequency of the crankshaft of the diesel engine. Analysis of factors affecting fuel equipment, mathematical modelling of the process of fuel into the cylinders, as well as mathematically describes the speed control of the crankshaft of the diesel engine. Joint mathematical model of fuel equipment and rotation speed regulator. Presented algorithm and program calculation process the fuel feed to the cylinders of a diesel engine with a light hydraulic characteristics of generalized elements of fuel equipment and provision of the Executive mechanism of the regulator of the rotation frequency of the crankshaft of the diesel engine. In the work used mathematical and simulation, system analysis methods, the comparative method, methods of theoretical knowledge (formalisation), common logical methods and techniques of research (analysis, synthesis, classification, analogy).

Keywords: diesel locomotive, gasoline, fuel equipment, high pressure fuel pump, discharge pipe, injector, pump capacity, speed control, mathematical model, the fuel delivery process, plunger stroke, modes of operation

Режимы работы дизелей определяются частотой вращения коленчатого вала, положением регулирующего органа – рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) и тепловым состоянием силовой установки.

В эксплуатации режимы работы локомотивных энергетических установок отличаются большим разнообразием из-за различного рода службы тепловозов, массы поездов, профиля пути, климатических условий и технического состояния локомотивов.

Дизель должен надежно работать в широком диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала и эффективной мощности. При установившемся режиме крутящий момент на коленчатом валу двигателя равен суммарному моменту сопротивления, а положение регулирующего органа, частота вращения и тепловое состояние двигателя не изменяются во времени.

При неустановившемся режиме двигатель вырабатывает энергию, меньшую или большую той, которая необходима для преодоления внешней нагрузки. При неустановившемся режиме могут изменяться во времени внешняя нагрузка, частота вращения, положение регулирующего органа и тепловое состояние дизеля. Возможны неустановившиеся режимы при неизменном положении регулирующего органа или частоты вращения.

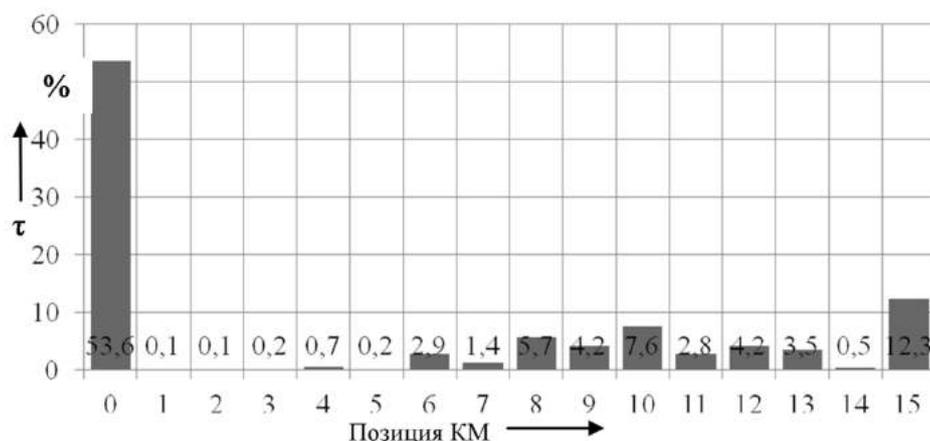
При номинальном режиме силовая установка работает при номинальной мощности, получаемой при номинальных значениях частоты вращения и цикловой подачи топлива.

Частичный режим характеризуется меньшей мощностью по отношению к номинальной и имеет широкий диапазон при уменьшении частоты вращения от номинального до минимального значения. Режим холостого хода соответствует эксплуатации дизеля без внешней нагрузки.

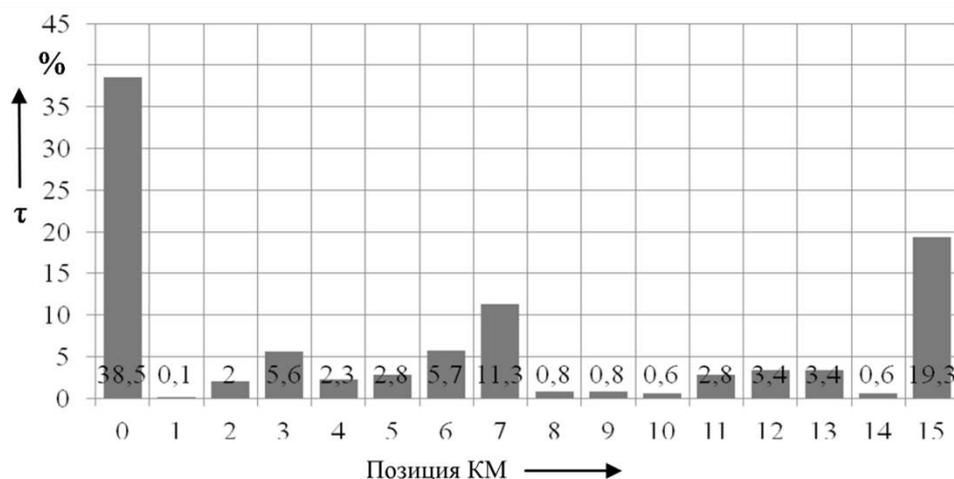
Для энергетических установок магистральных и маневровых тепловозов характерны частые изменения режимов работы при циклическом изменении нагрузки: холостой ход – нагрузка – холостой ход. Распределение времени работы тепловозов по позициям контроллера машиниста (КМ) представлено на рисунке 1.

При движении поезда даже по сравнительно несложному участку наблюдаются постоянные с интервалом 1 – 6 мин изменения режимов. При этом подача топлива увеличивается от 0 до 100 % и происходят резкие ее сбросы. В общем случае для магистральных тепловозов длительность работы дизеля на номинальном режиме не является определяющей, однако в общем ба-

лансе расхода топлива основная доля приходится на работу в этом режиме и значительная доля – на работу в неустановившихся режимах [1].



а



б

Рисунок 1 – Распределение времени работы тепловозов по позициям КМ:
а – магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ116; б – пассажирский тепловоз ТЭП70

Для магистральных грузовых тепловозов время работы силовых установок на номинальном режиме составляет около 12 %, на холостом ходу – около 50, на неустановившихся режимах – около 30 %.

Число переключений позиций контроллера управления локомотивом (смен режимов) за час работы для дизелей грузовых тепловозов в среднем составляет 50 – 60, пассажирских 110 – 115, маневровых – до 130.

Важное значение имеет изучение процессов, протекающих на указанных выше режимах.

Одним из основных эксплуатационных критериев правильного функционирования дизеля является минимальный удельный расход топлива, обеспечиваемый при минимальной неравномерности цикловой подачи топлива по цилиндрам дизеля [4 – 6].

На цикловую подачу топлива $g_{ц}$ и ее неравномерность $\Delta g_{ц}$ оказывают влияние различные технологические и конструкционные характеристики элементов топливной аппаратуры (ТА).

Производительность ТНВД $Q_{н}$ определяется выходом его рейки $x_{р}$, плотностью плунжерной пары $\rho_{п}$ и нагнетательного клапана $\rho_{н.к}$, давлением открытия нагнетательного клапана $P_{н.к}$ и жесткостью его пружины $C_{н.к}$:

$$Q_{н} = f(x_{р}, \rho_{п}, \rho_{н.к}, P_{н.к}, C_{н.к}). \quad (1)$$

В общем случае давление в надплунжерной полости, штуцере ТНВД и в камере распылителя форсунки у иглы, а также количество впрыснутого в цилиндр топлива к расчетному углу поворота коленчатого вала могут быть определены с помощью системы уравнений [2]:

$$\begin{cases} P_n = P_{n1} + \Delta P(h_{пл}) - \Delta P(Y) - \Delta P(Q_{кл}) - \Delta P(Q_{ов}) - \Delta P(Q_{ун}); \\ P_{шт} = P_{шт1} + \Delta P(Y) + \Delta P(Q_{кл}) - \Delta P(Q_{тр}); \\ P_{\phi} = P_{\phi1} + \Delta P(Q_{тр}) - \Delta P(Z) - \Delta P(Q_{ц}); \\ g_{ц} = g_{ц1} + \Delta g_{ц}, \end{cases} \quad (2)$$

где $P_n, P_{шт}, P_{\phi}$ – давление топлива в надплунжерной полости, штуцере ТНВД и в камере распылителя форсунки у иглы соответственно к расчетному углу поворота коленвала, Па;

$P_{n1}, P_{шт1}, P_{\phi1}$ – то же давление на предыдущем шаге расчета, Па;

$\Delta P(h_{пл}), \Delta P(Y), \Delta P(Q_{кл}), \Delta P(Q_{ов}), \Delta P(Q_{ун}), \Delta P(Q_{тр}), \Delta P(Q_{ц}), \Delta P(Z)$ – прирост давления от перемещения плунжера, перемещения нагнетательного клапана, перетекания топлива через нагнетательный клапан, перетекания топлива в отсечное отверстие, утечки топлива по плунжерной паре, перетекания топлива через нагнетательный трубопровод, перетекания топлива в цилиндр и от перемещения иглы форсунки соответственно за период поворота коленчатого вала на угол $\Delta\varphi$, Па;

$g_{ц}, g_{ц1}$ – количество впрыснутого в цилиндр топлива к концу и к началу текущего расчетного интервала, кг;

$\Delta g_{ц}$ – количество впрыснутого топлива за время расчетного интервала, кг.

Система уравнений (2) может быть упрощенно представлена в виде системы из трех уравнений [5]:

$$\begin{cases} P_n = P_{n1} + \Delta P(h_{пл}) - \Delta P(Q_{кан}) - \Delta P(Q_{ов}) - \Delta P(Q_{ун}); \\ P_{\phi} = P_{\phi1} + \Delta P(Q_{кан}) - \Delta P(Z) - \Delta P(Q_{ц}); \\ g_{ц} = g_{ц1} + \Delta g_{ц}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Delta P(Q_{кан})$ – прирост давления от перетекания топлива через канал, Па.

Давление нагнетания P_n определится по уравнению:

$$P_n = P_{n1} + \frac{f_n(h-h_1)}{\alpha_n V_n} - \frac{b\Delta t \mu f_{кан}}{\alpha_n V_n} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_{\phi}|} - \frac{c\Delta t \mu f_{ов}}{\alpha_n V_n} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_n - P_b|} - \frac{Q_{ун}\Delta t}{\alpha_n V_n}, \quad (4)$$

где f_n – площадь поперечного сечения плунжера, м²;

h, h_1 – ход плунжера на текущем и предыдущем шагах расчета, м;

α_n – средний коэффициент сжимаемости топлива при давлении P_n , Па⁻¹;

V_n – средний объем надплунжерной полости, м³;

Δt – расчетный интервал, с;

ρ – плотность топлива, кг/м³;

$\mu f_{ов}$ – эффективное проходное сечение нагнетательного (отсечного) отверстия, м²;

$Q_{ун}$ – утечки топлива по зазорам в плунжерной паре, м³/с;

b, c – коэффициенты, учитывающие направление движения топлива;

P_b – давление топлива во всасывающей (отсечной) полости, Па.

Давление топлива во входной полости форсунки

$$P_{\phi} = P_{\phi 1} + \frac{b \Delta t \mu f_{\text{кан}}}{\alpha_{\phi} V_{\phi}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_{\text{н}} - P_{\phi}|} - \frac{\Delta t \mu f_{\phi}}{\alpha_{\phi} V_{\phi}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_{\phi} - P_{\text{ц}}|}, \quad (5)$$

где α_{ϕ} – средний коэффициент сжимаемости топлива при давлении P_{ϕ} , Па⁻¹;

V_{ϕ} – средний объем полости форсунки, м³;

μf_{ϕ} – эффективное проходное сечение форсунки, м²;

$P_{\text{ц}}$ – давление газов в цилиндре дизеля, Па;

После определения $P_{\text{н}}$ и P_{ϕ} рассчитывается количество впрыснутого в цилиндр топлива по уравнению [8]:

$$g_{\text{ц}} = g_{\text{ц1}} + \Delta t \rho \mu f_{\phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_{\phi} K - P_{\text{ц}}|}, \quad (6)$$

где K – коэффициент потери давления в трубопроводе, учитывающий гидравлические сопротивления, связанные с конечной длиной трубопровода.

Коэффициент потери давления K в трубопроводе вычисляется по выражению [8]:

$$K = C_2 \frac{\mu f_{\text{тр}}}{f_{\text{тр}}}, \quad (7)$$

где C_2 – постоянная для данного типа ТА.

При характерном для тепловозных дизелей линейном законе изменения скорости плунжера его ход определяется так [7, 8]:

$$h = h_{\text{н}} + \frac{C_i (\varphi - \varphi_{\text{н}})}{6n} + \frac{(C_{i+1} - C_i) (\varphi - \varphi_{\text{н}})^2}{12n \varphi_i}, \quad (8)$$

где $h_{\text{н}}$ и $\varphi_{\text{н}}$ – ход плунжера и угол поворота кулачкового вала, соответствующие началу расчетного участка кривой скорости плунжера;

C_i – скорость плунжера в узловых точках кривой $h = f(C)$, м/с;

φ – расчетный угол поворота кулачкового вала, град;

n – частота вращения кулачкового вала, при которой построена кривая $h = f(C)$, мин⁻¹;

φ_i – угол поворота кулачкового вала, соответствующий рассматриваемому участку кривой скорости плунжера, град.

Площадь проходного сечения отсечного (наполнительного) отверстия при ходе плунжера $(h - h_0) \sin \beta > r$

$$f_0 = \pi r^2 - \left[r^2 \arccos \frac{(h - h_0) \sin \beta - r}{r} - r((h - h_0) \sin \beta - r) \sqrt{1 - \left(\frac{(h - h_0) \sin \beta - r}{r} \right)^2} \right], \quad (9)$$

а при ходе плунжера $(h - h_0) \sin \beta \leq r$:

$$f_0 = r^2 \arccos \frac{r - (h - h_0) \sin \beta}{r} - r(r - (h - h_0) \sin \beta) \sqrt{1 - \left(\frac{r - (h - h_0) \sin \beta}{r} \right)^2}, \quad (10)$$

где h_0 – ход плунжера, соответствующий началу отсечки подачи топлива, м;

β – угол наклона кромки плунжера к его оси, град.;

r – радиус наполнительного (отсечного) отверстия, м.

Таким образом, математическая модель процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей может быть реализована в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} P_H = P_{H1} + \frac{f_H(h-h_1)}{\alpha_H V_H} - \frac{b\Delta t \mu f_{кан}}{\alpha_H V_H} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_H - P_\Phi|} - \frac{c\Delta t \mu f_{ов}}{\alpha_H V_H} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_H - P_B|} - \frac{Q_{yH} \Delta t}{\alpha_H V_H}; \\ P_\Phi = P_{\Phi1} + \frac{b\Delta t \mu f_{кан}}{\alpha_\Phi V_\Phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_H - P_\Phi|} - \frac{\Delta t \mu f_\Phi}{\alpha_\Phi V_\Phi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_\Phi - P_{ц}|}; \\ g_{ц} = g_{ц1} + \Delta t \rho \mu f_\Phi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|P_\Phi K - P_{ц}|}. \end{cases} \quad (11)$$

Дифференциальные уравнения элементов регулятора и системы автоматического регулирования (САР) записываются в форме, при которой левая часть уравнения, содержащая выходную координату и ее производные, определяет собственные свойства элемента или системы, а правая часть уравнения, включающая в себя соответствующие входные координаты возмущающих или задающих воздействий, характеризует их влияние на работу элемента или системы. Дифференциальное уравнение системы в общем виде при определенных условиях можно представить как линейное дифференциальное уравнение n -го порядка с постоянными коэффициентами [9]:

$$\begin{aligned} A_n \frac{d^n n_k}{dt^n} + A_{n-1} \frac{d^{n-1} n_k}{dt^{n-1}} + \dots + A_1 \frac{dn_k}{dt} + A_0 n_k = B_m \frac{d^m N}{dt^m} + B_{m-1} \frac{d^{m-1} N}{dt^{m-1}} + \dots + B_1 \frac{dN}{dt} + \\ + B_0 N + S_k \frac{d^k \psi}{dt^k} + S_{k-1} \frac{d^{k-1} \psi}{dt^{k-1}} + \dots + S_1 \frac{d\psi}{dt} + S_0 \psi, \end{aligned} \quad (12)$$

где $A_n \frac{d^n}{dt^n}$ – собственный оператор САР;

n_k – частота вращения коленчатого вала дизеля;

$B_m \frac{d^m}{dt^m}$, $S_k \frac{d^k}{dt^k}$ – операторы возмущающих воздействий;

N – нагрузка регулируемого объекта;

ψ – положение рычага управления автоматическим регулятором.

На тепловозных дизелях применяются всережимные астатические непрямого действия регуляторы частоты вращения коленчатого вала с гибкой связью, называемой изодромной. Изодром – эластичный элемент, позволяющий одному из звеньев выключателя изменять свою длину в процессе регулирования.

Дифференциальное уравнение для изодромной САР имеет вид:

$$\begin{aligned} A_5 \frac{d^5 \varphi}{dt^5} + A_4 \frac{d^4 \varphi}{dt^4} + A_3 \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + A_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + A_1 \frac{d\varphi}{dt} + A_0 \varphi = \\ = S_1 \frac{d\alpha_p}{dt} + S_0 \alpha_p - B_4 \frac{d^4 \alpha_0}{dt^4} - B_3 \frac{d^3 \alpha_0}{dt^3} - B_2 \frac{d^2 \alpha_0}{dt^2} - B_1 \frac{d\alpha_0}{dt}, \end{aligned} \quad (13)$$

где α_0 , α_p – внешние воздействия, действующие на объект регулирования и чувствительный элемент регулятора;

φ – регулируемая координата.

Значения входных и выходных составляющих уравнения (13) определяются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 A_5 &= T_o T_p^2 T_c T_i; \\
 A_4 &= (T_p^2 + T_o T_k) T_c T_i + (T_c + T_i \beta_i) T_o T_p^2; \\
 A_3 &= (T_p^2 + T_o T_k) (T_c + T_i \beta_i) + (T_o + T_k) T_c T_i; \\
 A_2 &= (T_o + T_k) (T_c + T_i \beta_i) + T_c T_i; \\
 A_1 &= (T_c + T_i \beta_i) + T_i k_o^\lambda k_p^\phi; \\
 A_0 &= k_o^\lambda k_p^\phi; \\
 S_1 &= T_i k_o^\lambda k_p^\alpha; \\
 S_0 &= k_o^\lambda k_p^\alpha; \\
 B_4 &= T_p^2 T_c T_i k_o^\alpha; \\
 B_3 &= (T_c + T_i \beta_i) T_p^2 k_o^\alpha + T_k T_c T_i k_o^\alpha; \\
 B_2 &= (T_c + T_i \beta_i) T_k k_o^\alpha + T_c T_i k_o^\alpha; \\
 B_1 &= (T_c + T_i \beta_i) k_o^\alpha; \\
 B_0 &= 0,
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где k_o^λ , k_o^α , k_p^ϕ , k_p^α – коэффициенты усиления по входным координатам;

T_o – постоянная времени регулируемого объекта;

T_p – постоянная времени регулятора;

T_k – постоянная времени катаракта (корректирующее звено);

T_c – постоянная времени серводвигателя;

T_i – постоянная времени изодрома;

β_i – коэффициент пропорциональности.

Уравнение (13) неоднородное, оно описывает вынужденные переходные процессы системы изодромного регулирования, появляющиеся в результате внешних воздействий α_o и α_p .

Применение электронных САР является эффективным средством снижения эксплуатационного расхода топлива и выбросов с отработавшими газами токсичных веществ в дизелях различного назначения. Созданы модификации электронных регуляторов типа ЭРЧМ30Т для установки на тепловозах 2ТЭ116, ТЭМ18, 2ТЭ10, 2ТЭ70, 2ТЭ25К, ТЭП70БС и ТЭП70У, которые нашли широкое применение на железнодорожном транспорте [2, 3].

Электронная система автоматического регулирования частоты (САРЧ) вращения коленчатого вала дизеля типа ЭРЧМ30Т состоит из следующих звеньев регулирования: дизеля с ТНВД; модулятора дизеля (диск с зубьями, вращающийся с числом оборотов n); датчика частоты вращения (ДЧВ); электронного регулятора частоты вращения (ЭРЧВ), содержащего блок управления и электрогидравлическое исполнительное устройство (ИУ); рычажной передачи от ИУ к ТНВД.

Коэффициент усиления ЭРЧВ равен произведению коэффициентов усиления блока управления и ИУ [3]:

$$k_{\text{ЭРЧВ}} = k_{\text{б.у}} k_{\text{ИУ}} = k_{\text{р.ч}} k_u \cdot \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + (k_1 \omega)^2}{(1 + T_\phi^2 \omega^2) [(1 - T_\phi^2 \omega^2)^2 + (2\delta T \omega)^2]}}. \quad (15)$$

Перемещение реек ТНВД, мм,

$$x_p = k_{\text{р.п}} Y, \quad (16)$$

где Y – перемещение поршня сервомотора ИУ ЭРЧВ, мм;

$k_{\text{р.п}}$ – коэффициент рычажной передачи.

Коэффициент рычажной передачи

$$k_{\text{р.п}} = \frac{x_{\text{р.н}}}{Y_N}, \quad (17)$$

где $x_{\text{р.н}}$ – номинальный ход реек ТНВД, мм;

Y_N – номинальный ход поршня сервомотора ИУ ЭРЧВ, мм.

Коэффициент усиления рычажной передачи от ИУ ЭРЧВ к рейкам ТНВД дизеля

$$k_{\text{р.п}} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}} = \frac{x_{\text{р.н}}}{Y_N}. \quad (18)$$

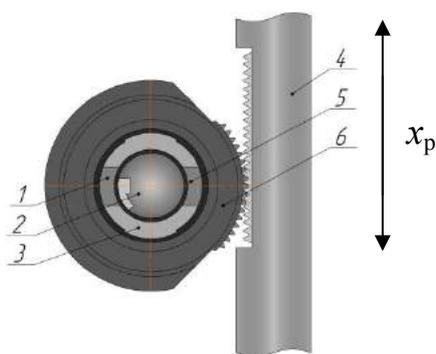


Рисунок 2 – Взаимосвязь ТНВД и РЧО посредством топливной рейки дизеля:

- 1 – вертикальный паз головки плунжера;
- 2 – головка плунжера; 3 – гильза плунжера;
- 4 – регулирующая рейка; 5 – боковое отверстие гильзы; 6 – шлицевая поворотная втулка; x_p – положение топливной рейки

Связь топливной аппаратуры и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля осуществляется путем механического соединения ТНВД и РЧО управляющим органом – топливной рейкой.

Количество топлива, подаваемого в цилиндр, зависит от положения винтовой кромки головки плунжера 2 относительно одного из боковых отвер-

стий 5 гильзы 3 (рисунок 2).

При изменении нагрузки регулятором частоты вращения коленчатого вала дизеля посредством рычажного механизма управления топливоподачей перемещается регулирующая рейка 4 ТНВД, которая при помощи шлицевой поворотной втулки 6 повернет плунжер относительно гильзы. Поворотом плунжера изменяется подача топлива от нуля до наибольшего значения.

Анализ представленных моделей показал, что математические модели процесса подачи топлива и работы регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля можно связать только через единственный параметр – ход рейки x_p ТНВД (см. рисунок 2).

Для гидромеханического регулятора необходимо связать производительность ТНВД Q_n , которая определяется выходом рейки x_p , с уравнениями регулятора (12) – (14). При этом необходимо учитывать все составляющие уравнения, влияющие на производительность ТНВД (1). Аналогично для электронного регулятора необходимо связать производительность ТНВД Q_n с уравнениями регулятора (16) – (18).

Реализация математической модели совместной работы топливной аппаратуры высокого давления и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля представлена в виде алгоритма и фрагмента программы расчета на рисунке 3.

Предложенная модель совместной работы топливной аппаратуры высокого давления и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля может быть применена при формировании комплектов топливной аппаратуры и РЧО перед их установкой на дизель и для

расчета параметров деталей топливной аппаратуры, используемых при обкатке ТНВД на стендах, применяемых в настоящее время в локомотивных депо.

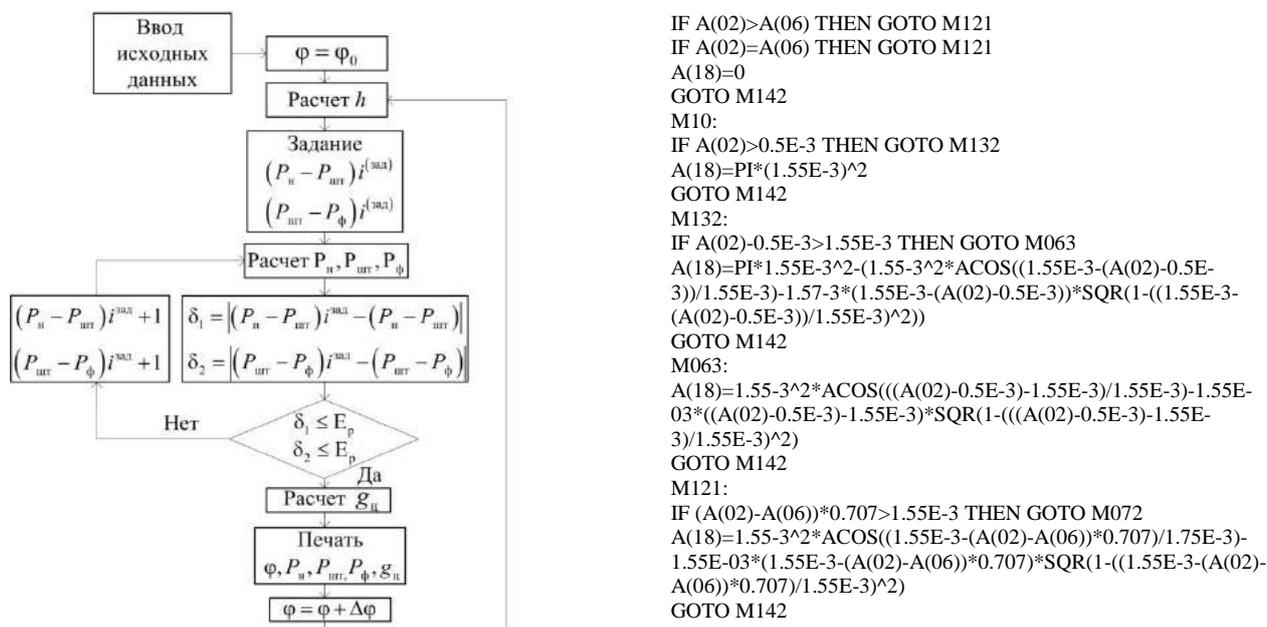


Рисунок 3 – Алгоритм и фрагмент программы для расчета процесса подачи топлива

Список литературы

1. Чулков, А. В. Факторы, характеризующие условия эксплуатации магистральных тепловозов [Текст] / А. В. Чулков, В. А. Михеев, Ю. Б. Гришина // Актуальные вопросы современной науки. – Новосибирск, 2010. – № 12. – С. 216 – 221.
2. Фурман, В. В. Улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления: Дис... докт. техн. наук [Текст] / В. В. Фурман. – М., 2016. – 321 с.
3. Марков, В. А. Исследование системы автоматического регулирования частоты вращения тепловозного дизеля [Текст] / В. А. Марков, В. В. Фурман, В. А. Иванов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 8. – С. 54 – 63.
4. Блинов, П. Н. Совершенствование технического обслуживания и ремонта топливной аппаратуры тепловозных дизелей [Текст]: Дис... канд. техн. наук / П. Н. Блинов. – Омск, 1986. – 177 с.
5. Блинов, П. Н. Модель процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей с учетом технологических характеристик ее деталей [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 3 (3). – С. 2 – 7.
6. Блинов, П. Н. Влияние параметров настройки и условий эксплуатации тепловозов на качество работы и экономичность тепловозных дизелей [Текст] / П. Н. Блинов, П. А. Бернс, А. П. Блинов // Материалы второй междунар. науч.-практ. конф. «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 35 – 41.
7. Фомин, Ю. Я. Топливная аппаратура дизелей [Текст] / Ю. Я. Фомин, Г. В. Никонов, В. Г. Ивановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.
8. Блинов, П. Н. Применение математической модели процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей для многовариантных расчетов [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 3 (19). – С. 2 – 7.

9. Крутов, В. И. Основы теории автоматического регулирования [Текст] / В. И. Крутов, Ф. М. Данилов, П. К. Кузьмин. – М.: Машиностроение. 1984. – 368 с.

References

1. Chulkov A. V., Mikheev V. A., Grishina U. B. Factors characterizing the operation conditions of main-line diesel locomotives [Faktory, karakterizuyushhie usloviya ekspluatacii magistralnykh teplovozov]. *Aktual'nye voprosy sovremennoi nauki – Actual problems of modern science*, 2010, no. 12, pp 216 – 221.

2. Furman V. V. *Uluchshenie ekspluatacionno-texnicheskikh karakteristik dizel-generatorov teplovozov putem sozdaniya i sovershenstvovaniya sistem elektronnoy upravleniya* (Improvement of operational and technical characteristics of diesel-generator locomotives through the establishment and improvement of electronic control systems). Doctor's thesis, Moscow, 2016, 321 p.

3. Markov V. A., Furman V. V., Ivanov V. A. Study of automatic control system of rotational speed of the diesel diesel [Issledovanie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashheniya teplovoznogo dizelya]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of higher educational establishments. Engineering*, 2013, no. 8, pp. 54 – 63.

4. Blinov P. N. *Sovershenstvovanie texnicheskogo obsluzhivaniya i remonta toplivnoy apparatury teplovoznnykh dizelej* (Improving the maintenance and repair of the fuel equipment of diesel locomotive engines). Ph. D. thesis. Omsk, 1986, 177 p.

5. Blinov P.N., Blinov A.P. Fuel process model of fuel equipment of diesel locomotive engines, taking into account the technical characteristics of its parts [Model processa toplivopodachi toplivnoy apparatury teplovoznnykh dizelej s uchedom texnologicheskikh karakteristik ee detalej]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, Omsk, 2010, no. 3 (3), pp 2 – 7.

6. Blinov A.P., Blinov P.N., Berns P.A. Effect settings and operating conditions of diesel locomotives on the quality of work and economical diesel engines [Vliyanie parametrov nastrojki i usloviy ekspluatacii teplovozov na kachestvo raboty i ekonomichnost teplovoznnykh dizelej]. *Proceedings of the second international scientifically-practical Conference Improvement energy efficiency of land transport systems* (Materials of the Second Intern. scientific-practical. conference «Improving the energy efficiency of land transportation systems»). Omsk, 2016, pp 35 – 41.

7. Fomin U. Y., Nikonov G. V., Ivanovsky V. G. *Toplivnaya apparatura dizelej* (Fuel equipment of diesel engines). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982, 168 p.

8. Blinov P. N., Blinov A. P. Application of mathematical model of process fuel injection equipment for diesel locomotive engines multivariate calculations [Primenenie matematicheskoy modeli processa toplivopodachi toplivnoy apparatury teplovoznnykh dizelej dlya mnogovariantnykh raschetov]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, Omsk, 2014, no. 3 (19), pp 2 – 7.

9. Krutov V. I., Danilov F. M., Kuzmin P. K. *Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya* (Fundamentals of the theory of automatic control). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984, 368 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Блинов Александр Павлович

Филиал «Западно-Сибирский»

ООО «ТМХ-Сервис»

Ведущий инженер ООО «ТМХ-Сервис».

Ленина ул., д. 21/1, корп. 1, г. Новосибирск,

630004, Российская Федерация.

Тел. +7 (983) 309-34-14

E-mail: blinovap@mail.ru

Блинов Павел Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Blinov Alexander Pavlovich

West-Siberian Filial LLC «TMH-service»

Leading engineer LLC «TMH-service».

21/1, Lenin str., Bldg. 1, Novosibirsk, 630004, Russian Federation.

Phone: +7 (983) 309-34-14

E-mail: blinovap@mail.ru

Blinov Pavel Nikolayevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Декан теплоэнергетического факультета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент.

Тел.: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

Бернс Павел Александрович

Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД».

Вокзальная магистраль, д. 12, г. Новосибирск, 630004, Российская Федерация.

Инженер Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Тел. +7 (923) 681-82-57

E-mail: p10499042@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Блинов, А. П. Разработка математической модели совместной работы топливной аппаратуры высокого давления и регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля [Текст] / А. П. Блинов, П. Н. Блинов, П. А. Бернс // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 12 – 22.

The Dean of faculty «Heat power», candidate of Technical Sciences,, the senior scientific employee, the senior lecturer, OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-04-09.

E-mail: blinovpn@omgups.ru

Berns Pavel Aleksandrovich

The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways».

12, Vokzalnaya magistral, Novosibirsk, 630004, Russian Federation.

Engineer West-Siberian railway-branch of JSC «Russian railways».

Phone: +7 (923) 681-82-57

E-mail: p10499042@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Blinov A. P., Blinov P. N., Berns P. A. Development of a mathematical model of the joint work of fuel equipment of high pressure and regulator of the rotation frequency of the crankshaft of the diesel engine. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 12 – 22. (In Russian).

УДК 621.436:629

Л. С. Курманова

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЗОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОМОТОРНОГО ТОПЛИВА

***Аннотация.** В статье обобщены и проанализированы данные по применению природного газа (метана) в качестве добавки к дизельному топливу на линии низкого давления дизелей тепловозов ЧМЭЗ. Представлены результаты по оценке влияния газомоторного топлива на эффективность работы тепловозов ЧМЭЗ.*

***Ключевые слова:** газомоторное топливо, удельный эффективный расход топлива, эффективная мощность, тепловоз, природный газ, позиция контроллера машиниста.*

Leila S. Kurmanova

Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russian Federation

OPERATION EFFICIENCY IMPROVEMENT OF HEAT TRANSPORTATION BY APPLYING GAS-MOTOR FUEL

***Abstract.** The article summarizes and analyzes data on the use of natural gas (methane) as an additive to diesel fuel on the low-pressure line of diesel engines of locomotive CHME3. The results of The gas engine fuel effect assessment on the efficiency of locomotives CHME3 are presented.*

***Keywords:** gas motor fuel, specific effective fuel consumption, effective power, locomotive, natural gas, diesel locomotive operation modes, driver's position.*

В настоящее время компания ОАО «РЖД» является крупнейшим потребителем энергоресурсов в России, которая ежегодно расходует на тягу поездов 3,2 млн т дизельного топлива, что составляет 9,1 % общего потребления в стране [1].

Одним из перспективных направлений реализации «Энергетической стратегии ОАО «РЖД» является обеспечение к 2030 г. 25 – 30 % замещения дизельного топлива природным газом.

В рамках государственной программы Правительства РФ «Внедрение газомоторной техники на железнодорожном транспорте» на 2017 – 2020 гг. разработан комплекс мероприятий к концу 2020 г., который должен составить суммарный объем потребления газомоторного топлива на железнодорожном транспорте 131,5 млн м³ [2].

Переход на газомоторное топливо позволяет улучшить тяговые свойства автономных локомотивов, увеличить их наработку на отказ, сократить расход дизельного топлива, снизить выбросы вредных веществ. Программа внедрения газомоторной техники на железнодорожном транспорте предполагает замену тягового автономного подвижного состава, работающего на дизельном топливе, локомотивами, работающими на природном газе.

Термодинамические и экологические преимущества газомоторного топлива по сравнению с дизельным обусловлены энергетическими и физическими показателями газового топлива. По отечественным и зарубежным данным при эксплуатации дизелей на газомоторном топливе значения выбросов токсичных веществ снижаются по углеводородному составу и окислам азота в 1,5 – 2,0 раза. При работе на газодизельном процессе происходит значительное снижение дымности, повышение экономичности (на 2 – 5 %), увеличение ресурса, межремонтного пробега и срока службы моторного масла (на 20 – 40 %) [1 – 3].

На основании проведенных научных исследований по применению природного газа на тепловозных дизелях в эксплуатации стало возможным повышение их топливной экономичности. Однако существующий уровень топливной экономичности не позволяет достигнуть высоких показателей эффективности работы тепловозов. Поэтому актуальными являются вопросы по повышению топливной экономичности тепловозных дизелей за счет применения газомоторного топлива.

Целью данной работы является оценка влияния замещения дизельного топлива метаном на показатели эффективности работы тепловозов.

Газообразное состояние моторного топлива, в данном случае природного газа, является важным преимуществом с точки зрения осуществления эффективного рабочего процесса дизеля тепловоза, однако влечет за собой такие недостатки, как

невысокая доля замещения дизельного топлива газом на газотепловозах, при меньшей частоте наблюдается неравномерная подача и даже пропуски подачи по циклам, что приводит к невозгоранию газа в цилиндре;

организация смесеобразования, требующая решения для обеспечения работы на режимах при малых нагрузке и частоте вращения коленчатого вала;

отсутствие автоматизированной системы управления подачей топлива;

сложности хранения, заключающаяся в создании компактных, легких и надежных систем его хранения. Внушительные габаритные размеры и масса металлических баллонов для сжатого газа приводят к сокращению пробега между заправками.

Применение газового топлива в дизелях достигается, как правило, путем организации рабочего процесса по принципу смешанного смесеобразования: внешнего по газовому и внутреннего по запальному дизельному топливу [2, 3].

В первом случае газоздушная смесь создается в смесителе вне двигателя и подается в цилиндр до начала такта сжатия, т. е. в цилиндрах сжимается газоздушная горючая смесь (внешнее смесеобразование по газу). Затем в конце такта сжатия в цилиндры впрыскивается дизельное топливо (внутреннее смесеобразование), благодаря самовоспламенению которого происходит зажигание газоздушной смеси.

В основном внешнее смесеобразование применяется на четырехтактных двигателях, так как у большинства двухтактных двигателей газовой модификации из-за потери свежей рабочей смеси в процессе продувки снижается экономичность.

Во втором случае и наиболее целесообразным при переводе дизелей на газ является воспламенение газовой смеси некоторым количеством жидкого топлива. В этом случае при необходимости обеспечивается быстрый переход с газового топлива на жидкое (конвертация), в конструкцию двигателя почти не вносятся существенных изменений: используется диспергатор для создания однородной смеси и изменяется система газораспределения. При этом в дизель поступает газоздушная смесь, а не воздух, как в случае воспламенения от сжатия. Такой способ зажигания является наиболее приемлемым для транспортных четырехтактных дизелей в качестве газодизельного или газожидкостного процесса [2].

В общем случае моторное топливо в цилиндре можно рассматривать как смесь различных компонентов. Основными характеристиками газового топлива для дизелей являются низшая теплота сгорания, плотность, цетановое число, содержание общей и органической серы, суммарная доля негорючих компонентов, содержание влаги и механических примесей [4].

При добавке метана к дизельному топливу теплотворная способность смеси изменяется, вследствие чего происходит теоретическое падение мощности.

В работе [5] описана модель, которая позволяет при наличии начальных значений доли добавки альтернативных видов топлива, закона и способа его подачи определить действительное максимальное давление рабочего цикла локомотивных энергетических установок, работающих на альтернативных видах топлива. Недостатком данной модели является трудность расчета эффективной мощности тепловоза из-за отсутствия определения объемной подачи газомоторного топлива.

Для сохранения номинальной мощности дизеля при подаче метана его цикловая подача должна быть эквивалентной теплоте сгорания дизельного топлива. Учитывая разницу объемных теплотворных способностей обоих видов топлива, необходимо для этого выполнить следующее условие:

$$\Delta V_{д.т} Q_{н.д.т} = \Delta V_{м} Q_{н.м}, \quad (1)$$

где $\Delta V_{д.т}$ и $\Delta V_{м}$ – объемная подача соответственно дизельного топлива и метана на один цикл, см³;

$Q_{н.д.т}$ и $Q_{н.м}$ – низшая теплота сгорания соответственно дизельного топлива и природного газа, МДж/м³.

Из выражения (1) находим объем метана на один рабочий цикл:

$$\Delta V_{м} = \Delta V_{д.т} \frac{Q_{н.д.т}}{Q_{н.м}}. \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо при допущении, что сгорание обоих видов топлива происходит с одинаковой эффективностью.

Максимальной мощности дизеля тепловоза ЧМЭЗ соответствует цикловая подача дизельного летнего топлива $q_{ц} = 1,52$ г/цикл, что при удельной массе топлива $\gamma = 0,84$ г/см³ составляет объемную подачу $\Delta V_{д.т} = 1,810$ см³. Приняв изменения низшей теплоты сгорания смесей дизельного топлива с природным газом по аддитивному закону, можно рассчитать необходимый объем топлива $\Delta V_{т}$, который должен подаваться в цилиндр на один рабочий цикл (таблица 1).

Из таблицы 1 видно, что при замещении дизельного топлива метаном теплотворная способность смесевоего топлива растет, поэтому действительная объемная подача метана должна быть снижена примерно на 10 %.

На основании усовершенствованной методики был произведен расчет показателей работы тепловоза. В таблице 1 представлены результаты для номинального режима работы тепловоза ЧМЭЗ.

Таблица 1 – Параметры подачи газомоторного топлива

Параметр	Состав топлива										
	ДТ	5 % СН4 + 95% ДТ	10 % СН4 + 90% ДТ	20 % СН4 + 80% ДТ	30 % СН4 + 70% ДТ	40 % СН4 + 60% ДТ	50 % СН4 + 50% ДТ	60 % СН4 + 40% ДТ	70 % СН4 + 30% ДТ	80 % СН4 + 20% ДТ	90 % СН4 + 10% ДТ
Низшая теплота сгорания Q_H , МДж/м ³	3,06	3,71	3,83	4,06	4,28	4,51	4,74	4,97	5,20	5,42	5,65
Отношение $\frac{Q_{н.д.м}}{Q_{н.м}}$,981	,977	,971	,964	,958	,952	,945	,939	,933	,927
Объем топлива на один цикл V_T , см ³	,81	,72	,629	,448	,267	,086	,905	,724	,543	,362	,181
Объем метана на один цикл V_m , см ³		8,4	76,8	53,6	30,4	07,2	84	060,8	237,6	414,4	591,2
Масса топлива на один цикл $q_{ц}$, гр	,52	,44	,37	,22	,06	,91	,76	,61	,46	,31	,15
8-я позиция контроллера машиниста											
Часовой расход метана G_m , кг/ч	–	8,3	16,6	33,2	49,7	66,3	83	99,4	116	132,6	149,2
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	181,6	172,5	163,4	145,3	127,2	108,9	90,8	62,64	54,5	36,3	18,6
Эффективная мощность N_e , кВт	885	887	889	892,8	896,7	901	904,5	908,4	912,3	916,2	920,1
Удельный эффективный расход топлива be , г/(кВт·ч)	226	225,8	225,1	224,2	223,1	221,8	220,2	218,6	216,3	215,1	214,2

С целью определения показателей работы тепловоза ЧМЭЗ при замещении дизельного топлива метаном были проведены экспериментальные исследования в условиях станции реостатных испытаний СЛД «Орск».

Подача метана осуществлялась на линии низкого давления в количестве 5 % из топливной рампы объемом 270 л с давлением 175 бар с выходом на редуктор. Для подачи метана использовались жиклеры с различными диаметрами отверстий от 0,71 до 2,61 мм. Для установки жиклеров использовался переходной штуцер, который был размещен в технологическом отверстии топливного коллектора.

Подача метана осуществлялась на всех позициях контроллера машиниста с последующей регистрацией параметров. Для получения высокодисперсной однородной смеси использовалось перемешивающее устройство, которое было изготовлено на кафедре «Локомотивы» СамГУПС.

На всех этапах испытаний производился контроль удельного эффективного расхода топлива с помощью струйного расходомера топлива, входящего в комплекс «Кипарис», погрешность измерений составила 0,15 %.

В результате проведенных экспериментов были выявлены зависимости удельного эффективного расхода топлива при замещении дизельного топлива метаном на линии низкого давления дизеля тепловоза ЧМЭЗ (рисунок 1).

Как видно, снижение удельного эффективного расхода топлива составило в среднем 8 – 10 % в зависимости от позиции контроллера машиниста. Полученные результаты свиде-

тельствуют об уменьшении удельного эффективного расхода топлива только на позициях контроллера машиниста начиная со второй и выше. Вследствие нестабильного процесса сгорания метана (невысокая температура и давление рабочего цикла) дизель на холостом ходу работает по дизельному циклу.

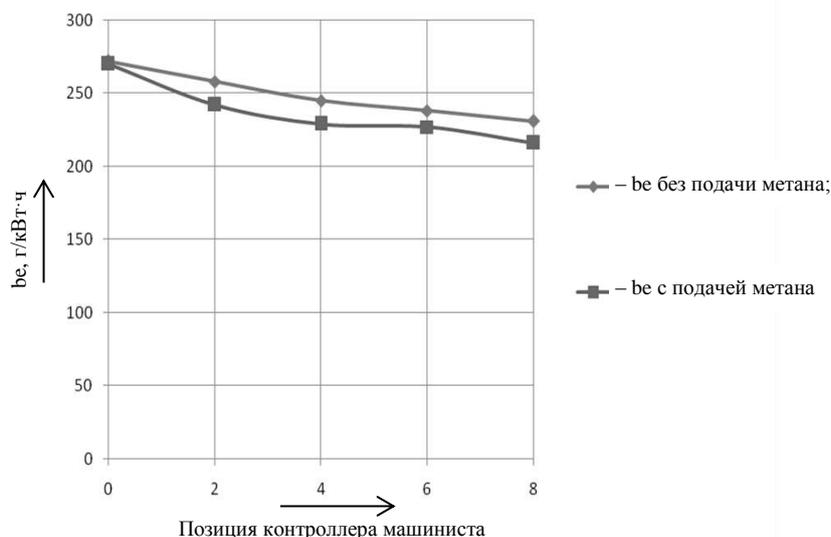


Рисунок 1 – Изменение удельного эффективного расхода топлива be дизеля тепловоза ЧМЭЗ при замещении дизельного топлива метаном

Применение газообразного топлива в газовых двигателях обусловлено уменьшением их мощности из-за меньшей теплотворной способности этого вида топлива по сравнению с дизельным, что относится в первую очередь к двигателям без наддува. Несмотря на это уменьшения мощности удалось избежать за счет турбонаддува и внутреннего смесеобразования.

Как видно, наблюдается увеличение эффективной мощности дизеля в зависимости от позиции контроллера машиниста в среднем на 2 – 4 % при замещении дизельного топлива метаном, т. е. теплотворная способность газа не является критерием ограничения мощности газодизельных двигателей (рисунок 2).

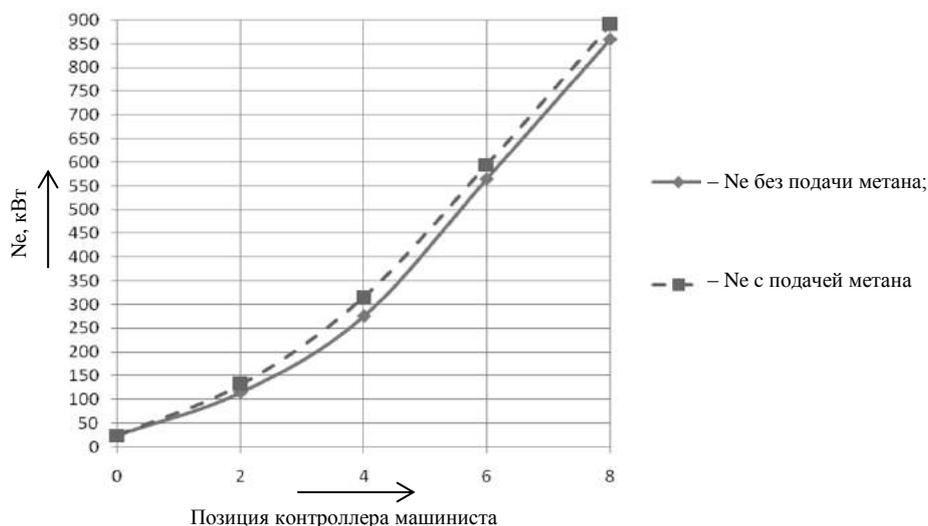


Рисунок 2 – Изменение эффективной мощности дизеля тепловоза ЧМЭЗ при замещении дизельного топлива метаном

Изменение часового расхода метана и дизельного топлива в зависимости от позиции контроллера машиниста подтверждает то, что часовой расход метана увеличивается пропорционально частоте вращения коленчатого вала и мощности дизеля, а часовой расход дизельного топлива имеет пологий участок характеристики на малых позициях контроллера машиниста (рисунок 3).

Объясняется это тем, что при низких значениях цикловой подачи дизельного топлива топливная аппаратура находится на границе устойчивой работы. При условии снижения цикловой подачи дизельного топлива и соответственно расхода топлива возможны пропуски вспышек. Поэтому для более устойчивой и стабильной работы дизеля на всем диапазоне нагрузок необходима корректировка топливной аппаратуры и системы воздухообеспечения.

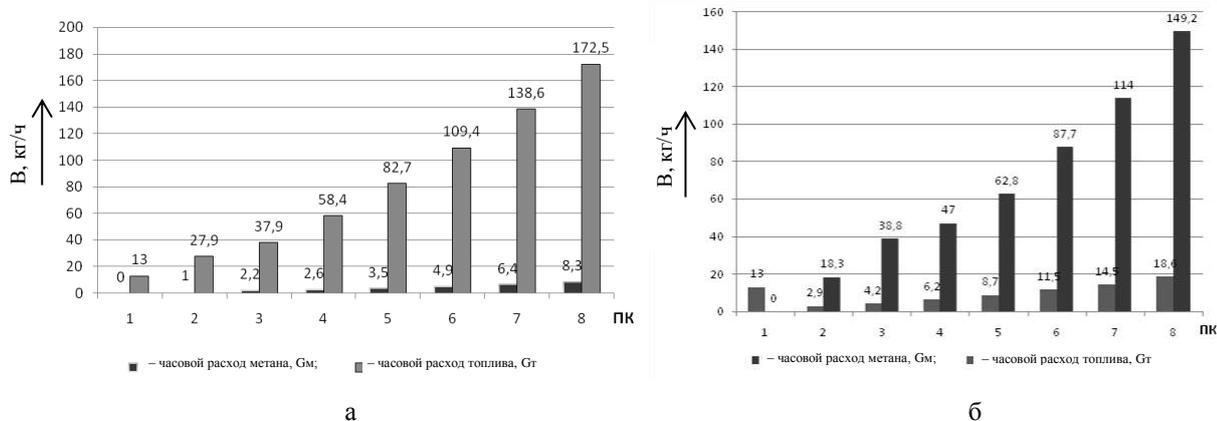


Рисунок 3 – Расчет часового расхода метана Gм и топлива Gт по позициям контроллера машиниста при замещении дизельного топлива метаном: а – 5 %-ное замещение, б – 90 %-ное замещение

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что замещение дизельного топлива метаном в количестве 5 % на линии низкого давления приводит к положительным изменениям эффективной мощности и удельного эффективного расхода топлива.

Для оценки влияния газомоторного топлива на показатели эффективности работы тепловоза ЧМЭЗ было проведено компьютерное моделирование данных, полученных с помощью приведенной методики с использованием программного продукта *ENGINE*.

При увеличении доли метана в дизельном топливе происходит снижение удельного эффективного расхода топлива и увеличение эффективной мощности (рисунки 4, 5). Это обусловлено существенным влиянием доли метана как водородосодержащего газа на характеристики процесса горения.

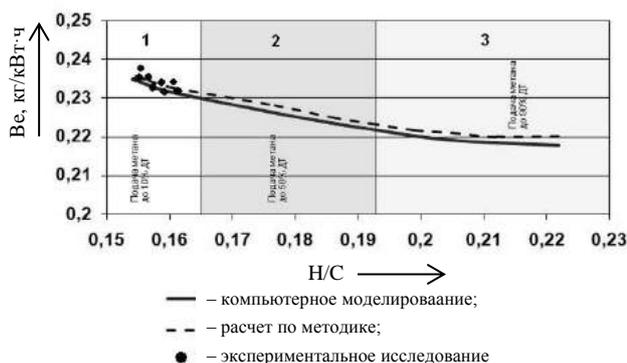


Рисунок 4 – Изменение удельного эффективного расхода топлива v_e при изменении соотношения H/C для дизельного топлива с добавкой метана

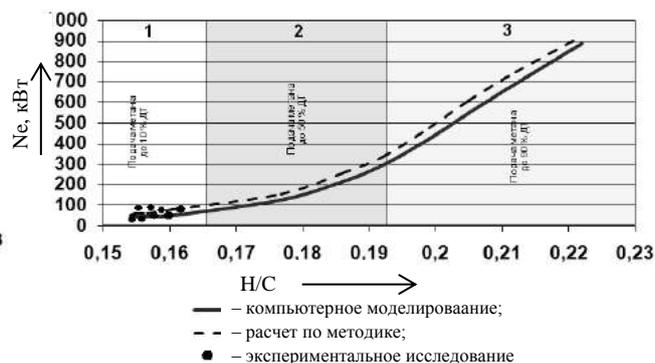


Рисунок 5 – Изменение эффективной мощности N_e при изменении соотношения H/C для дизельного топлива с добавкой метана

В качестве определяющего параметра в механизме влияния метана на показатели эффективности работы тепловоза используется отношение H/C.

Сравнение данных, полученных по предложенной методике и по программному продукту *ENGINE* для номинального режима работы тепловоза ЧМЭЗ, с результатами, полученными экспериментальным путем, показали хорошую сходимость. Расхождение составило не более 5 %.

На представленных зависимостях область построения условно поделена на зоны. В зоне **I** осуществляется подача метана до 10 % дизельного топлива, которая характеризуется подачей метана как в воздушный ресивер, так и на линии низкого давления. В зоне **II** осуществляется подача метана до 50 % дизельного топлива, которая характеризуется подачей метана к дизельному топливу на линии низкого давления. В зоне **III** осуществляется подача метана до 90% дизельного топлива, которая реализуется за счет применения двухтопливной или комбинированной системы (см. рисунки 4, 5).

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали, что замещение дизельного топлива метаном в диапазоне 1 – 90 % при работе тепловоза ЧМЭЗ на номинальном режиме снижает удельный расход топлива от 1 до 26 г/кВт·ч, повышает мощность на 2 – 6 %.

Для одновременного определения поведения удельного эффективного расхода топлива и эффективной мощности в зависимости от доли метана в дизельном топливе на основе обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов с использованием программы STATISTICA6 были получены зависимости и уравнения регрессии (таблица 2).

Таблица 2 – Уравнения регрессии, описывающие показатели работы тепловоза ЧМЭЗ в зависимости от количества добавки метана к дизельному топливу и режима работы

Параметр	Аналитические выражения
b_e , г/кВт·ч	$b_e = 340,4985 - 0,3692N_e - 24,4476D + 0,0003N_e^2 + 0,0096N_eD + 0,9686D^2$
N_e , кВт	$N_e = 5939,8802 + 659,58,37b_e - 41,642D - 386,4484b_e^2 - 0,0769b_eD + 0,074 D^2$

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными результатами, приведенными в работах [6 – 10].

Для проверки адекватности полученных уравнений регрессии рассматриваемым процессам вычисляется опытное значение критерия Фишера F_{on} и сравнивается с теоретическим значением F_T . Если $F_{on} \leq F_T$, то модель адекватна.

Таблица 3 – Результаты проверки на адекватность математической модели

Тепловоз	Y_i	f_r	S_{ad}^2	S_y^2	$F_{on} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$	F_T	Адекватность модели
ЧМЭЗ	b_e	4	6,321	2,608	2,424	9,15	Адекватна
	N_e	2	7,5·E-8	2,4·E-6	3,125 E-2	5,14	Адекватна

На рисунках 6, 7 приведены поверхности отклика параметра b_e и N_e от доли добавки природного газа для дизеля тепловоза ЧМЭЗ.

Наибольшее снижение расхода топлива при замещении дизельного топлива метаном происходит на малых и средних нагрузках и составляет $\Delta b_e = 31,2$ г/(кВт·ч), или 10 %. С увеличением доли метана в дизельном топливе наблюдается также повышение эффективной мощности, которое составило 4 % на максимальных нагрузках или $\Delta N_e = 40$ кВт.

На основании полученных уравнений регрессии и установленных взаимосвязей между удельным эффективным расходом топлива и эффективной мощностью в зависимости от доли метана в дизельном топливе был произведен расчет указанных показателей работы тепловоза по позициям контроллера машиниста (рисунок 8).

С увеличением доли метана в дизельном топливе происходит снижение удельного эффективного расхода топлива, причем при малых и средних нагрузках, характерных для маневровых тепловозов (вторая – пятая позиции контроллера машиниста), снижение составляет 8 – 12 %, а на номинальном режиме – 4 %.

С увеличением доли метана в дизельном топливе наблюдается также прирост эффективной мощности дизеля тепловоза на всех позициях контроллера машиниста. Наибольшее значение прироста мощности соответствует номинальному режиму работы тепловоза и составляет 5 %.

Таким образом, не учитывая вопросы надежности и долговечности, результаты проведенных исследований показали, что замещение дизельного топлива метаном на линии низкого дав-

ления в количестве 5 % приводит к увеличению эффективной мощности в среднем на 2 – 4 % и снижению удельного эффективного расхода топлива в среднем на 8 – 10 % в зависимости от позиции контроллера машиниста.

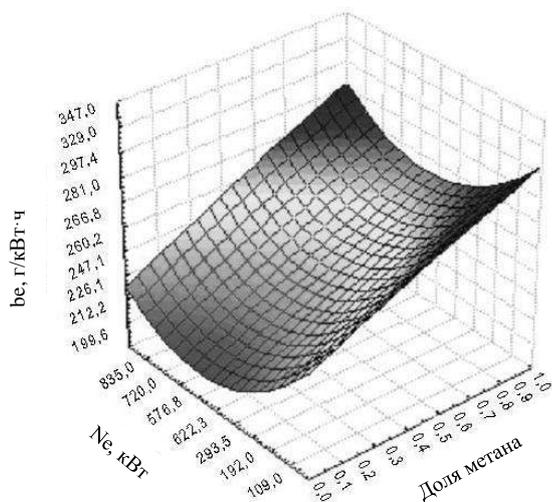


Рисунок 6 – Зависимость удельного эффективного расхода топлива тепловоза ЧМЭЗ от эффективной мощности дизеля и доли метана в дизельном топливе

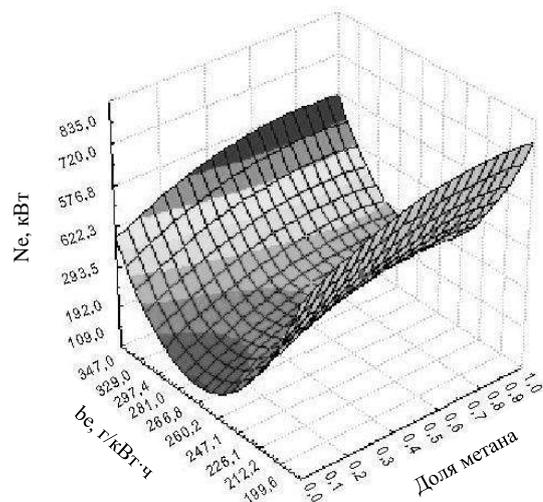


Рисунок 7 – Зависимость эффективной мощности дизеля тепловоза ЧМЭЗ от удельного эффективного расхода топлива и доли метана в дизельном топливе

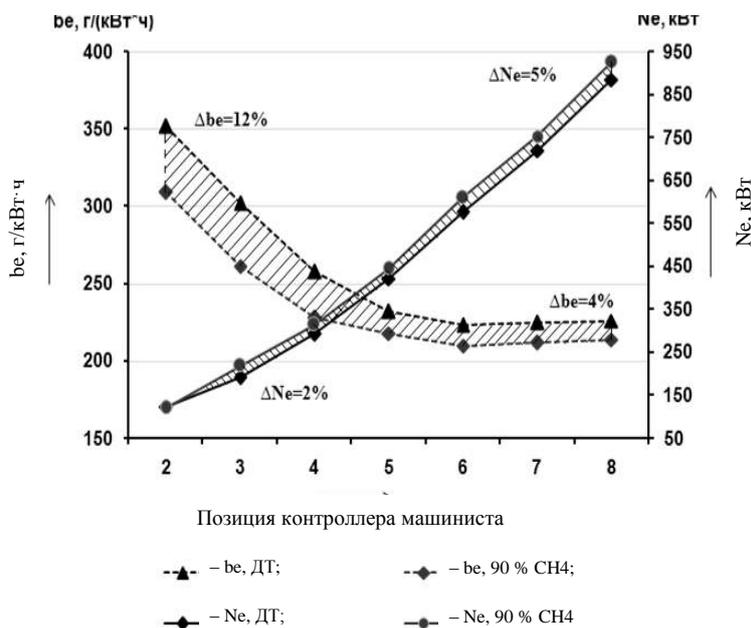


Рисунок 8 – Показатели работы тепловоза ЧМЭЗ при замещении дизельного топлива метаном в зависимости от позиции контроллера машиниста

Список литературы

1. Носырев, Д. Я. Перспективы и проблемы применения водорода в локомотивных энергетических установках: Монография [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов, С. А. Петухов / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2014. – 112 с.
2. Проблемы и перспективы эксплуатации газотепловозов на Куйбышевской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 20 – 23.

3. Кавтарадзе, Р. З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород [Текст] / Московский гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана. – М., 2011. – 238 с.
4. Анисимов, А. С. Особенности математического моделирования рабочего процесса двухтопливного двигателя [Текст] / А. С. Анисимов, И. В. Чернышков // Локомотивы. Газомоторное топливо (Проблемы. Решения. Перспективы): Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2016. – 135 с.
5. Носырев, Д. Я. Теоретическая модель расчета внутрицилиндровых параметров локомотивных энергетических установок при использовании альтернативных видов топлива [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов, С. А. Петухов // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 5 (35). – С. 26 – 29.
6. Применение природного газа в локомотивных энергетических установках [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов и др. // Наука и образование транспорту. – 2016. – № 1. – С. 51 – 54.
7. Влияние насыщения дизельного топлива метаном на эксплуатационные показатели тепловозных дизелей [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 6 (60). – С. 25 – 28.
8. Оценка влияния соотношения углерода к водороду на теплофизические свойства комбинированных топлив для работы тепловозных дизелей [Текст] / Д. Я. Носырев, А. Ю. Балакин и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 2 (56). – С. 33 – 38.
9. Оценка экономичности тягового автономного подвижного состава при использовании природного газа в качестве моторного топлива [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 2 (62). – С. 34 – 38.
10. Носырев, Д. Я. Экспериментальная оценка влияния природного газа на работу дизелей тепловозов [Текст] / Д. Я. Носырев, А. В. Муратов, Л. С. Курманова // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 124 – 132.

References

1. Nosyrev D. Ia., Muratov A. V., Petukhov S. A. *Prospects and problems of hydrogen application in locomotive power plants: Monograph* (Perspektivy i problemy primeneniia vo-doroda v lokomotivnykh energeticheskikh ustanovkakh: monografiia). Samara: SamGUPS, 2014, 112 p.
2. Nosyrev D. Ia., Muratov A. V., Petukhov S. A., Kurmanova L. S. Problems and prospects of operation of gas-thermal locomotives at the Kuibyshev Railroad – a branch of JSCo «Russian Railways» [Problemy i perspektivy ekspluatatsii gazoteplovozzov na Kuibyshevskoi zheleznoi doroge – filiale OAO «RZhD»]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of Transport in the Volga Region.* – 2014, .no. 5, pp. 20 – 23.
3. Kavtaradze R. Z. *Teplofizicheskie protsessy v dizeliakh, konvertirovannykh na prirodnyi gaz i vodorod* (Thermophysical processes in diesel engines converted to natural gas and hydrogen). Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2011, 238 p.
4. Anisimov A. S., Chernyshkov I. V. Peculiarities of mathematical modeling of the working process of a two-fuel engine [Osobennosti matematicheskogo modelirovaniia rabocheho protsessa dvukhtoplivnogo dvigatel'ia]. *Lokomotivy. Gazomotornoe toplivo (Problemy. Resheniia. Perspektivy). Materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Locomotives. Gas-engine fuel (Problems, Solutions, Prospects): Materials of the Intern. scientific-practical conference). Samara, 2016, 135 p.
5. Nosyrev D. Ia., Muratov A. V., Petukhov S. A. A theoretical model for calculating the intracylinder parameters of locomotive power plants using alternative fuels [Teoreticheskaiia model' rascheta vnutritsi-lindrovnykh parametrov lokomotivnykh energeticheskikh ustanovok pri ispol'zovanii al'ter-nativnykh vidov topliva]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of Transport of the Volga Region*, 2012, no. 5 (35), pp. 26 – 29.
6. Nosyrev D. Ia., Muratov A. V., Kurmanova L. S., Petukhov S. A. The use of natural gas in locomotive power plants [Primenenie prirodnogo gaza v lokomotivnykh energeticheskikh

ustanovkakh]. *Nauka i obrazovanie transport – Science and education in transport*. 2016, no. 1, pp. 51 – 54.

7. Nosyrev D. Ia., Muratov A. V., Kurmanova L. S., Petukhov S. A. Influence of the saturation of diesel fuel with methane on the operational performance of diesel locomotives [Vliianie nasyshcheniia di-zel'nogo topliva metanom na ekspluatatsionnye pokazateli teplovoznnykh dizelei]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of Transport of the Volga Region*, 2016, no. 6 (60), pp. 25 – 28.

8. Nosyrev D. Ia., Balakin A. Iu., Petukhov S. A., Kurmanova L. S. Evaluation of the influence of the ratio of carbon to hydrogen on the thermal properties of composite fuels for the operation of diesel locomotives [Otsenka vliianiia sootno-sheniia ugleroda k vodorodu na teplofizicheskie svoistva kompozitnykh topliv dlia raboty teplovoznnykh dizelei]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of Transport of the Volga Region*, 2016, no. 2 (56), pp. 33 – 38.

9. Nosyrev D. Ia., Muratov A. V., Kurmanova L. S., Petukhov S. A. An estimation of profitability of traction autonomous rolling stock at use of natural gas as motor fuel [Otsenka ekonomichnosti tiagovogo avtonomnogo podvizhnogo sostava pri ispol'zovanii prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of Transport of the Volga Region*, 2017, no. 2 (62), pp. 34 – 38.

10. Nosyrev D. Ia., Muratov A. V., Kurmanova L. S. Experimental assessment of the effect of natural gas on diesel locomotive diesel locomotives [Eksperimental'naia otsenka vliianiia prirodnogo gaza na rabotu dizelei teplovoznov]. *V sbornike: Ekspluatatsionnaia nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tiagi poezdov. Materialy tret'ei Vse-rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Operational reliability of locomotive fleet and increase of train traction efficiency: Materials All-Russian scientific-technical konferencia with intern. participation)*. Omsk, 2016, pp. 124 – 132.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Курманова Лейла Салимовна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2в, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Локомотивы», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 255-68-58.

E-mail: leyla_kurmanova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kurmanova Leila Salimovna

Samara State Transport University (SSTU).

2V, Svobody st., Samara, 443066, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (846) 255-68-58.

E-mail: leyla_kurmanova@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Курманова, Л. С. Повышение эффективности работы тепловозов путем применения газомоторного топлива [Текст] / Л. С. Курманова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 22 – 31.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kurmanova L. S. Operation efficiency improvement of heat transportation by applying gas-motor fuel. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 22 – 31. (In Russian).

УДК 629.4.015, 621.534, 621.752

А. И. Орленко¹, А. В. Елисеев², К. Ч. Вьонг²

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта, г. Красноярск;

²Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС

ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБЪЕКТА. ДИНАМИЧЕСКОЕ ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПО ДВУМ КООРДИНАТАМ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ

Аннотация. Рассматриваются новые динамические эффекты, возникающие в задачах вибрационной защиты объектов, в частности, транспортных при внешних возмущениях, со стороны опорных поверхностей. Пред-

ложен метод построения математических моделей для случая, когда объект защиты имеет две степени свободы. Показаны возможности введения дополнительных связей в виде устройств для преобразования движения. Оцениваются возможности использования винтовых несамотормозящихся механизмов, приведенные моменты инерции элементов которых могут регулироваться или настраиваться. Предлагается методика построения частотных диаграмм, отражающих возможные формы реализации динамических эффектов. Определены условия реализации новых физических эффектов в виде одновременного динамического гашения колебаний твердого тела одновременно по двум координатам при кинематическом возмущении системы. Приведены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: частотная диаграмма, режимы одновременного гашения колебаний, передаточные функции.

Alexey I. Orlenko¹, Andrey V. Eliseev², Kuang Chyk Vuong²

¹Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russian Federation,

²Scientific and Educational Center of Modern Technologies, the System Analysis and Modeling of Irkutsk State Railway Transport University, Irkutsk, Russian Federation

PARTICULARITIES OF VIBRATION CONDITION OF TRANSPORT OBJECT. DYNAMICAL DAMPING OF VIBRATION BY TWO COORDINATES: NEW APPROACHES

Abstract. The new dynamic effects, arising in problems of vibration protection of objects at external perturbations from the bearing surfaces, are considered. A method of constructing mathematical models for the vibration-protection system, in which protection of an object has two degrees of freedom, is developed. The possibilities of the introduction of additional ties in the form of devices for converting the movement are shown. The possibilities of using screw non self-locking mechanisms with nuts – flywheels, reduced moment of inertia may be regulated are estimated. The technique of constructing frequency chart, showing the possible forms of realization of the dynamic effects, is offered. The conditions of the realization of new physical effects in the form of simultaneous dynamic vibration damping of the solid at the same time by two coordinates at the kinematic system perturbation are determined. Results of numerical modeling are given.

Keywords: frequency diagram, regimes of simultaneous vibration damping, transfer functions.

В задачах динамики технологических машин и транспортных средств большое внимание уделяется вопросам вибрационных взаимодействий элементов механических колебательных систем (МКС) [1 – 4]. Эффекты динамического гашения колебаний широко используются в различных отраслях техники [5 – 7], что связано с изучением особенностей динамических свойств объектов, чаще всего выбираемых в виде массоинерционных элементов, динамическое состояние которых оценивается одной координатой.

Развитие теории и практики вибрационной защиты технических объектов характеризуются разработкой методов и средств оценки, контроля и управления движением механических колебательных систем, в составе которых используются различные механизмы и устройства для преобразования движения (УПД), существенно изменяющих спектр динамических свойств систем [8 – 10].

В работах, посвященных управляемым устройствам в составе МКС, используются сервоприводы, элементы пневмо-, гидро- и электроавтоматики [11 – 13]. При всей разработанности вопросов анализа и динамического синтеза МКС в меньшей степени, получили развитие методы структурного математического моделирования, ориентированные на использование аналитического аппарата теории автоматического управления. Основные положения структурного математического моделирования приводятся в работах [14, 15].

В предлагаемой статье развивается методологическая основа построения математических моделей для виброзащитных систем с объектом защиты в виде твердого тела, совершающего плоское движение при действии кинематического возмущения с учетом возможностей реализации режимов динамического гашения колебаний одновременно по двум координатам.

I. Некоторые общие положения. Постановка задачи исследования. Рассматривается расчетная схема транспортного объекта, подверженного действию вибраций со стороны опорной поверхности (рисунок 1). Объект в виде твердого тела с массой M и моментом инерции J опирается на упругие элементы с жесткостями k_1 и k_2 с установленными параллельно устрой-

ствами для преобразования движения, имеющими приведенные массы L_1 и L_2 соответственно [7, 15].

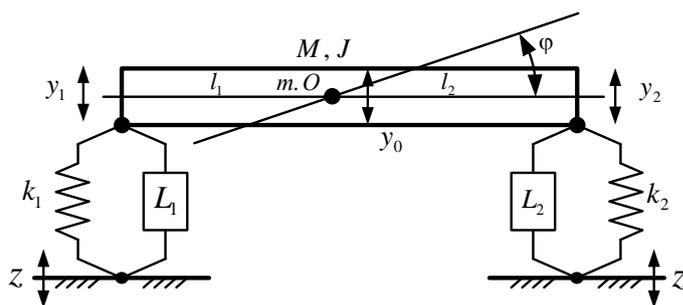


Рисунок 1 – Принципиальная схема виброзащитной платформы в виде твердого тела с упруго-инерционными опорами при кинематическом возмущении $z(t)$

Рассматриваемая система обладает линейными свойствами и совершает малые колебания относительно положения статического равновесия. Положение центра тяжести (т. О) определяется длинами плеч l_1 и l_2 . Используется система координат y_1 и y_2 , связанная с неподвижным базисом. Силы трения в системе не учитываются, внешнее воздействие $z(t)$ является гармонической функцией.

Для получения математической модели на основе использования уравнений Лагранжа 2-го рода определяются выражения для кинетической и потенциальной энергии:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} L_1 (\dot{y}_1 - \dot{z})^2 + \frac{1}{2} L_2 (\dot{y}_2 - \dot{z})^2; \quad (1)$$

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

Для проведения соответствующих расчетов принимаются во внимание следующие соотношения:

$$y_0 = ay_1 + by_2, \quad \phi = c(y_2 - y_1), \quad y_1 = y_0 - l_1 \phi, \quad y_2 = y_0 + l_2 \phi; \quad (3)$$

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

Используя выражения (1) – (3), получим на основе известных приемов математическую модель в виде системы двух линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. После преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях эти уравнения в операторной форме приобретают вид:

$$\bar{y}_1 [(Ma^2 + Jc^2 + L_1)p^2 + k_1] + \bar{y}_2 (Mab - Jc^2)p^2 = \bar{z} (L_1 p^2 + k_1); \quad (4)$$

$$\bar{y}_2 [(Mb^2 + Jc^2 + L_2)p^2 + k_2] + \bar{y}_1 (Mab - Jc^2)p^2 = \bar{z} (L_2 p^2 + k_2), \quad (5)$$

где $p = j\omega$ – комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$); значок « \leftrightarrow » соответствует изображению переменной по Лапласу [11, 15].

На основе уравнений (4), (5) может быть построена структурная математическая модель, как показано на рисунке 2; система имеет внешнее возмущение одновременно на входах двух парциальных систем.

Используя структурную схему, приведенную на рисунке 2, запишем передаточные функции системы:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}} = \frac{(L_1 p^2 + k_1)[(Mb^2 + Jc^2 + L_2)p^2 + k_2] + (L_2 p^2 + k_2)(Jc^2 - Mab)p^2}{A_0(p)}; \quad (6)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}} = \frac{(L_2 p^2 + k_2)[(Ma^2 + Jc^2 + L_1)p^2 + k_1] + (L_1 p^2 + k_1)(Jc^2 - Mab)p^2}{A_0(p)}, \quad (7)$$

где

$$A_0(p) = [(Ma^2 + Jc^2 + L_1)p^2 + k_1] \cdot [(Mb^2 + Jc^2 + L_2)p^2 + k_2] - [(Jc^2 - Mab)p^2]^2 - \quad (8)$$

характеристическое частотное уравнение.

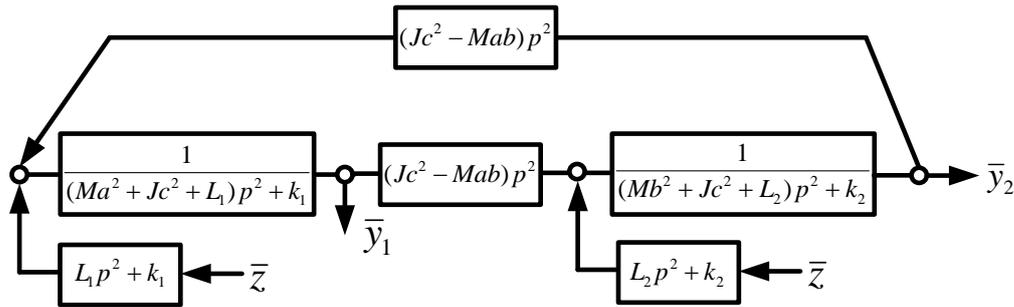


Рисунок 2 – Структурная математическая модель системы по рисунку 1 в виде структурной схемы эквивалентной (в динамическом отношении) системы автоматического управления

Отметим, что \bar{y}_1 и \bar{y}_2 могут принимать нулевые значения при выполнении условия

$$\omega_{\text{дин1}}^2 = \frac{k_1}{L_1} = \omega_{\text{дин2}}^2 = \frac{k_2}{L_2}. \quad (9)$$

На частоте, определяемой соотношением $k_1 L_2 = k_2 L_1$, возможно одновременное «обнуление» координат y_1 и y_2 , которое может рассматриваться как режим динамического гашения колебаний объекта защиты одновременно по двум координатам y_1 и y_2 при кинематическом возмущении со стороны опорной поверхности. Однако такие режимы обладают недостатками, связанными с нежелательными эффектами узости частотного диапазона настройки и проявлениями неустойчивости; по существу входные воздействия на определенных частотах «блокируются», но объект не обладает потенциальной возможностью колебаний относительно положения статического равновесия.

Задача исследования заключается в изучении возможностей формирования режимов динамического гашения колебаний объекта одновременно по двум координатам, используя для настройки параметров динамического состояния объекта данные о доступных формах целенаправленного изменения соотношений параметров систем.

II. Построение математических моделей взаимодействий. Используя соотношения (9), принимая, что $\frac{L_2}{L_1} = \alpha$, запишем передаточные функции (6), (7) в виде:

$$W_1'(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}} = \frac{(L_1 p^2 + k_1)[(Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1)p^2 + k_2] + (\alpha L_1 p^2 + k_2)(Jc^2 - Mab)p^2}{A_0(p)}; \quad (10)$$

$$W_2'(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}} = \frac{(\alpha L_1 p^2 + k_2)[(Ma^2 + Jc^2 + L_1)p^2 + k_1] + (L_1 p^2 + k_1)(Jc^2 - Mab)p^2}{A_0(p)}, \quad (11)$$

где

$$A_0'(p) = [(Ma^2 + Jc^2 + L_1)p^2 + k_1] \cdot [(Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1)p^2 + k_2] - [(Jc^2 - Mab)p^2]^2. \quad (12)$$

Отметим, что при построении передаточных функций системы учитывается одновременная передача воздействий на оба входа системы, при этом α рассматривается как регулируемый коэффициент связности параметров приведенных масс УПД.

Парциальные частоты системы определяются выражениями соответственно:

$$n_1^2 = \frac{k_1}{Ma^2 + Jc^2 + L_1}; \quad (13)$$

$$n_2^2 = \frac{k_2}{Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1}. \quad (14)$$

Отметим, что парциальная частота n_1^2 не зависит от α .

В рассматриваемой МКС (рисунок 1) возможно возникновение режимов динамического гашения колебаний по двум координатам, что определяется возможностями «обнуления» числителей передаточных функций (10), (11).

1. Для координаты \bar{y}_1 можно записать следующее уравнение для нахождения частот динамического гашения колебаний при кинематическом возмущении \bar{z} :

$$p^4 L_1 [Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1 + \alpha(Jc^2 - Mab)] + p^2 [k_1 (Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1) + k_2 (L_1 + Jc^2 - Mab) + k_1 k_2] = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) можно привести к форме биквадратного уравнения, полагая, что $p^2 = -\omega^2 = -\gamma$, тогда (15) примет вид:

$$\gamma^2 \cdot R_1 - \gamma \cdot R_2 + R_3 = 0, \quad (16)$$

где $R_1 = L_1 [Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1 + \alpha(Jc^2 - Mab)]$, $R_2 = k_1 (Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1) + k_2 (L_1 + Jc^2 - Mab)$, $R_3 = k_1 k_2$.

Решение уравнения (15) при определенном наборе параметров системы может иметь два вещественных положительных корня:

$$\gamma_{1,2} = \frac{1}{2} \frac{R_2}{R_1} \pm \sqrt{\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - \frac{1}{4} \frac{R_3}{R_1}}. \quad (17)$$

2. В свою очередь по координате \bar{y}_2 получим, что

$$p^4 L_1 [\alpha Ma^2 + Jc^2 + L_1] + Jc^2 - Mab + p^2 [k_2 (Ma^2 + Jc^2 + L_1) + k_1 (\alpha L_1 + Jc^2 - Mab) + k_1 k_2] = 0 \quad (18)$$

или

$$R'_1 \gamma^2 - R'_2 \gamma + R'_3 = 0, \quad (19)$$

где $R'_1 = L_1 [\alpha (Ma^2 + Jc^2 + L_1) + Jc^2 - Mab]$, $R'_2 = k_2 (Ma^2 + Jc^2 + L_1) + k_1 (\alpha L_1 + Jc^2 - Mab)$, $R'_3 = k_1 k_2$.

3. Введение коэффициента связности α между параметрами L_1 и L_2 изменяет передаточные функции (6), (7) и значения частот динамического гашения колебаний, определяемых уравнениями (16) и (19). При этом изменяется также характеристическое частотное уравнение, т. е. изменяются соответствующим образом и частоты собственных колебаний.

4. С учетом коэффициента связности α составим, используя выражения (15) и (18), уравнение для определения частот динамического гашения $\omega_{1\text{дин}}^2$, $\omega_{2\text{дин}}^2$.

Частоты собственных колебаний $\omega_{1\text{соб}}$, $\omega_{2\text{соб}}$ могут быть найдены из решения характеристического уравнения (12), которое может быть представлено в виде:

$$p^4[(Ma^2 + Jc^2 + L_1)(Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1) - (Jc^2 - Mab)^2] + p^2[k_2(Ma^2 + Jc^2 + L_1) + k_1(Mb^2 + Jc^2 + \alpha L_1)] + k_1k_2 = 0. \quad (20)$$

Отметим, что частоты собственных колебаний в данном случае будут зависеть от коэффициента связности α .

III. Сравнительный анализ динамических свойств в режимах динамического гашения колебаний. При кинематическом возмущении исходной системы (см. рисунок 1), как показано на структурной схеме, приведенной на рисунке 2, внешнее возмущение распределяется одновременно по двум входам. Использование принципа суперпозиции приводит к изменению вида передаточных функций по сравнению с обычными подходами, когда возмущение происходит только по одному входу.

1. При действии одного внешнего возмущения в системе с двумя степенями свободы числитель передаточной функции по координате приложения силы формируется на основе параметров соответствующей парциальной системы. По другой координате числитель передаточной функции создается за счет параметров звена, реализующего межпарциальные связи, что в целом зависит от выбора системы координат. В обычной ситуации МКС, представленная на рисунке 1, в координатах y_1, y_2 при силовом возмущении по координате y_1 будет иметь один режим динамического гашения колебаний на частоте, определяемой выражением

$$n_1^2 = \frac{k_1}{Ma^2 + Jc^2 + L_1}. \quad (21)$$

По второй координате y_2 при силовом возмущении режим динамического гашения колебаний не предполагается, но в силу специфики передаточной функции звена межпарциальной связи с передаточной функцией

$$W_{00}(p) = (Jc^2 - Mab)p^2. \quad (22)$$

Координата y_2 может приобрести нулевые значения при выполнении условия $Jc^2 = Mab$. Однако при этом структура исходной системы изменяется, что делает постановку задачи поиска режима динамического гашения колебаний некорректной.

Таким образом, при возмущении по одному входу система имеет, в общем случае, только один режим динамического гашения колебаний. При этом частота динамического гашения совпадает с парциальной частотой системы, в которую не входит точка приложения силы.

2. При двух силовых возмущениях числитель передаточной функции представляется собой сумму из двух компонент, каждая из которых имеет свои параметры гармонического процесса. В этом случае простые формы анализа ситуации возможны лишь при совпадении частот внешних сил и простых зависимостях между амплитудами и фазами движения по отдельным координатам. Важным для последующих исследований является то обстоятельство, что учет совместного действия двух внешних факторов изменяет структуру числителя передаточной функции и ее знаменателя.

В этом случае понятие динамического гашения колебаний обобщается до представлений о том, что режим динамического гашения колебаний определяет такие формы динамического взаимодействия элементов МКС, при которых числители двух передаточных функций системы становятся равными нулю. В таких представлениях система приобретает, в том числе, и возможности реализации режимов динамического гашения колебаний одновременно по двум координатам.

Используя формулы для определения частот парциальных и собственных колебаний, а также частот динамического гашения колебаний, можно построить частотную диаграмму, которая отражает особенности динамических взаимодействий исходной МКС, что показано на рисунке 3.

3. Для конкретизации представлений решалась модельная задача с параметрами $M = 10$ кг; $J = 5$ кгм²; $a = 0,4$ м; $b = 0,6$ м; $c = 1$; $k_1 = 5000$ Н/м; $k_2 = 10000$ Н/м; $L_1 = 10$ кг; $L_2 = \alpha L_1$.

На диаграмме (см. рисунок 3) сплошной линией (—) обозначены графики зависимости $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$, для построения графика $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ используется числитель передаточной функции (10). Значения частот $\omega_{1\text{дин}}^2$ зависят от коэффициента связности α . Поскольку частота динамического гашения колебаний по координате y_1 определяется из биквадратного частотного уравнения, то график $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ представлен на диаграмме (см. рисунок 3) двумя фрагментами (или ветвями): нижняя ветвь графика $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ соответствует низкочастотным формам движения. В свою очередь график зависимости частоты динамического гашения колебаний $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$ по координате y_1 определяется из частотного уравнения, формируемого числителем передаточной функции (11). На диаграмме (см. рисунок 3) обе ветви графика $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$ обозначены штриховой линией (- - -).

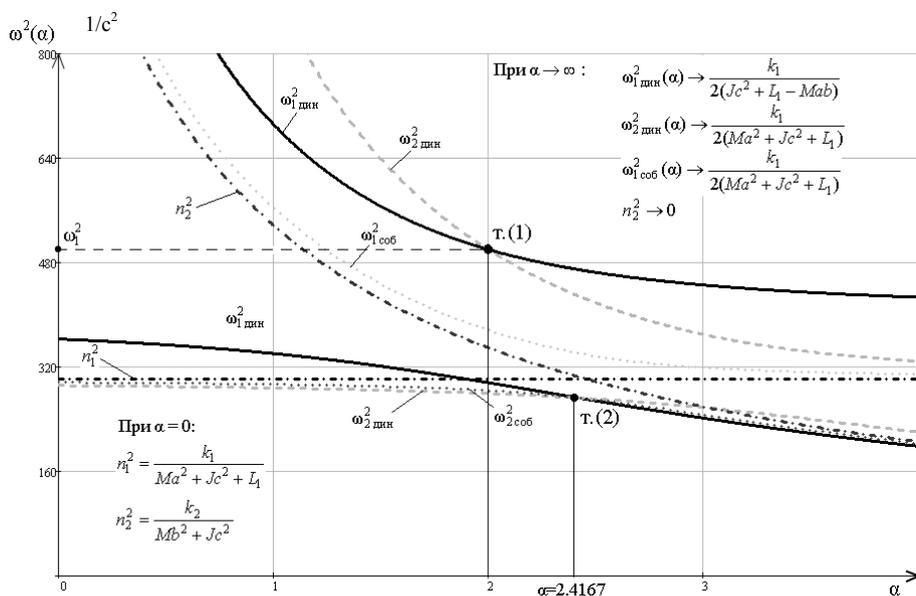


Рисунок 3 – Диаграмма режимов динамических взаимодействий ($L_1, L_2 = \alpha L_1$): обозначение зависимостей $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$, $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$, $\omega_{1\text{соб}}^2(\alpha)$, $\omega_{2\text{соб}}^2(\alpha)$, $n_1^2(\alpha)$ и $n_2^2(\alpha)$ приведены в тексте

4. В рассматриваемом случае парциальные частоты системы, определяемые выражениями (13), (14), также представлены на рисунке 3 графиками $n_1^2(\alpha)$, $n_2^2(\alpha)$ и обозначены штрихпунктирными линиями (- · - · -). График зависимости $n_1^2(\alpha)$ является прямой линией, параллельной оси абсцисс, так как n_1 , как это следует из уравнения (13), не зависит от α . Графики зависимостей $\omega_{1\text{соб}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{соб}}^2(\alpha)$ могут быть построены на основе использования частотного характеристического уравнения (12). На рисунке 3 графики $\omega_{1\text{соб}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{соб}}^2(\alpha)$ обозначены точечными линиями (· · · ·).

Характерными особенностями диаграммы являются точки (1) и (2), которые расположены на пересечениях графиков $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$. В точке (1) пересечение определяет значение коэффициента связности α , обеспечивающее одновременное динамическое гашение колебаний по двум координатам y_1 и y_2 (частота ω_1^2 на оси ординат).

Точка (2) также соответствует пересечению графиков $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$, однако в этой точке происходит также и пересечение с графиком $\omega_{2\text{соб}}^2(\alpha)$, что в физическом смысле соответствует проявлению неустойчивых форм колебательных движений элементов системы.

5. На графиках зависимостей $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$ имеют предельные значения при $\alpha \rightarrow \infty$; в частности, для графика $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$ имеем:

$$\omega_{1\text{дин}}^2_{\alpha \rightarrow \infty} = \frac{k_1}{2(Jc^2 + L_1 - Mab)}; \quad (23)$$

$$\omega_{2\text{дин}}^2_{\alpha \rightarrow \infty} = \frac{k_1}{2(Ma^2 + Jc^2 + L_1)}. \quad (24)$$

При $\alpha = 0$ значения соответствующих частот динамического гашения колебаний определяются из биквадратных частотных уравнений, формируемых при нулевых значениях числителей передаточных функций (6), (7). Соответственно частоты собственных колебаний также стремятся к предельным значениям при $\alpha = 0$ и $\alpha \rightarrow \infty$, что определяется величинами

$$\omega_{1\text{соб}}^2_{\alpha=0} = \omega_{10\text{соб}}^2; \quad (25)$$

$$\omega_{2\text{соб}}^2_{\alpha=0} = \omega_{20\text{соб}}^2, \quad (26)$$

где ω_{10} , ω_{20} – частоты собственных колебаний, определяемых из частотного характеристического уравнения (8).

При $\alpha \rightarrow \infty$ из частотного характеристического уравнения (12) следует, что низшая частота собственных колебаний будет стремиться к нулю; при этом $\omega_{1\text{соб}}^2$ при $\alpha \rightarrow \infty$ будет стремиться к предельному значению

$$\omega_{1\text{соб}}^2_{\alpha \rightarrow \infty} = \frac{k_1}{Ma^2 + Jc^2 + L_1}, \quad (27)$$

что совпадает со значением парциальной частоты n_1^2 , определяемой из выражения (13). Парциальная частота n_2^2 при $\alpha = 0$ имеет значение

$$n_{2\alpha=0}^2 = \frac{k_2}{Mb^2 + Jc^2}, \quad (28)$$

а при $\alpha \rightarrow \infty$ парциальная частота n_2 стремится к нулевому значению.

IV. Особенности динамических характеристик.

1. На рисунке 4 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для частоты, соответствующей точке (1), в которой реализуется режим одновременного динамического гашения колебаний по двум координатам. Сплошной линией (—) обозначен график зависимости $\frac{\bar{y}_1}{\bar{z}}(\omega)$; точечной линией (· · · ·) обозначен график зависимости (или амплитудно-частотная характеристика) $\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}}(\omega)$. Пересечение обоих графиков обозначено как точка (1). Эта точка находится на оси абсцисс и определяет соответствующую частоту динамического гашения колебаний $\omega_{12\text{дин}}$. При нулевых значениях частот

$$\frac{\bar{y}_1}{\bar{z}}_{\omega=0} = 1; \quad (29)$$

$$\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}} = 1. \quad (30)$$

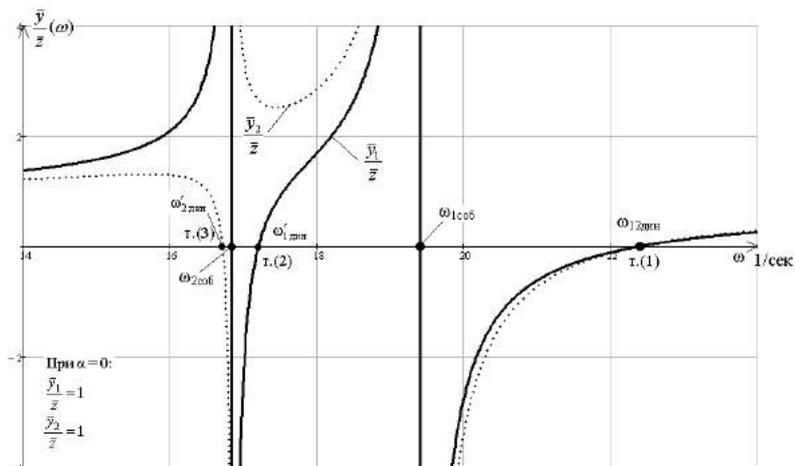


Рисунок 4 – Графики зависимостей $\frac{\bar{y}_1}{\bar{z}}(\omega)$ и $\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}}(\omega)$ при условиях одновременного гашения колебаний по координатам \bar{y}_1 и \bar{y}_2

При увеличении частоты внешнего возмущения амплитудно-частотные характеристики стремятся к предельным значениям:

$$\frac{\bar{y}_1}{\bar{z}} = \frac{L_1(Mb^2 + 2L_1 + 3Jc^2 - 2Mab)}{(Ma^2 + Jc^2 + L_1)(Mb^2 + Jc^2 + 2L_1) - (Jc^2 - Mab)^2}; \quad (31)$$

$$\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}} = \frac{L_1(2Ma^2 + 2L_1 + 3Jc^2 - Mab)}{(Ma^2 + Jc^2 + L_1)(Mb^2 + Jc^2 + 2L_1) - (Jc^2 - Mab)^2}. \quad (32)$$

Отметим, что кроме режима динамического гашения колебаний одновременно по двум координатам y_1 и y_2 , возможны локальные режимы динамического гашения колебаний по координате y_1 (частота определяется положением точки (2) (см. рисунок 4)). Что касается АЧХ $\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}}(\omega)$, то частота локального динамического гашения колебаний определяется точкой (3) на оси абсцисс (см. рисунок 4). Расположение точек (2) и (3) таково, что выполняются условия

$$\omega'_{2\text{дин}} < \omega_{2\text{соб}} < \omega'_{1\text{дин}} < \omega_{1\text{соб}}. \quad (33)$$

2. Для точки (2) на частотной диаграмме (см. рисунок 3) амплитудно-частотная характеристика системы принимает вид, соответствующий вырожденной амплитудно-частотной характеристике системы с одной степенью свободы, как показано на рисунке 5.

Вырожденный характер АЧХ заключается в совпадении частот одновременного динамического гашения колебаний по координатам y_1 и y_2 и частоты собственных колебаний $\omega_{2\text{соб}}$ в точке (2) на частотной диаграмме, приведенной на рисунке 3. Что касается характерных точек на АЧХ, приведенных на рисунке 5 (точки (1), (2), (3)), то их реализуемость должна быть подтверждена экспериментально так же, как и предельные значения АЧХ при $\omega = 0$ и $\omega \rightarrow \infty$. Отметим, что существенное влияние на формы проявления рассмотренных динамических эффектов будет иметь учет сил сопротивления, влияющих на ограничение резонансных режимов так же, как и на режимы динамического гашения колебаний.

На основе проведенных исследований показаны возможности изменения динамических свойств механических колебательных систем с двумя степенями свободы при кинематических возмущениях. Показано, что при введении в систему дополнительных связей, создаваемых устройствами для преобразования движения, возможно формирование режимов динамического гашения колебаний одновременно по двум координатам. Такие эффекты технически вполне реализуемы при соблюдении соотношений между приведенными массами устройств для преобразования движения. В связи с этим предлагается введение соответствующего коэффициента связности параметров.

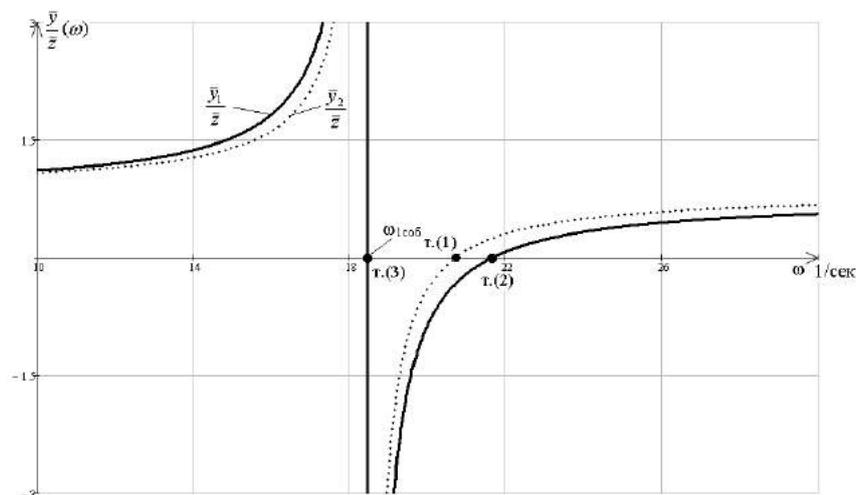


Рисунок 5 – Графики зависимостей $\frac{\bar{y}_1}{z}(\omega)$ и $\frac{\bar{y}_2}{z}(\omega)$ при одновременном совпадении $\omega_{1\text{дин}}^2(\alpha)$ и $\omega_{2\text{дин}}^2(\alpha)$ с частотой собственных колебаний системы $\omega_{2\text{соб}}^2(\alpha)$

Технически такие возможности могут быть реализованы с помощью специальных механизмов, управляемых на основе измерения текущих параметров динамического состояния объекта защиты от вибрации.

Авторами предлагается метод построения математических моделей системы, основанный на использовании передаточных функций системы. Предлагаемый аналитический аппарат опирается на метод структурного моделирования, в рамках которого механической колебательной системе сопоставляется эквивалентная в динамическом отношении структурная схема системы автоматического управления.

Список литературы

1. Harris C. M. Shock and Vibration Handbook / C. M. Harris, A. G. Piersol. – New York : McGraw – Hill Book Co, 2002. – 1457 p.
2. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of vibration protection. Switzerland: Springer, 2016. 708 p.
3. De Silva C.W. Vibration. Fundamentals and Practice / Clarence W. de Silva. – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. – 957 p.
4. Белокобыльский, С. В. Прикладные задачи структурной теории виброзащитных систем / С. В. Белокобыльский, С. В. Елисеев, В. Б. Кашуба. – СПб: Политехника, 2013. – 363 с.
5. Елисеев, С. В. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко. – Новосибирск: Наука, 2014. – 357 с.
6. Коловский, М. З. Автоматическое управление виброзащитными системами / М. З. Коловский. – М.: Наука, 1976. – 320 с.
7. Eliseev S.V. Dynamics of mechanical systems with additional ties / S. V. Eliseev, A. V. Lukyanov, Yu. N. Reznik, A. P. Khomenko. – Irkutsk: Irkutsk State University, 2006. – 315 p.

8. Афанасьев, М. Я. Концепция адаптивной платформы технологического оборудования / М. Я. Афанасьев, А. А. Грибовский // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – № 4 (58). – С. 268 – 272.
9. Елисеев, С. В. Управление колебаниями роботов / С. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, А. В. Лукьянов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 320 с.
10. Елисеев, С. В. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко. – Новосибирск: Наука, 2011. – 384 с.
11. Елисеев, С. В. Активные виброзащитные системы. Вопросы управляемости и наблюдаемости / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко, Ю. Н. Резник / Сб. науч. тр. Сер. «Серия машиностроения, строительство». – Полтава. – 2009. – С. 98 – 109.
12. Кузнецов Н. К. Динамика управляемых машин с дополнительными связями / Н. К. Кузнецов / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2009. – 290 с.
13. Черноусько, Ф. Л. Управление колебаниями / Ф. Л. Черноусько, Л. Д. Акуленко, Б. Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
14. Хоменко, А. П. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев, Ю. В. Ермошенко / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2012. – 288 с.
15. Елисеев, С. В. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем / С. В. Елисеев, А. И. Артюнин. – Новосибирск: Наука, 2016. – 459 с.

References

1. Harris C. M., Piersol A. G. Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw – Hill Book Co, 2002. – 1457 p.
2. Karnovsky I. A., Lebed E. Theory of vibration protection. Switzerland: Springer, 2016. 708 p.
3. De Silva C.W. Vibration. Fundamentals and Practice / Clarence W. de Silva. – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. – 957 p.
4. Belokobyilski S. V., Eliseev S. V., Kashuba V. B. *Prikladnyie zadachi strukturnoi teorii vibrozashitnyikh system* (Applied problems of the structural theory of vibration protection systems). Sankt-Peterburg: Politekhnik, 2013, 363 p.
5. Eliseev S. V., Khomenko A. P. *Dinamicheskoe gashenie kolebaniy: kontseptsia obratnoi svyazi i strukturnyie metodyi matematicheskovo modelirovaniya* (Dynamic damping of oscillations: the concept of feedback and structural methods of mathematical modeling). Novosibirsk: Nauka, 2014, 357 p.
6. Kolovskii M. Z. *Avtomaticheskoe upravlenie vibrozashitnyimi systemami* (Automatic control of vibration protection systems). M.: Nauka, 1976, 320 p.
7. Eliseev S. V., Lukyanov A.V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. Dynamics of mechanical systems with additional ties. Irkutsk: Irkutsk State University, 2006, 315 p.
8. Afanasiev M. Ya., Gribovskii A. A. The concept of the adaptive platform of technological equipment [Kontseptsia adaptivnoi platformy tekhnologicheskovo oborudovaniya]. Izvestiya vuzov. Priborostroenie. – Izvestiya Vuzov. Instrument making, 2015, no. 4 (58), pp. 268 – 272.
9. Eliseev S. V., Kuznhetsov N. K., Lukyanov A. V. *Upravlenie kolebanyami robotov* (Controlling the oscillations of robots). Novosibirsk: Nauka, 1990, 320 p.
10. Eliseev S. V., Reznikh Yu. N., Khomenko A. P. *Mekhatronnyie podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatelnyikh system* (Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical oscillation systems). Novosibirsk: Nauka, 2011, 384 p.
11. Eliseev S. V., Khomenko A. P., Reznikh Yu. N. Active vibration protection systems. Questions of controllability and observability [Aktivnyie vibrozashitnyie systemy. Voprosy upravlyaemosti i nablyudaemosti] *Sbornikh nauchnykh trudov seriya «Seria mashinostroeniya, stroitelstvo»* (Collection of scientific papers. Series «Machine building series, construction»), 2009, pp. 98 – 109.
12. Kuznhetsov N. K. *Dinamika upravlyaemykh mashin s dopolnitelnyimi svyazami* (The dynamics of controlled machines with additional constraints). Irkutsk: IrGTU, 2009, 290 p.

13. Chernousko F. L., Akulenko L. D., Sokolov B. N. *Upravlenie kolebanyami* (Control of oscillations). Moscow: Nauka, 1980, 384 p.

14. Khomenko A. P., Eliseev S. V., Ermoshenko Yu.V. *Systemnyi analiz i matematicheskoe modelirovanie v mekhatronike vibrozashitnyikh system* (System analysis and mathematical modeling in mechatronics of vibration protection systems). Irkutsk: IrGUPS, 2012, 288 p.

15. Eliseev S. V., Artyunin A. I. *Prikladnaya teoriya kolebanii v zadachakh dinamiki lineinykh mekhanicheskikh system* (Applied theory of oscillations in problems of the dynamics of linear mechanical systems). Novosibirsk: Nauka, 2016, 459 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Орленко Алексей Иванович

Красноярский институт железнодорожного транспорта.

Ладо Кецовели ул., д. 89, Красноярск, 660028, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, директор Красноярского института железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения.

Тел.: +7(3912) 482077.

E-mail: orlenko_ai@krsk.irgups.ru

Елисеев Андрей Владимирович

Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС.

Чернышевского ул., д. 15, Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС.

E-mail: eavsh@yandex.ru

Вьонг Куанг Чык

Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС.

Чернышевского ул., д. 15, Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования ИрГУПС.

E-mail: trucvq1990@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Орленко, А. И. Особенности вибрационного состояния транспортного объекта. динамическое гашение колебаний по двум координатам: новые подходы [Текст] / А. И. Орленко, А. В. Елисеев, К. Ч. Вьонг // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 31 – 42.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Orlenko Alexey Ivanovich

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport.

660028, Krasnoyarsk, Lado Ketskhoveri St. 89.

Candidate of Technical Sciences, associate professor, director of Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - the branch of Irkutsk State Transport University (KriZhT IRGUPS).

Тел.: +7(3912) 482077.

E-mail: orlenko_ai@krsk.irgups.ru

Yeliseyev Andrey Vladimirovich

Scientific and Educational Center of Modern Technologies, the System Analysis and Modeling of Irkutsk State Railway Transport University.

664074, Irkutsk, Chernyshevsky St. 15.

Candidate of Technical Sciences, senior research associate of the Scientific and Educational Center of Modern Technologies, System Analysis and Modeling of Irkutsk State Transport University.

E-mail: eavsh@yandex.ru

Vyong Kuang Chyk

Scientific and Educational Center of Modern Technologies, the System Analysis and Modeling of Irkutsk State Railway Transport University.

664074, Irkutsk, Chernyshevsky St. 15.

Graduate student of the Scientific and Educational Center of Modern Technologies, System Analysis and Modeling of Irkutsk State Transport University.

E-mail: trucvq1990@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Orlenko A. I., Eliseev A. V., Vuong Q. T. Particularities of vibration condition of transport object. dynamical damping of vibration by two coordinates: new approaches. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 31 – 42. (In Russian).

УДК 621.423.1

А. В. Плаксин¹, С. В. Швецов²

¹Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация;

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РАВНИННЫХ УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Расход электроэнергии на тягу зависит от большого числа эксплуатационных показателей, в том числе и от использования мощности электроподвижного состава. На российских железных дорогах имеются равнинные участки большой протяженности, на которых эксплуатируемые электровозы нерационально используют свою мощность и работают в режимах с низкими энергетическими показателями.

Цель работы – рассмотреть пути повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов, такие как эксплуатация электроподвижного состава с рациональными значениями мощности и числа осей для обеспечения современных пассажирских перевозок на равнинных участках пути большой протяженности и оценить их энергетические показатели.

Для достижения указанной цели было определено рациональное значение мощности, необходимой для вождения поездов на рассматриваемом участке пути с максимальными скоростями движения 160 км/ч, проведены расчеты асинхронных тяговых двигателей, получены тягово-энергетические характеристики электровозов с асинхронным тяговым приводом, и предложена методика сравнения, позволяющая оценить разницу расхода электроэнергии на тягу электровозов с асинхронным тяговым приводом (с рациональными значениями мощности и числа осей) с эксплуатируемыми в настоящее время электровозами постоянного тока ЭП2К.

На основании проведенного исследования был сделан вывод о том, что имеются резервы повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов на равнинных участках пути большой протяженности, такие как эксплуатация электроподвижного состава с рациональными значениями мощности и числа осей, соответствующих массе поезда, скорости движения и профилю пути, которые позволят значительно снизить расходы электроэнергии на тягу поездов.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, тяга поездов, пассажирский электровоз, постоянный ток, энергетические показатели, рациональное значение мощности, асинхронный тяговый двигатель.

Alexey V. Plaksin¹, Semen V. Shvetsov²

¹The West Siberian railway – branch of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, Russian Federation;

²Omsk state transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

WAYS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY PASSENGER LOCOMOTIVES WHEN OPERATING ON THE PLAINS RAILWAYS

Abstract. Electricity consumption for traction depends on a number of operational parameters, including the use of power of electric rolling stock. On Russian Railways there are flat areas of great extent, which operated the locomotives inefficient use of power and work modes with low energy performance. The aim of this work is to examine ways to improve the energy efficiency of passenger locomotives, such as the operation of electric rolling stock with rational values of power and number of axes for the modern passenger transport on the flat sections of the road long-haul and assess their energy performance.

To achieve this goal was determined by the rational value of the power required for driving trains on this stretch of track with maximum speeds of 160 km/h, the calculations of the asynchronous traction motors obtained traction and power characteristics of electric locomotives with asynchronous traction drive, and a proposed comparison methodology, allowing to evaluate the difference of power consumption for traction of electric locomotives with asynchronous traction drive (with rational values of power and number of axes) currently operating a DC electric locomotive EP2K.

On the basis of the conducted research it was concluded that there are reserves for improvement of energy efficiency of passenger locomotives on the flat sections of the road long-haul, such as operation of electric rolling stock with rational values of power and number of axes corresponding to the train weight, speed and track profile, which will significantly reduce the cost of electricity for traction of trains.

Keywords: energy efficiency, pull trains, passenger electric locomotives, direct current, energy performance, sustainable value of the power asynchronous traction motor.

Энергосбережение относится к основным проблемам жизнеобеспечения во многих странах. Железнодорожный транспорт, и в первую очередь электрифицированный, является одним из крупных потребителей электроэнергии.

За последние годы уже многое сделано в области рационального использования электроэнергии на тягу поездов. Свидетельством тому является постоянное снижение удельного расхода электроэнергии – одного из основных показателей экономичности работы электрических железных дорог. Однако не все резервы экономии электрической энергии еще использованы, что подтверждается на примере пассажирских электровозов, эксплуатируемых на равнинных участках пути. В источнике [1] показано, что на равнинном участке Новосибирск – Омск электровозы ЭП2К нерационально используют свою мощность и работают в режимах с низкой нагрузкой – среднее значение развиваемой локомотивом мощности составляет менее 20 % от их номинального (часового) значения.

Необходимо отметить, что нерациональное использование мощности пассажирскими электровозами происходит на протяжении нескольких десятков лет. Анализ отчетных данных о работе локомотивов за 1973 г. [2] показывает, что мощность, потребляемая пассажирскими электровозами за время движения, была весьма далека от их номинального значения и находилась в пределах 13 – 16 %, в связи с чем эксплуатационная мощность пассажирских электровозов на протяжении нескольких десятков лет была и остается значительно ниже их номинального значения. В результате этого большинство электровозов работает с низкими энергетическими показателями, а расход электроэнергии на тягу пассажирских поездов имеет завышенное значение в сравнении с тем, которое могло бы быть, если бы электровозы обладали меньшей мощностью.

Для повышения энергетической эффективности электроподвижного состава (ЭПС) при его эксплуатации в режимах с низкой загруженностью применяют способ регулирования мощности. На пассажирском ЭПС он используется на электровозах ЧС7, оборудованных системой оперативного регулирования мощности, о возможном его применении на электровозах ЭП2К и ЭП20 указано в работах [1, 3]. Однако способ регулирования мощности, является вынужденной мерой. Большого снижения расхода энергии, на наш взгляд, можно добиться при эксплуатации ЭПС с мощностью и числом осей, соответствующим массе поезда, скорости движения и профилю пути.

В связи с тем, что на российских железных дорогах имеются равнинные участки большой протяженности, определим рациональное по тягово-энергетическим показателям значение мощности электровозов при осуществлении пассажирских перевозок на равнинных участках пути. В качестве примера рассмотрим участок Новосибирск – Челябинск протяженностью 1400 км, профиль пути на котором преимущественно равнинный.

Выбор мощности пассажирских электровозов рассматривается в ряде работ [4, 5], где показано, что значение мощности зависит от ряда параметров, основными из которых являются максимальная скорость движения, масса поезда, пусковая скорость и сила тяги, определяющие величину ускорения поезда в период разгона. Если сравнить среднюю участковую и среднюю техническую скорости пассажирских электровозов ЭП2К на участке Новосибирск – Барабинск – Омск [1], то отличие скоростей составит не более 2,6 %, что указывает на малое количество остановок пассажирских электровозов на данном участке. Кроме того, имеются поезда, которые без остановок проходят расстояние в 300 км (например, поезда «Москва – Пекин» и «Москва – Владивосток»). Поэтому основными параметрами при выборе мощности для данного участка, на наш взгляд, являются максимальная скорость движения по участку и масса поезда.

Для определения рационального значения мощности, необходимой для вождения пассажирских поездов на равнинных участках пути, были определены расчетные зависимости силы тяги и мощности в зависимости от заданных значений максимальной скорости движения и массы поезда [4].

Расчетные значения силы тяги на ободу колес электровоза были определены так [4]:

$$F_{\text{кр}} = 9,81 \cdot m_{\text{л}} \cdot (w_0' + w_i) + 9,81 \cdot m_{\text{в}} \cdot (w_0'' + w_{\text{пр}} + w_i), \quad (1)$$

где $m_{\text{л}}$ и $m_{\text{в}}$ – массы локомотива и вагонов;

w'_0 и w''_0 – основные удельные сопротивления движению электровоза и вагонов;

$w_{пт}$ и w_i – дополнительные удельные сопротивления движению от подвагонных генераторов и от уклона (w_i принимаем равным нулю).

Расчетные значения мощности на ободе колес локомотива были рассчитаны по формуле [4]

$$P_{кр} = K_{п} \cdot V \cdot F_{кр}, \quad (2)$$

где $K_{п}$ – переводной коэффициент;

V – скорость движения.

С учетом того, что номинальная (полезная) и расчетная мощности электровоза связаны соотношением [4, 5]

$$P_{кн} = \frac{P_{кр}}{k_p}, \quad (3)$$

где k_p – коэффициент перегрузки, который для пассажирских электровозов можно принять равным $k_p = 1,1$, номинальное значение мощности локомотива было определено как [1, 6]

$$P_{н} = \frac{P_{кн}}{\eta_{э,р}}, \quad (4)$$

где $\eta_{э,р}$ – расчетный КПД электровоза, который был принят равным 90 %.

Значения силы тяги и мощности, рассчитанных для средних масс (в пределах 600 – 900 тонн) и скоростей движения пассажирских поездов, начиная от максимально разрешенных на данном участке – 120 км/ч (скорость 140 км/ч разрешена только на 1 перегоне) [1] и до конструкционной скорости движения электровозов ЭП2К (160 км/ч), эксплуатируемых на рассматриваемом полигоне, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения силы тяги и мощности электровозов, необходимых для эксплуатации на равнинных участках пути

Расчетная скорость V_p , км/ч	120			140			160		
Масса состава m_b , т	600	748	900	600	748	900	600	748	900
Расчетная сила тяги $F_{кр}$, кН	41,24	49,30	57,58	48,42	57,78	67,39	56,77	67,64	78,81
Расчетная мощность $P_{кр}$, кВт	1375	1643	1919	1883	2247	2621	2523	3006	3502
Номинальная (полезная) мощность $P_{кн}$, кВт	1250	1494	1745	1712	2043	2382	2294	2733	3184
Номинальная мощность $P_{н}$, кВт	1388	1660	1939	1902	2270	2647	2548	3037	3538

Как видно из данных таблицы 1, для вождения поездов массами 600 – 900 тонн на равнинных участках пути с максимальными скоростями движения 120 км/ч номинальной была бы мощность электровоза 2000 кВт, а со скоростями движения 160 км/ч – 3600 кВт.

Для определения снижения расхода электроэнергии при возможной эксплуатации электровозов с рациональными значениями мощности для обеспечения современных пассажирских перевозок на равнинных участках пути было проведено сравнение эксплуатации локомотивов с рациональными значениями мощности с эксплуатируемыми электровозами ЭП2К.

В связи с прогнозируемым увеличением скоростей движения на перегонах рассматривать возможность эксплуатации электровозов, которые рассчитаны на максимальную скорость движения 120 км/ч, на наш взгляд, нецелесообразно. Более перспективным представляется рассмотреть возможность эксплуатации электровозов с рациональным по тягово-энергетическим показателям значением мощности для обеспечения современного пассажиропотока с максимальными скоростями движения 160 км/ч. Кроме этого, учитывая, что в настоящее время промышленностью освоен выпуск современных локомотивов с АТД, имеющими номинальную осевую мощность более 1000 кВт (номинальная мощность одного тягового двигателя электро-

воза ЭП10 равняется 1200 кВт), что позволяет эксплуатировать электровозы с АТД в четырехосном исполнении с той же мощностью, что и у шестиосных электровозов ЭП2К (4800 кВт), была рассмотрена возможность эксплуатации электровозов с АТД с рациональными значениями мощности в четырехосном исполнении.

Для оценки снижения расхода электроэнергии от величины выбранного значения номинальной мощности электровоза сравнение было проведено на примере электровозов с АТД в четырехосном исполнении с двумя значениями номинальной мощности – 4800 кВт (соответствующей мощности электровозов ЭП2К) и 3600 кВт (рациональной для вождения пассажирских поездов на данном участке).

Поскольку предстояло провести сравнение разных типажей локомотивов с различными тяговыми приводами и числом осей, сравнение вариантов было рассмотрено подробно. В качестве критерия определения энергетической эффективности электровозов был принят минимум расхода электроэнергии на тягу при осуществлении перевозок на заданном участке пути.

Расход электроэнергии на тягу можно представить как [5, 6]

$$A = \int_{t_n}^{t_k} P_3(t) dt = \frac{1}{\eta_{3,т}} \int_{t_n}^{t_k} P_k(t) dt = \frac{K_n}{\eta_{3,т}} \int_{s_n}^{s_k} F_k(s) ds, \quad (5)$$

где P_3 , P_k – значения мощности, потребляемой из сети и на ободу колес электровоза;

t – время движения электровоза;

t_n , t_k – начальный и конечный моменты времени движения электровоза на участке;

$\eta_{3,т}$ – КПД локомотива без учета потерь на собственные нужды;

S – путь, пройденный электровозом;

s_n , s_k – координаты пути, соответствующие началу и концу участка.

Приведа выражение (5) к виду [1, 5]

$$A = \frac{10^3 \cdot P_3 \cdot S}{V} = \frac{10^3 \cdot P_k \cdot S}{V \cdot \eta_{3,т}} = \frac{10^3 \cdot K_n \cdot F_k \cdot S}{\eta_{3,т}}, \quad (6)$$

разницу расходов электроэнергии сравниваемых электровозов при идентичных режимах движения поезда $V(S)$ можно определить как

$$\Delta a^* = \frac{A_{1(6)} - A_{2(4)}}{A_{1(6)}} = \left(1 - \frac{F_{k2}}{F_{k1}} \cdot \frac{\eta_{3,т1}}{\eta_{3,т2}}\right), \quad (7)$$

где $A_{1(6)}$ и $A_{2(4)}$ – расходы электроэнергии электровозов на тягу;

F_{k1} и F_{k2} – значения сил тяги электровозов;

$\eta_{3,т1}$ и $\eta_{3,т2}$ – величины КПД сравниваемых электровозов без учета потерь на собственные нужды.

Далее, представив разницу масс электровозов как $\Delta m = m_{п1} - m_{п2}$, а силы тяги локомотивов уравнениями $F_{k1} = w_{01} \cdot (m_{п1} + m_b)$ и $F_{k2} = w_{02} \cdot (m_{п1} + m_b - \Delta m)$, значение F_{k2} было преобразовано как $F_{k2} = F_{k1} - \Delta F = F_{k1} - w'_0 \cdot \Delta m$, а уравнение (7) приведено к виду:

$$\Delta a^* = \left(1 - \frac{F_{k1} - \Delta F}{F_{k1}} \cdot \frac{\eta_{3,т1}}{\eta_{3,т2}}\right) = \left(1 - \frac{F_{k1} - w'_0 \cdot \Delta m}{F_{k1}} \cdot \frac{\eta_{3,т1}}{\eta_{3,т2}}\right), \quad (8)$$

где $\Delta F = F_{k1} - F_{k2} = w'_0 \cdot \Delta m$ – разница силы тяги электровозов.

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что расход электроэнергии при сравнении электровозов определяется следующими показателями, от которых зависят изменения затрат электроэнергии:

разницей масс локомотивов, в связи с чем для ведения поезда с одинаковым числом вагонов (одинаковой массы состава) будут требоваться различные силы тяги сравниваемых электровозов;

значениями величин КПД электровозов.

Как видно из формул (7) – (8), для оценки разницы расхода электроэнергии сравниваемых вариантов необходимо знать значения масс, силы тяги и КПД электровозов, для определения которых нужны тягово-энергетические характеристики (ТЭХ) ЭПС. Характеристики электровозов ЭП2К принимаем на основании работы [1], где подробно рассмотрен их расчет.

Для получения ТЭХ электровоза с АТД по методике [7] были проведены расчеты АТД мощностью 1200 кВт (с параметрами, близкими к параметрам АТД электровоза ЭП10 - НТА-1200 [8, 9]) и 900 кВт. Значения основных величин, полученных при расчетах АТД и необходимых для расчета характеристик электровозов, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры асинхронных тяговых двигателей с номинальными мощностями 1200 и 900 кВт

Основные параметры	Обозначение	АТД, кВт	
		1200	900
1	2	3	4
Номинальная мощность, кВт	P_n	1200	900
Номинальное напряжение первой гармоники фазы, В	$U_{\phi 1n}$	1260	978
Номинальный ток первой гармоники фазы статора, А	I_{1n}	378	364
Номинальный ток ротора, приведенный к току статора, А	I_{2n}	327	325
Максимальная скорость движения электровоза, км/ч	V_{\max}	160	160
Скорость движения электровоза в номинальном режиме, км/ч	V_n	81,7	81,7
Номинальная частота тока статора, Гц	f_{1n}	67,4	67,4
Номинальная частота тока ротора, Гц	f_{2n}	0,647	0,838
Номинальный магнитный поток, Вб	Φ_n	0,0948	0,0736
Активное сопротивление обмотки статора при 20 / 130 °С, Ом	r_1	0,0281 / 0,0404	0,0281 / 0,0404
Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора при 20 °С / 130 °С, Ом	r_2'	0,0255 / 0,0367	0,0255 / 0,0367
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом	χ_1	0,35	0,35
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом	χ_2'	0,399	0,399
Действующее значение намагничивающего тока, А	I_μ	140	102
Основные номинальные потери в стали статора, кВт	$\Delta P_{с.н}$	18,95	11,75
Номинальные добавочные потери в обмотках статора / ротора, кВт	$\Delta P_{1д.н} / \Delta P_{2д.н}$	1,685 / 3,730	1,015 / 2,250
Номинальные добавочные пульсационные потери статора / ротора, кВт	$\Delta P_{м1.п} / \Delta P_{м2.п}$	1,183 / 5,380	0,712 / 3,240
Потери в стали от высшего гармонического напряжения, Вт	$\Delta P_{свг}$	635	395
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	$\cos \varphi$	0,85	0,87
Номинальные потери от первой гармоники в меди статора / ротора, кВт	$\Delta P_{м1.н} / \Delta P_{м2.н}$	17,5 / 11,7	16,25 / 11,6
Механические потери, кВт	$\Delta P_{мех.н}$	2,45	1,85
Добавочные потери в двигателе без учета потерь от высших гармоник, кВт	$\Delta P'_{мд}$	6,05	4,65
Сумма добавочных потерь от высших гармоник, кВт	$\Sigma \Delta P_{доб.н}$	12,55	7,60
КПД при питании от источника синусоидального напряжения / инвертора	$\eta_{атд.н}$	0,955 / 0,946	0,950 / 0,943

По полученным для номинального режима АТД данным были рассчитаны характеристики для нагрузочных режимов работы по методике, приведенной в работе [7]. Для этой цели были определены следующие значения параметров АТД:

ток статора

$$I_1 = U_{\phi 1н} \cdot \gamma \cdot \frac{\sqrt{(1 + \tau_1)^2 + \left(\frac{\tau_1}{\chi_1}\right)^2 \cdot r_2'^2 \cdot \frac{1}{\beta^2}}}{\sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2) + (d^2 + e^2 \alpha^2) \cdot \frac{r_2'^2}{\beta^2} + 2r_1 \alpha \cdot \frac{r_2'}{\beta}}}; \quad (9)$$

ток ротора, приведенный к статору,

$$I_2' = U_{\phi 1н} \cdot \gamma \cdot \frac{1}{\sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2) + (d^2 + e^2 \alpha^2) \cdot \frac{r_2'^2}{\beta^2} + 2r_1 \cdot \alpha \cdot \frac{r_2'}{\beta}}}; \quad (10)$$

электромагнитный момент

$$M_э = \frac{m_1 \cdot U_{\phi 1н}^2}{9,81 \omega_{1н}} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{1}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \cdot \frac{\beta}{r_2'} + (d^2 + e^2 \alpha^2) \cdot \frac{r_2'}{\beta} + 2r_1 \cdot \alpha}. \quad (11)$$

В приведенных выше формулах β – параметр абсолютного скольжения, вычисляемый как $\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}$; m_1 – число фаз обмотки статора; $\omega_{1н}$ – номинальная угловая скорость вращающегося магнитного поля статора; γ , α , b , c , d и e – вспомогательные обозначения величин, входящие в формулы, были определены как [7]

$$\gamma = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 1(н)}}; \quad \alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}; \quad b = r_1(1 + \tau_2); \quad c = \chi_0 \tau; \quad d = \frac{r_1}{\chi_0}; \quad e = 1 + \tau_1, \quad (12)$$

где χ_0 – индуктивное сопротивление намагничивающей ветви, χ_0 было рассчитано так:

$$\chi_0 \approx \frac{U_{\phi 1} - I_{\mu} \cdot \chi_1}{I_{\mu}}; \quad (13)$$

τ_1 , τ_2 – коэффициенты рассеяния статора и ротора, определяемые как

$$\tau_1 = \frac{\chi_1}{\chi_0}; \quad \tau_2 = \frac{\chi_2}{\chi_0}; \quad (14)$$

τ – общий коэффициент рассеяния, рассчитываемый по формуле [7]

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2. \quad (15)$$

По найденному электромагнитному моменту была определена полная механическая мощность [7]

$$P_{мх} = M_э \omega_{1н} \cdot (\alpha - \beta). \quad (16)$$

Для дальнейших расчетов были получены потери мощности для различных нагрузочных режимов, которые определялись по формулам [7]:

в стали –

$$\Delta P_c = \Delta P_{с.н} \cdot \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \cdot \alpha^{1,5}; \quad (17)$$

суммарные добавочные –

$$\sum P_{\text{доб}} = 0,02 \cdot M_3 \cdot w_1; \quad (18)$$

механические –

$$\Delta P_{\text{мех}} = \frac{\Delta P_{\text{мех.н}}}{n_{\text{н}}} \cdot n; \quad (19)$$

в меди –

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{м1н}} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1н}}\right)^2 + \Delta P_{\text{м2н}} \cdot \left(\frac{I_2'}{I_{2н}}\right)^2. \quad (20)$$

Значения потерь мощности при номинальном режиме работы АТД – в стали ($\Delta P_{\text{с.н}}$), механические ($\Delta P_{\text{мех.н}}$) и в меди ($\Delta P_{\text{м1н}}$ и $\Delta P_{\text{м2н}}$) – были приняты согласно данным таблицы 2.

Полезная мощность была найдена путем вычета потерь в стали в сумме с механическими и добавочными из полной механической мощности [7]:

$$P_2 = P_{\text{мх}} - (\Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}} + \sum \Delta P_{\text{доб}}). \quad (21)$$

Подведенная активная мощность была рассчитана как [7]

$$P_1 = P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{м}}. \quad (22)$$

Тяговое усилие на ободу колеса определялось по формуле [7]

$$F = \frac{0,367 \cdot P_1 \cdot \eta_{\text{атд}} \cdot \eta_{\text{тп}} \cdot \eta_{\text{зп}}}{V}, \quad (23)$$

где $\eta_{\text{тп}}$ – КПД тягового преобразователя (ТП);

$\eta_{\text{зп}}$ – КПД зубчатой передачи (ЗП);

$\eta_{\text{атд}}$ – КПД АТД, который находился по формуле [7]

$$\eta_{\text{атд}} = \frac{P_2}{P_1}. \quad (24)$$

Значение КПД ЗП были определены согласно ГОСТ 2582-81 по аппроксимированным значениям, приведенным в источнике [1].

Наибольшую сложность представляет расчет потерь мощности в ТП локомотива. Различные формы токов, значительные скорости их нарастания, а также принимаемый ряд допущений (линеаризация и неучитываемый разброс характеристик) осложняют задачу и могут привести к большим погрешностям при расчетах [10]. В работе [3] приведена энергетическая диаграмма электровоза ЭП20 в номинальном режиме при его питании от сети постоянного тока, где показано, что величина потерь на ТП составляет 1,42 %. В источнике [10] приведена зависимость КПД преобразователя от тока, из которой можно увидеть, что КПД преобразователя при изменении тока в пределах 40 – 100 % от его номинального значения меняется незначительно и его величина составляет 99 %, в связи с чем значение КПД ТП было принято равным 99 %, а характеристики электровоза с АТД были рассчитаны для значений токов, находящихся в пределах 40 – 100 % от номинального значения. Следует отметить, что значение КПД электровоза мощностью 4800 кВт при номинальном режиме работы по рассчитанным ТЭХ с учетом потерь в сетевом дросселе, принятых согласно рекомендациям работы [3], составило 89,9 %, что сопоставимо с номинальным значением КПД электровоза ЭП20 без учета потерь мощности на соб-

ственные нужды 89,8 % [3]. В качестве примера на рисунке 1 представлены ТЭХ четырехосного электровоза с АТД мощностью 4800 кВт, приведенные к одному колесно-моторному блоку.

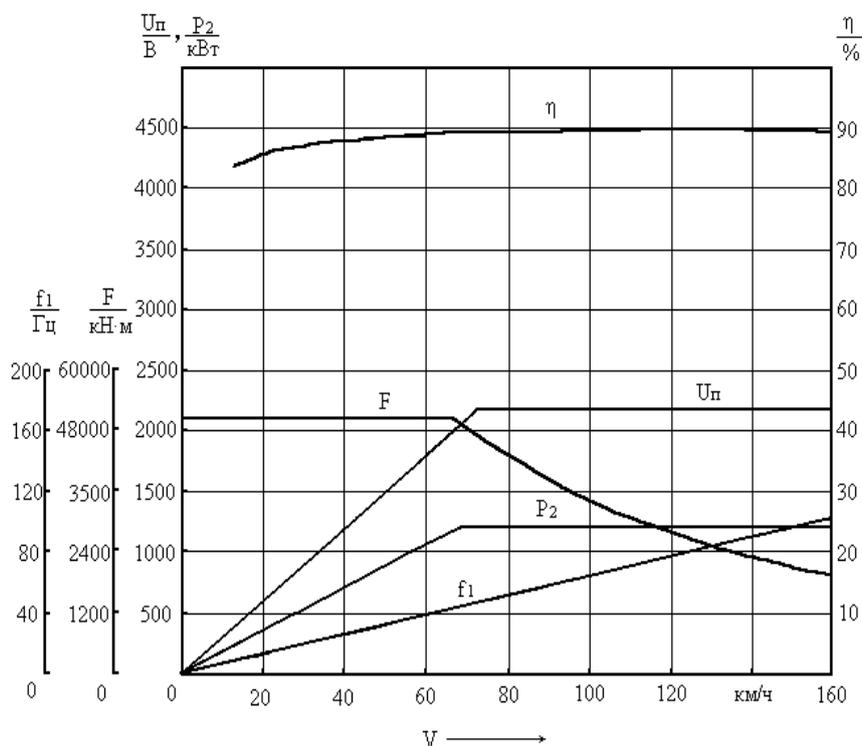


Рисунок 1 – Тягово-энергетические характеристики четырехосного электровоза с АТД мощностью 4800 кВт, приведенные к одному колесно-моторному блоку

С использованием ТЭХ было проведено сравнение энергетической эффективности эксплуатации электровозов ЭП2К и четырехосных локомотивов с АТД мощностью 4800 и 3600 кВт.

В связи с тем, что электровоз с АТД при заданной скорости движения может реализовать любое тяговое усилие в зависимости от заданных параметров регулирования (путем изменения подводимого напряжения или его частоты), сравнение электровозов было проведено по следующей методике.

1. Применительно к электровозу ЭП2К для заданных значений масс и скоростей движения было рассчитано сопротивление движению поезда, по ТЭХ выбрана ближайшая характеристика электровоза, на которой определены значения силы тяги $F_{к1}$ и КПД электровоза $\eta_{э,т1}$.

2. Для найденного значения силы тяги $F_{к1}$ было уточнено значение массы вагонов, которые может везти электровоз постоянного тока на данной характеристике равномерно длительное время, по формуле [6]

$$m_b = \frac{F_{к1} - m_{п1}(w'_0 + w_i)}{w''_0 + w_{пр} + w_i}. \quad (25)$$

3. Применительно к электровозу с АТД была определена величина силы тяги, которую нужно развить данному локомотиву для ведения поезда с уточненной массой вагонов с равномерной скоростью движения длительное время, по формуле

$$F_{к2} = F_{к1} - \Delta F = F_{к1} - w'_0 \cdot \Delta m. \quad (26)$$

4. Для заданного значения скорости движения путем подбора частоты и величины напряжения АТД была рассчитана характеристика электровоза с АТД, при которой можно реализовать значение силы тяги $F_{к2}$, и определен коэффициент полезного действия электровоза $\eta_{э,т2}$.

5. По найденным значениям $F_{к1}$, $F_{к2}$, $\eta_{э,т1}$ и $\eta_{э,т2}$ было проведено сравнение энергетической эффективности электровозов ЭП2К с четырехосными локомотивами с АТП мощностью 4800 и 3600 кВт по формуле (7). Результаты сравнения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Анализ сравнения показателей эксплуатации электровозов ЭП2К с четырехосными электровозами с АТП номинальной мощностью 4800 и 3600 кВт

Типаж электровоза, число осей, ед.	Номинальная мощность электровоза $P_{э}$, кВт	Масса электровоза $m_{л}$, т	Масса вагонов (состава) $m_{в}$, т	Скорость движения $V_{э}$, км/ч	Соединение ТД (частота питающего напряжения f_1), Гц	Напряжение ТД $U_{д}$, В	Ток двигателя $I_{д}$, А	Сила тяги электровоза $F_{э}$, кН	КПД электровоза $\eta_{э}$, %	Снижение расхода электроэнергии Δa , %
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			П-ОП3	1500	339,000	65,053	91,4	
	4800	95	752,363	154,404	(126,772)	1260	227,700	61,484	90,1	4,165
	3600	95			(127,268)	1026,9	280,647	61,484	90,2	4,229
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			П-ОП1	1500	282,500	61,847	90,6	
	4800	95	859,653	134,032	(110,269)	1008	237,200	58,918	89,6	3,618
	3600	95			(110,322)	978	240,882	58,918	90,2	4,313
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			СП-ОП3	1000	282,500	43,855	87,7	
	4800	95	635,239	122,016	(100,373)	819	192,600	41,266	86,6	4,709
	3600	95			(100,231)	880,2	175,520	41,266	88,5	6,754
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			СП-ОП2	1000	260,000	43,582	86,8	
	4800	95	695,778	111,843	(92,065)	756	156,200	41,258	85,7	4,162
	3600	95			(91,981)	782,4	181,214	41,258	87,9	6,517
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			СП-ПП	1000	200,000	35,747	83,3	
	4800	95	605,155	100,691	(82,805)	693	162,925	33,691	82,6	4,954
	3600	95			(82,796)	684,6	158,379	33,691	85,3	7,962
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			СП-ПП	1000	230,000	46,280	85,2	
	4800	95	890,451	91,447	(75,188)	756	178,084	44,404	84,5	3,260
	3600	95			(75,300)	684,6	185,033	44,404	86,9	5,931
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			С-ОП5	500	280,000	31,073	78,1	
	4800	95	621,072	75,396	(62,478)	567	144,788	29,534	78,1	4,988
	3600	95			(62,635)	489	153,894	29,534	80,9	8,277
ЭП2К, 6 АТП, 4 АТП, 4	4800	135			С-ОП3	500	260,000	34,240	77,3	
	4800	95	739,052	63,432	(52,254)	504	150,500	32,901	77,3	3,912
	3600	95			(52,264)	489	149,083	32,901	80,1	7,271

Как видно из данных таблицы 3, при вождении поездов с массами, близкими к средней массе поезда на рассматриваемом участке пути в диапазоне скоростей движения от 60 до 160 км/ч четырехосными электровозами с АД с мощностью 4800 кВт, расход электроэнергии на тягу может быть снижен на 3,5 – 5 %, а электровозами с АД с мощностью 3600 кВт еще больше – от 4 до 8 %. Как следует из анализа значений, приведенных в таблице 3, четырехосные электровозы на равнинном участке пути способны водить поезда массой 900 т со скоростью движения 154 км/ч с током 280 А (при номинальном токе 364 А), что говорит о возможном запасе мощности.

Для полноты проводимого анализа помимо оценки разницы расхода электроэнергии сравниваемых электровозов была произведена проверка локомотивов по условиям сцепления колес с рельсами и определено время их разгона до средней скорости движения на участке.

С этой целью был рассчитан минимальный вес, который должен иметь четырехосный электровоз при максимальной скорости движения 160 км/ч и массах поезда 1350 (максимально разрешенной на участке [1]) и 748 т по формуле [4]

$$m_{л2\min} = \frac{F_{кр}}{9,81 \cdot \psi}, \quad (27)$$

где ψ – коэффициент сцепления электровоза, определяемый как [4]

$$\psi = 0,28 + \frac{3}{50 + 20 \cdot V} - 0,0007 \cdot V, \quad (28)$$

и определено, что четырехосные локомотивы (массой 95 т) по условиям сцепления колес с рельсами могут водить составы массой 1350 и 748 т со скоростью движения 160 км/ч на участках с подъемами 3 и 11 % соответственно.

Расчет времени разгона электровозов был проведен на основании следующих положений.

Пусковая сила тяги электровоза ограничивается либо условиями сцепления колес локомотива с рельсами, либо максимальным током ТД. Сила тяги, определяемая условиями сцепления колес электровоза с рельсами, была рассчитана по неравенству [4]

$$F_{п.э} \leq F_{сц} = 9,81 \cdot m_{л} \cdot \psi \cdot 10^3. \quad (29)$$

Сила тяги, определяемая перегрузочной способностью двигателя, была найдена для наибольшего значения тока при пуске, который соответствует следующему значению [4]:

$$I_6 = \kappa_{п.э} \cdot I_9, \quad (30)$$

где $\kappa_{п.э}$ – коэффициент эксплуатационной перегрузки, равный 1,6 – 1,8 [4].

Сравнение времени разгона электровозов до средней скорости движения на рассматриваемом участке (81,4 км/ч) показало, что в период пуска у четырехосного электровоза с АД ограничение пусковой силы тяги будет по условиям сцепления колес с рельсами, а у электровоза ЭП2К пусковая сила тяги будет ограничена токовой нагрузкой (790 А), в связи с чем время разгона электровоза ЭП2К со средней массой поезда (748 т) до средней скорости движения составит 1 минуту 27 секунд, а четырехосного – 1 минуту 49 секунд и будет отличаться на 22,1 секунды, или на 25,5 %.

На основании проведенного сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что при эксплуатации электровозов с рациональным значением мощности и числа осей для обеспечения современных пассажирских перевозок на равнинных участках пути можно снизить расход электроэнергии на тягу на 3,5 – 8 %, и это без учета снижения расхода электроэнергии на вспомогательный привод.

Эксплуатация электровозов с рациональным значением мощности в четырехосном исполнении несмотря на незначительное увеличение времени разгона в сравнении с шестиосным типом является предпочтительней с экономической точки зрения – меньшее число осей (колесных пар), ТД и другого оборудования, что облегчает затраты на производство, обслуживание и ремонт ЭПС. Еще одним положительным качеством данных электровозов при значительном

увеличении пассажиропотока является возможность использования их по системе многих единиц (СМЕ), что гораздо предпочтительнее с экономической точки зрения, чем эксплуатация по СМЕ шестиосных локомотивов.

Можно рассмотреть также эксплуатацию на равнинных участках пути электровозов различной мощности. Применение локомотивов двух типов на одном участке и подбор их под поезда с соответствующими массами и количеством остановок позволит значительно снизить расход электроэнергии на тягу.

Список литературы

1. Плаксин, А. В. Пути снижения расхода электроэнергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках пути [Текст] / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 35 – 47.
2. Перцовский, Л. М. Энергетическая эффективность электрической тяги [Текст] / Л. М. Перцовский // Железнодорожный транспорт. – 1974. – № 12. – С. 39 – 43.
3. Андриященко, А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом [Текст] / А. А. Андриященко, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Известия ПГУПС. – 2015. – № 4. – С. 5 – 14.
4. Проектирование систем управления подвижным составом электрических железных дорог. [Текст] / Под ред. Д. Д. Захарченко. – М.: Транспорт, 1964. – 351 с.
5. Гетьман, Г. К. Выбор параметров номинального режима магистральных электровозов [Текст] / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, Р. Н. Демчук // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 3. – С. 11 – 14.
6. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги: Учебник [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
7. Проектирование тяговых электрических машин: Учебник. [Текст] / Под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
8. Электровоз двойного питания ЭП10: особенности конструкции и электрических схем. [Текст] / А. И. Лещев, С. С. Матекин и др. // Локомотив. – 1999. – № 11. – С. 28 – 32.
9. Захаров, В. И. Электровоз двойного питания ЭП10: особенности конструкции и электрических схем [Текст] / В. И. Захаров, М. А. Комаровский, П. М. Лузиков // Локомотив. – 2000. – № 1. – С. 30 – 32.
10. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава [Текст] / Под ред. Ю. М. Инькова. – М.: Транспорт, 1982. – 263 с.

References

1. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Puti snizheniya raskhoda ehlektroehnergii pri ehkspluatacii passazhirskih ehlektrovozov na ravninnyh uchastkah puti (Ways to reduce energy consumption in the operation of passenger electric locomotives on the flat sections of the road). *Izvestiya Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 35 – 47.
2. Pertsovsky L. M. Energeticheskaya ehffektivnost' ehlektricheskoy tyagi (Energy efficiency of electric traction). *Zheleznodorozhnyj transport – Railway transport*, 1974, no. 12, pp. 39 – 43.
3. Andryushchenko A. A., Zarifyan A. A., Kolpahchyan P. G. Povyshenie energeticheskoy ehffektivnosti passazhirskikh ehlektrovozov s asinkhronnym tyagovym privodom (Improving the energy efficiency of locomotives with asynchronous traction motor). *Izvestiya PGUPS – Processing Petersburg Transport University*, 2015, no. 4, pp. 5 – 14.
4. Rotanov N. A., Zaharchenko D. D., Gorchakov E. V., Plaks A.V., Milyutin S. V., Nekrasov V. I. *Proektirovanie sistem upravleniya podvizhnym sostavom ehlektricheskikh zheleznykh dorog* (Designing control systems for rolling stock of electric Railways). Moscow: Transport, 1964, – 351 p.
5. Getman, G. K., Arpul S. V., Demchuk R. N. Vybor parametrov nominal'nogo rezhima magistral'nykh ehlektrovozov (The Choice of parameters of the nominal mode electric locomotives) / *Zaliznichnij transport Ukraini – Zaliznychnyi transport Ukraini*, 2009, no. 3, pp. 11 – 14.
6. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* (Theory of electric traction). Moscow: Transport, 1983, 328 p.

7. Nakhodkin M. D., Vasilenko G V., Bocharov V. I., Kozorezov M. A. *Proektirovanie tyagovyh ehlektricheskikh mashin. Uchebnik.* (Design of traction electric machines. The Textbook). Moscow.: Transport, 1976. – 624 p.

8. Leshchev A. I., Matekin S. S., Usvizky S. A., Kirillov V. S. *Ehlektrovoz dvojnogo pitaniya EP10: osobennosti konstrukcii i ehlektricheskikh skhem* (Electric dual power ЭП10: design and electrical circuits). *Lokomotiv – The Locomotive*, 1999, no. 11, pp. 28 – 32.

9. Zaharov V. I., M. A. Komorowski M. A., Luzikov P. M. *Ehlektrovoz dvojnogo pitaniya EP10: osobennosti konstrukcii i ehlektricheskikh skhem* (Electric Locomotive dual power EP10: design features and electrical circuits). *Lokomotiv – The Locomotive*, 2000, no. 1, pp. 30 – 32.

10. Inkov Yu. M., Rotanov N. A., Feoktistov V. P., Chausov O. G. *Preobrazovatel'nye poluprovodnikovye ustrojstva podvizhnogo sostava* (Converter semiconductor devices of rolling stock). Moscow: Transport, 1982. – 263 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Плаксин Алексей Владимирович

Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД».

Вокзальная магистраль, д. 12, г. Новосибирск, 630004, Российская Федерация.

Ведущий инженер дорожного топливно-энергетического центра.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

Швецов Семен Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: 89040708125@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Плаксин, А. В. Пути повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов при эксплуатации на равнинных участках железных дорог [Текст] / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 43 – 54.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Plaksin Alexey Vladimirovich

The West Siberian railway – branch of JSC «RZD».

12, Vokzalnaya Magistral, Novosibirsk, 630004, the Russian Federation.

Leading engineer of road fuel and energy centre.

E-mail: Plaksin.av@mail.ru

Shvetsov Semen Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D., associate professor of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19

E-mail: 89040708125@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Ways to improve energy efficiency passenger locomotives when operating on the plains rail ways. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 43 – 54. (In Russian).

УДК 625.032

В. Г. Солоненко, Н. М. Махметов, С. Е. Бекжанова, И. С. Коптлеуов

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М.Тынышпаева (КазАТК), г. Алматы, Казахстан

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРОИЗВОДСТВА ТОО «КВК» НА ТЕЛЕЖКАХ МОДЕЛИ 18-9996

Аннотация. Изложены некоторые результаты динамических испытаний полувагонов с двухосными тележками ЗК1. Выполнены сравнительные расчеты по исследованию влияния тележек на основные динамические показатели.

Ключевые слова: тележка, динамические качества, испытания, вертикальная динамика, колесная пара.

Vladimir G. Solonenko, Narzankul M. Makhmetova, Saule E. Bekzhanova, Ibray S. Koptleuov
Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev, Almaty,
The Republic of Kazakhstan

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE FREIGHT RAILCARS, PRODUCTION LLP «КВК» ON CARTS OF MODEL 18-9996

Abstract. In this article outlined some results of dynamic tests of the gondola with biaxial bogies ZK1 type. Done the comparative calculations for the study the influence of carriages to the main dynamic performances.

Keywords: cart, dynamic quality, test, vertical dynamics.

Снижение динамической нагруженности экипажей во время движения является одним из основных резервов оптимизации технико-экономических показателей железнодорожных перевозок и повышения их конкурентоспособности, позволяющих ускорить доставку и улучшить условия транспортировки грузов [1].

В последнее время с ростом объемов грузовых перевозок и в связи с поэтапным переходом к подвижному составу нового поколения актуальной стала задача по созданию новой тележки для грузовых вагонов.

Оценка динамических качеств грузовых вагонов с тележками модели 18-9996 производилась по нормированным динамическим показателям: коэффициент вертикальной динамики рамы тележки $K_{дв}$, коэффициент горизонтальной динамики рамы тележки $K_{дг}$, коэффициент запаса устойчивости от схода вагона с рельсов $K_{у}$ [2].

Среди мер, направленных на обеспечение устойчивости движения вагонов, и прежде всего наиболее массовых – грузовых, существенную роль играют конструкция и состояние тележек, особенно тех, которые оборудованы диагональными связями между их боковинами.

Вагоны модели 12-9941 произведены в ТОО «Казахская вагоностроительная компания». Их двухосные тележки типа ZK1 (модель 18-9996) рассчитаны на осевую нагрузку 25 тс и скорость движения в порожнем и груженом состоянии, равную 120 км/ч. Конструкция тележки с диагональными связями, упруго-катковыми скользунами, адаптерами, резиновыми амортизаторами и касетными подшипниками в буксовом узле приведена на рисунке 1.

Результаты обработки опытных данных показали, что динамические показатели, характеризующие ходовые качества вагона, не превышают допустимых значений [3]. В пределах нормы находятся коэффициент запаса поперечной устойчивости вагона от опрокидывания при движении в кривых участках пути, ускорения кузова в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях в порожнем и груженом состоянии вагона, коэффициент конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания с учетом максимальной нагрузки от оси на рельсы, а также коэффициент запаса устойчивости колеса от схода с рельса для всех доверительных вероятностей (таблица 1).

Опытные заезды проводились на прямом участке пути Жидели – Бирлик со следующими характеристиками: рельсошпальная решетка – 1840 шп./км, рельсы – Р65, шпалы железобетонные, скрепление Foslo, состояние пути согласно замерам путеизмерительного комплекса составляло 10 баллов. Для проведения комплексных испытаний по воздействию на путь нескольких единиц подвижного состава в поезд были включены два вагона модели 12-9941 производства ТОО «КВК» – порожний и груженный, вагоны модели 12-9920 производства КНР – порожний и груженный, маневровый тепловоз СКД-6Е производства КНР и локомотив-толкач ВЛ80с. В процессе проведения испытаний на этом участке пути было проведено 48 заездов со скоростями от 50 до 110 км/ч. На участке кривой малого радиуса $R =$

400 м Чокпар – Айлайгир было проведено 15 заездов со скоростями 25 – 80 км/ч. В таблице 1 приведены наиболее характерные экспериментальные данные из журнала регистрации и испытаний.

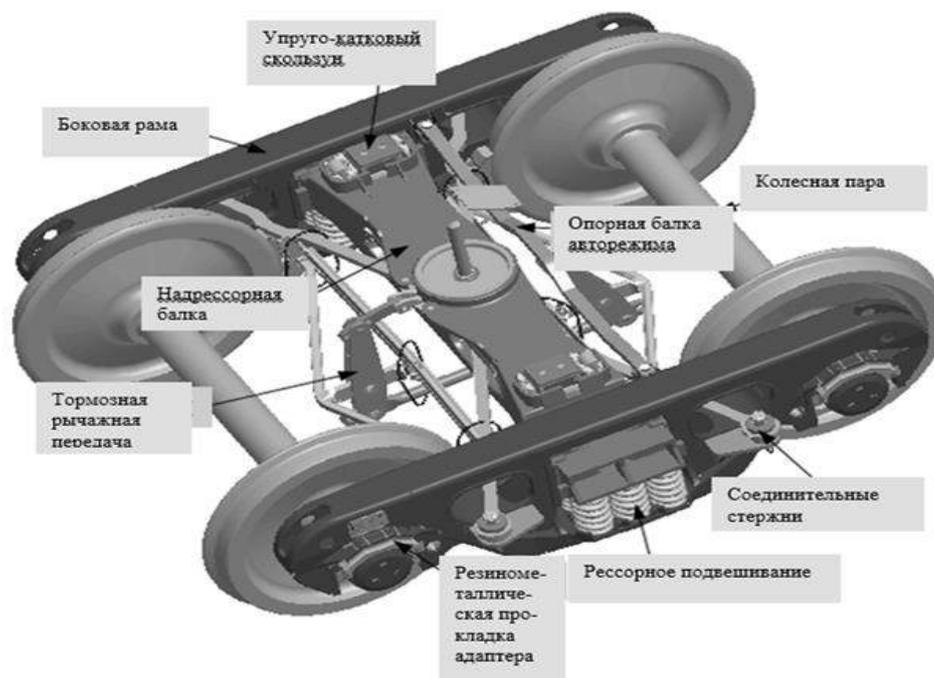


Рисунок 1 – Тележка двухосная типа ZK-1(модель 18-9996)

Таблица 1 – Экспериментальные данные по определению коэффициента вертикальной динамики первой и второй ступени

Замер	Скорость, км/ч		Вагон № 61369336 (порожний)			Вагон № 60995123 (груженный)		
			КД1пр	КД1л	КД2	КД1пр	КД1л	КД2
1	550	max 1	0,303	0,226	0,155	0,737	0,518	0,421
		max 2	0,262	0,173	0,118	0,749	0,457	0,272
		max 3	0,241	0,185	0,11	0,615	0,351	0,318
		ср	0,267	0,195	0,128	0,703	0,442	0,337
2	660	max 1	0,187	0,346	0,119	0,391	0,293	0,247
		max 2	0,184	0,319	0,118	0,743	0,38	0,351
		max 3	0,233	0,448	0,162	0,831	0,592	0,484
		ср	0,198	0,371	0,133	0,655	0,422	0,361
3	70	max1	0,145	0,198	0,087	0,542	0,338	0,157
		max2	0,202	0,205	0,147	0,819	0,490	0,366
		max3	0,231	0,175	0,131	0,522	0,431	0,238
			0,193	0,193	0,122	0,628	0,399	0,254
4	90	max1	0,219	0,237	0,161	0,674	0,701	0,661
		max2	0,153	0,152	0,106	0,615	0,301	0,229
		max3	0,149	0,181	0,123	0,527	0,377	0,370
			0,174	0,190	0,130	0,605	0,459	0,420
5	110	max1	0,225	0,247	0,172	0,685	0,725	0,681
		max2	0,173	0,164	0,127	0,625	0,315	0,238
		max3	0,157	0,183	0,133	0,538	0,387	0,386
			0,185	0,198	0,144	0,616	0,475	0,435

На рисунках 2 – 5 приведены экспериментальные данные, полученные на опытном участке Жидели – Берлик при движении со скоростями 50 – 90 км/ч. Полученные данные фиксировались измерительным комплексом МИС-26 и датчиками ускорений АР-37.

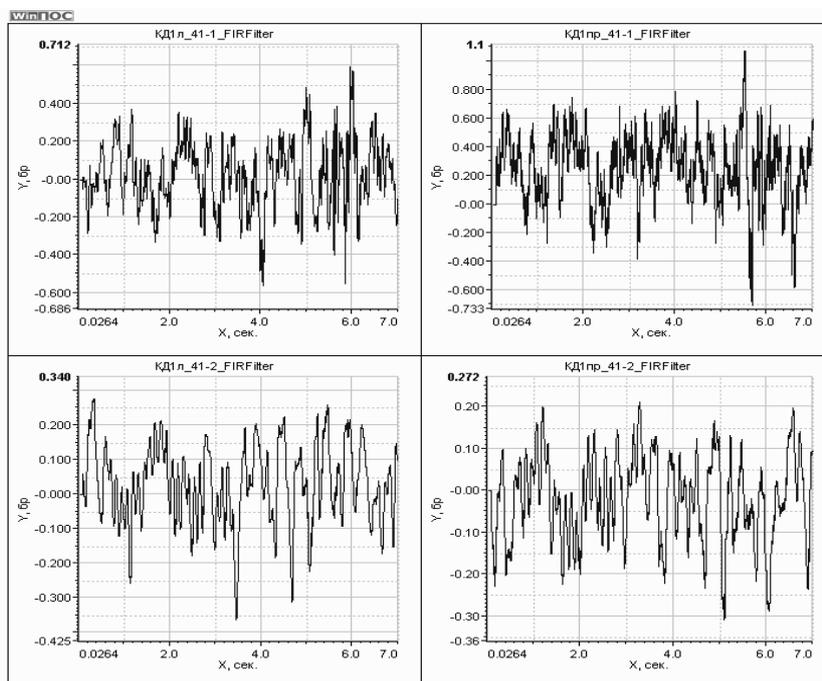


Рисунок 2 – Коэффициент вертикальной динамики первой ступени рессорного подвешивания полувагонов 12-9941 при движении по прямому участку пути, мм

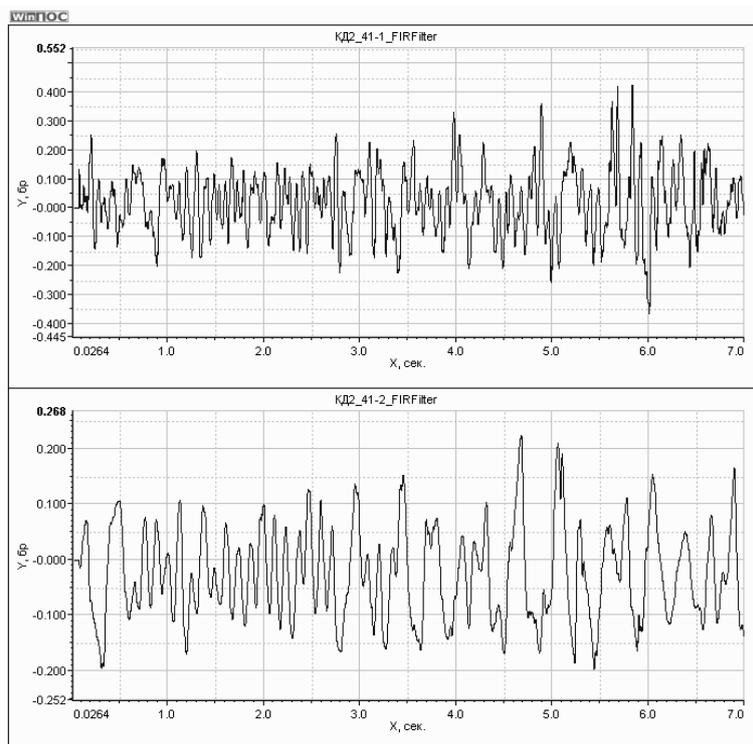


Рисунок 3 – Коэффициент вертикальной динамики второй ступени рессорного подвешивания полувагонов 12-9941 при движении по прямому участку пути

На рисунках 6, 7 приведены результаты ходовых динамических испытаний со скоростью до 120 км/ч. Коэффициенты вертикальной и горизонтальной динамики определены и приведены с доверительной вероятностью 0,999. Пунктирными линиями показаны зависимости для

груженого состояния полувагона, сплошными линиями – для порожнего. Линиями без маркеров показаны допускаемые значения для соответствующих показателей.

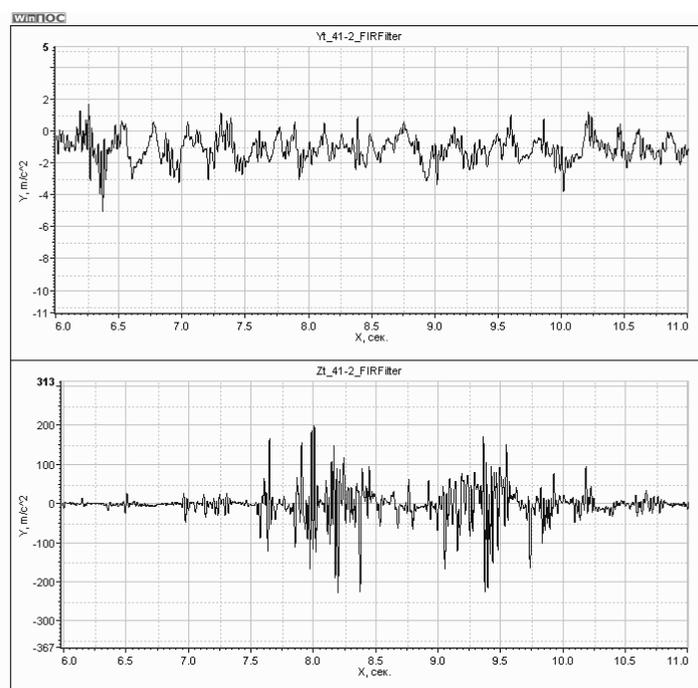


Рисунок 4 – Вертикальные и горизонтальные ускорения рамы тележки полувагонов 12-9941 при движении по прямому участку пути, m/c^2

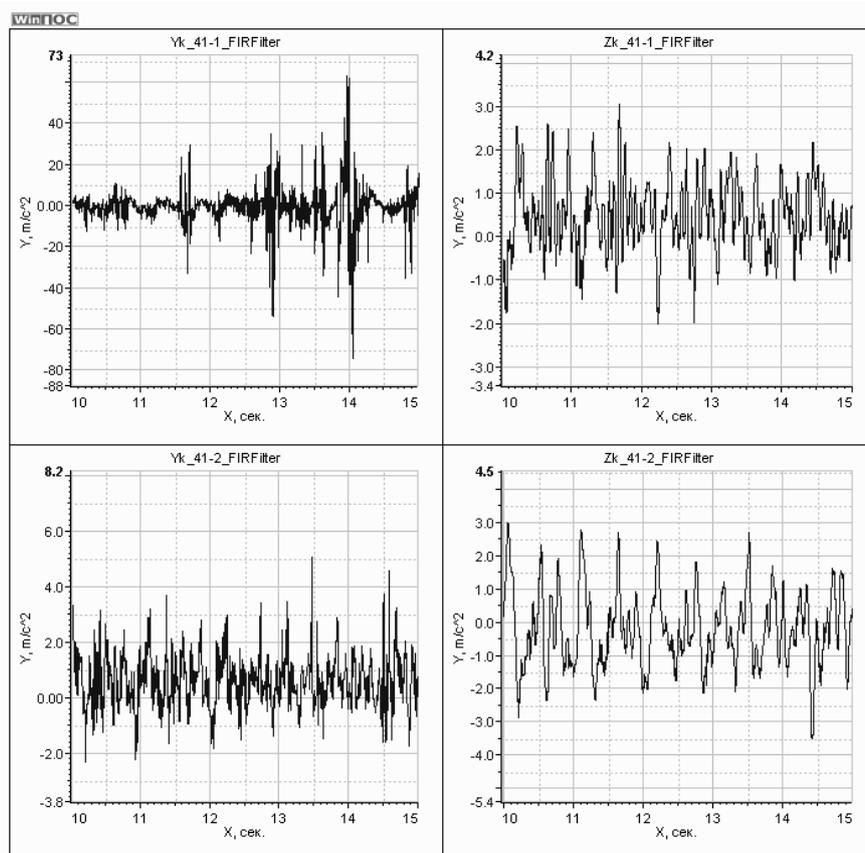


Рисунок 5 – Вертикальные и горизонтальные ускорения кузова полувагонов 12-9941 при движении по прямому участку пути, m/c^2

Результаты динамических испытаний показали, что коэффициент вертикальной динамики для порожнего вагона с увеличением скорости до 110 км/ч увеличивается или изменяется незначительно, а для груженого вагона увеличивается, не превышая допустимых значений, что обусловлено прежде всего конструктивными особенностями двухосных тележек типа ЗК-1 (18-9996).

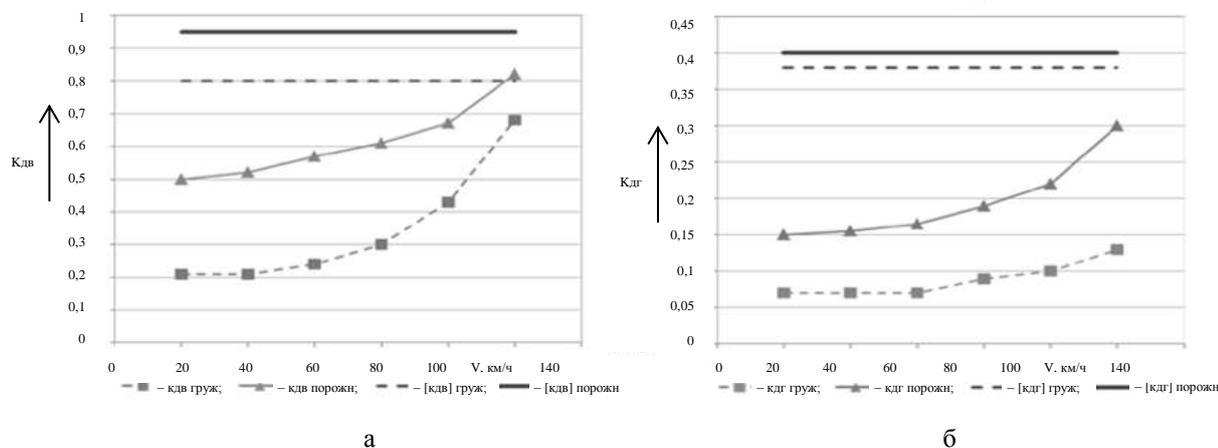


Рисунок 6 – Зависимости коэффициентов вертикальной (а) и горизонтальной (б) динамики от скорости при движении на прямом участке пути Жидели – Берлик

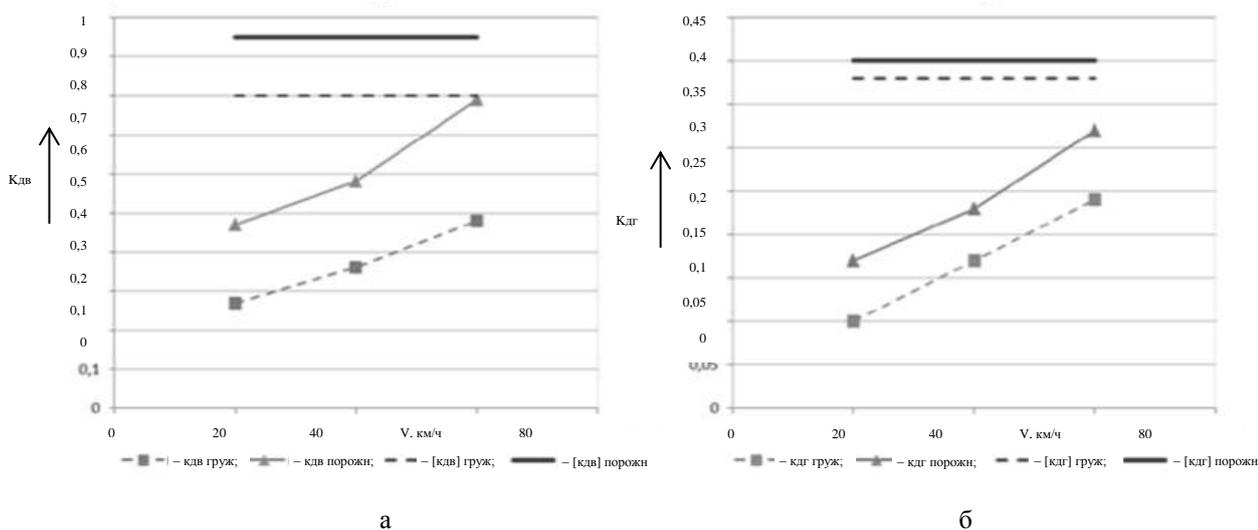


Рисунок 7 – Зависимости коэффициентов вертикальной (а) и горизонтальной (б) динамики от скорости при движении по кривой радиусом 400 м на отрезке Чокпар – Айла-айгир

Список литературы

1. Динамические качества грузовых вагонов, имеющих тележки с диагональными связями / Е. П. Блохин, К. Т. Алпысбаев и др. // Вестник СНУ им. В.Даля. – Северодонецк. – 2012. – № 5 (176). – С. 56 – 63.
2. Солоненко, В. Г. Исследование параметров пути и ходовых частей вагона на силы взаимодействия / В. Г. Солоненко, Н. В. Ивановцева, Н. Т. Мусагитов // Магистраль. – 2012. – № 4 (62). – С. 31 – 37.
3. ГОСТ 33211-2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам / ОАО «ВНИИЖ». – М., 2016. – 54 с.

References

1. Blokhin E. P., Alpysbaev K. T., Granovsky R. B., Dzichkovsky E. M., Krivchikov A. E., Federov E. F. Dynamic qualities of freight cars with trolleys with diagonal links [Dinamicheskie

kachestva gruzovykh vagonov, imeiushchikh telezhki s diagonal'nymi svziami]. *Vestnik SNU im. V. Dalia – Bulletin of SNU im. V. Dalia*, 2012, no. 5 (176), p. 56 – 63.

2. Solonenko V. G., Ivanovtseva N. V., Musagitov N. T. Study of the parameters of the track and the running parts of the car on the forces of interaction [Issledovanie parametrov puti i khodovykh chastei vagona na sily vzaimodeistviia]. *Magistral' – Highway*, 2006, no. 4 (62), p. 31 – 37.

3. *Vagony gruzovye. Trebovaniia k prochnosti i dinamicheskim kachestvam, GOST 33211-2014* (Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities). Moscow, OAO «VNIIZh», 2016, 54 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Солоненко Владимир Гельевич

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК).

Ул. Шевченко, 97, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Подвижной состав», КазАТК.

E-mail: v.solonenko@mail.ru

Махметова Нарзанкул Мусаевна

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК).

Ул. Шевченко, 97, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортное строительство», КазАТК.

E-mail: makhmetova_n1958@mail.ru

Бекжанова Сауле Ертаевна

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК).

Ул. Шевченко, 97, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Организация перевозок», КазАТК.

E-mail: makhmetova_n1958@mail.ru

Коптлеуов Ибрай Сакенович

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК).

Ул. Шевченко, 97, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан.

Магистрант кафедры «Подвижной состав», КазАТК.

E-mail: ybrai31@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Динамические характеристики грузовых вагонов, производства ТОО «КБК» на тележках модели 18-9996 [Текст] / В. Г. Солоненко, Н. М. Махметов и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 54 – 60.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Solonenko Vladimir Gel'evich

Kazakh Academy of Transport and Communications. M. Tynyshpaev (KazATK).

Shevchenko Street, 97, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Rolling Stock», KazATK.

E-mail: v.solonenko@mail.ru

Makhmetova Narzankul Musaevna

Kazakh Academy of Transport and Communications. M. Tynyshpaev (KazATK).

Shevchenko Street, 97, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Transport Construction», KazATK.

E-mail: makhmetova_n1958@mail.ru

Bekzhanova Saule Ertaevna

Kazakh Academy of Transport and Communications. M. Tynyshpaev (KazATK).

Ul. Shevchenko, 97, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Organization of Transportation», KazATK.

E-mail: makhmetova_n1958@mail.ru

Koptleuov Ibray Sakenovich

Kazakh Academy of Transport and Communications. M. Tynyshpaev (KazATK). Ul. Shevchenko, 97, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan.

Graduate student of the Department «Rolling Stock», KazATK.

E-mail: ybrai31@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Solonenko V. G., Makhmetova N. M., Bekzhanova S. E., Koptleuov I. S. Dynamic characteristics of the freight railcars, production LLP «KBK» on carts of model 18-9996. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 54 – 60. (In Russian).

УДК 629.4.027.26

В. В. Трофимович, Е. Н. Кузьмичев, М. А. Попов

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск,
Российская Федерация

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕС ТЕЛЕЖЕК ЛОКОМОТИВОВ ТГ16 И ТГ16М В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

Аннотация. В статье выполнено сравнение по величине силы давления гребня на рельс в кривых участках пути локомотивов ТГ16 и ТГ16М.

Ключевые слова: локомотив, тележка, колесная пара, гребень, кривая, износ, давление.

Vitaliy V. Trofimovich, Evgeniy N. Kuz'michev, Mikhail A. Popov

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERACTION OF LOCOMOTIVE WHEELS TRUCKS TG16 TG16M IN A CURVE TRACK SECTIONS

Abstract. The article carried out a comparison of the magnitude of the crest of the pressure forces on the rail in the curve sections of track and locomotives TG16 TG16M.

Keywords: locomotive, truck, wheel pair, crest, curve, wear, pressure.

По решению ОАО «РЖД» с 2003 г. началась перешивка колеи Сахалинской дороги: с ширины 1067 мм на ширину 1520 мм. При этом производится полная реконструкция путевого хозяйства. Для сохранения возможности постоянно использовать пути на дороге укладывается трёхниточная рельсошпальная решётка с расстоянием 1067 и 1520 мм. Кроме работ по перешивке пути требует замены тяговый подвижной состав дороги. Локомотивы, способные работать как на узкой колее, так и, после переоборудования, на широкой колее, стали закупаться для Сахалинского региона ДВЖД с 2014 г.

Основу локомотивного парка острова Сахалин составляют магистральные тепловозы ТГ16 (с 1967 по 1974 г. постройки), предназначенные для работы на железных дорогах колеи 1067 мм. Для замены и обновления парка локомотивов ТГ16 построен тепловоз серии ТГ16М (модернизированный), спроектированный для работы на железных дорогах колеи 1067 и 1520 мм.

Общая длина железных дорог острова Сахалин составляет 922 км, 27 % из которых – кривые участки пути различного радиуса. А процент кривых участков пути малого радиуса (менее 600 м) составляет 17 %. При прохождении кривых малого радиуса локомотивные тележки самоустанавливаются в перекосное положение: наружного рельса касается гребень только передней колесной пары, а между хордой и продольной осью тележки образуется угол, называемый углом перекоса тележки. В результате возрастает давление на рельс гребня набегающего колеса, увеличивается износ контактирующих поверхностей гребня колеса и головки рельса [1]. В связи с этим необходимо рассмотреть, как параметры нового локомотива ТГ16М влияют на давление гребня колеса на рельс, учитывая его работу на разной ширине колеи в сравнении с тепловозом ТГ16.

В работах [2 – 4] учтено влияние многих факторов на процесс разворачивания тележки в рельсовой колее. Были определены законы изменения угла перекоса и сил давления на рельс гребня набегающего колеса, а также было установлено, что максимальный угол перекоса тележки в большинстве случаев меньше предельного угла, определяемого базой тележки и шириной рельсовой колеи. Установлено также, что доминирующее влияние на процесс разворачивания тележки и на величину давления гребня на рельс оказывают поперечные касательные силы в точках контакта поверхностей катания колес и головок рельсов [1].

Решить поставленную в статье задачу, анализируя полную математическую модель [1, 3]

динамики вписывания тележки в кривые, затруднительно из-за ее сложности, поэтому ниже будем использовать упрощенную модель.

Модель тележки при вписывании в кривую имеет ряд упрощений.

1. Вписывание тележки в кривую рассматривается как движение плоской неизменяемой фигуры $A_1A_2A_3A_4$ (рисунок 1) в плоскости рельсовой колеи. Точкам A_i ($i = 1, 2, 3, 4$) соответствуют точки контакта поверхностей катания колес и головок рельсов.

2. Скорость центра шкворневого узла постоянна.

3. Продольные касательные силы в точках контакта колес с рельсами уравновешиваются вращающими моментами тяговых двигателей тележки и силами сопротивления ее движению в кривой.

4. Поперечная внешняя сила, приложенная в центре шкворневого узла тележки, уравновешивается центробежными силами.

5. Силовая нагрузка, перпендикулярная плоскости рельсовой колеи, равномерно распределяется на четыре колеса тележки.

6. Продольные касательные силы в точках контакта возникают вследствие упругих смещений колес относительно рельсов, эти смещения пропорциональны разности скорости контактной точки колеса от вращения вокруг оси КП и скорости центра тележки.

Кинематическая схема тележки при хордовой установке (см. рисунок 1). Чтобы тележка при движении по круговой кривой все время занимала хордовое положение, необходимо обеспечить движение точек A_i по соответствующим дугам окружностей, при этом скорости точек должны удовлетворять соотношениям:

$$V_1 = V_4 = V \frac{R_1}{R}; \quad V_2 = V_3 = V \frac{R_2}{R}, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 – радиусы окружностей, соответствующих внутренней и наружной рельсовым нитям (см. рисунок 1).

Движение тележки, удовлетворяющее соотношениям (1), можно считать состоящим из двух движений: поступательного – вместе с центром C – и вращательного – вокруг оси Z_c с постоянной угловой скоростью $\omega = V/R$. Ось Z_c перпендикулярна плоскости рельсовой колеи и проходит через центр тележки C .

Равномерное вращение тележки вокруг оси Z_c может осуществляться, если сумма моментов всех внешних сил, действующих на тележку относительно этой оси, равна нулю.

Известно, что движение тележки в круговой кривой с сохранением хордового положения и с постоянной угловой скоростью может происходить без касания наружного рельса гребнем набегавшего колеса [1]. При этом сила давления гребня набегавшего колеса на рельс минимальна, что является положительным фактом. Однако при хордовой установке тележки в кривой существуют две причины появления неуравновешенных составляющих касательных сил в точках контакта колес, способствующих разворачиванию тележки вокруг оси Z_c . Касательные силы (силы крипа) – следствие дополнительных упругих смещений точек контакта поверхностей катания колес относительно рельса, величины сил пропорциональны скоростям упругого проскальзывания по рельсам контактных точек колес [5].

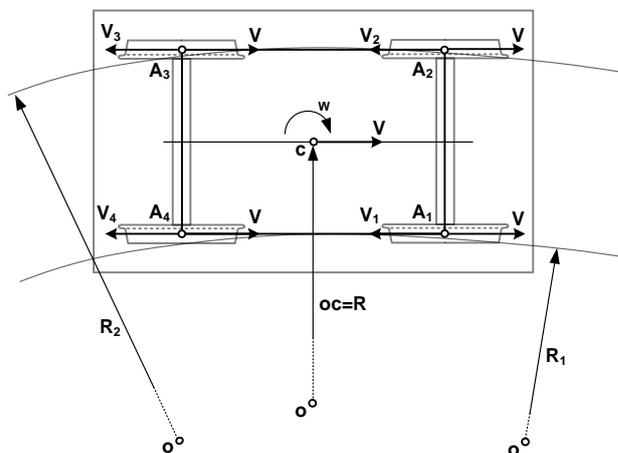


Рисунок 1 – Кинематическая схема тележки при хордовой установке

Опишем причины появления дополнительных упругих скоростей контактных точек колес.

Первая причина (рисунок 2) – вращение тележки вокруг оси Z_c (по часовой стрелке) с угловой скоростью $\omega = V/R$ приводит к возникновению в точках контакта колес с рельсами дополнительных скоростей упругого проскальзывания

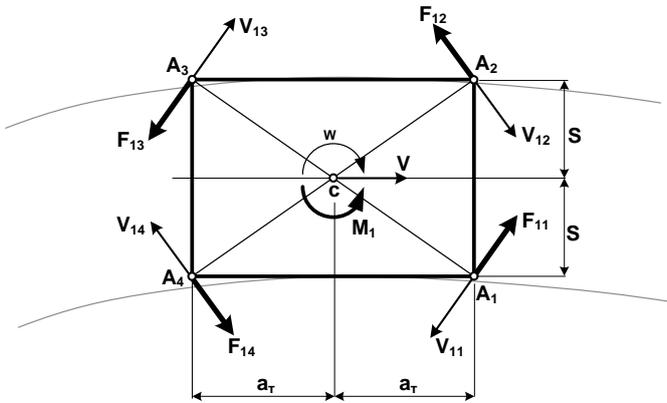


Рисунок 2 – Касательные силы в точках контакта колес и рельсов при хордовой установке (первая группа дополнительных внешних силовых факторов)

$$V_{1i} = \omega \cdot cA_i = V \frac{\sqrt{a_r^2 + S^2}}{R}, \quad (2)$$

где a_r – половина базы тележки; S – половина расстояния между контактными точками колес.

Соответствующие этим скоростям касательные силы определяются по формуле:

$$F_{1i} = \alpha \cdot \Pi \cdot V_{1i} = \alpha \cdot \Pi \cdot V \frac{\sqrt{a_r^2 + S^2}}{R}, \quad (3)$$

где α – динамический коэффициент упругого проскальзывания; Π – нагрузка от

колеса на рельс.

Силы F_{1i} , ($i = 1, 2, 3, 4$) создают относительно оси Z_c момент M_1 , препятствующий поворачиванию тележки по часовой стрелке:

$$M_1 = \alpha \cdot 4 \cdot \Pi \cdot V \frac{a_r^2 + S^2}{R}. \quad (4)$$

Главный вектор сил F_{1i} (их векторная сумма, т. е. $R_1 = 0$) равен нулю.

Вторая причина (рисунок 3) – неодинаковость диаметров окружностей катания колес на внешнем и на внутреннем рельсах при смещении колесных пар к наружному рельсу в кривой за счет конусности бандажей. При этом радиус окружности катания колес на наружном рельсе становится больше среднего радиуса на величину

$$\Delta r = i\delta, \quad (5)$$

где i – конусность поверхности катания колеса; δ – половина колеинового зазора, который зависит от радиуса круговой кривой (см. рисунок 1) и определяется по выражению:

$$\delta = (S_k - S_r)/2, \quad (6)$$

где S_k – ширина рельсовой колеи; S_r – расстояние (в мм) между рабочими гранями гребней колес.

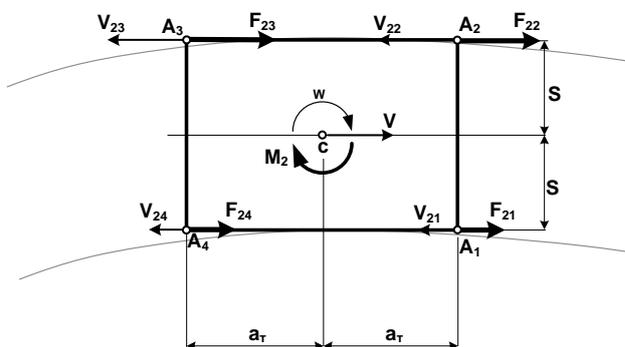


Рисунок 3 – Касательные силы в точках контакта колес и рельсов за счет различия диаметров окружностей катания колес (вторая группа дополнительных внешних силовых факторов)

Соответственно радиус окружности катания колеса на внутреннем рельсе будет меньше на величину Δr . Возникающие в связи с этим дополнительные скорости упругого проскальзывания в четырех контактных точках колес одинаковы по модулю и рассчитываются так:

Рассчитываются так:

$$V_{2i} = V \frac{\Delta r}{r} = \frac{V \cdot i \cdot \delta}{r}. \quad (7)$$

Соответствующие скоростям V_{2i} касательные силы создают относительно оси Z_c момент M_2 , поворачивающий тележку по часовой стрелке:

$$M_2 = \alpha 4 P V \frac{i \delta S}{r}. \quad (8)$$

Главный вектор сил F_{2i} (их векторная сумма, т. е. $R_2 = 0$) равен нулю.

Результат действия на тележку моментов M_1 и M_2 зависит от соотношения их модулей M_1 / M_2 . Также можно определить радиус кривого участка пути R_{\min} , при котором $M_1 = M_2$.

Так, для тепловозов ТГ16 и ТГ16М (узкой колеи) R_{\min} составляет 4300 и 4800 м соответственно, для тепловоза ТГ16М (колеи 1520) $R_{\min} = 1300$ м. Из этого следует, что при движении локомотива в кривых, у которых $R < R_{\min}$, всегда $M_1 > M_2$, т. е. тележки будут отклоняться от хордового положения.

В связи с этим тележки не могут сохранять хордовую установку. Если принять, что при входе в кривую тележка занимала хордовое положение, то последующее ее движение по кривой будет сопровождаться разворачиванием в направлении противоположном ω (т. е. против часовой стрелки). При этом гребень набегающего колеса будет касаться наружного рельса в точке A_2 , а угол между продольной осью тележки и касательной к оси пути будет увеличиваться. Этот угол называют углом перекоса тележки λ .

Третья причина появления дополнительных скоростей упругого проскальзывания контактных точек колес (рисунок 4) – относительное движение тележки (поворот тележки на угол λ относительно т. В).

Скорости упругого проскальзывания в четырех контактных точках колес рассчитываются по уравнению:

$$V_{3i} = \dot{\lambda} \cdot BA_i, \quad (9)$$

где $BA_1 = BA_2 = S$, а $BA_3 = BA_4 = \sqrt{4a_T^2 + S^2}$.

Соответствующие скоростям V_{3i} касательные силы определяются по выражению:

$$F_{3i} = \alpha P \dot{\lambda} \cdot BA_i, \quad (10)$$

где $\dot{\lambda}$ – угловая скорость разворачивания тележки в рельсовой колее.

Приводя силы F_{3i} к центру тележки С, получим главный вектор R_3 , направленный перпендикулярно продольной оси тележки наружу кривой, и главный момент M_3 , стремящийся развернуть тележку по часовой стрелке:

$$R_3 = \alpha 4 P \dot{\lambda} a_T; \quad (11)$$

$$M_3 = \alpha 4 P \dot{\lambda} (a_T^2 + S^2). \quad (12)$$

Четвертая причина появления дополнительных скоростей упругого проскальзывания контактных точек колес (рисунок 5) определяется углом перекоса тележки λ . Поворот тележки на угол λ приводит к тому, что между скоростью V центра тележки С и продольной осью тележки образуется угол λ , а в контактных точках колес возникают дополни-

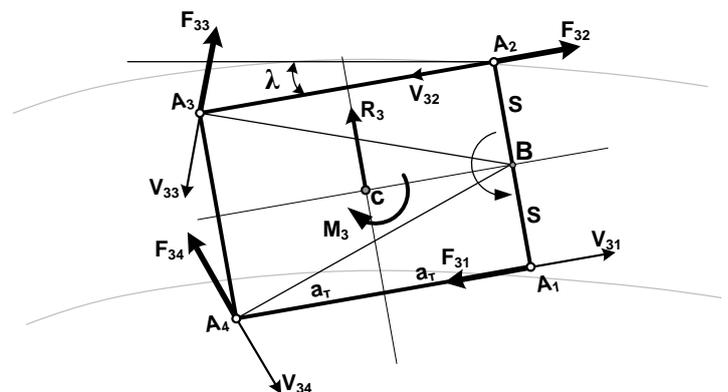


Рисунок 4 – Касательные силы в точках контакта колес и рельсов за счет относительного движения тележки (третья группа дополнительных внешних силовых факторов)

тельные скорости упругого проскальзывания, перпендикулярные продольной оси тележки. Модули этих скоростей одинаковы для всех контактных точек и определяются так:

$$V_{4i} = V \sin \lambda = V \lambda. \quad (13)$$

Соответствующие им касательные силы:

$$F_{4i} = \alpha P V \lambda. \quad (14)$$

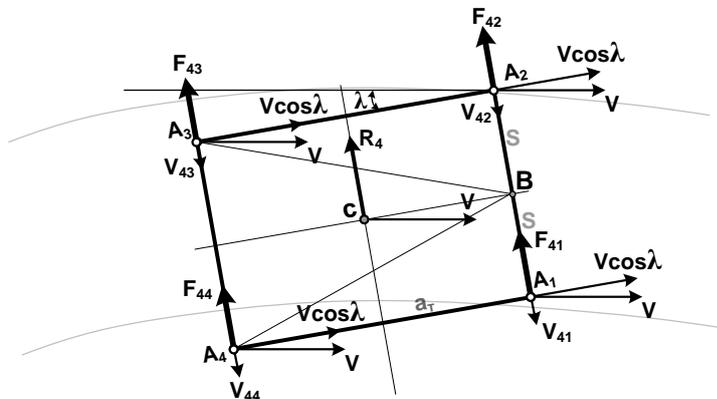


Рисунок 5 – Касательные силы в точках контакта колес и рельсов, определяемые углом перекоса тележки λ (четвертая группа дополнительных внешних силовых факторов)

Силы F_{4i} приводятся к равнодействующей R_4 , проходящей через центр C , направленной перпендикулярно продольной оси тележки наружу кривой. Модуль равнодействующей

$$R_4 = \alpha 4 P V \lambda. \quad (15)$$

Главный момент $M_4 = 0$.

На процесс разворачивания тележки в рельсовой колее кроме сил F и моментов M оказывает влияние сила реакции рельса, действующая на

гребень набегающего колеса N . С учетом допущений будем считать, что сила нормального давления рельса на гребень N направлена перпендикулярно продольной оси тележки (рисунок 6).

С учетом силы $F_{ин}$ и момента инерции $M_{ин}$ дифференциальные уравнения относительного движения тележки имеют вид:

$$F_{ин} - N + R_3 + R_4 = 0; \quad (16)$$

$$M_{ин} - M_1 + M_2 + M_3 + N a_T = 0. \quad (17)$$

Входящие в уравнения (16), (17) силы определяются по соотношениям:

$$F_{ин} = m \ddot{y}_T \quad \text{и} \quad M_{ин} = J_T \ddot{\lambda}, \quad (18)$$

где \ddot{y}_T – ускорение центра масс тележки в относительном движении, направленное перпендикулярно продольной оси тележки, $\ddot{y}_T = a_T \ddot{\lambda}$;

J_T – момент инерции массы тележки относительно оси Z_C , проходящей через центр масс.

После подстановки формул (1) – (5), (8) в уравнения (6) и (7) и приведения подобных слагаемых из уравнения (6) сила давления рельса на гребень N будет определяться по выражению:

$$N = R_3 + R_4 + m a_T \ddot{\lambda}, \quad (19)$$

уравнение (7) с учетом (9) можно преобразовать к виду:

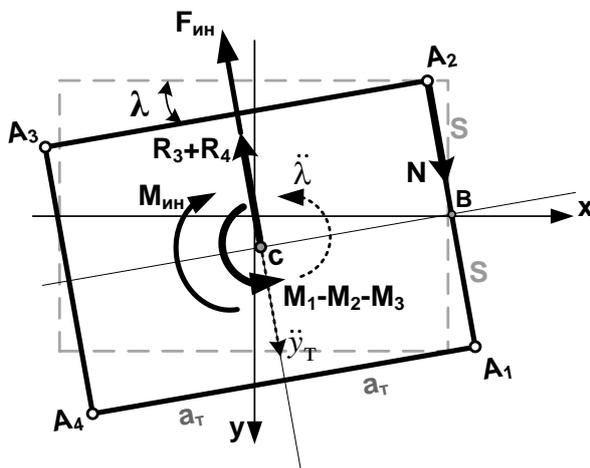


Рисунок 6 – Динамическая схема тележки при перекосной установке

$$k_1 \ddot{\lambda} + k_2 \dot{\lambda} + k_3 \lambda = k_4, \quad (20)$$

где k_i – постоянные коэффициенты, которые определяются выражениями:

$$k_1 = J_T + ma_T^2; \quad k_2 = d4\Pi(3a_T^2 + S^2); \quad k_3 = d4\Pi Va_T; \quad k_4 = d4\Pi V \left(\frac{a_T^2 + S^2}{R} - \frac{i \cdot \delta \cdot S}{r} \right). \quad (21)$$

Решение уравнения (20) позволяет получить закон изменения угла перекаса тележки в рельсовой колее $\lambda(t)$, используя который можно найти закон изменения силы давления рельса на гребень набегающего колеса $N(t)$ (9). Результаты решения уравнения (20) для локомотива ТГ16 при скорости движения 36 км/ч в круговой кривой радиусом 400 м показаны на рисунке 7.

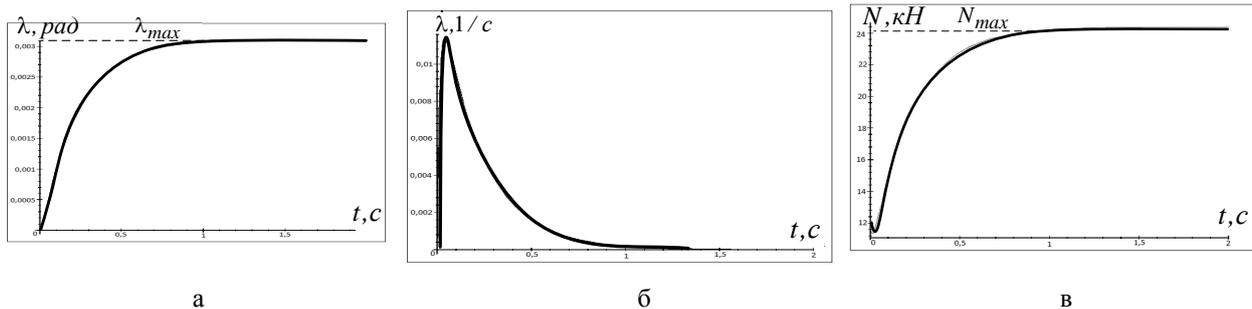


Рисунок 7 – Результаты решения уравнения (20): а – закон изменения угла перекаса тележки в рельсовой колее; б – угловая скорость перекаса тележки в рельсовой колее; в – закон изменения силы давления рельса на гребень набегающего колеса

Если принять нулевые начальные условия, то на тележку вначале будет действовать только моменты M_1 и M_2 , их разность вызывает появление углового ускорения $\ddot{\lambda}$. Возникающие при этом силы инерции определяют согласно формуле (9) силу давления на рельс гребня набегающего колеса в момент начала перекашивания тележки. В дальнейшем с увеличением λ и $\dot{\lambda}$ на тележку будут действовать все силы и моменты, показанные на рисунке 6. На первом этапе перекашивания угловая скорость будет увеличиваться. Второй этап перекашивания – угловая скорость после достижения максимального значения будет быстро убывать до нуля, а угол λ будет стремиться к своему максимальному значению. В максимально перекошенном положении тележки моменты сил, влияющие на ее разворот в рельсовой колее, взаимно уравниваются.

В последующем установившемся движении вращение тележки вокруг центра С будет происходить с постоянной угловой скоростью $\omega = V/R$.

Давление на рельс гребня набегающего колеса на первом этапе перекашивания тележки уменьшается из-за быстрого убывания $\ddot{\lambda}$ и недостаточно быстрого возрастания сил R_3 и R_4 . На втором этапе давление гребня на рельс увеличивается за счет сил R_3 и R_4 , при этом влияние сил инерции тележки становится несущественным. В максимально перекошенном положении тележки давление гребня на рельс определяется только силой R_4 .

Зависимость максимальной силы давления гребня на рельс от скорости движения $N_{max}(V)$ показана на рисунке 8.

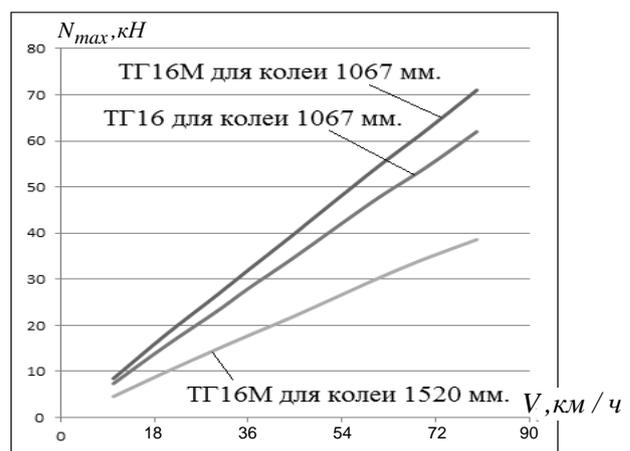


Рисунок 8 – График зависимости $N_{max}(V)$ при радиусе кривой 300 м

Из графика зависимости $N_{\max}(V)$ видим, что при увеличении скорости V сила давления на гребень N увеличивается; для локомотива ТГ16М (колеи 1520 мм) сила давления на гребень меньше, чем у ТГ16, на 35 % и на 44 % меньше ТГ16М (колеи 1067 мм), а сила давления на гребень у ТГ16 ниже, чем у ТГ16М (колеи 1067 мм), на 12 %.

Зависимость максимальной силы давления гребня на рельс при изменении радиуса круговой кривой $N_{\max}(R)$ показана на рисунке 9.

Из графика $N_{\max}(R)$ видим:

для ТГ16 (колеи 1067 мм) при радиусе кривой до 200 м сила давления на гребень меньше, чем для ТГ16М (колеи 1520 мм), на 10 %;

на колее 1067 мм сила давления на гребень N у локомотива ТГ16 меньше, чем на ТГ16М, на 11 %;

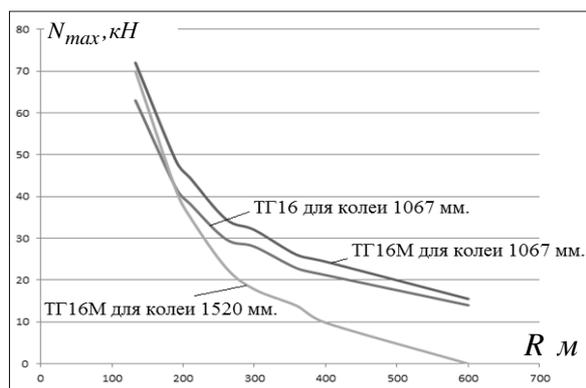


Рисунок 9 – График зависимости $N_{\max}(R)$ для кривых радиусом от 133 до 600 м

для ТГ16М (колеи 1520 мм) при радиусе кривой более 200 м сила давления на гребень меньше, чем для ТГ16 (колеи 1067 мм) на 36 % и на 44 % меньше, чем для ТГ16М (колеи 1067 мм), соответственно;

для ТГ16М (колеи 1520 мм) при радиусе 600 м и более сила давления на гребень будет отсутствовать.

Анализ вписывания тележек в кривые участки железнодорожного пути показал, что при ширине колеи 1520 мм при радиусе кривых от 200 м и выше сила давления на гребень будет меньше, чем при ширине колеи 1067 мм, отсюда следует, что износ гребня колеса будет меньше на колее

1520 мм, а при радиусе кривой более 600 м сила давления на гребень на колее 1520 мм будет отсутствовать, в то время как на колее 1067 мм сила давления на гребень значительно уменьшится при радиусе кривой более 500 м.

Список литературы

1. Доронин, В. И. Движение колесных пар подвижного состава в прямых и кривых участках рельсовой колеи: Монография / В. И. Доронин, С. В. Доронин / Дальневосточный гос. ун-т путей ообщения. – Хабаровск, 2006. – 120 с.
2. Доронин, С. В. Управление движением локомотивных тележек в кривых / С. В. Доронин, И. И. Доронина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 1 (25). – С. 25 – 30.
3. Доронин, В. И. Взаимодействие колесных пар электровоза ЭП1 с рельсами в переходных и круговых кривых малого радиуса / В. И. Доронин, В. В. Трофимович // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2005. – № 4 (20). – С. 47 – 52.
4. Захаров, С. М. Математическое моделирование влияния параметров пути и подвижного состава на процессы изнашивания колеса и рельса / С. М. Захаров, Ю. С. Ромен // Вестник науч.-исследоват. ин-та ж.-д. трансп / ВНИИЖТ. – М. – 2010. – № 2. – С. 26 – 30.
5. Куценко, С. М. Динамика установившегося движения локомотивов в кривых / С. М. Куценко. – Харьков: Высшая школа. – 1975. – С. 130.

References

1. Doronin V. I., Doronin S. V. *Dvizhenie klesnih par podvizjnogo sostava v pramih I krivih uchastkah relsovoi kolei: Monografiya* (The movement of wheel couples of rolling stock in direct and curve sites of a rail track). Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2006. – 120 p.
2. Doronin S.V. Doronina I. I. Motion control of locomotive trolleys in curves [Upravlenie dvizheniem lokomotivnih telezhek v krivih]. *Izvesyia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, № 1 (25), pp. 20 – 30.
3. Doronin V. I., Trofimovich V. V. Interaction of wheel couples of electric locomotive of JeP1 with rails in transitional and circular curves of small radius [Vzaimideistvie kolesnih par elektrovoza EP1 s relsami v perehodnih i krugovih krivih malogo radiusa]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Bulletin of Rostov State Transport University*, 2005, no. 4 (20), pp. 47 – 52.
4. Zakharov S. M., Roman U. S. Mathematical modeling of influence of parameters of a way and the rolling stock on processes of wear of a wheel and rail [Matematicheskoe modelirovanie vliania parametrov puti i podvizjnogo sostava na procesi iznachivania kolesa i relsa]. *Vestnik VNIIZhT – Vestnik VNIIZhT*, no. 2, 2010, pp. 26 – 30.
5. Kutsenko S. M. *Dinamika ustanovivshegosia dvizheniia lokomotivov v krivykh* (Dynamics of the established movement of locomotives in curves). Khar'kov: Vysshiaia shkola, 1975, 130 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофимович Виталий Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Ул. Серышева, 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

E-mail: tvvit@mail.ru

Кузьмичев Евгений Николаевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Ул. Серышева, 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

E-mail: accord@festu.khv.ru

Попов Михаил Алексеевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Ул. Серышева, 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

E-mail: main79@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Трофимович, В. В. Сравнительный анализ взаимодействия колес тележек локомотивов ТГ16 и ТГ16М в кривых участках пути [Текст] / В. В. Трофимович, Е. Н. Кузьмичев, М. А. Попов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 61 – 68.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Trofimovich Vitaliy Vladimirovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

Serysheva Street, 47, Khabarovsk, 680021, Russian Federation.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: tvvit@mail.ru

Kuz'michev Evgeniy Nikolaevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

Serysheva Street, 47, Khabarovsk, 680021, Russian Federation.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: tvvit@mail.ru

Popov Mikhail Alekseevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

Serysheva Street, 47, Khabarovsk, 680021, Russian Federation.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», FESTU.

E-mail: tvvit@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Trofimovich V. V., Kuz'michev E. N., Popov M. A. comparative analysis of interaction of locomotive wheels trucks TG16 TG16M in a curve track sections. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 61 – 68. (In Russian).

УДК 629.4

В. А. Нехаев, В. А. Николаев, Д. Ю. Лукс

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ «ВАГОН – ПУТЬ» НА ДИНАМИКУ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЭКИПАЖА

***Аннотация.** Выполнено исследование влияния параметров нелинейного рессорного подвешивания грузового вагона (жесткости рессорного комплекта, базы тележки, длины неровностей пути) на амплитуду и фазу колебаний подпрыгивания кузова. Определена собственная частота колебаний подпрыгивания кузова вагона как функция его параметров.*

***Ключевые слова:** грузовой вагон с нелинейным рессорным подвешиванием, база тележки, математическая модель, неровности пути, колебания.*

Victor A. Nekhaev, Victor A. Nikolaev, Dmitry Y. Luks

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

STUDY OF THE INFLUENCE OF NON-LINEAR SYSTEM PARAMETERS «WAGON-WAY» ON THE DYNAMICS OF RAILWAY VEHICLE

***Abstract.** A study of the influence of non-linear parameters spring of a freight car suspension (stiffness spring, length base of a bogie, roughnesses railway) on the amplitude and phase fluctuations bouncing body is completed. Defined own vibrational frequency jumps car body as a function of the parameters.*

***Keywords:** freight wagon with of nonlinear spring suspension, base of bogie, mathematical model, the roughness of railway, vibrations.*

Существенным отличием новых инновационных вагонов, выпускаемых Тихвинским вагоностроительным заводом, оснащенных тележками Barber (модели 12-9761-02 и 12-9853), и вагонов производства Уральского вагоностроительного завода с тележками модели 18-194-1 (модель 12-196-01) от вагонов старой модели (12-132) с тележкой 18-100 является то, что тележки Barber (18-9810 и 18-9855) и 18-194-1 имеют нелинейное рессорное подвешивание, способствующее повышению безопасности движения вагонов прежде всего в порожнем режиме их движения.

В результате экспериментов, выполненных сотрудниками кафедры «Теоретическая механика» ОмГУПСа в вагонном депо Московка (филиале ВРК-2) построена силовая характеристика тележки «Barber-S-2-R», которая практически совпадает с данными, приведенными в работе [1].

Силовая характеристика рессорного подвешивания такой тележки, представленная на рисунке 1 (линия 1), имеет переломы, соответствующие прогибам 0–0,005 м; 0,005–0,015 м; 0,015–0,050 м и свыше 0,050 м.

Таким образом, рессорное подвешивание новых тележек грузовых вагонов обладает кусочно-линейной силовой характеристикой и в окрестности положения статического прогиба рессорного комплекта в груженом состоянии вагона его жесткость равна 447 кгс/мм (или 4,385 кН/м). В настоящее время, как показано в работе [2], вождение поездов повышенной массы и длины является причиной формирования неровностей пути с большой амплитудой, вызывающей интенсивные колебания вагона с соответствующими большими динамическими прогибами рессорных комплектов. Такие прогибы превышают диапазоны отдельных участков силовой характеристики, поэтому для дальнейших исследований необходимо получить ее аналитическое представление, так как решение задачи методами качественного исследования, в данном случае методом припасовывания, чрезвычайно трудоемко. Аналитическое представление силовой характеристики можно получить следующим образом.

Сначала с использованием эмпирического материала строится сплайн-преобразование, которое состоит из минимально необходимого числа кубических парабол, число которых определяется выбираемой нами точностью представления исходных данных.

С помощью известного метода наименьших квадратов, причем суммы были заменены на интегралы, которые необходимо было вычислять с заданной точностью, вначале находим сплайн-преобразование силовой характеристики рессорного комплекта, строим кубический полином для одного рессорного комплекта тележки вагона:

$$G(\Delta) = \sum_{k=1}^4 a_k \Delta^{k-1}, \quad (1)$$

где Δ – сжатие рессорного комплекта; $a_1 = 9,377356$, $a_2 = -1032,72078$, $a_3 = 46425,900496$, $a_4 = -102667,212$ – коэффициенты регрессионного уравнения (1). Нужно отметить, что эти коэффициенты зависят от диапазона, на котором определена силовая характеристика рессорного подвешивания экипажа. Аппроксимирующая (2) силовая характеристика рессорного комплекта тележки Барбера приведена на рисунке 1 (кривая 2). Из графика видно, что кубический полином достаточно хорошо описывает исходную кусочно-линейную кривую. Некоторые отличия обнаруживаются в точках перелома и в начале координат, что некритично потому, что колебания подпрыгивания кузова вагона происходят относительно положения, достаточно близкого к статическому равновесию.

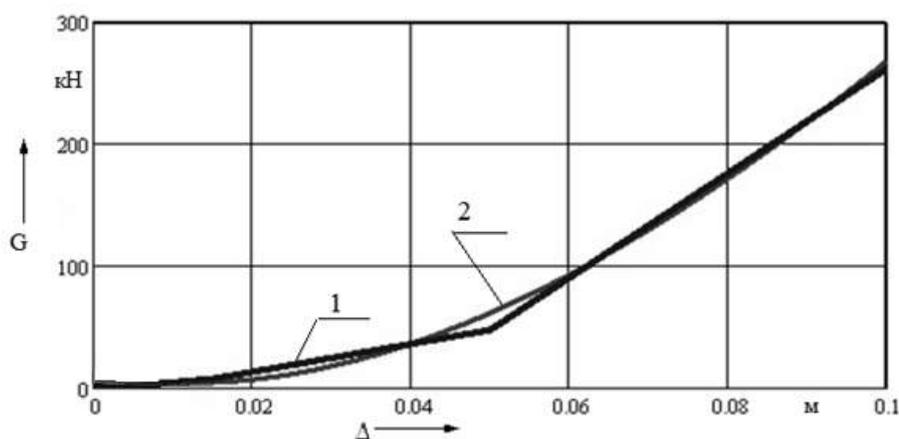


Рисунок 1 – Экспериментальная (1) и аппроксимирующая (2) силовые характеристики рессорного подвешивания тележки Барбера, кН

Из теории колебаний известно, что жесткость любой силовой характеристики определяется как производная от силовой характеристики по прогибу. Определим этот параметр для рессорного комплекта вагона, взяв производную от силовой характеристики по прогибу:

$$ж(\Delta) = a_2 + 2a_3\Delta + 3a_4\Delta^2 = \sum_{k=2}^4 (k-1)a_k\Delta^{k-2}. \quad (2)$$

На рисунке 2 показан график жесткости нелинейного рессорного подвешивания кузова вагона на тележках Барбера как функции прогиба.

Заметим, что вследствие полученной аппроксимации кусочно-линейной силовой характеристики кубическим полиномом значение жесткости при прогибах до 6 мм является отрицательным, что, разумеется, противоречит физическому смыслу. Этот факт можно не принимать во внимание, так как даже в порожнем режиме движения вагона величина статического прогиба превышает 20 мм. При колебаниях около статического равновесия, как видно из рисунка 1, расчетная и экспериментальная характеристики близки друг к другу. Оценим погрешность выполненной аппроксимации. Здесь можно отметить, что жесткость определяется как отношение приращения функции (силы упругости) к приращению деформации рессорного комплекта, при-

чем эти величины берутся немалыми). Экспериментально установлено, что жесткость одного рессорного комплекта в груженом режиме вагона равна 447 тс/м. Так как колебания кузова в груженом режиме его движения происходят около положения статического равновесия, то с учетом амплитуды динамического прогиба рессорного комплекта получаем, что она приблизительно равна 472,7 тс/м. Следовательно, погрешность аппроксимации не превышает 6 %, что вполне приемлемо. Отметим, что из рисунка 2 вытекает очевидный вывод – характеристика рессорного подвешивания тележки Барбера относится к так называемому «жесткому» типу.

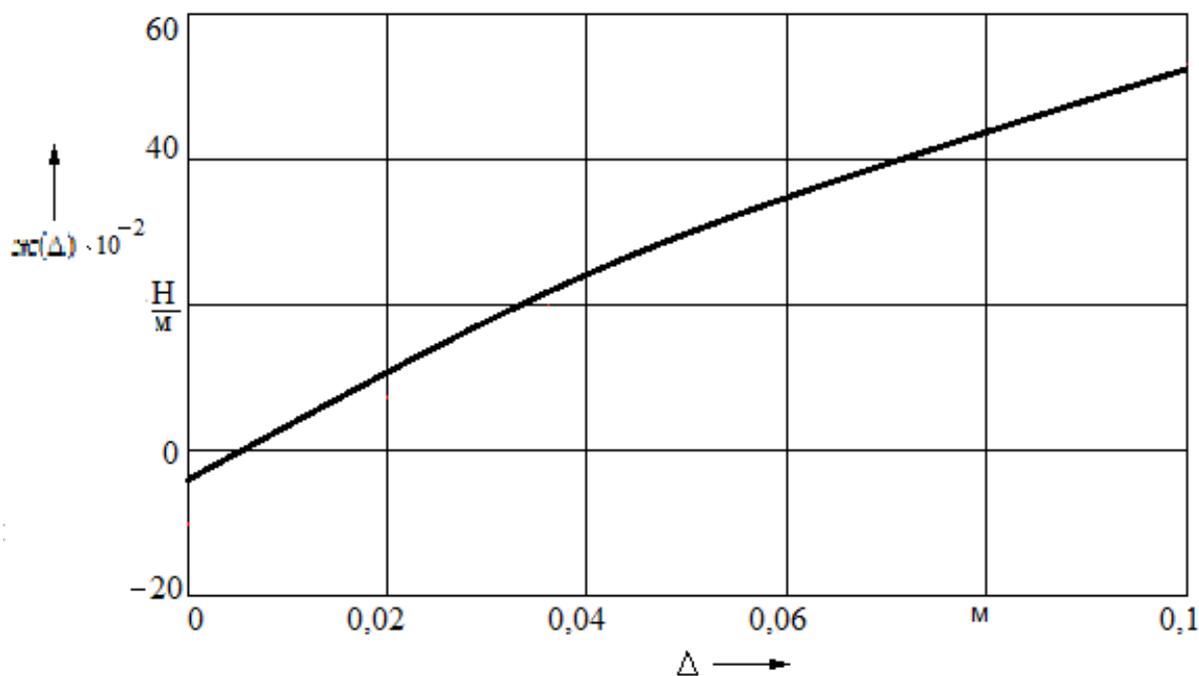


Рисунок 2 – Характеристика жесткости рессорного комплекта тележки Барбера

Выполним оценку влияния базы тележки на динамику вагона.

Для рассматриваемого случая ограничимся рассмотрением колебаний вагона в вертикальной продольной плоскости симметрии железнодорожного экипажа и учтем только колебания подпрыгивания кузова, что, как показано в работе [3], вполне корректно.

Для исследования динамики подвижного состава применяются несколько математических моделей железнодорожного пути разной степени сложности и детализации протекающих в нём процессов. Во многих случаях [4, 5] применяется модель абсолютно жесткого пути, т. е. путь описывается только геометрическими неровностями, а также неровностями на поверхности катания рельсов. Как показывает практика исследований, погрешность такой идеализации железнодорожного пути можно оценить в 10 – 15 %, что вполне удовлетворительно с инженерной точки зрения.

Обоснование данной идеализации также подтверждается результатами многочисленных исследований, позволивших идентифицировать параметры железнодорожного пути и спектральную плотность геометрической неровности на основании эмпирических данных [6, 7]. В результате оказалось, что колесная пара практически в точности повторяла геометрическую неровность пути при ее безотрывном движении по рельсам, следовательно, можно понизить число степеней свободы подвижного состава.

Расчетная схема системы «вагон – путь» приведена на рисунке 3.

Запишем дифференциальное уравнение для подпрыгивания кузова вагона:

$$m\ddot{z} + \beta(\dot{z} - \dot{\eta}) + 2G(z - \eta) = mg, \quad (3)$$

здесь m – половина массы кузова и масса надрессорной балки с учетом половины массы груза, (тс·с²/м); z – подпрыгивание кузова полувагона, м; β – эквивалентное вязкое трение в рессорном

подвешивании, тс·с/м, определяемое по равенству работ реальной диссипативной силы и демпфера вязкого трения; $\eta = \eta_1 + \eta_2$ – геометрическая неровность пути, м (при этом полагаем, что на обоих рельсах она одинакова); g – ускорение свободно падающего тела, равное $9,81 \text{ м/с}^2$.

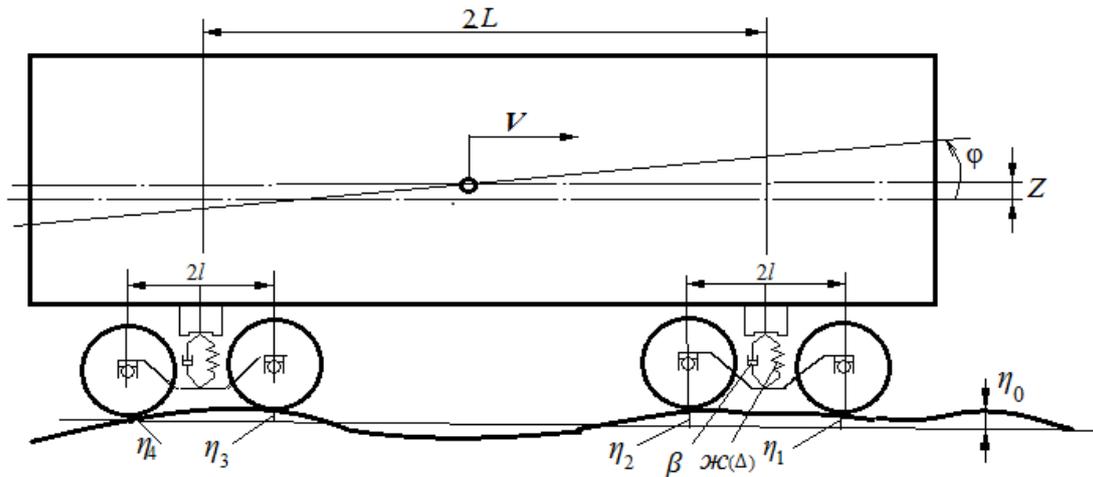


Рисунок 3 – Расчетная схема системы «вагон – путь»

Необходимо отметить некоторую важную особенность, которая часто теряется при линеаризации характеристики силы сухого трения. Из теории динамики систем с сухим трением известно [8], что такое трение способно создавать зоны застоя, и поэтому аналитическое исследование движения таких систем чрезвычайно затруднено. Мы полагаем, что энергии, доставляемой в систему внешним воздействием, достаточно для движения кузова вагона без остановок, следовательно, вагон всегда совершает колебательные движения и процедура замены сухого трения вязким здесь является достаточно корректной.

Силовая характеристика рессорного подвешивания тележки Барбера нелинейная, поэтому будем использовать метод гармонического баланса, который требует выполнения энергетического соотношения только на частоте возмущения, которое считаем гармоническим согласно [5]. Амплитуда этого воздействия может быть выражена в зависимости от длины неровности пути соотношением $h = 0,0004 l_n$, м (рекомендовано профессором В. А. Камаевым [9]), что практически совпадает с требованиями Руководящего документа ВНИИЖТа.

Выполним некоторые несложные преобразования, связанные с внешним возмущением, действующим на колесные пары вагона, что упростит дальнейшие расчеты:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_1 = h \sin(\omega t + \varphi); \quad \eta_2 = h \sin(\omega t - \omega \tau + \varphi); \\ \tau = \frac{3,6 l_m}{V}; \quad \omega \tau = 2\pi \frac{l_m}{l_n}; \\ \eta = \eta_1 + \eta_2 = 2h \cos 2\pi \frac{l_m}{l_n} \sin(\omega t - \gamma); \\ \gamma = \arctg \frac{\sin 2\pi \frac{l_m}{l_n}}{1 + \cos 2\pi \frac{l_m}{l_n}}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где h – амплитуда волнообразного износа, м; $\omega = \frac{\pi V}{1,8 l_n}$ – частота внешнего возмущения, рад/с;

V – скорость движения полувагона вдоль железнодорожного пути, км/ч; l_n – база тележки, м, ($l_n = 2l$); l_m – длина геометрической неровности, м; t – время, с; φ – сдвиг фазы внешнего воздей-

ствия (рад) по отношению к решению (так следует поступать в нелинейных случаях, чтобы облегчить нахождение решения); τ – время запаздывания второй колесной пары относительно первой.

Из приведенных формул видно, что отношение базы тележки к длине геометрической неровности играет важную роль в динамике подвижного состава. Однако выбрать вполне конкретное соотношение невозможно ввиду того, что на реальном пути существуют разные длины неровностей, при этом амплитуда и длина некоторых из них изменяются непредсказуемым образом.

Кроме того, при выборе базы тележки доминирующую роль играют условия необходимости рационального вписывания вагона в кривую. При увеличении базы тележки возрастает угол набегания колесной пары на рельс, что приводит к интенсивному износу гребня колеса и головки рельса. Кроме того, увеличение базы повлечет за собой возрастание изгибающего момента в наиболее нагруженном сечении боковой рамы, что ведет к необходимости повышения ее момента сопротивления и, следовательно, увеличения необрессоренной массы, негативно влияющей на верхнее строение пути.

Несмотря на отмеченное, с точки зрения минимизации воздействия неровностей пути на динамику вагона все же можно указать два рациональных значения для отношения базы тележки к длине геометрической неровности. Исходя из того факта, косинус этого отношения, умноженный на 2π должен быть близок к нулю, имеем, что $l_n = 4l_t$ или $l_n = 4l_t/3$. Необходимо отметить, что указанные соотношения являются приближенными.

Вследствие того, что нелинейная силовая характеристика рессорного подвешивания тележки Барбера обладает четной несимметрией, необходимо выполнить оценку влияния конструктивных параметров рассматриваемой механической колебательной системы на амплитуду установившегося решения и найти угол сдвига фазы между решением и возмущающим воздействием.

Если обратиться к уравнению (3) и учесть принятую аппроксимацию силовой характеристики рессорного подвешивания тележки Барбера в виде кубического полинома, то нетрудно заметить проблему, связанную с возведением в степень разности $z - \eta$. От нее можно избавиться, введя новую переменную $\Delta = z - \eta$, т. е. прогиб рессорного подвешивания, тогда дифференциальное уравнение для сжатия рессорного комплекта тележки Барбера будет иметь следующий вид:

$$m\ddot{\Delta} + \beta\dot{\Delta} + 2G(\Delta) = mg - m\ddot{y} \quad (5)$$

или

$$\ddot{\Delta} + 2n\dot{\Delta} + \frac{2}{m}G(\Delta) = g + 2h\omega^2 \cos 2\pi \frac{l_m}{l_n} \sin(\omega t - \gamma + \varphi). \quad (6)$$

Здесь угол φ сдвига фазы между вынужденными колебаниями и внешним воздействием внесен в правую часть дифференциального уравнения для упрощения поиска решения (обычно так поступают в нелинейных системах).

Установившееся решение данного уравнения найдем в виде:

$$\Delta = D_0 + A \sin(\omega t - \gamma), \quad (7)$$

где D_0 – константа, появляющаяся из-за того, что нелинейная силовая характеристика рессорного подвешивания тележки Барбера обладает четной несимметрией, а также и потому, что в правой части дифференциального уравнения есть постоянная величина, равная g .

Уравнение (7) – приближенное, стационарное решение, так как на самом деле любая периодическая функция, удовлетворяющая условиям Липшица, всегда может быть представлена бесконечным рядом Фурье. Однако следует помнить о том, что здесь строится алгоритм экспертной оценки динамического поведения вагона, следовательно, вполне допустимы некоторые небольшие погрешности.

Необходимо отметить, что в данном случае взят лишь первый гармонический член этого ряда, поэтому и говорится о приближённом решении (7) и удовлетворении нелинейного уравнения (6) лишь по гармонике возмущения ω . В этом, собственно говоря, заключается суть метода гармонического баланса, которым далее следует воспользоваться.

Вспомним некоторые тригонометрические соотношения, которые понадобятся нам в дальнейших преобразованиях:

$$\begin{cases} \sin^2 \psi = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\psi); \\ \sin^3 \psi = \frac{1}{4}(3 \sin \psi - \sin 3\psi), \end{cases} \quad (8)$$

здесь $\psi = \omega t - \gamma$. Подставим решение (6) в формулу (1), тогда получим:

$$\begin{aligned} G(\Delta) &= a_1 + a_2 \Delta + a_3 \Delta^2 + a_4 \Delta^3 = \\ &= a_1 + a_2 (D_0 + A \sin \psi) + a_3 (D_0 + A \sin \psi)^2 + a_4 (D_0 + A \sin \psi)^3 = \\ &\approx G(D_0) + \frac{1}{2} (a_3 + 3a_4 D_0) A^2 + \left[\mathcal{K}(D_0) + \frac{3}{4} a_4 A^2 \right] A \sin \psi, \end{aligned} \quad (9)$$

где $G(D_0)$ – постоянная величина силы, создаваемой рессорным комплектом вагона, тс; $\mathcal{K}(D_0)$ – значение жесткости рессорного подвешивания кузова вагона в точке D_0 , тс/м; $\psi = \omega t - \gamma$ – аргумент тригонометрической функции. Далее внесем формулу (7) в уравнение (6) и с учетом выражений (8) и (9), получим:

$$\begin{aligned} \frac{2}{m} \left[G(D_0) + \frac{1}{2} (a_3 + 3a_4 D_0) A^2 \right] - A \omega^2 \sin \psi + 2n\omega A \cos \psi + \frac{2}{m} k_0^2(D_0, A) A \sin \psi = \\ = g + h\omega^2 \cos 2\pi \frac{l_m}{l_n} \sin(\psi + \varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

Вследствие того, что решение уравнения (7) должно выполняться в любой момент времени, запишем систему трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} 2G(D_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2 G}{d\Delta^2} (D_0) A^2 = mg; \\ \left[k_0^2(D_0, A) - \omega^2 \right] A = 2h\omega^2 \cos 2\pi \frac{l_m}{l_n} \cos \varphi; \\ 2n\omega A = 2h\omega^2 \cos 2\pi \frac{l_m}{l_n} \sin \varphi, \end{cases} \quad (11)$$

где $k_0(D_0, A) = \sqrt{\frac{2}{m} \left[\mathcal{K}(D_0) + \frac{3}{4} a_4 A^2 \right]}$ – собственная частота подпрыгивания кузова вагона в консервативном случае, рад/с; $d^2 G(D_0)/d\Delta^2 = 2(a_3 + 3a_4 D_0)$ – значение второй производной от силовой характеристики в точке $\Delta = D_0$, тс/м².

Разрешим первое уравнение системы (11) относительно квадрата амплитуды подпрыгивания кузова вагона на тележках Барбера, в результате имеем:

$$A^2 = \frac{mg - 2G(D_0)}{a_3 + 3a_4 D_0}. \quad (12)$$

Подставим этот результат в выражение собственной частоты колебаний подпрыгивания кузова вагона в консервативном случае, в результате получим формулу для определения собственной частоты подпрыгивания кузова вагона как функцию переменной D_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{m} \left[\text{жс}(D_0) + \frac{3}{4} a_4 \frac{mg - 2G(D_0)}{a_3 + 3a_4 D_0} \right]}. \quad (13)$$

Далее, возводя второе и третье уравнения в квадрат, складывая результаты и учитывая выражение (13), найдем целевую функцию для поиска неизвестных величин (ее вид хорошо знаком специалистам по теории колебаний, что указывает на корректность проведенных выше расчетов):

$$\left\{ \left[\omega_0^2(D_0) - \omega^2 \right]^2 + 4n^2 \omega^2 \right\} A^2 = 4h^2 \omega^4 \cos^2 2\pi \frac{l_m}{l_n}. \quad (14)$$

Подставляя в формулу (14) значение A^2 из выражения (12), после несложных преобразований получим нелинейное алгебраическое уравнение для переменной D_0 :

$$\left\{ \left[\omega_0^2(D_0) - \omega^2 \right]^2 + 4n^2 \omega^2 \right\} \frac{mg - 2G(D_0)}{a_3 + 3a_4 D_0} = h^2 \omega^4 \cos^2 2\pi \frac{l_m}{l_n}. \quad (15)$$

Отметим, что согласно физическому смыслу собственная частота нелинейной системы обязана быть действительной величиной, тогда должно выполняться неравенство:

$$mg - 2a_1 \geq 2(a_2 + a_3 D_0 + a_4 D_0^2) D_0 - \frac{4}{3} \frac{a_2 + 2a_3 D_0 + 3a_4 D_0^2}{a_4}. \quad (16)$$

С другой стороны, амплитуда подпрыгивания кузова полувагона A должна быть также действительной величиной, которая должна быть больше или равна нулю, следовательно, имеем еще одно неравенство:

$$mg - 2a_1 \geq 2(a_2 + a_3 D_0 + a_4 D_0^2) D_0. \quad (17)$$

Для запуска итерационного процесса получения корня необходимо знать начальное приближение к корню D_0 , которое должно выбираться из условия обеспечения сходимости итераций, следовательно, должны выполняться неравенства (16) и (17). Хотя проще это сделать, если решить неравенство (16), которое превращается в равенство при отыскании критического значения, ибо это кубическое уравнение, которое, как известно из высшей математики, обязательно будет иметь один действительный и два комплексно-сопряженных корня, или три действительных корня.

Поиск значения переменной D_0 будем осуществлять, минимизируя целевую функцию (15), для этого в пакете *Mathcad* есть стандартная процедура **root(...)**. В результате использования указанной функции имеем график зависимости D_0 от скорости движения вагона (рисунок 4).

Заметим, что изменение переменной D_0 не очень велико и близко к статическому прогибу рессорного подвешивания кузова вагона. На рисунке 5 показано изменение динамической добавки деформации рессорного комплекта кузова вагона на тележках Барбера в зависимости от скорости его движения. Из графика на рисунке 5 видно, что максимальная амплитуда деформации не превышает 4 мм, что вполне совпадает с практикой.

Угол сдвига фазы между решением и возмущающим воздействием находится из второго и третьего уравнений системы (11):

$$\varphi = \arctg \frac{2n\omega}{\omega_0^2(D_0) - \omega^2}. \quad (18)$$

Вычислять этот угол нужно с учетом квадрантов фазовой плоскости. Так, если $\omega_0(D_0) > \omega$, то точка на фазовой плоскости находится в дорезонансной области и $\varphi < \pi/2$, если же $\omega_0(D_0) = \omega$, то точка находится в области резонанса и $\varphi = \pi/2$, если же $\omega_0(D_0) < \omega$, то, очевидно, что точка находится в зарезонансной области и $\varphi = \pi + \arctg 2n\omega / [\omega_0^2(D_0) - \omega^2]$.

Полученные данные служат основой для дальнейшей оценки показателей динамических качеств грузового вагона с нелинейным рессорным подвешиванием.

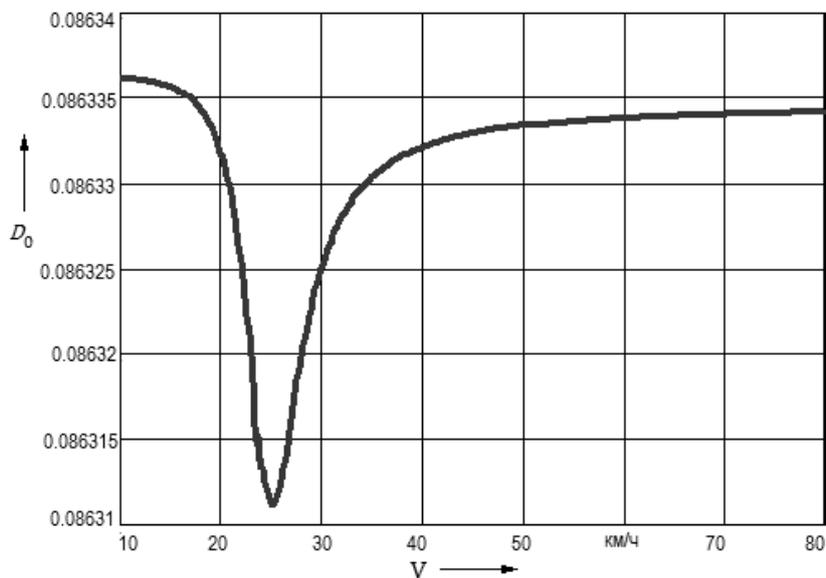


Рисунок 4 – График зависимости переменной D_0 , (м) от скорости движения вагона при длине неровности 3 м

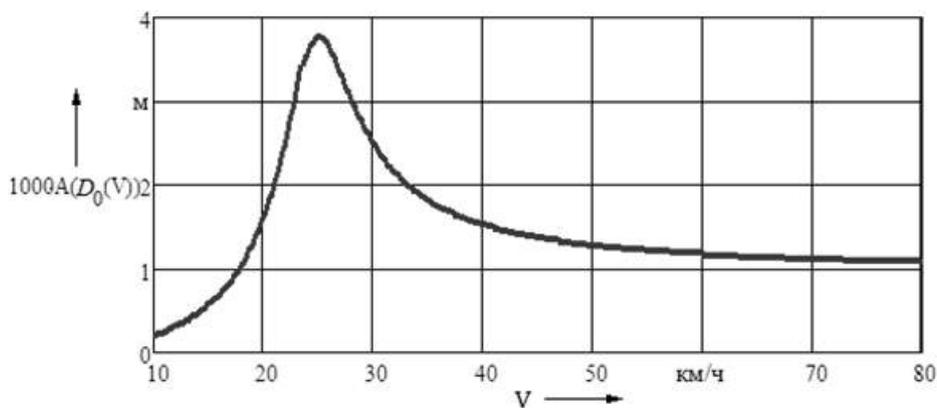


Рисунок 5 – Амплитуда деформации рессорного комплекта вагона (мм) при длине неровности 3 м

График изменения постоянной величины $G(D_0)$, создаваемой рессорным подвешиванием вагона, показан на рисунке 6.

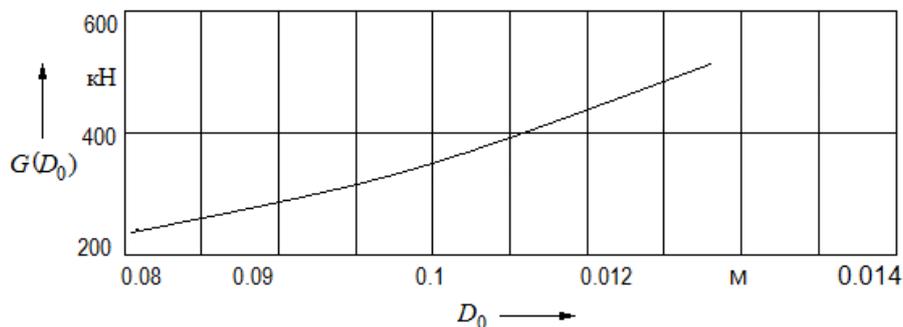


Рисунок 6 – Изменение величины $G(D_0)$ в зависимости от прогиба рессорного комплекта

Список литературы

1. Мещерин, Ю. В. О рессорном подвешивании тележек грузовых вагонов [Текст] / Ю. В. Мещерин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 2 (46). – С. 33–35.
2. Воздействие длинносоставных поездов на путь [Текст] / В. С. Коссов, А. А. Лунин и др. // Вестник ВНИИЖТа. – М. – 2016. – Т. 75. – № 5. – С. 224–231.
3. Вершинский, С. В. Динамика вагона [Текст] / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. – М.: Транспорт, 1978. – 352 с.
4. Нехаев, В. А. Обоснование выбора расчетной схемы железнодорожного экипажа для оценки импульсного воздействия со стороны пути [Текст] / В. А., Нехаев В. А. Николаев, Е. П. Челтыгмашев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 1 (21). – С. 36–44.
5. Кудрявцев, Н. Н. Исследование динамики необреесоренных масс вагонов [Текст] / Н. Н. Кудрявцев / Сб. научн. тр. / ЦНИИ МПС. – М.: Транспорт, 1965. – Вып. 287. – 190 с.
6. Руководящий документ РД 32.68-96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов [Текст] / РФ МПС. – М., 1996. – 17 с.
7. Результаты экспериментальных исследований упругих характеристик пути на Забайкальской железной дороге [Текст] / М. П. Пахомов, И. И. Галиев и др. // Материалы сетевой науч.-техн. конф. «Динамика и меры повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири» / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп.. – Омск, 1972. – С. 139–146.
8. О моделях для исследования взаимодействия подвижного состава и пути [Текст] / В. А. Лазарян, З. Г. Берман и др. // Материалы сетевой науч.-техн. конф. «Динамика и меры повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири» / Омский ин-т инж. ж.-д. транспорта. – Омск, 1972. – С. 174–178.
9. Фейгин, М. И. Вынужденные колебания систем с разрывными нелинейностями [Текст] / М. И. Фейгин. – М.: Наука, 1994. – 285 с.
10. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. А. Камаев. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.

References

1. Meshcherin Iu. V. On the spring suspension of cargo wagon carriages [O ressonom podveshivanii telezhek gruzovykh vagonov]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo – Wagons*, 2016, no. 2 (46), pp. 33–35.
2. Kossov V. S., Lunin A. A., Panin Iu. A. The influence of long-distance trains on the way [Vozdeistvie dlinnosostavnykh poezdov na put']. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bulletin*, 2016, T. 75, no. 5, pp. 224–231.
3. Vershinskii S. V., Danilov V. N., Chelnokov I. I. Dynamics of the car [Dinamika vagona] [Tekst]. Moscow: Transport, 1978, 352 p.
4. Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Cheltygmashev E. P. The substantiation of the choice of the design scheme of the railway crew for the estimation of impulse impact from the side of the path [Obosnovanie vybora raschetnoi skhemy zheleznodorozhnogo ekipazha dlia otsenki impul'snogo vozdeistviia so storony puti]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 36–44.
5. Kudriavtsev N. N. Investigation of the dynamics of unreplated masses of wagons [Issledovanie dinamiki neobreesorennykh mass vagonov]. *Transport – Transport*, 1965, no. 287, 190 p.
6. *Rukovodiashchii dokument RD 32.68-96. Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlia ispol'zovaniia pri issledovaniakh i proektirovanii passazhirskikh i gruzovykh vagonov* (Guidance document RD 32.68-96. Estimated unevenness of the railway track for use in research and design of passenger and freight cars). Moscow: MPS, 1996, 17 p.

7. Pakhomov, M. P., Galiev I. I. Results of experimental studies of the elastic characteristics of the track on the Trans-Baikal Railway [Rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy uprugikh kharakteristik puti na Zabaikal'skoi zheleznoi doroge]. *Materialy setevoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Dinamika i mery povysheniia ekspluatatsionnoi nadezhnosti lokomotivov v usloviakh zheleznykh dorog Urala i Sibiri»* (Materials of the network of scientific and technical conference «Dynamics and measures to improve the operational reliability of locomotives in the conditions of the railways of the Urals and Siberia»). Omsk, 1972, pp. 139 – 146.

8. Lazarian V. A., Berman Z. G. On models for investigating the interaction of rolling stock and track [O modeliakh dlia issledovaniia vzaimodeistviia podvizhnogo sostava i puti]. *Materialy setevoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Dinamika i mery povysheniia ekspluatatsionnoi nadezhnosti lokomotivov v usloviakh zheleznykh dorog Urala i Sibiri»* (Materials of the network of scientific and technical conference «Dynamics and measures to increase the operational reliability of locomotives in conditions of railroads expensive in the Urals and Siberia»). Omsk, 1972, pp. 174 – 178

9. Feigin M. I. *Vynuzhdennye kolebaniia sistem s razryvnymi nelineinostiami* (Forced oscillations of systems with discontinuous nonlinearities). Moscow: Nauka, 1994, 285 p.

10. Kamaev V. A. *Optimizatsiia parametrov khodovykh chastei zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Optimization of the parameters of running parts of railway rolling stock). Moscow: Mashinostroenie, 1980, 215 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николаев Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

Нехаев Виктор Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NehaevVA@omgups.ru

Луks Дмитрий Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Исследование влияния параметров нелинейной системы «вагон-путь» на динамику железнодорожного экипажа [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев, Д. Ю. Луks // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 69 – 78.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolaev Viktor Aleksandrivich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the department «Theoretical Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

Nekhaev Viktor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Theoretical Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NehaevVA@omgups.ru

Luks Dmitry Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Theoretical Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nehaev V. A., Nikolaev V. A., Luks D. Yu. Study of the influence of non-linear system parameters «wagon-way» on the dynamics of railway vehicle. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 69 – 78 (In Russian).

УДК 621.313.2

В. В. Харламов, А. С. Хлопцов, С. Н. Найден

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЕРМОГРАММ И РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАГРЕВА СКОльзяЩЕГО КОНТАКТА В КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОМ УЗЛЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

***Аннотация.** В статье описывается разработанное программное обеспечение (ПО) Collector-Brush Heat для автоматической обработки термограмм, полученных в результате тепловизионного обследования КЩУ ТЭД. Разработанное ПО позволяет рассчитать интенсивность нагрева и построить кривую нагрева зоны «щетка – коллектор». Collector-Brush Heat разработано для применения в составе аппаратно-программного комплекса диагностики состояния ТЭД.*

***Ключевые слова:** коллекторно-щеточный узел, тяговый электродвигатель, тепловизор, термограмма, интенсивность нагрева, кривая нагрева, блок-схема, программное обеспечение.*

Viktor V. Kharlamov, Andrey S. Khlopcov, Sergey N. Nayden

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

AUTOMATIC THERMOGRAMS PROCESSING AND TRACTION DRIVE COLLECTOR-BRUSH HEATING RATE CALCULATION PC-APPLICATION DEVELOPMENT

***Abstract.** This article describes developed «Collector-brush heat» pc-application », which is aimed to automatically process thermal images, received during thermos-vision of DC machine collector-brush unit. This application allows to calculate the thermal rate and to build collector-brush heating curve. The application is developed in order to apply it in the traction drive diagnostics hardware-software complex.*

***Keywords:** collector-brush heat, traction drive, thermal imager, thermogram, heating rate, heating curve, flowchart, software.*

Важным узлом машины постоянного тока является коллекторно-щеточный узел (КЩУ). Согласно статистике до 33 % неисправностей тяговых электродвигателей (ТЭД) приходится на перенос электрической дуги по коллектору, и, как следствие, вывод подвижного состава из эксплуатации и дорогостоящий ремонт [1]. Одной из причин данных неисправностей является недостаточный процесс контроля качества проведенного ремонта ТЭД.

Современные методы диагностики КЩУ позволяют определить неисправности с высокой точностью, одним из таких методов является тепловизионный контроль. Данный метод обладает достоверностью, объективностью и точностью получаемых сведений, а также безопасностью при проведении обследования оборудования.

Сотрудники кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения уделяют большое внимание вопросам диагностики тяговых электродвигателей. Предложена методика обследования КЩУ с помощью тепловизора.

Процесс коммутации машины постоянного тока (МПТ) в значительной степени связан с тепловым состоянием машины [2]. На нагрев элементов КЩУ оказывают влияние большое количество факторов, различных по своей природе. Чрезмерный нагрев является следствием неисправности КЩУ или неправильной настройки режима работы машины постоянного тока [3]. При повышении температуры в зоне контакта «щетка – коллектор» изменяются токопроводящие свойства элементов КЩУ, что влияет на параметры работы машины и коммутационную устойчивость. В результате нарушение теплового состояния КЩУ ТЭД может привести к ин-

тенсивному искрению щеток и, как следствие, к повышенному износу и преждевременному выходу машины из строя [4]. Зная характер воздействия параметров работы машины на нагрев элементов в зоне КЩУ, можно дать определенную численную оценку причинно-следственных связей, что может быть использовано в процессе диагностирования технического состояния КЩУ и распознавания дефектов.

Таким образом, актуальной задачей является совершенствование методов диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла ТЭД с учетом его теплового состояния [5].

Согласно анализу параметров, позволяющих диагностировать техническое состояние КЩУ, установлено, что в их число входят интенсивность нагрева в зоне контакта «щетка – коллектор» [6]. Для расчета интенсивности нагрева КЩУ предложено использовать среднее приращение температуры на интервале с шагом регистрации температуры в 30 секунд, определяемой по кривой нагрева (рисунок 1):

$$\theta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \theta_i \quad (1)$$

где θ_i – приращение температуры в i -й точке;
 n – количество точек на интервале.

Нагрев в зоне коллекторно-щеточного узла происходит в два этапа: интенсивное повышение температуры зоны контакта в течение 2 – 4 минут в результате воздействия потерь непосредственно в зоне контакта $P_{\text{конт}}$, обусловленных механическим трением в контакте, протеканием тока через контакт, а также электродуговым искрением на сбегавшем крае щетки. Дальнейшее повышение температуры происходит в результате нагрева при протекании тока в меди коллектора и обмотке якоря, это процесс занимает 10 – 15 минут, после чего температура достигает установившихся значений. Регистрация термограмм производится для определения интенсивности нагрева зоны контакта «щетка – коллектор», для этого требуется определять температуру точки зоны контакта «щетка – коллектор» на протяжении времени обследования.

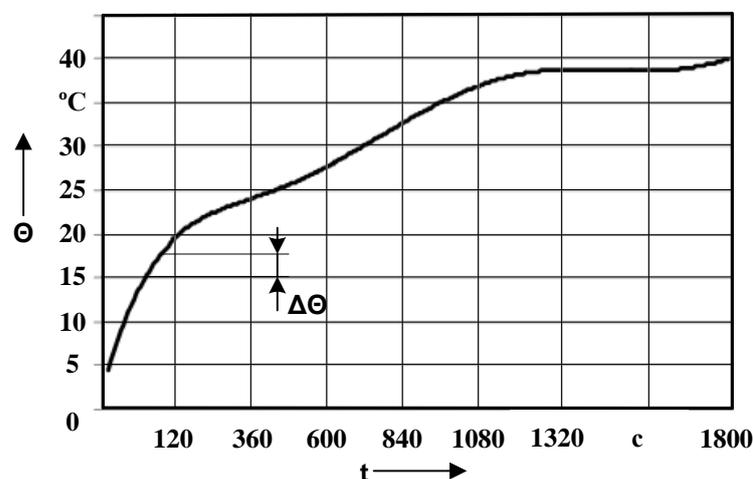


Рисунок 1 – Диаграмма нагрева зоны контакта «щетка – коллектор»

Регистрация термограмм КЩУ может проводиться в двух режимах: видеозаписи и фото, в зависимости от возможностей тепловизора. Приборы с видеорегистрацией обладают рядом преимуществ по сравнению с тепловизорами только с возможностью фоторегистрации, но и цена их значительно выше, что не всегда оправданно в рамках конкретного исследования. При использовании фототепловизора TESTO-875-1 после рабочего сеанса регистрации термограмм пользователь получает набор из нескольких десятков файлов. Каждый из файлов содержит термограмму, зарегистрированную в определенный момент времени. Как правило, производители

тепловизоров поставляют и программное обеспечение для обработки термограмм, однако данное ПО не автоматизировано и каждый снимок приходится обрабатывать вручную. Это трудоемкий процесс, занимающий достаточно много времени, к тому же, вносящий погрешность оператора в результаты обработки.

Ручной режим обработки заключается в следующих действиях: после проведения эксперимента отсортировать файлы в хронологическом порядке, в свойствах каждого файла определить время создания и внести его в таблицу, в программе обработки данных определить температуру контакта «щетка – коллектор», внести в таблицу; затем по полученным данным строится кривая нагрева и проводится расчет интенсивности нагрева.

Для ускорения и упрощения диагностирования необходимо автоматизировать процесс расчета интенсивности нагрева, для чего необходимо разработать программное обеспечение, позволяющее обрабатывать одновременно набор термограмм.

Программный обработчик должен выполнять две основные функции для определения интенсивности нагрева:

- 1) на термограмме определять температуру видимой зоны контакта «щетка – коллектор»;
- 2) обрабатывать набор из нескольких десятков термограмм с привязкой каждой термограммы ко времени.

При термографическом обследовании КЩУ (рисунок 2) машины, работающей в номинальном режиме при отсутствии искрения, видно, что максимальная температура 52,6 и 51 °С в точках зоны контакта М2 и М3 соответственно. На поверхности «петушков» в точке М1 температура составила 48,2 °С. Тело щетки с противоположной точки зоны контакта нагрелось менее всего (точка М4, 43,6 °С). Таким образом, для определения температуры контакта достаточно определять на термограмме максимально нагретую точку.



Рисунок 2 – Термограмма КЩУ в номинальном режиме работы

Алгоритм расчета средней интенсивности нагрева зоны контакта «щетка – коллектор» приведен на рисунке 3.

Разработана программа для ЭВМ Collector-Brush Heat, позволяющая обработать термограммы, полученные в процессе регистрации теплового состояния КЩУ. Выходными данными программы являются кривая нагрева зоны контакта «щетка – коллектор» и значение интенсивности нагрева на заданном временном промежутке.

Отдельно взятая термограмма представляет собой массив данных, содержащий информацию о расположении точки на снимке и ее температуру. Файл термограммы также содержит данные о дате и времени фиксации, что позволяет вводить переменную времени. Это дает возможность выстраивать термограммы в хронологическом порядке.

Рабочее окно программы Collector-Brush Heat представлено на рисунке 4.

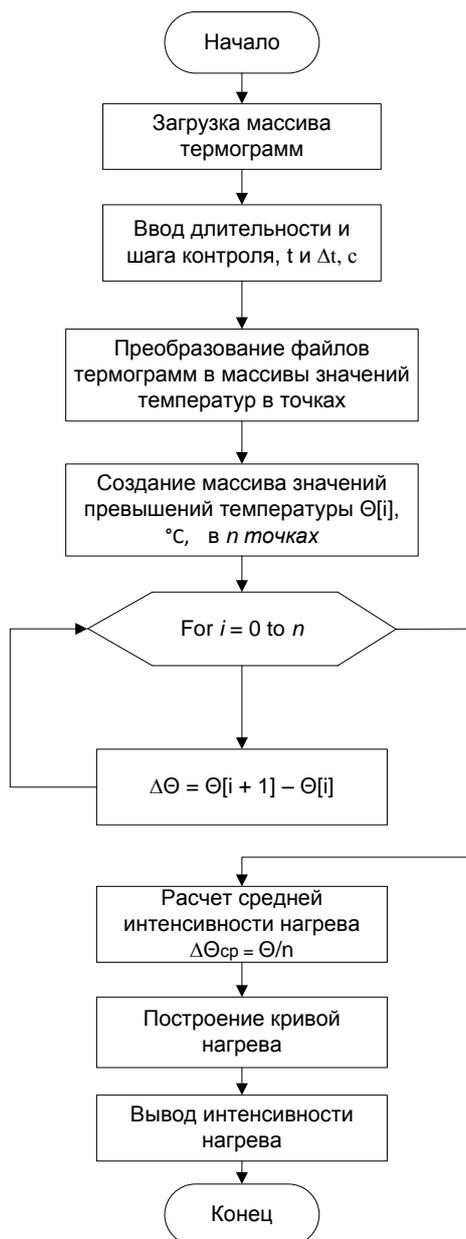


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета средней интенсивности нагрева зоны контакта «щетка – коллектор»

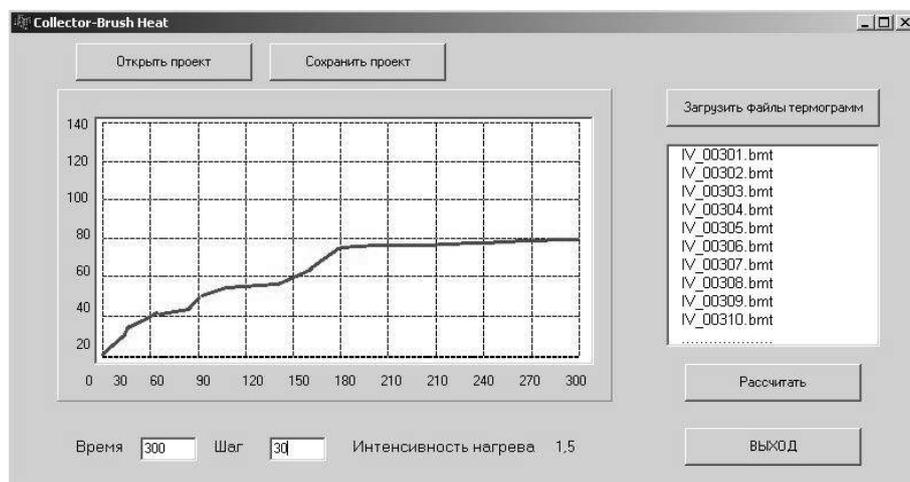


Рисунок 4 – Окно программы Collector-Brush Heat

При начале работы с программой пользователю требуется загрузить файлы термограмм рабочего сеанса, полученные с помощью тепловизора в формате «ВМТ» (Testo 875-2: Руководство по эксплуатации). Далее требуется определить временной интервал для расчета интенсивности нагрева в поле «Время». По умолчанию значение временного интервала составляет 300 секунд. Также необходимо задать значение временного шага в поле «Шаг». По умолчанию значение шага составляет 30 секунд.

При нажатии на кнопку «Расчитать» программа рассчитывает интенсивность нагрева зоны контакта «щетка – коллектор» для заданного временного интервала с заданным шагом по алгоритму, представленному на рисунке 3.

После расчета в поле «Интенсивность нагрева» отображается значение интенсивности нагрева для данной кривой нагрева. В графическом поле отображается масштабированная кривая нагрева для заданного временного интервала.

Возможности программы подразумевают формирование проекта – набора термограмм для обработки с рассчитанной по ним кривой нагрева. С помощью кнопки «Сохранить проект» создается файл проекта в формате «DAT», что позволяет обратиться повторно к набору термограмм и кривой нагрева при повторном запуске программы и нажатии кнопки «Открыть проект».

Интерфейс программного обеспечения содержит следующие функции:

- загрузка файлов термограмм в формате «ВМТ»;
- графическое построение кривой нагрева;
- отображение рассчитанной интенсивности нагрева.

С помощью разработанного приложения проведено исследование нагрева контакта щетка-коллектор для вспомогательных машин подвижного состава П-31М при различных искусственно внесенных неисправностях. Значение интенсивности нагрева отражает действие локальных источников потерь в КЩУ на первых минутах работы машины. Кривые нагрева при повышенной интенсивности искрения, использовании не притёртой щетки, а также увеличенном нажатии на щетку приведены на рисунке 5. Программой определена повышенная интенсивность нагрева на первых минутах работы машины в связи с действием факторов механической и электромагнитной природы.

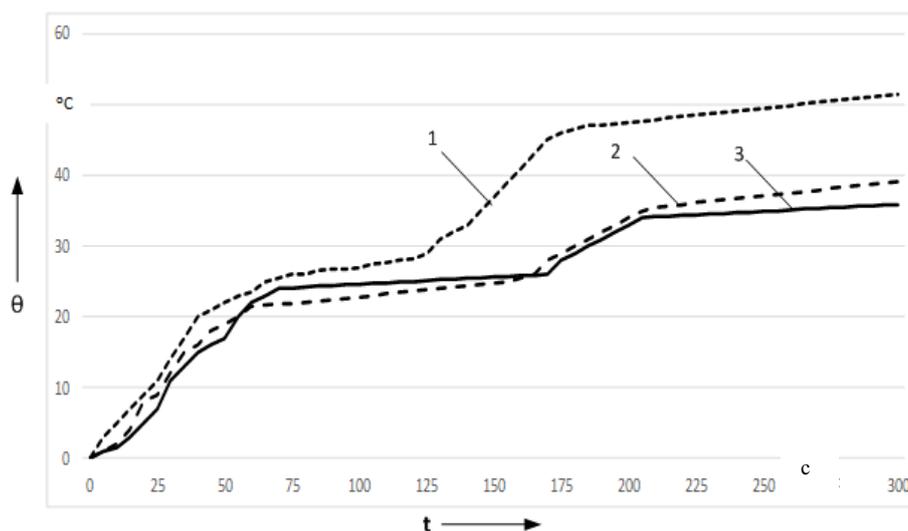


Рисунок 5 – Кривая нагрева КЩУ П-31-М при различных внесенных неисправностях: 1 – повышенный уровень искрения, 2 – использование непритертой щетки, 3 – увеличенное нажатие на щетку

Разработанное программное обеспечение дает возможность быстро и точно строить кривые нагрева, а также рассчитывать интенсивность нагрева, что позволяет использовать его в тепловизионной диагностике тяговых электродвигателей и других электрических машин. При ис-

пользовании подобного программного обеспечения процесс диагностирования может занимать меньше времени, что очень важно для приемосдаточных испытаний в депо.

Список литературы

1. Деятельность «РЖД» // ОАО «РЖД». – Режим доступа: URL: http://rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=660, свободный. (Дата обращения 27.11.2016).
2. Вегнер, О. Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока [Текст] / О. Г. Вегнер. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 156 с.
3. Совершенствование процесса диагностирования коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013 – № 1 (13). – С. 42 – 48.
4. Хлопцов, А. С. Исследование интенсивности нагрева контакта щетка-коллектор машины постоянного тока [Текст] / А. С. Хлопцов, М. Ф. Байсадыков, С. Н. Найден // Материалы XII междунар. науч.-практ. конф. «Современные научные исследования: инновации и опыт» / Межотраслевой ин-т «Наука и образование». – Екатеринбург, 2015. – С. 68 – 71.
5. Хлопцов, А. С. Применение тепловизионного метода для исследования тепловых процессов в зоне коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя подвижного состава [Текст] / А. С. Хлопцов, А. В. Долгова, П. К. Шкодун // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 2 (22). – С. 45 – 51.
6. Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов / В. В. Харламов, П. К. Шкодун и др. // Известия Томского политехн. ун-та. – Томск. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 84 – 91.

References

1. Activities of Russian Railways // ОАО «РЖД». – Access mode : URL: http://rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=660, free. – (Date of access 27.11.2016).
2. Vegner O. G. *Teoriia i praktika kommutatsii mashin postoiannogo toka* (Commutation of DC machines: theory and practice). Moscow: Gosekonomizdat, 1961, 156 p.
3. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Akhunov D. A., Khloptsov A. S. Traction drives diagnostic process development with PKP-4M equipment [Sovershenstvovanie protsesssa diagnostirovaniia kollektora tiagovykh elektrodvigateli s pomoshch'iu pribora PKP-4M]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 1 (13), pp. 42 – 48.
4. Khloptsov A. S., Baysadykov M. F., Nayden S. N. DC machine collector-brush contact thermal rate research [Issledovanie intensivnosti nagreva kontakta shchetka-kollektor mashiny postoiannogo toka]. *Materialy XII mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye nauchnye issledovaniia: innovatsii i opyt»* (Materials XII International Conference materials «Modern scientific research: innovations and experience»). Ekaterinburg, 2015, pp. 68 – 71.
5. Khloptsov A. S., Dolgova A. V., Shkodun P. K. Thermal imaging method applying for traction drive collector-brush heat thermal processes research [Primenenie teplovizionnogo metoda dlia issledovaniia teplovykh protsessov v zone kollektorno-shchetochного узла tiagovogo elektrodvigatelia podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2 (22), pp. 45 – 51.
6. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Khloptsov A. S., Dolgova A. V. Traction drive collector-brush heat diagnostic graph-model composing with thermal factors [Formirovanie graf-modeli diagnostirovaniia kollektorno-shchetochного узла tiagovogo elektrodvigatelia s uchetom teplovykh faktorov]. *Izvestiya Tomskogo polytechnicheskogo universiteta – Proceedings of Tomsk Polytechnic University*, 2016, T. 327, no. 1, pp. 84 – 91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Victor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

E-mail: emoe@omgups.ru

Хлопцов Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Инженер кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Найден Сергей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (923) 737-1027.

E-mail: sergeynayden@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Разработка программного обеспечения для автоматической обработки термограмм и расчета интенсивности нагрева скользящего контакта в коллекторно-щеточном узле тягового электродвигателя [Текст] / В. В. Харламов, А. С. Хлопцов, С. Н. Найден // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 79 – 85.

Doctor of technical science, professor, the head of department «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

E-mail: emoe@omgups.ru

Khloptsov Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35 Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia

Engineer of Department «Automatics and Control Systems»

Phone: +7 (913) 1450723

E-mail: khloptsov@mail.ru

Nayden Sergey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Graduate student of electrical machinery and general electrical engineering of the Omsk State Transport University, Omsk

Тел.: +7 (923) 737-1027.

E-mail: sergeynayden@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov V. V., Khloptsov A. S., Naiden S. N. Automatic thermograms processing and traction drive collector-brush heating rate calculation pc-application development. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 79 – 85. (In Russian).

УДК 629.4.084

С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян, О. П. Супчинский

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕМОНТЕ ЛОКОМОТИВОВ НОВЫХ СЕРИЙ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНО ВОЗНИКАЮЩИХ ОТКАЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы оптимизации организации технического обслуживания и ремонта локомотивов за счет новых подходов расчета норм запасных частей и материалов. Приведены модели систем транспортных средств, состоящих из парка эксплуатируемых локомотивов, с учетом всех состояний.*

***Ключевые слова:** подвижной состав, ремонт локомотивов, норма расхода материалов, страховой запас, надежность транспортных систем.*

Sergey G. Shantarenko, Mikhail F. Kapustyan, Oleg P. Supchinsky

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF SPARE PARTS AND MATERIALS IN REPAIR OF LOCOMOTIVES WITH REGISTRATION OF INCIDENTALLY APPEARING FAULTS

Abstract. *The problems of optimization of organization of maintenance and repair of locomotives. The article presents new approaches for calculating the norms of spare parts and materials. Models of vehicle systems consisting of a fleet of operated locomotives are given, taking into account all conditions.*

Keywords: *rolling stock, repair of locomotives, the rate of consumption of materials, insurance stock, the reliability of transport systems.*

В настоящее время техническое обслуживание и ремонт локомотивов ОАО «РЖД» выполняются на условиях аутсорсинга двумя сервисными компаниями – «ЛокоТех-Сервис» и «СТМ-Сервис». При этом осуществляется внедрение новых подходов к системе технического обслуживания и ремонта, связанных с увеличением межремонтных пробегов. В этих условиях для обеспечения своевременного и качественного ремонта необходимо создание оборотного фонда, т. е. наличие на локомотиворемонтном предприятии переходящих с одного локомотива на другой агрегатов и узлов в работоспособном техническом состоянии. В связи с этим возник вопрос о количественном и качественном составе этого фонда [1 – 5]. Кроме того, в последнее время в достаточно большом количестве поступают в эксплуатацию локомотивы новых серий. Для ОАО «РЖД» и сервисных компаний остается актуальной проблема учета и заказа запасных частей и материалов.

Согласно распоряжению ОАО «Российские железные дороги» от 29 декабря 2009 г. № 2713р об утверждении стандарта ОАО «РЖД» «Система материально-технического обеспечения ОАО «РЖД» нормирование запасов материально-технических ресурсов» [6], нормы запаса определяются исходя из максимальной величины текущего запаса, нормы страхового запаса и нормы подготовительного запаса. Однако назначение данных норм весьма затруднительно, особенно для локомотивов новых серий, а также при переходе на новые нормы межремонтного пробега, поскольку для их применения необходимо знать планируемую среднесуточную потребность в материалах, интервал между поставками, фактические интервалы поставок, запланированные объемы поставок, объем статистической выборки для оценки среднего отклонения фактического объема поставок от запланированного, время погрузочно-разгрузочных работ, расчетное время груза в пути и другие логистические параметры. Более точно оценить необходимый оборотный фонд можно, если использовать вероятностный подход.

Для этого необходимо рассчитать оборотный фонд [7, 8], который состоит из технологического запаса $F_{\text{техн}}$, определяемого исходя из требований технологического процесса и программы ремонта, и страхового запаса $F_{\text{стр}}$ для замены узлов во время неплановых ремонтов, а также узлов, которые не подлежат восстановлению или для восстановления которых требуются особые условия и время больше нормативного:

$$F_{\text{об}} = F_{\text{техн}} + F_{\text{стр}}. \quad (1)$$

Необходимое количество запасных агрегатов

$$F_{\text{техн}} = n_a \left(\frac{t_a \pm \Delta t_a - t_b}{t_p \pm \Delta t_p} + x_a \right), \quad (2)$$

где n_a – число однотипных агрегатов на локомотиве;

x_a – число, дополняющее величину $F_{\text{техн}}$ до ближайшего целого числа;

$t_a \pm \Delta t_a$ – время фактического простоя агрегата в ремонте с учётом отклонения Δt_a от нормированного;

$t_p \pm \Delta t_p$ – время фактического простоя локомотива с учётом отклонения Δt_p от нормированного;

t_b – период времени, в течение которого агрегат отсутствует на локомотиве в соответствии с графиком технологического процесса ремонта.

Если одновременно ремонтируется M_p локомотивов, то

$$F_{\text{техн}} = M_p n_a \left(\frac{t_a \pm \Delta t_a - t_b}{t_p \pm \Delta t_p} + x_a \right). \quad (3)$$

За расчетный период

$$M_p = \frac{M_p^r (t_p \pm \Delta t_p)}{T_p^r}, \quad (4)$$

где M_p^r – годовая программа ремонта локомотивов;

T_p^r – фонд времени за расчетный период.

Тогда

$$F_{\text{техн}} = n_a \left(\frac{t_a \pm \Delta t_a - t_b}{T_p^r} + x_a \right) M_p^r. \quad (5)$$

Страховой запас определяется по формуле:

$$F_{\text{стр}} = \frac{a n_a M_p t_b}{T_p^r}, \quad (6)$$

где a – коэффициент сменяемости агрегатов (узлов, деталей), которые необходимы для непластовых ремонтов и не подлежат процессу восстановления или требуют для ремонта длительного времени.

На предприятиях определение норм расхода материалов и запасных частей осуществляется с применением расчетно-аналитического и опытного методов.

Расчетно-аналитический метод подразумевает расчет на основе прогрессивных показателей использования материала. За основу при расчете принимается полезный расход, который устанавливается исходя из номинальных размеров детали.

При определении норм расхода материалов основной исходной информацией будут являться [9] чертежи деталей (сборочных единиц), спецификации, технологическая документация, нормативы расхода материалов, отходов и потерь.

При опытном методе разработки норм расхода определение затрат материалов и запасных частей, которые необходимы при сервисном обслуживании и ремонте, производится на основе данных измерений полезного расхода, технологических отходов и потерь, которые в свою очередь определяются непосредственно в условиях производства.

Так как на расход материалов существенное влияние оказывает небольшое количество факторов, то при расчете норм расхода используется комбинированный метод, т. е. применяется расчетно-аналитический или опытный метод в комплексе со статистическим.

Примером комбинированного метода является вариант, при котором определяются индивидуальные нормы расхода [10]:

$$H_{ij} = \sum_{ij}^n H_{ij}^n a q_j p_j, \quad (7)$$

$$H_{ij}^n = m_{ij}^a \left(\frac{m_{ij}^0}{m_{ij}^a} \right) - m_{ij}^b, \quad (8)$$

где H_{ij} – норма расхода i -го материала или запасной части при различных видах ремонта на j -й объект;

H_{ij}^n – поддетально-узловая норма расхода i -го материала или запасной части на ремонт, которая определяется на основе опытного метода исходя из выражения (3);

m_{ij}^0 – черный вес i -го заменяемого материала или запасной части в j -м узле;

m_{ij}^1 – чистый вес i -го заменяемого материала или запасной части в j -м узле;

m_{ij}^B – вес i -го материала или запасной части, используемого при ремонте повторно.

При невозможности повторного использования материала q_j – количество одноименных j -х узлов; p_j – вероятность того, что при данном отказе ремонту в определенном объеме будут подвергнуты j -е узлы.

Другой вариант определения суммарной нормы расхода материалов и запасных частей основывается на данных фактического параметра потока отказов и количества материалов или запасных частей, которые необходимы для устранения одного отказа.

Норма расхода для каждого наименования материала

$$H_i = \omega_i q_i, \quad (9)$$

где ω_i – параметр потока отказов;

q_i – количество i -го материала или запасной части, необходимое для устранения одного отказа.

Параметр отказов

$$\omega_i = \frac{h_i(\tau)}{h_{об}(\tau)}, \quad (10)$$

где τ – длительность наблюдаемого периода (лет);

$h_{об}(\tau)$ – число единиц наблюдаемого за этот период оборудования;

$h_i(\tau)$ – число отказов наблюдаемого оборудования в анализируемом периоде, необходимое для восстановления расхода i -го материала.

Количество материала, необходимое для устранения одного отказа q_j ,

$$\omega_i = \frac{h_i(\tau)}{h_{об}(\tau)}, \quad (11)$$

$$\sigma_{q(i)} = \sqrt{\frac{[\sum_{m=1}^{m(\tau)} (q_{im} - \bar{q}_i)^2]}{[h_i(\tau) - 1]}}, \quad (12)$$

где \bar{q}_i – среднее значение расхода i -го материала или запасной части для устранения одного отказа;

$\sigma_{q(i)}$ – среднеквадратичное отклонение значения;

q_{im} – фактический расход i -го материала или запасной части для устранения m -го отказа.

Однако в основе данных методов определения запасных частей и материалов лежит также предположение о том, что нам известны такие параметры, как фактический расход за определенное время, поток отказов и т. д. Для локомотивов новых серий и при ремонте с увеличенными межремонтными пробегами это неприемлемо.

Чтобы определить норму расхода материалов при неплановых ремонтах, требуется выразить ее через коэффициент сменяемости a .

Для решения данной проблемы (определения коэффициента сменяемости a) необходимо рассмотреть модель системы транспортных средств с учетом всех состояний [11].

Эта модель основана на следующих допущениях.

1. Из строя могут выходить только работающие локомотивы, а локомотивы, находящиеся в резерве, на техническом обслуживании и в ремонте, не выходят из строя. Следовательно, интенсивность отказов локомотивов, которые находятся в ремонте или резерве, равна нулю. Обычно интенсивность отказов может приниматься равной нулю только в случае ненагруженного резерва. Если локомотивы находятся в режиме частично нагруженного резерва, то прини-

маемое допущение справедливо лишь в том случае, когда интенсивность отказов в режиме частично нагруженного резерва мала по сравнению с интенсивностью отказов действующих локомотивов.

2. Полный отказ одного локомотива приводит к простоя всей системы. Продолжительность простоя определяется как промежуток времени с момента остановки локомотива до момента восстановления нормальной работы. Предполагается, что время простоя всех локомотивов, как вышедших из строя, так и остановившихся в результате блокирования пути, одинаково. Это допущение справедливо в случае малых интервалов между последовательными транспортными единицами и сравнительно небольшой длины замкнутого пути. При большей длине пути и большей продолжительности интервалов между последовательными транспортными единицами время простоя может быть различным и потребуются внесение поправок в модели.

3. Если имеется ровно одна резервная единица, то после технического обслуживания локомотив начинает функционировать либо поступает в резерв. Однако если резерв не предусмотрен, то после технического обслуживания локомотив сразу начинает работать, не поступая в резерв.

Часть диаграммы переходов для модели системы транспортных средств показана на рисунке 1.

Буквы n , s , m – соответственно число действующих, резервных и находящихся на техническом обслуживании локомотивов. Большие квадраты соответствуют рабочим состояниям, а малые – состоянию частичного или полного отказа. В верхнем левом углу квадрата указан номер состояния, а в нижнем левом углу – число отказавших транспортных средств, o – рабочее состояние, r – состояние полного отказа, p – состояние частичного отказа.

Столбец слева (см. рисунок 1) характеризует число m локомотивов, находящихся на техническом обслуживании (группа m), а второй столбец – группу $(m - 1)$, когда на техническом обслуживании находятся $(m - 1)$ локомотивов. Соотношения между различными состояниями можно лучше понять, рассмотрев несколько состояний, начиная с верхней части диаграммы.

Здесь I_0 означает состояние системы, когда каждый локомотив находится в заданном режиме. В этом состоянии имеется n работающих локомотивов, s резервных для замены неисправных; m локомотивов находятся на планово-предупредительном техническом обслуживании, а неисправных локомотивов нет. Из состояния I_0 система может перейти в состояние I_r или I_p при полном или частичном отказе транспортной единицы. При появлении состояния I_r неисправный локомотив блокирует путь, что приводит к прекращению движения во всей системе. После эвакуации неисправного локомотива система переходит в состояние 2_0 , когда имеется одна неисправная транспортная единица, и она заменяется резервной.

Таким образом, число резервных локомотивов становится меньше на единицу. Аналогично из состояния I_p , после устранения частичного отказа система переходит в состояние 2_0 . Из состояния 2_0 система может перейти в состояние I_0 после поступления из ремонта неисправного локомотива либо в состояние 2_r или 2_p при отказе другого локомотива. Такая схема переходов может продолжаться до состояния $(s + 1)_0$, когда имеется s неисправных и 0 резервных локомотивов. В состоянии $(s + 1)_0$ дополнительно к рассмотренной ранее схеме переходов вводится еще один вид переходов, т. е. после завершения технического обслуживания локомотива она переходит в резерв (группа $m - 1$).

Рассмотрим теперь состояние $(s + 2)_0$, когда работает $(n - 1)$ локомотивов, т. е. на один меньше требуемого числа. Если в данном случае завершается техническое обслуживание локомотива, то он переводится в режим эксплуатации, а система переходит в состояние $(s + n + 3)_0$.

Остальные состояния можно проанализировать аналогичным образом.

С помощью рисунка 1 число состояний можно определить как

$$N_s = 3(s - 1) + (m + 1)(3n + 4). \quad (13)$$

Например, при $n = 50$, $s = 2$ и $m = 4$ число состояний N_S будет равно 773. Число состояний можно значительно уменьшить, объединяя i_r и i_p с i_0 . Упрощенная модель состояния системы транспортных средств показана на рисунке 2.

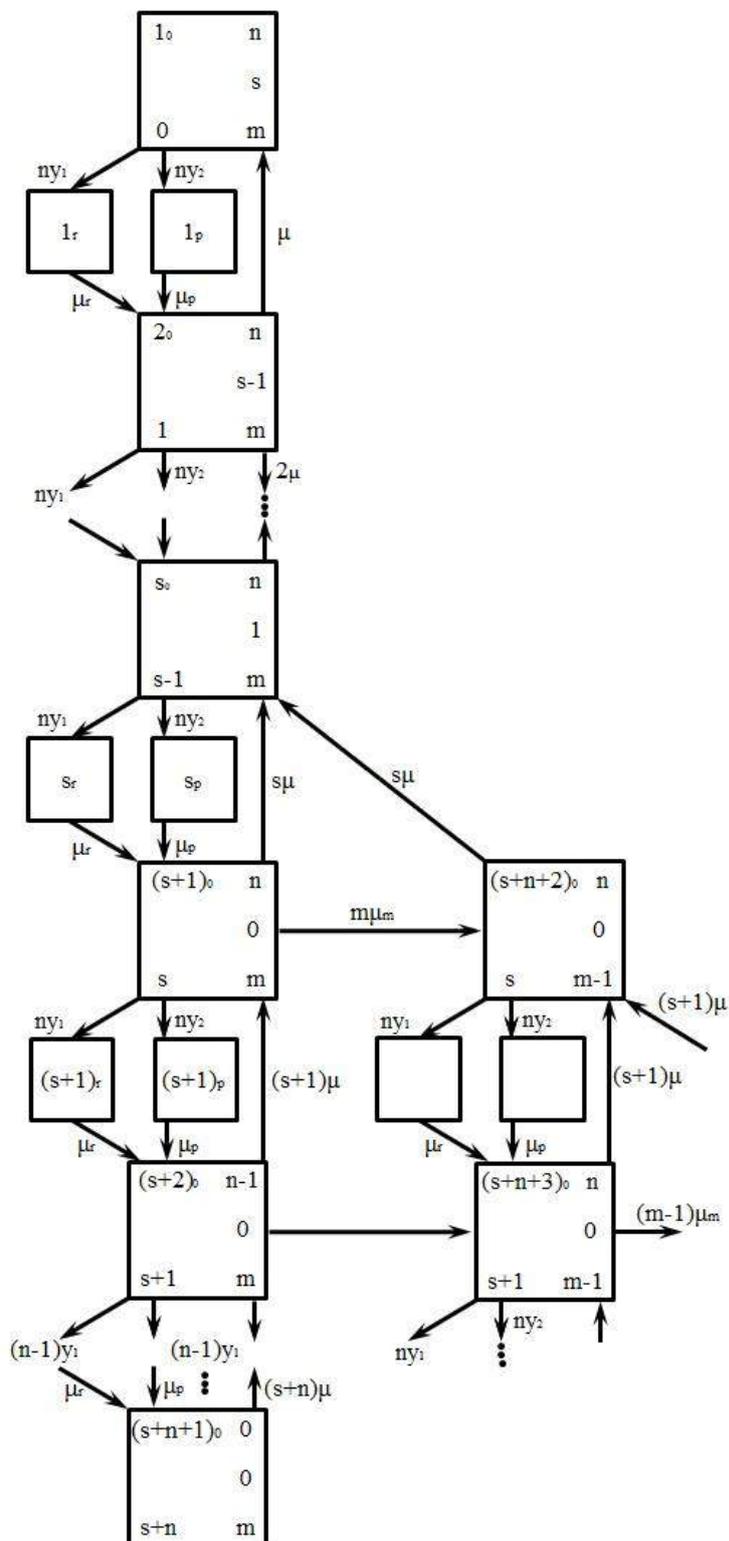


Рисунок 1 – Фрагмент диаграммы состояния системы транспортных средств

Здесь состояние i эквивалентно состоянию (i_0, i_r, i_p) , представленному на рисунке 1. В этой модели число состояний

$$RN_S = (s - 1) + (m + 1)(n + 2). \quad (14)$$

В данном случае при $n = 50$, $s = 2$ и $m = 4$ имеем $RN_S = 261$. Согласно рисунку 2 при нахождении на техническом обслуживании m транспортных средств имеется $(m + 1)$ групп состояний. С помощью формулы для y^e_{x-x+} можно вычислить частоту переходов для различных состояний.

Эквивалентные частоты переходов в определенной группе. Выражение для частоты переходов из i -го состояния в $(i + 1)$ -е имеет вид:

$$y_{i(i+1)} = \frac{P_{ip} \cdot \mu_p + P_{ir} \cdot \mu_r}{P_{i0} + P_{ip} + P_{ir}}. \quad (15)$$

В данном случае

$$P_{ir} = \frac{O_i y_1}{\mu_r}; \quad (16)$$

$$P_{ip} = \frac{O_i y_2}{\mu_p}, \quad (17)$$

где O_i – число работающих транспортных средств в i -м состоянии. Подставляя значения P_{ir} и P_{ip} в выражение для $y_{i(i+1)}$, имеем:

$$y_{i(i+1)} = \frac{O_i (y_1 + y_2)}{Z_i}, \quad (18)$$

где

$$Z_i = 1 + O_i \left(\frac{y_1}{\mu_r} + \frac{y_2}{\mu_p} \right). \quad (19)$$

Аналогично

$$y_{i(i-1)} = \frac{P_{i0} \mu D_i}{P_{i0} + P_{ip} + P_{ir}} = \frac{\mu D_i}{Z_i}, \quad (20)$$

где D_i – число неисправных элементов в i -м состоянии.

Эквивалентная частота переходов из i -го состояния в $(j + n + 1)$ -е состояние

$$\mu_{i(i+n+1)} = \frac{\mu_i \mu_m I_i P_{i0}}{P_{i0} + P_{ip} + P_{ir}} = \frac{\mu_i \mu_m I_i}{Z_i}, \quad (21)$$

где m_i – число транспортных средств, находящихся на техническом обслуживании в i -м состоянии; $\mu_m = 1/T_m$; T_m – средняя продолжительность технического обслуживания; $I_i = 0$ для числа резервных транспортных средств в i -м состоянии, $i > 0$; в противном случае $I_i = 1$.

Схема эквивалентной частоты переходов из определенной группы состояний в смежную предыдущую группу показана на рисунке 2.

В матричной записи стационарные уравнения для эквивалентной модели имеют вид:

$$A \cdot P = 0, \quad (22)$$

где A – такая матрица $N \cdot N$, что ее ij -й член описывает частоту переходов из j -го в i -е состояние, N – общее число состояний; P – матрица-столбец, i -м членом которого является P_i , т. е. вероятность нахождения в i -м состоянии; O – матрица-столбец, все элементы которой равны нулю.

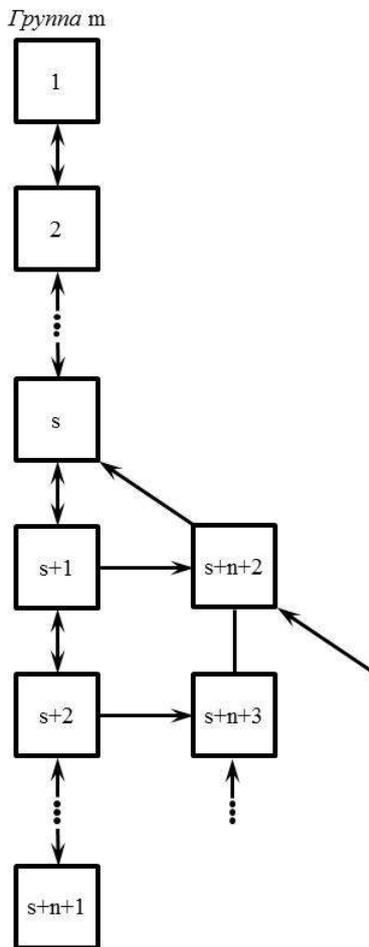


Рисунок 2 – Фрагмент приведенной диаграммы состояний системы и переходов из одной группы в другую

N уравнений полученной системы линейно зависимы, т. е. любое уравнение можно получить с помощью остальных $(N - 1)$ уравнений. Поэтому можно найти P , решив любые $(N - 1)$ уравнений данной системы совместно с уравнением полной вероятности:

$$\sum_i P_i = 1. \quad (23)$$

В матричной форме записи любая строка матрицы A и соответствующий элемент матрицы O заменяются на 1 до получения решения. Линейные уравнения можно решить с помощью численных методов, например, путем исключения переменной методом Гаусса. После определения вероятностей для эквивалентных состояний можно вычислить вероятности для первоначальных состояний, используя следующие уравнения:

$$P_{i0} = \frac{P_i}{Z_i}; \quad (24)$$

$$P_{ir} = \frac{O_i y_i P_{i0}}{\mu_r}; \quad (25)$$

$$P_{ip} = \frac{O_i y_2 P_{i0}}{\mu_p}. \quad (26)$$

Интегральные меры надежности представляют собой вероятности и частоты появления состояний, в которых количество действующих транспортных средств N_0 не больше некоторого определенного числа. Эти вероятности определяются по формулам:

$$P(N_0 \leq n) = \sum_{i; O_i \leq n} (P_{i0} + P_{ir1} + P_{ip}) + \sum_i P_{ir2}; \quad (27)$$

$$f(N_0 \leq n) = P_{k0} \cdot O_k y_1 E + P_{kp} \mu_p + \sum_i P_{i0} O_i y_1 (1 - E), \quad (28)$$

где k – такое состояние, что $N_0 = n$ при $(k_0 + 1)$.

Таким образом, применяя рассмотренные модели, учитывающие переход во все возможные состояния, нормы расхода запасных частей и материалов могут быть рассчитаны с использованием коэффициента сменяемости a , определяемого как

$$a = [f(N_0 \leq n)]. \quad (29)$$

Полученные выражения позволяют рассчитать численные значения страхового запаса запасных частей и нормы расхода материалов на основе учета всех возможных состояний системы, состоящей из парка эксплуатируемых локомотивов.

Полученные численные значения страхового запаса запасных частей и норм расхода материалов позволят составить обоснованный календарный план поставки запасных частей и материалов; сократить простой локомотивов в ремонте; содержать минимальный запас оборудования, материалов и запасных частей; оперативно корректировать планы поставки в зависимости от текущего состояния подвижного состава и перевозочного процесса.

Данная методика может быть использована для оптимизации как уже действующих автоматических систем управления производством, таких как сетевое планирование, ERP-систем, так и для создания новых локальных систем планирования ресурсов предприятия.

Список литературы

1. Рувинов, И. Р. Задачи и принципы управления запасами на железнодорожном транспорте [Текст] / И. Р. Рувинов // Вестник транспорта. – М., 2012. – № 1. – С. 28 – 34.

2. Левин, А. И. Методика определения параметров МТО для выполнения планово-профилактического обслуживания изделия и устранения случайно возникающих отказов [Текст] / А. И. Левин, Е. В. Чубаров // Информационные технологии в проектировании и производстве / Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас». – М., 2006. – № 1. – С. 42 – 46.

3. Небова, А. В. Проблемы в системе планирования потребностей в запасах компаний «РЖД» [Текст] / А. В. Небова // Проблемы и перспективы развития экономики и образования в Монголии и России: Материалы междунар. науч.-практ. конф. XIII междунар. Плехановские чтения. – Улан-Батор, 2017. – С. 8 – 11.

4. Корецкая, С. А. Выявление резервов снижения издержек управления нормируемыми производственными запасами материально-технических ресурсов на предприятиях железнодорожного транспорта [Текст] / С. А. Корецкая // Наука и прогресс на транспорте / Днепропетровский национальный ун-т ж.-д. транспорта им. академика В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2007. – № 15. – С. 241 – 244.

5. Корнилов, С. Н. Моделирование процесса управления ресурсами в системе ремонта подвижного состава промышленного железнодорожного транспорта [Текст] / С. Н. Корнилов, А. Н. Антонов // Вестник Уральского гос. ун-та путей сообщения / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2010. – № 2. – С. 57 – 65.

6. Система материально-технического обеспечения ОАО «РЖД». Нормирование запасов материально-технических

7. Тепловозоремонтные предприятия. Организация, планирование и управление: Учебник [Текст] / Под ред. Н. А. Малоземова. – М.: Транспорт, 1979. – 264 с.

8. Собенин, Л. А. Организация, планирование и управление локомотиворемонтным производством [Текст] / Л. А. Собенин, А. А. Зайцев, Б. А. Чмыхов / УМЦ ЖДТ. – М., 2006. – 439 с.

9. Экономика, организация и управление локомотивным хозяйством: Учебник [Текст] / Под ред. Л. Ф. Хасина. – М.: Желдориздат, 2002. – 452 с.

10. Методические указания по разработке норм расхода материалов на ремонтно-эксплуатационные нужды в энергетике [Текст] / Министерство энергетики и электрификации СССР. РД 34.10.301. – М., 1985. – 27 с.

11. Диллон, Б., Инженерные методы обеспечения надежности систем. Пер. с англ. [Текст] / Б. Диллон, Ч. Сингх; Под ред. Е. К. Масловского. – М.: Мир, 1984. – 318 с.

References

1. Ruvinov I.R. Tasks and principles of inventory management in railway transport [Zadachi i principy upravleniya zapasami na zheleznodorozhnom transporte] *Vestnik transporta – Transport Massanger*, 2012, no. 1, pp. 28 – 34.

2. Levin A. I. Methodology for determining the parameters of the logistics for the implementation of preventive maintenance of the product and the elimination of accidental failures [Metodika opredeleniya parametrov MTO dlya vypolneniya planovo-profilakticheskogo obsluzhivaniya izdeliya i ustraneniya sluchajno vznikayushchih otkazov] *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve – Information technologies in design and production*, 2006, no. 1, pp. 42 – 46.

3. Nebova A.V. Problems in the system of planning requirements for the reserves of the Russian Railways [Problemy v sisteme planirovaniya potrebnostej v zapasah kompa-nij «RZHD»] *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. XIII Mezhdunarodnye Plekhanovskie chteniya* (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. XIII International Plekhanov's readings). – Ulan-Bator, 2017, pp. 8 – 11.

4. Koreckaya S. A. Identification of reserves to reduce management costs of normalized production reserves of material and technical resources at railway transport enterprises [Vyyavlenie rezervov snizheniya izderzhek upravleniya normiruemyimi proizvodstvennymi zapasami material'no-tekhnicheskikh resursov na predpriyatiyah zheleznodorozhnogo transporta] *Nauka i progress na transporte – Science and progress in transport*, 2007, no. 15, pp. 241 – 244.

5. Kornilov S. N., Antonov A. N. Modeling of the process of resource management in the system of repair of the rolling stock of industrial railway transport [Modelirovanie processa upravleniya resursami v sisteme remonta podvizhnogo sostava promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta] *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – Bulletin of the Ural State University of Railways*, 2010, no. 2, pp. 57 – 65.

6. *Sistema material'no-tekhnicheskogo obespecheniya OAO «RZHD». Normirovanie zapasov material'no-tekhnicheskikh resursov. STO RZHD 1.21.015-2009 (System of material and technical support of JSCo «Russian Railways». Normalization of reserves of material and technical resources. SRT RZD 1.21.015-2009)*. Moscow, 2009, 29 p.

7. Malozemov N. A. *Teplovozoremontnye predpriyatiya. Organizaciya, planirovanie i upravlenie* (Diesel locomotives. Organization, planning and management). Moscow: Transport, 1979, 264 p.

8. Sobenin L. A., Zajcev A. A., Chmyhov B. A. *Organizaciya, planirovanie i upravlenie lokomotivoremontnym proizvodstvom* (Organization, planning and management of locomotive repair work). Educational and methodological center for education in railway transport). 2006, 439 p.

9. Hasin L. F., Matveev V. N. *Ekonomika, organizaciya i upravlenie lokomotivnym hozyajstvom* (Economics, organization and management of locomotive economy). Moscow: Zheldorizdat, 2002, 452 p.

10. *Metodicheskie ukazaniya po razrabotke norm raskhoda materialov na remontno-ehkspluatatsionnye nuzhdy v ehnergetike* (Methodological guidelines for the development of standards for the consumption of materials for maintenance and repair in the energy sector). Moscow, Ministry of Energy and Electrification of the USSR. RD 34.10.301, 1985, 27p.

11. Dillon B. *Inzhenernye metody obespecheniya nadezhnosti sistem* (Engineering methods for ensuring the reliability of systems). Moscow: The World, 1984, 318 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», доктор технических наук.

Тел.: 8 (3812) 31-16-27.

E-mail: nauka@omgups.ru

Капустьян Михаил Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», кандидат технических наук.

Тел.: 8 (3812) 31-18-11.

E-mail: ttm@omgups.ru

Супчинский Олег Павлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

E-mail: sunchinyan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shantarenko Sergey Georgeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.

Vice-principal by scientific work, head of chair «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», Dr. Sci. Tech.

Тел.: 8(381-2) 31-16-27

E-mail: nauka@omgups.ru

Kapustyan Mikhail Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.

The senior lecture of chair «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», Cand. Sci. Nech.

Phone: 8(381-2) 31-18-11

E-mail: ttm@omgups.ru

Supchinsky Oleg Pavlovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk. 644046, Russia.

Lecturer of chair «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock».

Phone: 8-908-105-24-16

E-mail: sunchinyan@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шантаренко, С. Г. Определение норм запасных частей и материалов при ремонте локомотивов новых серий с учетом случайно возникающих отказов в эксплуатации [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустьян, О. П. Супчинский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 85 – 95.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shantarenko S. G., Kapustyan M. F., Supchinsky O. P. Determination of spare parts and materials in repair of locomotives with registration of incidentally appearing faults. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 85 – 95. (In Russian).

УДК 621.331:621.311

А. В. Горькин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЛЕ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ШУНТА С ЗАДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ ЕГО СРАБАТЫВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматриваются временные характеристики и результаты анализа работы реле-дифференциального шунта при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения. Сделаны выводы о возможностях его применения при проходе электроподвижным составом изолирующих сопряжений. Предложен метод выбора уставок реле-дифференциального шунта, учитывающий задержку времени при его срабатывании.

Ключевые слова: быстродействующий выключатель, реле-дифференциальный шунт, пакет стали, выдержка времени срабатывания реле, максимальная импульсная защита.

Artem V. Gor'kin

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLICATION OF RELAY – THE DIFFERENTIAL SHUNT WITH THE DELAY OF TIME OF ITS OPERATION

Abstract. In article temporary characteristics and results of the analysis of operation of the relay - the differential shunt are considered at full removal of a package of steel on a branch of smaller section. Conclusions are drawn on opportunities of its application at pass by the electrorolling stock of the isolating interfaces. The method of the choice of settings of the relay - the differential shunt, considering time delay at its operation is offered.

Keywords: high-speed switch, the relay – the differential shunt, steel package, endurance of reaction time of the relay, maximum pulse protection.

Скоростное и тяжеловесное движение железнодорожного транспорта, развивающееся в России вследствие роста максимальных рабочих токов, потребляемых электроподвижным составом (ЭПС), и скачков нагрузки при проходе им изолирующих сопряжений является одной из основных причин увеличения количества отключений быстродействующих выключателей (БВ). Все это ведет к обострению многолетней проблемы: возможны пережоги контактного провода из-за появления мощной дуги в режиме перераспределения тока, потребляемого локомотивом, между двумя фидерами контактной сети 3,3 кВ при проходе ЭПС изолирующего сопряжения контактной сети. Кроме того, увеличение количества отключений БВ ведет к повышению эксплуатационных затрат на обслуживание и капитальный ремонт выключателей.

Долгие годы основной и практически единственной защитой фидеров контактной сети постоянного тока являлась максимальная импульсная защита (МИЗ), конструктивно выпол-

ненная непосредственно на БВ типа АБ-2/4 и ВАБ-43 в виде индуктивного шунта или на базе реле-дифференциального шунта (РДШ), применяемого для выключателей типа ВАБ-28, ВАБ-49, ВАБ-70. Главным недостатком МИЗ является то, что она не отличается высокой избирательностью в различении признаков нормального режима и короткого замыкания. При этом определяющими параметрами МИЗ являются временные характеристики короткого замыкания и коэффициент динамичности – отношение статической уставки к динамической. От этих параметров зависят величина тока короткого замыкания, ограничиваемого БВ, и время гашения дуги, что в конечном итоге влияет на износ выключателей.

В дополнение к основной защите было разработано значительное количество различных схем и решений защиты от ложных отключений и пережога контактного провода: мгновенное автоматическое повторное включение отключившегося БВ, шунтирование изолирующего сопряжения на момент прохода его ЭПС, навешивание защитных экранов на ветви изолирующего сопряжения и др. При этом недостатки предложенных решений достаточно значимы:

- усложнение конструкций защит фидеров контактной сети и изолирующих сопряжений;
- повышение капитальных и эксплуатационных затрат на устройства защит тяговой сети;
- ежегодное снижение эффективности применения данных методов и устройств в условиях развития скоростного и тяжеловесного движения ЭПС.

Поэтому существует потребность снизить число ложных и неселективных отключений БВ без усложнения существующих устройств защит тяговой сети и конструкций изолирующих сопряжений. Этого можно добиться, рассматривая временные характеристики индуктивных шунтов и РДШ с точки зрения уменьшения их реакции на броски тока в тяговой сети.

Временные характеристики индуктивных шунтов и РДШ рассмотрены достаточно подробно с точки зрения обеспечения максимально быстрого отключения БВ [1 – 4]. Однако с точки зрения увеличения времени срабатывания РДШ при уменьшении до нуля пакета стали на ветви меньшего сечения в этих работах представлен недостаточно полный анализ его временных характеристик. Более того, в источниках [1, 3] указывается, что статистическая уставка МИЗ может стать меньше динамической при полном снятии пакета стали с ветви меньшего сечения РДШ. Но, как показали результаты экспериментов [5], это не так, и при снятии пакета стали динамическая уставка становится равной статической и при этом появляется задержка срабатывания РДШ. Отчасти такое освещение данной проблемы связано с тем, что РДШ – это импульсное реле тока, с помощью которого реализована МИЗ для БВ. МИЗ являлась к моменту написания работ [1 – 4] единственной защитой выключателей фидеров контактной сети, обеспечивающей их наиболее быстрое отключение. Но с появлением цифровых терминалов защит фидеров контактной сети типа ЦЗАФ-3,3/ИнТер-3,3 (далее – ЦТ) в условиях ежегодного развития в России скоростного и тяжеловесного движения, приводящего к увеличению максимальных рабочих токов потребляемых электроподвижным составом, значение этого свойства МИЗ стало уменьшаться и даже становиться нежелательным, так как количество ложных и неселективных отключений БВ остается на высоком уровне [6, 7].

В работе [5] описан экспериментально полученный результат – возможное снижение числа отключения БВ при проходе электроподвижным составом изолирующих сопряжений, что достигается применением РДШ при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения на фидерах контактной сети оборудованных ЦТ. Результаты, полученные в ходе эксперимента, являются частным случаем, так как на других участках железных дорог России параметры тяговой сети могут существенно отличаться от рассматриваемых в статье [5]. Таким образом, существует необходимость рассмотреть временные характеристики РДШ при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения с разными значениями уставок МИЗ и параметров токов короткого замыкания.

Зависимость времени срабатывания РДШ от скорости нарастания тока при полном снятии пакета стали для разных уставок МИЗ показана на рисунке 1.

Имитация короткого замыкания выполнялась прогрузочным аппаратом ПРУС-6400 с разными скоростями нарастания тока, но при одном и том же установившемся значении – 4000 А. Время срабатывания РДШ оценивалось с помощью цифровых терминалов. Пример фрагмента осциллограммы приведен на рисунке 2. В этом случае время срабатывания РДШ составило 62 мс, при уставке МИЗ, равной 3000 А, и скорости нарастания тока 100 А/мс.

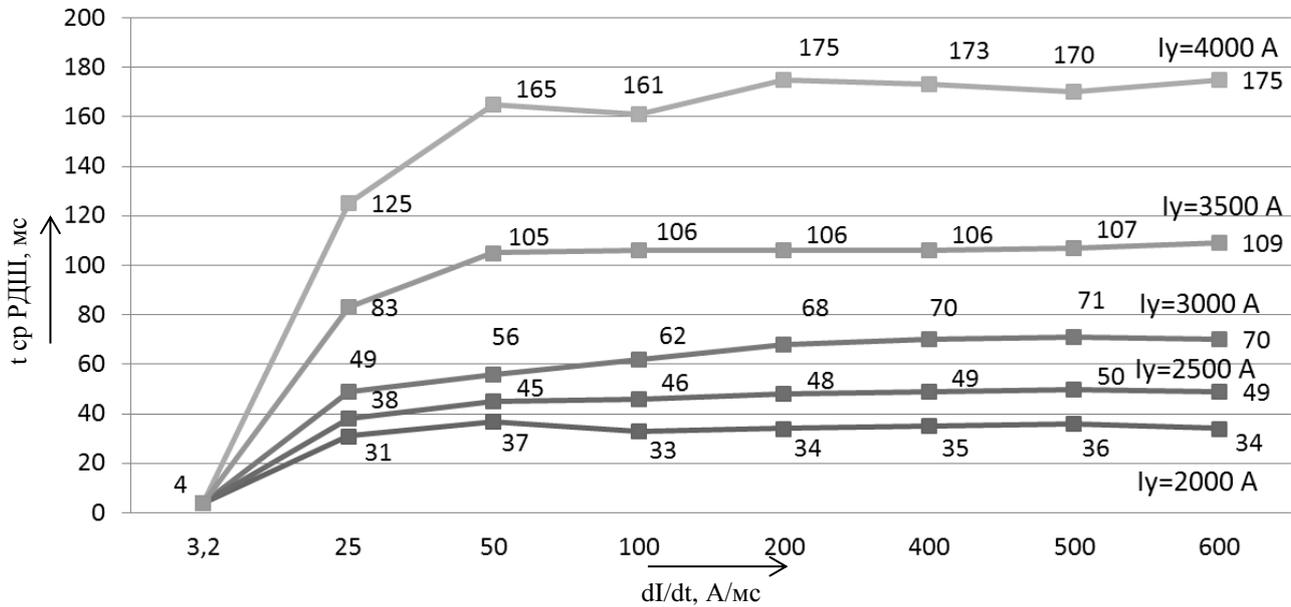


Рисунок 1 – Зависимости времени срабатывания РДШ от скорости нарастания тока при полном снятии пакета стали

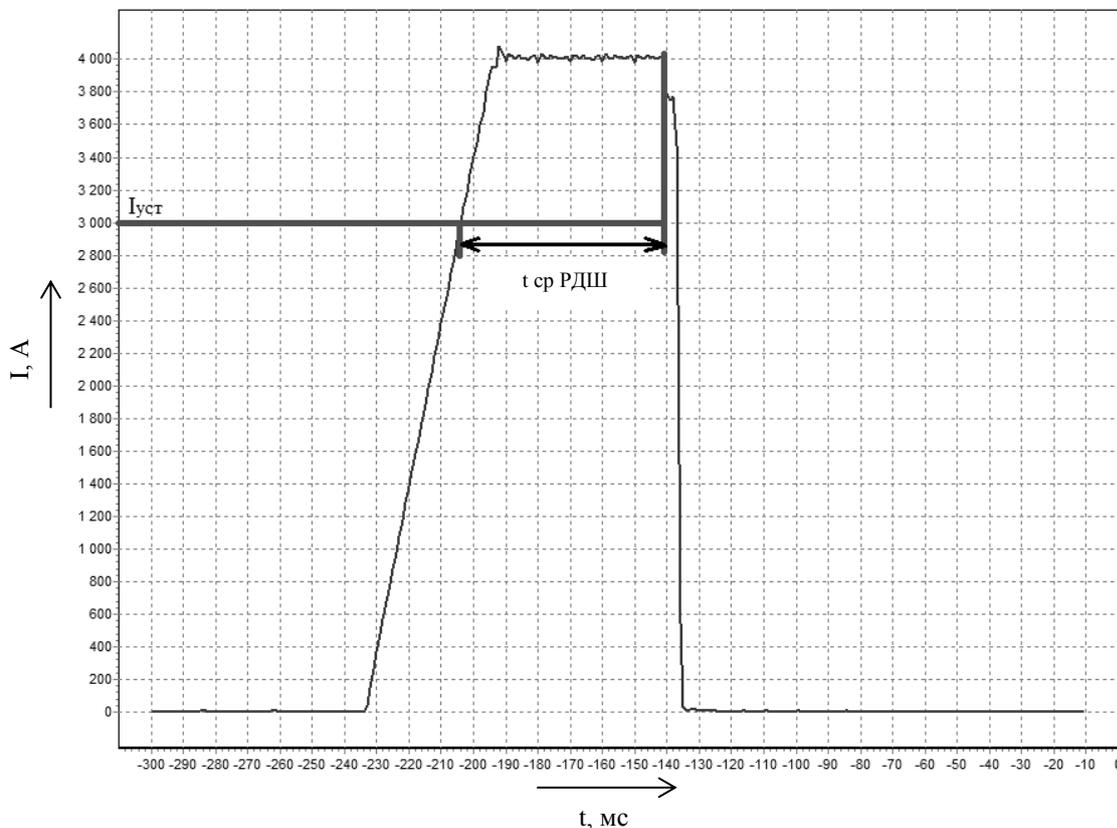


Рисунок 2 – Фрагмент осциллограммы

Полученные зависимости времени срабатывания РДШ позволяют сделать следующий вывод – чем больше разница между значением уставки МИЗ и максимальным установившимся током короткого замыкания, тем меньше время задержки.

Например, если ток короткого замыкания в два раза превышает значение уставки, то время задержки срабатывания РДШ составит в среднем около 34 мс при скорости нарастания более 25 А/мс, а при уставке, равной току короткого замыкания, и при скорости нарастания свыше 25 А/мс время задержки будет больше 125 мс.

Если отобразить зависимости, приведенные на рисунке 1, как функцию $t_{\text{ср РДШ}}(I_y)$, то получим график, вид которого представлен на рисунке 3.

Очевидно, что при скорости нарастания тока более 50 А/мс время срабатывания РДШ будет изменяться по одному закону – экспоненциальному – и будет зависеть от величины превышения тока короткого замыкания (установившегося значения) над уставкой. Путем аппроксимации, проведенной встроенными средствами Microsoft Excel, получили функцию

$$t_{\text{ср РДШ}}(I_y) = \frac{115}{I_{\text{кз}}^{2,25}} \cdot e^{0,87 \cdot I_y}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ср РДШ}}$ – время срабатывания РДШ, мс;

$I_{\text{кз}}$ – значение установившегося тока короткого замыкания, кА;

I_y – значение тока уставки МИЗ РДШ, кА.

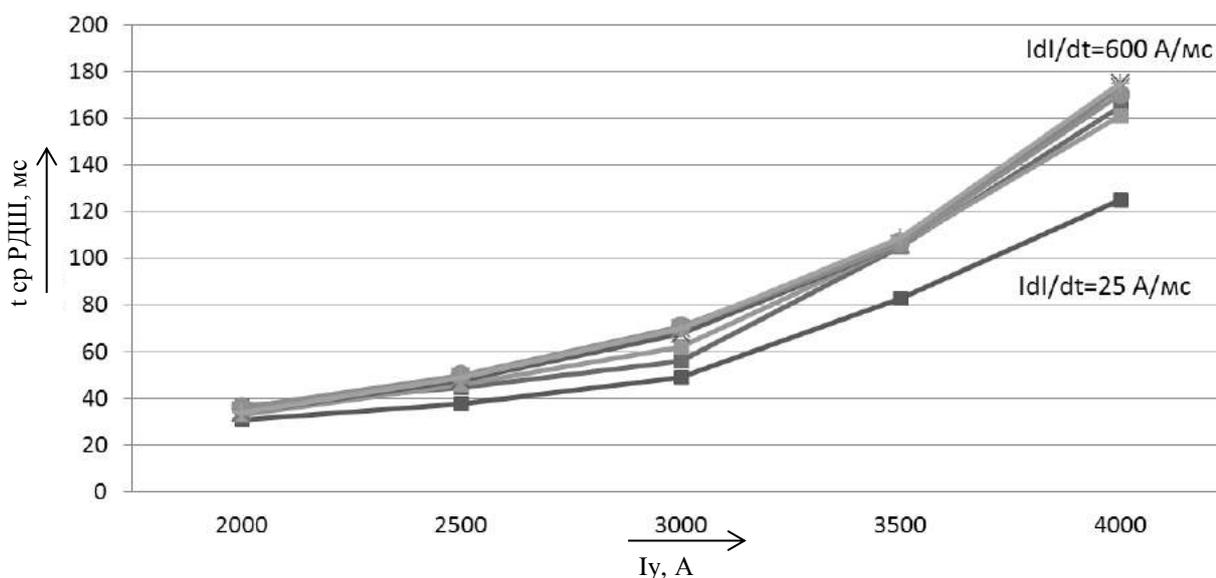


Рисунок 3 – Зависимости времени срабатывания РДШ от тока уставки при полном снятии пакета стали

По полученной функции можно получить расчетное время срабатывания РДШ в зависимости от расчетного установившегося тока короткого замыкания и значения уставки МИЗ. На рисунке 4 приведены пять зависимостей для следующих установившихся значений токов короткого замыкания: 4 кА (кривая 1), 8 кА (кривая 2), 12 кА (кривая 3), 16 кА (кривая 4) и 32 кА (кривая 5). Таким образом, при уставке МИЗ, равной 4 кА, и токе короткого замыкания 8 кА время срабатывания РДШ будет равно 35 мс, а при токе 12 кА и той же уставке время срабатывания составит уже 14 мс. Соответственно при установившемся токе короткого замыкания 32 кА время будет равняться примерно 4 мс.

Согласно инструкции [8] состав защит для выключателей фидеров контактной сети постоянного тока, совместно с самостоятельными устройствами защит или цифровым терминалом защит и автоматики (воздействующим на схему управления этого выключателя) определен следующий: основная, резервная и дополнительная.

Основная защита должна перекрывать всю защищаемую зону и обладать наименьшим временем действия из всего применяемого набора защит. В качестве основной в большин-

стве случаев используется максимально-импульсная защита, реализованная непосредственно на индуктивном шунте БВ или на реле РДШ, но возможно также применение дистанционной и максимально-токовой защит, применяемых в цифровых терминалах защит ЦЗАФ-3,3 / Ин-Тер-3,3.

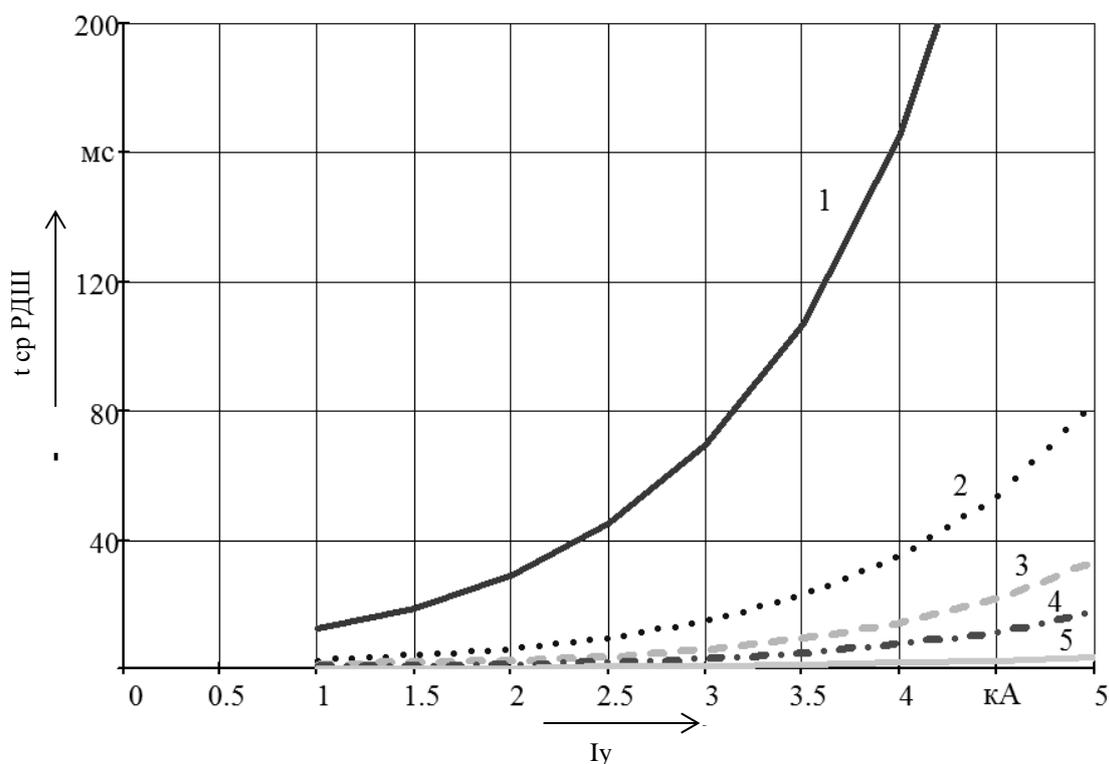


Рисунок 4 – Зависимости времени срабатывания РДШ от тока уставки

Резервная защита обеспечивает повышение надежности за счет дублирования действия основной защиты. Зона ее действия должна быть не меньше, чем длина защищаемой зоны. У данной защиты может быть предусмотрена выдержка времени. В качестве резервной защиты могут быть использованы защита по приращению тока, дистанционная и максимально-токовая.

Дополнительная защита не является обязательной и применяется выборочно для улучшения каких-либо показателей основной защиты. В качестве дополнительной защиты могут использоваться токовая отсечка – МИЗ с зоной действия от 40 до 70 % длины защищаемого участка и защита по скорости нарастания тока (зона действия – до 3 км).

Как было указано выше, применяя данные указания, часто невозможно отстроиться от ложных отключений БВ при проходе ЭПС изолирующего сопряжения под током вследствие высокой реакции РДШ (или индуктивного шунта БВ типа ВАБ-43). Особенно актуально это для присоединений питающих участки контактной сети с рабочими токами, превышающими минимальные токи короткого замыкания, поэтому необходимо в качестве основной защиты выбирать защиту по скорости нарастания тока (ЗСНТ) и дистанционную защиту, которые выполняются на базе цифровых терминалов. МИЗ в этом случае отводится роль дополнительной защиты [5]. При этом нельзя обойти вниманием такой важный фактор, как время возможного пережога контактного провода. В работе [9] приводится ориентировочный диапазон значений времени 0,062 – 0,074 с, при превышении которого возможен пережог контактного провода. Из этого следует, что если выбрать уставку МИЗ на РДШ такую, чтобы время отключения выключателя не превышало 50 мс, то вероятность пережога контактного провода будет стремиться к нулю, особенно принимая во внимание тот факт, что дополнительная защита МИЗ с выдержкой времени будет срабатывать чрезвычайно редко. Малая частота

срабатывания МИЗ с выдержкой времени объясняется тем, что в первую очередь на присоединении будут работать ЗСНТ и дистанционная защита.

Таким образом, при расчетном токе короткого замыкания, равном 8 кА, уставку МИЗ можно принимать не более 4,2 кА. Соответственно при токе короткого замыкания 32 кА можно выбирать уставку МИЗ не более 6 кА (максимальная уставка для РДШ-I), что без снижения надежности электроснабжения позволит отстроиться от неселективных отключения БВ при проходе ЭПС изолирующих сопряжений. Ориентируясь на временные характеристики РДШ, приведенные на рисунке 4, и зная расчетный ток короткого замыкания в конце защищаемой зоны и возле шин подстанции, можно с уверенностью сказать, в каком случае защита участка будет обеспечиваться без снижения надежности электроснабжения тяговой сети.

Несмотря на то, что указанные выше утверждения приведены для РДШ первого типа (РДШ-I), все выводы можно применить и для РДШ-II, что объясняется их небольшим конструктивным различием между собой и, соответственно, малой разностью активных и реактивных сопротивлений.

Если же выбрать дистанционную защиту с выдержкой времени 7 – 10 мс в качестве основной, а максимальную токовую защиту вывести из работы либо завязать ее уставку, то можно добиться еще большего снижения ложных отключений БВ, так как при близких коротких замыканиях присоединение будет защищать ЗСНТ, а увеличение времени отключения на 7 – 10 мс не приведет к перегосу контактного провода [9], поскольку полное время отключения выключателя в этом случае составит не более 30 – 35 мс.

Важным моментом при расчете и выборе уставок будет являться то, что в случае если МИЗ с выдержкой времени будет перекрывать всю защищаемую зону, то максимальная ее уставка будет равняться минимальному току короткого замыкания.

Необходимо учитывать, что МИЗ с выдержкой времени будет работать только в тех случаях, когда цифровые терминалы защит по каким-либо причинам не отработают штатно, в соответствии с выставленными уставками защит, вероятность чего низка. Такое событие может произойти, например, по причине того, что в ЦТ типа ЦЗАФ-3,3 нет системы определения подключения к измерительному шунту, в результате чего при отпадании провода возможен отказ цифрового терминала.

В качестве основного вывода можно выделить возможное снижение числа отключения БВ при проходе ЭПС изолирующих сопряжений без снижения надежности защиты фидеров контактной сети, что ведет к уменьшению количества неселективных отключений выключателей, и позволяет тем самым снизить эксплуатационных затраты на их обслуживание и капитальный ремонт.

Вторым важным вывод является подтверждение и объяснение появления временной задержки срабатывания реле-дифференциального шунта в случае уменьшения пакета стали на ветви его меньшего сечения до нуля. Это свойство РДШ в научных источниках [1, 2, 3, 4, 9, 10] не упоминается и не объясняется, хотя стоит отметить, что в [10] рассматривается влияние снятия пакета стали с шины шунта для выключателей устаревших типов АБ-2/4 на время их срабатывания, а в [4] упоминается, что при неполном уменьшении пакета стали на РДШ время его срабатывания будет уменьшаться. Однако недостаточная степень освещенности влияния снятия пакета стали с шин индуктивного шунта и РДШ на время их срабатывания в работах [4 и 10] позволяет дополнить существующую теорию работы [4] реле-дифференциальных шунтов выключателей типа ВАБ-28 и ВАБ-49 и в дальнейшем экстраполировать полученные результаты на БВ с индуктивным шунтом типа ВАБ-43.

Список литературы

1. Радченко, В. Д. Высоковольтные аппараты защиты постоянного тока [Текст] / В. Д. Радченко, А. В. Фарафонов // Труды ЦНИИ МПС. – М., 1971. – Вып. 448. – 144 с.
2. Пацеура, В. И. О временных характеристиках быстродействующих выключателей с индуктивными шунтами [Текст] / В. И. Пацеура // Электровозостроение / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск. – 1974. – Т. 15. – С. 112 – 121.

3. Голубев, А. И. Быстродействующие автоматические выключатели [Текст] / А. И. Голубев. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240 с.
4. Пупынин, В. Н. Полная теория работы и характеристика параллельных индуктивных шунтов быстродействующих выключателей типов ВАБ-2, АБ-2/3, АБ-2/4 и реле дифференциальных шунтов выключателей ВАБ-28 [Текст] / В. Н. Пупынин // Труды МИИТа. Вопросы энергоснабжения электрических железных дорог. – М., 1965. – Вып. 213.
5. Горькин, А. В. Устранение неселективных отключений быстродействующих выключателей фидеров контактной сети [Текст] / А. В. Горькин // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения – Омск, 2016. – С. 46 – 51.
6. Горькин, А. В. Анализ работы коммутационных аппаратов тяговой подстанции постоянного тока в условиях прохождения электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током [Текст] / А. В. Горькин // 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. 251 – 256.
7. Горькин, А. В. Анализ процессов изменения токов смежных фидеров при прохождении электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током [Текст] / А. В. Горькин // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 290 – 296.
8. Инструкции о порядке расчета и выбора уставок защиты тяговой сети постоянного тока. Утверждена техническим указанием Управления электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» от 16 января 2012 г. № ЦЭТ-2/1 (П-01/12).
9. Фигурнов, Е. П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог [Текст] / Е. П. Фигурнов. – М.: Транспорт, 1981. – 216 с.
10. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.

References

1. Radchenko, V. D. High-voltage devices of protection of a direct current [Vysokovol'tnye apparaty zashchity postoiannogo toka]. *Works of Central Research Institute Ministry of Railways.* – Release 448, 1971, 144 p.
2. Patseura, V. I. About temporary characteristics of high-speed switches with inductive shunts. [O vremennykh kharakteristikakh bystrodeistvuiushchikh vykliuchatelei s induktivnymi shuntami]. *Elektrovozostroyeniye. Novochoerkassk, prod. ARRDIELB*, 1974, pp 112-121.
3. Golubev, A.I. *Bystrodeistvuiushchie avtomaticheskie vykliuchateli* (High-speed automatic switches). Prod. the 2nd. Moscow-Leningrad: Energy, 1964, 240 p.
4. Pupynin, V. N. A complete theory of work and the characteristic of parallel inductive shunts of high-speed switches of the VAB-2, AB-2\3, AB-2\4 types and the relay of differential shunts of VAB-28 switches [Polnaia teoriia raboty i kharakteristika parallel'nykh induktivnykh shuntov bystrodeistvuiushchikh vykliuchatelei tipov VAB-2, AB-2\3, AB-2\4 i rele differentsial'nykh shuntov vykliuchatelei VAB-28]. *Works MIET, Questions of power supply of the electric railroads, Release 213*, 1965.
5. Gor'kin, A. V. Elimination of not selective shutdowns of high-speed switches of feeders of contact network. [Ustranenie neselektivnykh otkliuchenii bystrodeistvuiushchikh vykliuchatelei fiderov kontaktnoi seti]. *Povyshenie energeticheskoi effektivnosti nazemnykh transportnykh sistem: Materialy vtoroi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Increase in energy efficiency of land transport systems: Materials of the second international scientific and practical conference). Omsk, 2016, C. 46 – 51.
6. Gor'kin, A. V. Job analysis of switching offices of traction substation of a direct current in the conditions of passing by electrorailway vehicles of the isolating interfaces alive. [Analiz raboty

kommutatsionnykh apparatov tiagovoi podstantsii postoiannogo toka v usloviakh prokhozheniia elektropodvizhnym sostavom izoliruiushchikh sopriazhenii pod tokom]. *Pribory i metody izmerenii, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte: Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Devices and methods of measurements, quality control and diagnostics in the industry and on transport: Materials of the All-Russian scientific and technical conference with the international participation). Omsk, 2013, 425 p.

7. Gor'kin, A. V. Organizational and technological parameters of operation of the liner-tamping-straightening machines cyclic action [Analiz protsessov izmeneniia tokov smezhnykh fiderov pri prokhozhenii elektropodvizhnym sostavom izoliruiushchikh sopriazhenii pod tokom]. *Metrologicheskoe i normativnoe obespechenie kachestva i bezopasnosti produktsii: Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Metrological and standard quality assurance and safety of products: Materials of the All-Russian scientific and technical conference). Omsk, 2014, 224 p.

8. *Instruktsiia o poriadke rascheta i vybora ustavok zashchity tiagovoi seti postoiannogo toka* [The instruction about a procedure of payments and the choice of settings of protection of traction network of a direct current), Moscow, Upravlenie elektrifikatsii i elektrosnabzheniia Tsentral'noi direksii infrastruktury – filiala OAO «RZhD», 2012.

9. Figurnov, E. P. *Releinaia zashchita ustroystv elektrosnabzheniia zheleznykh dorog* (Relay protection of devices of power supply of the railroads). Moscow: Transport, 1981, 215 p.

10. Veksler, M. I. *Zashchita tiagovoi seti postoiannogo toka ot tokov korotkogo замыкания* (Protection of traction network of a direct current against currents of short circuit). Moscow: Transport, 1976, 120 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Горькин Артём Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gor'kin Artem Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Rolling stock electric railway», OSTU.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Горькин, А. В. Применение реле-дифференциального шунта с задержкой времени его срабатывания [Текст] / А. В. Горькин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 95 – 102.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gor'kin A. V. Application of relay – the differential shunt with the delay of time of its operation. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 95 – 102 (In Russian).

УДК 621.315

Д. В. Лесников, А. В. Паранин

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

О ПОДХОДЕ К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация: В статье рассмотрены существующие методы расчета электрических параметров и математические модели электрических процессов железобетонных конструкций. Сделан вывод о том, что в полной степени влияние арматурной сетки в описанных моделях не учитывается.

Авторами предлагаются метод расчета железобетонного фундамента, основанный на системе уравнений электрического поля в проводниках, и метод конечных элементов, позволяющий учитывать точную гео-

метрию объекта, включая арматурную сетку. Ввиду соотношения сопротивлений стали и бетона авторами сделано предположение о неизменности потенциала арматурной сетки, покрытой слоем бетона на постоянном и переменном токе. Реализация метода осуществлялась с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics.

В качестве объекта расчета используется железобетонный фундамент ТСС-4, расположенный в грунте. Результаты расчета интерпретированы в виде цветовой эпюры распределения потенциалов и линий плотности тока. Путем интегрирования нормальной составляющей плотности тока по поверхности прикладываемого потенциала и поверхности арматуры определены ток, протекающий по железобетонной конструкции в целом, и ток, втекающий в арматуру. На основании полученных значений тока модели определено ее сопротивление в зависимости от удельного сопротивления бетона и грунта.

Ключевые слова: железобетонная конструкция, электрическое сопротивление, потенциал, плотность тока, метод конечных элементов.

Dmitriy V. Lesnikov, Alexander V. Paraniin

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation

ABOUT APPROACH TO VALUATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES ELECTRICAL RESISTANCE

Abstract: In article methods of valuation electrical parameters and mathematical models of electric processes of reinforced concrete construction are considered. The conclusion that influence of reinforced mesh was not taken into account in describe models had been done.

Method for prediction of reinforced concrete foundation which based on equation system of electric field in conductors and finite element method and allowed explicit geometry of object include reinforced mesh was suggested by authors. Authors done the assumption about invariability of potential of reinforced mesh which covered of concrete layer for direct current and alternating current due to ratio of steel and concrete resistance. Realization of method was done by dint of software complex Comsol Multiphysics.

Research object was reinforced steel foundation TSS-4, which is located in ground. Result of research was represented color epure of potential distribution and line of current density. Reinforced concrete construction current and current which flow into armature were determined by dint of integration of normal current density on surface where set the external potential and surface of armature. On the grounds of determine values of model current resistance of model depending on resistivity of concrete and ground were calculated.

Keywords: reinforced concrete construction, electrical resistance, potential, current density, finite element method.

В настоящее время железобетонные конструкции нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Наиболее часто они применяются в качестве фундаментов и опор линий электропередач, а также на электрифицированных железнодорожных линиях.

Одним из приоритетных направлений развития российских железных дорог сейчас является развертывание высокоскоростного движения. Опираясь на опыт немецких и китайских железных дорог, можно сказать о необходимости применения большого количества различных железобетонных конструкций при возведении высокоскоростных магистралей, а именно: железобетонные эстакады, использование железобетона при возведении безбалластного пути, сооружение туннелей и т. д. Очевидно, что для всесторонней оценки токораспределения в обратной тяговой сети и величин возможных опасных напряжений, возникающих в аварийном режиме на железобетонных конструкциях, необходима соответствующая математическая модель.

Таким образом, целью данной статьи является разработка метода расчета, позволяющего оценить электрические параметры железобетонных конструкций с учетом конфигурации арматуры и толщины поверхностного слоя бетона. При этом важно, чтобы разрабатываемый метод был применим на практике, т. е. не требовал дополнительных исследований параметров реальной железобетонной конструкции.

В настоящее время нет единой методики расчета электрических параметров железобетонных конструкций. К таким параметрам в первую очередь относится собственно электрическое сопротивление и сопротивление растеканию конструкции. Очевидно, что эти пара-

метры будут определяться удельным сопротивлением бетона, параметрами арматуры, толщиной поверхностного слоя бетона, расположением и площадью поверхностей, к которым приложено напряжение, а также характеристиками грунта и его удельным сопротивлением. В работе [1] описывается методика расчета импульсного сопротивления железобетонной стойки воздушной линии. Автор предлагает заменять стойку только ее арматурой, а бетон заменить окружающей стойку землей. Далее автор приводит ряд формул, позволяющих определить импульсное сопротивление стойки на основе эквивалентного по сопротивлению радиуса искрообразования. Также приводится сравнение рассчитанных величин сопротивлений и величин, полученных при полевых испытаниях, при этом погрешность составляет 1 – 8 %. Стоит отметить, что импульсное сопротивление, как правило, отличается от сопротивления растеканию, определяемого при промышленной частоте. Это объясняется спецификой процесса разряда молнии: большой величиной токов и кратковременностью процесса.

При определении сопротивления растеканию железобетонных конструкций может быть применена методика, описанная в источниках [2, 3]. Работа [2] посвящена расчету сопротивления заземления фундаментов опор воздушных линий с грибовидными подножниками. Собственно железобетонный фундамент был заменен сочетанием вертикальных и горизонтальных стержней, в частности, подножник представлял собой сочетание шести горизонтальных стержней: четыре по периметру подножника и два по диагоналям.

В работе [4] предложена другая методика определения сопротивления растеканию железобетонного фундамента опор контактной сети. Авторы предлагают схему замещения фундамента типа ТСА, учитывающую переходные сопротивления «анкерные болты – бетон», «бетон – грунт», «грунт – рельс» и собственно сопротивление бетона. При этом анкерные болты рассматривались как вертикальные электроды, располагающиеся в неоднородной структуре. Также авторы учитывали влияние толщины слоя бетона, окружающего болт, поскольку в различных направлениях она разная. Однако в работе [4] влияние параметров арматурной сетки фундамента на его сопротивление не рассматривается.

Указанные выше переходные сопротивления в значительной степени определяют величину сопротивления растеканию железобетонного фундамента, а также степень коррозионного повреждения арматуры. В работе [5] рассматривается модель подземной части железобетонной опоры контактной сети с учетом границы раздела «арматура – бетон». Фрагмент соответствующей схемы замещения представлен на рисунке 1.

Собственно граница раздела представляется элементами U_0 , $R_{гр}$, $C_{гр}$. Фрагмент схемы замещения применяется к каждому вертикальному стержню арматуры опоры, при этом принимается допущение, что в подземной части опоры протекают только токи в радиальном направлении, т. е. от арматуры опоры к внешней границе. В статьях [6, 7] представлены результаты экспериментального исследования параметров границы раздела «арматура – бетон». Представленные в работах расчетные и экспериментальные зависимости совпадают по форме и по значениям в пределах 5 %.

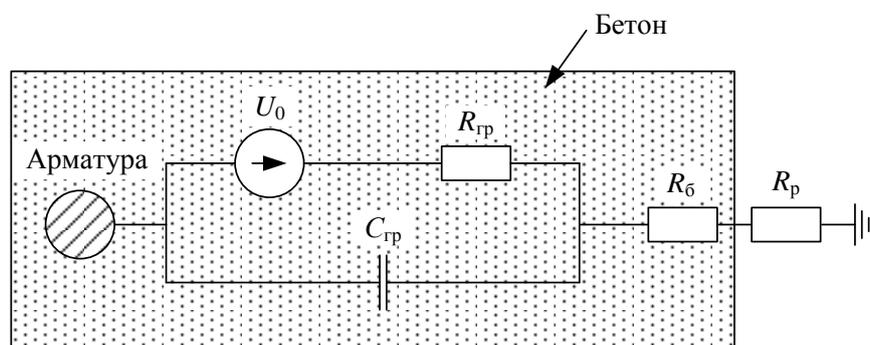


Рисунок 1 – Фрагмент схемы замещения подземной части железобетонной опоры: U_0 – ‘электрохимический потенциал на границе раздела «арматура – бетон»; $R_{гр}$, $C_{гр}$ – сопротивление и емкость на границе «арматура – бетон»; $R_б$ – сопротивление бетона от границы раздела «арматура – бетон» до внешней границы опоры; $R_р$ – сопротивление растеканию замещаемой площади опоры

В описанных выше методах меньшее внимание уделялось собственно бетону, в то время как его свойства значительно влияют на величину сопротивления железобетонных конструкций в целом. В работе [8] предлагается модель сухого бетона как «электрического проводника». Авторы, основываясь на известной структуре бетона, разработали схему замещения бетона, состоящую из последовательно и параллельно соединенных емкостей. Емкости представляют собой основные компоненты бетонной смеси: цементный камень, заполнитель и газообразные компоненты. В зависимости от соотношения компонентов изменяется емкость соответствующих элементов.

В источнике [9] для оценки сопротивления растекания круглых бетонных фундаментов предлагается рассматривать их как заземлители и использовать формулу

$$R = \frac{\rho_E}{2\pi t_E} \ln \frac{4t_E}{d_G}, \quad (1)$$

где ρ_E – сопротивление грунта, Ом·м;

t_E – глубина залегания, м;

d_G – диаметр фундамента, м.

Для прямоугольных фундаментов предлагается в качестве диаметра подставлять длину более короткой стороны прямоугольника.

Для расчета сопротивления растеканию армированного бетонного фундамента предлагается использовать другую формулу:

$$R = \frac{\rho_E}{\pi d_G}. \quad (2)$$

Здесь d_G – диаметр полусферы, объем которой равен объему фундамента.

Учитывая изложенное, можно сказать, что ни один из представленных методов в полной мере не учитывает конфигурацию арматуры, входящей в состав железобетонных конструкций. Влияние арматуры на электрические параметры фундаментов и опор очевидно, поэтому необходимо разработать метод, позволяющий учитывать пространственное расположение арматуры внутри железобетонной конструкции, при расчете ее электрических параметров.

Для описания расположения арматуры в железобетонной конструкции необходимо создать ее 3D-геометрию. Моделирование поля внутри объемного неоднородного объекта целесообразно осуществлять с помощью метода конечных элементов, поскольку он позволяет рассчитывать модели с конкретно заданной геометрией и характеристиками ее элементов. Этот метод получил на сегодняшний день широкое распространение в связи с развитием вычислительных мощностей современных компьютеров. С его помощью решаются задачи в различных областях науки: от механики до биохимии. Авторами для реализации конечно-элементной модели использован программный комплекс *Comsol Multiphysics*.

Для расчета электрического поля и токораспределения в данном случае применяется модуль *Electric Currents*. Электрическое поле описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\vec{J}) = 0; \\ \vec{J} = (\sigma + j\epsilon\epsilon_0\omega) \cdot \vec{E}; \\ \vec{E} = -\operatorname{grad}(U), \end{cases} \quad (3)$$

где \vec{J} – вектор плотности электрического тока, А/м²;

\vec{E} – вектор напряженности электрического поля В/м;
 σ – удельная проводимость, См/м;
 ε – относительная диэлектрическая проницаемость;
 ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;
 U – потенциал, В;
 ω – угловая частота, рад/с;
 j – мнимая единица.

По сути расчет электрического поля методом конечных элементов представляет собой решение «в лоб», т. е. непосредственное решение системы уравнений в частных производных. Таким образом, не требуется введение дополнительных допущений и упрощений геометрии рассматриваемого объекта. Однако применение такого подхода требует значительных вычислительных мощностей и знаний в области соответствующего программного обеспечения.

Метод конечных элементов позволяет учитывать конкретную конфигурацию арматуры рассматриваемых железобетонных конструкций и их свойства, поэтому далее рассмотрим железобетонный фундамент типа ТСС-4, располагаемый в грунте (рисунок 2). Таким образом, по результатам расчета возможно будет определить сопротивление фундамента с учетом его сопротивления растеканию.

На первоначальном этапе необходимо оценить величины сопротивления элементов железобетонной конструкции.

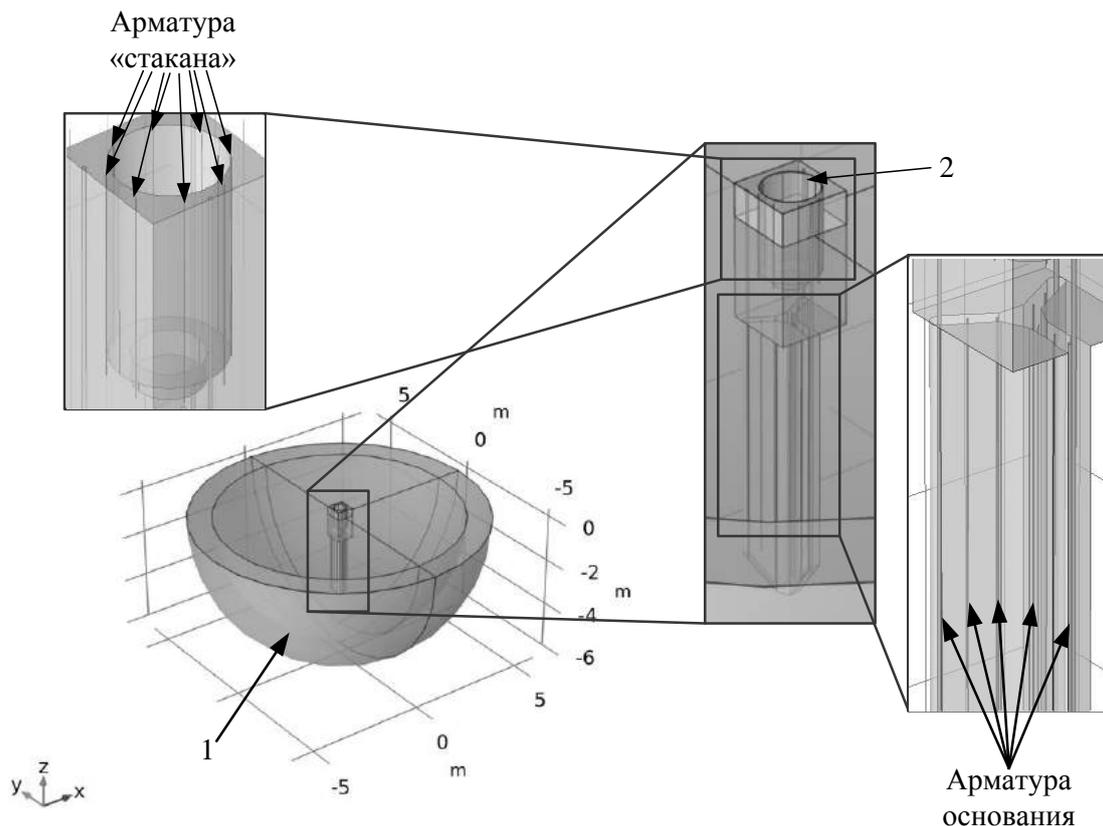


Рисунок 2 – Трехмерная геометрия железобетонного фундамента ТСС-4, располагаемого в грунте

Конструкция трехлучевого стаканного фундамента типа ТСС-4 состоит из верхней части, представляющей собой «стакан» для установки отдельных опор контактной сети, и нижней части, представляющей собой трехлучевую конструкцию с заострением. 3D-геометрия рассматриваемого фундамента создавалась на основе чертежей, представленных в источнике [10].

Арматура фундамента представлена арматурной сеткой «стакана», выполненной из проволоки диаметром 5 мм, а также арматурой трехлучевого основания, выполненной сеткой из стержней диаметром 20 мм и проволоки диаметром 5 мм.

В качестве материала арматуры используется сталь с удельным сопротивлением 1 мкОм·м. Удельное сопротивление бетона варьируется от 200 до 1000 Ом·м. Относительная диэлектрическая проницаемость бетона, как и его сопротивление, определяется многими факторами: пористостью, количеством влаги и т. д. В качестве среднего значения диэлектрической проницаемости бетона можно принять $\epsilon = 4,5$, для стали и грунта $\epsilon = 1$.

Для расчета будут задаваться следующие граничные условия: прикладываемый потенциал $U = U_0$ задается на внутренней поверхности «стакана» (плоскость 2 на рисунке 2) (условно принято 100 В), а нулевой потенциал $U = 0$ задается на внешней поверхности удаленной земли (плоскость 1 на рисунке 2).

На постоянном токе удельное сопротивление арматуры во много раз меньше сопротивления бетона, при этом арматура гальванически связана, следовательно, ее поверхность будет эквипотенциальной: $U = U_{\text{арм}}$. Для этого используется граничное условие «плавающий потенциал»:

$$\int_{S_{\text{арм}}} J_{\text{арм}}^n \cdot dS_{\text{арм}} = 0, \quad (4)$$

где $S_{\text{арм}}$ – внешняя поверхность арматуры, соприкасающаяся с бетоном, м²;

$J_{\text{арм}}^n$ – плотность тока по нормали к поверхности арматуры, А/м².

Выражение (4) означает, что при потенциале арматуры $U_{\text{арм}}$ весь ток, втекающий в нее из бетона по всей поверхности их соприкосновения, равен току, вытекающему обратно. Другими словами, в арматуре нет источников тока.

На переменном токе на сопротивление арматуры будет оказывать влияние величина протекающего по ней тока, поскольку величина относительной магнитной проницаемости стали зависит от напряженности магнитного поля. Относительная магнитная проницаемость влияет на толщину «скин»-слоя, по которому будет протекать ток, что в свою очередь приводит к тому, что сопротивление стального проводника переменному току выше, чем сопротивление того же проводника постоянному току. Для стального проводника толщина «скин»-слоя при частоте 50 Гц может варьироваться от 2 до 5 мм исходя из формулы [11]

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{1}{\mu \cdot \sigma \cdot f}}, \quad (5)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала;

f – частота, Гц.

В рассматриваемом железобетонном фундаменте используется стальная арматура диаметром от 5 до 20 мм, т. е. подтверждается «скин»-эффект.

В работе [12] представлены результаты исследования влияния тока, протекающего в стальном проводнике, на его магнитную проницаемость. Согласно результатам исследования на частоте 50 Гц продольное сопротивление стального проводника круглого сечения диаметром 22 мм варьировалось в пределах 0,003 – 0,0045 Ом/м при токе от 5 до 30 А, на постоянном токе сопротивление проводника того же сечения будет равно 0,00066 Ом/м. Таким образом, наблюдается повышение продольного сопротивления стали у проводника малого сечения вследствие «скин»-эффекта в семь раз. Однако повышенное сопротивление стали на переменном токе практически не влияет на соотношение удельных сопротивлений стали и бетона как проводников электрического тока, из чего следует, что на переменном токе поверхность арматуры также может быть принята эквипотенциальной.

Стоит отметить, что арматурная сетка «стакана» и основания не связаны металлически, поэтому граничные условия для них задавались отдельно. Наличие горизонтальных сеток

учитывается тем, что граничное условие «плавающий потенциал» задается для всех стержней основания и всех стержней «стакана».

Очевидно, что на сопротивление конструкции и ее сопротивление растеканию будет влиять не только сопротивление бетона, но и сопротивление грунта, исходя из чего необходимо провести расчет при различных значениях его сопротивления. При расчете удельное сопротивление грунта будет изменяться от 150 до 350 Ом·м. Значения удельного сопротивления грунта приведены в источнике [13] и получены на основании результатов вертикального электрического зондирования на участке ст. Катайск – ст. Долматово.

На рисунке 3 представлена расчетная сетка, состоящая из тетраэдральных элементов общим количеством около 837000.

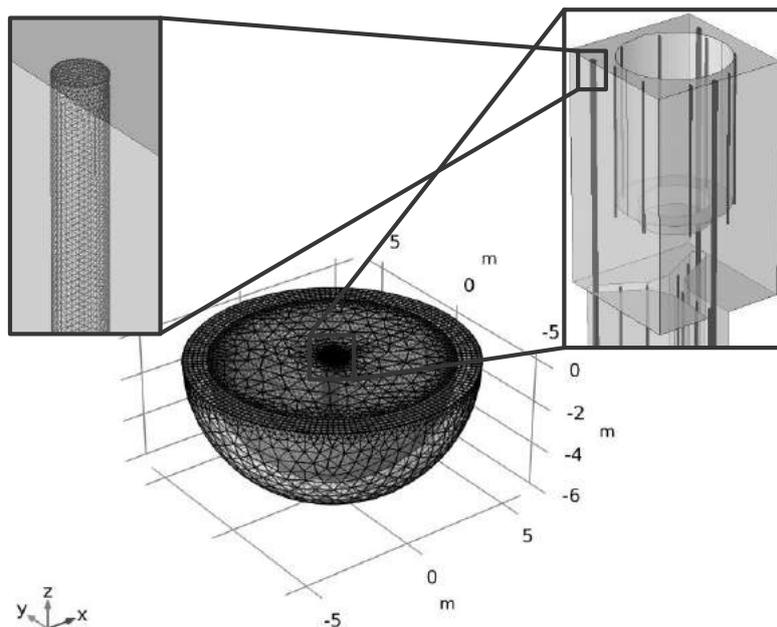


Рисунок 3 – Расчетная сетка

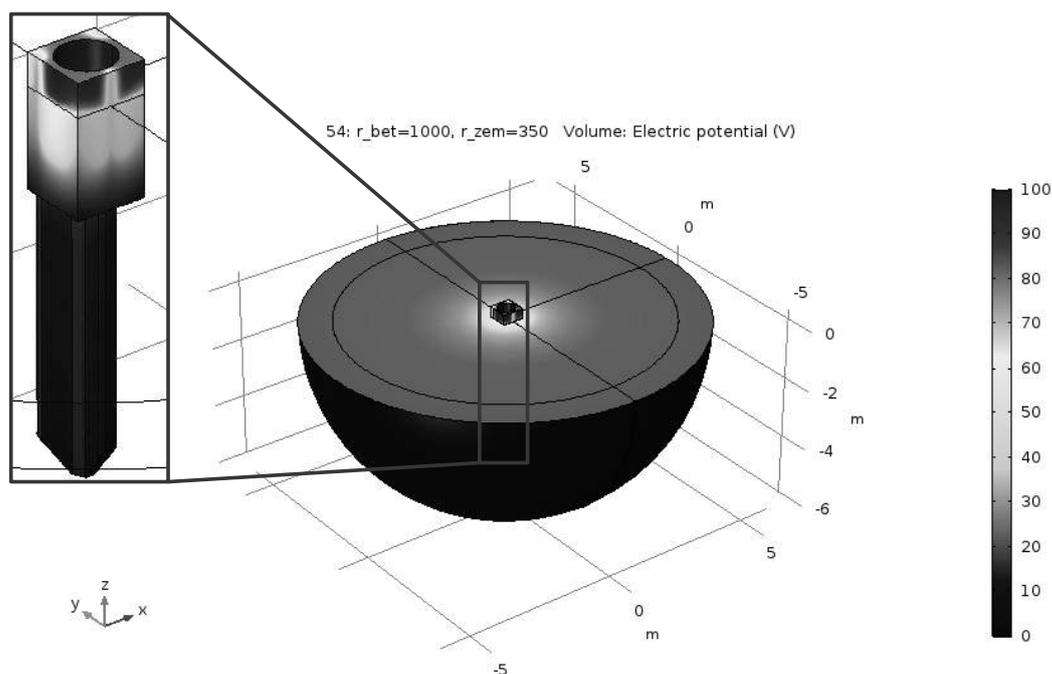


Рисунок 4 – Распределение потенциала в земле и на поверхности железобетонной конструкции, цветовая шкала в вольтах

Результатом расчета является распределение потенциала и плотности тока. На рисунках 4 – 6 представлены соответствующие распределения для сопротивления бетона 1000 Ом·м и сопротивления грунта 350 Ом·м.

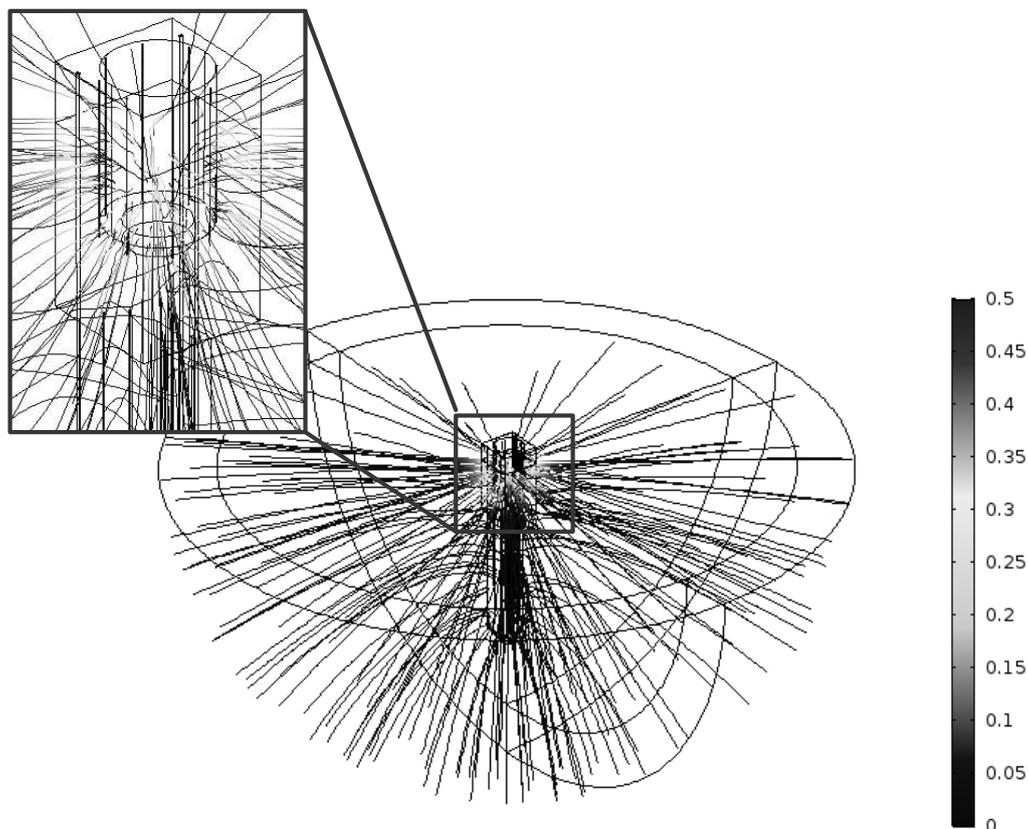


Рисунок 5 – Распределение линий плотности тока в земле и в теле фундамента, цвет линии означает величину плотности тока, цветовая шкала в A/m^2

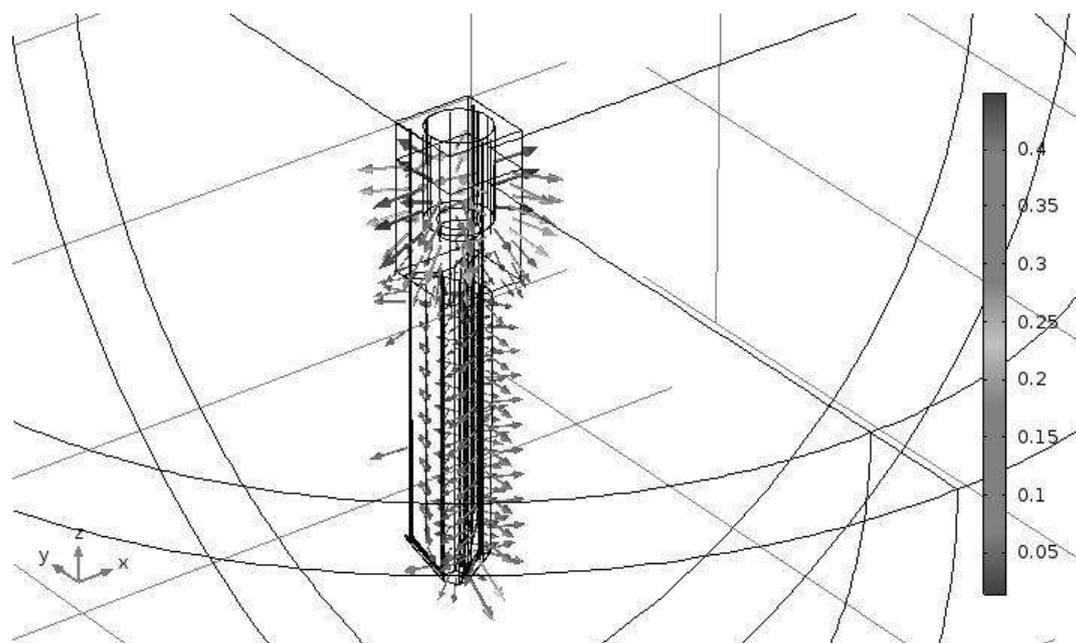


Рисунок 6 – Распределение векторного поля плотности тока в земле вокруг железобетонной конструкции, цвет стрелки означает величину плотности тока, цветовая шкала в A/m^2

На основе рассчитанного векторного поля плотности тока путем интегрирования определяется величина тока I_0 , вытекающего из поверхности 1 и втекающего в поверхность 2 (см. рисунок 2). Тогда величину сопротивления можно определить как отношение величины прикладываемого напряжения U_0 к рассчитанной величине тока I_0 , по закону Ома. Таким образом, можно получить кривые зависимости сопротивления конструкции с учетом ее сопротивления растеканию от удельного сопротивления бетона и грунта. Результаты расчетов представлены на рисунках 7 и 8.

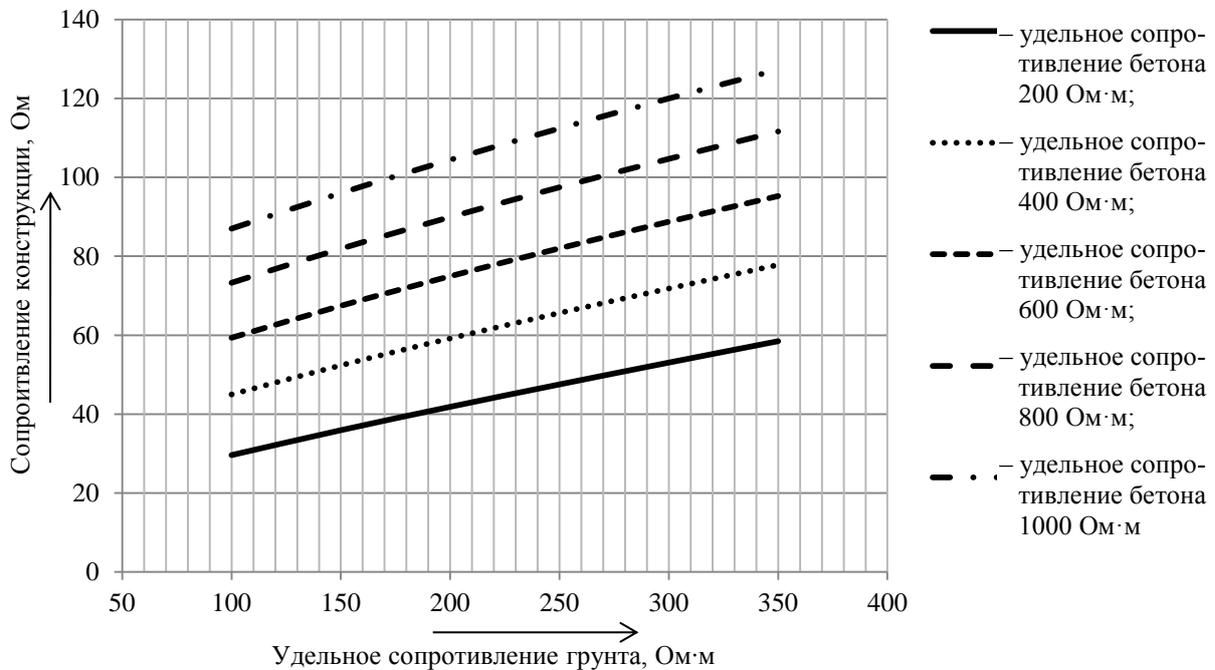


Рисунок 7 – Зависимость сопротивления рассматриваемой железобетонной конструкции от удельного сопротивления грунта при постоянном удельном сопротивлении бетона

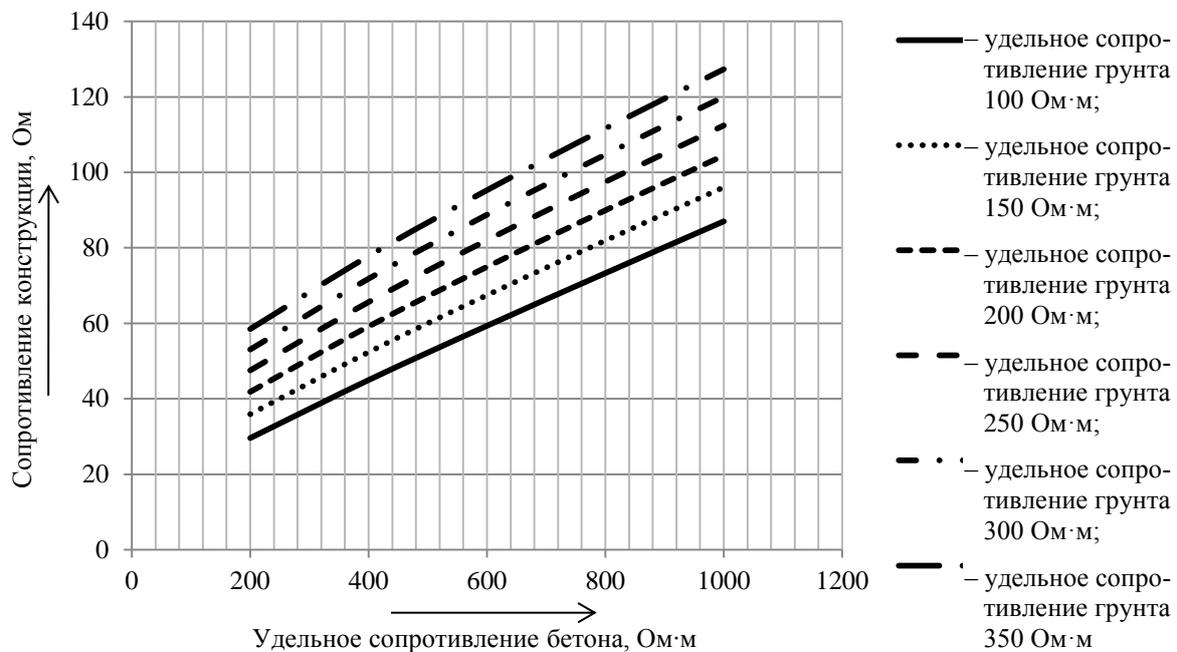


Рисунок 8 – Зависимость сопротивления рассматриваемой железобетонной конструкции от удельного сопротивления бетона при постоянном удельном сопротивлении грунта

Из кривых на рисунке 8 видно, что повышение удельного сопротивления бетона приводит к более резкому повышению сопротивления всей конструкции, нежели повышение со-

противления грунта. Это объясняется тем, что сопротивление бетона в большей степени определяет сопротивление самой конструкции, а сопротивление грунта влияет только на сопротивление растеканию фундамента в земле.

Для того чтобы определить какая величина тока протекает через арматуру $I_{\text{арм}}$, необходимо в выражении (4) плотность тока $J_{\text{арм}}^n$, текущего по нормали к поверхности арматуры, взять по модулю и разделить результат интегрирования на два. Разность между I_0 и $I_{\text{арм}}$ определяет величину тока, текущего только внутри бетона без проникновения в арматуру. Для рассматриваемой конструкции и диапазона удельного сопротивления бетона $I_{\text{арм}}$ составляет 88,6% от величины общего тока конструкции I_0 .

Помимо соотношения тока бетона и арматуры интерес вызывают характер сопротивления железобетонной конструкции при приложении переменного напряжения и его зависимость от диэлектрической проницаемости бетона. Исследование будет проводиться на той же модели при сопротивлении бетона 200 Ом·м и сопротивлении грунта 100 Ом·м. К поверхности 2 (см. рисунок 2) будет прикладываться переменное напряжение 100 В частотой 50 Гц. При этом диэлектрическая проницаемость бетона будет изменяться от 1 до 4,5. В результате расчета и постобработки сопротивление конструкции совпало с расчетным значением, полученным на постоянном токе. При этом сопротивление было одинаковым для всех значений диэлектрической проницаемости бетона. Таким образом, рассматриваемая железобетонная конструкция имеет преимущественно активное сопротивление, причем сопротивление ее не зависит от диэлектрической проницаемости бетона.

Неизменность потенциала арматуры при приложении внешнего напряжения вызывает необходимость разработки еще одного подхода к расчету железобетонных конструкций, который может быть применен для расчета железобетонных опор контактной сети. Поскольку соотношение сопротивлений арматурной сетки и бетона определяет распределение потенциала и токов внутри железобетонной конструкции таким образом, что втекание и стекание тока с арматурной сетки наблюдается только вблизи поверхностей задания потенциалов, то возможен подход, при котором объемные модели будут реализовываться только вблизи этих поверхностей, а остальная часть опоры будет заменяться цепочкой сопротивлений. Этот подход требует дополнительного исследования и более тщательной оценки.

В заключение можно отметить, что в результате анализа литературы по вопросу сопротивления железобетонных конструкций был сделан вывод о необходимости разработки метода расчета, позволяющего в полной мере учитывать конфигурацию арматуры объекта. Авторами предлагается метод определения сопротивления железобетонных конструкций, основанный на методе конечных элементов, реализованный на примере фундамента типа ТСС-4. При анализе электрических сопротивлений элементов железобетонного фундамента было сделано предположение о том, что потенциал арматуры не должен меняться по длине модели. С помощью программного комплекса *Comsol Multiphysics* был проведен расчет модели фундамента ТСС-4, расположенного в земле. Стоит отметить, что исходными данными для расчета послужили: конструкция фундамента, а также сопротивление бетона и грунта, что является подтверждением применимости такого метода расчета, поскольку все исходные данные являются общеизвестной информацией. В результате было получено распределение потенциала и плотности тока в фундаменте и в окружающем пространстве земли. При этом арматура принимается как эквипотенциальная поверхность: величина ее потенциала такова, что ток, втекающий в нее, равен току, вытекающему из неё. В результате расчета были получены кривые, описывающие зависимость сопротивления фундамента с учетом его сопротивления растеканию от величины удельного сопротивления бетона и грунта. На основании этих кривых можно сделать вывод, что сопротивление бетона в большей степени влияет на сопротивление конструкции, нежели сопротивление грунта.

Направлениями дальнейшего исследования будут разработка методики расчета установившегося потенциала арматуры и определение степени его зависимости от величины за-

щитного слоя бетона, конструкции арматурной сетки, геометрии поверхностей, на которых задается внешний потенциал и потенциал уровня нуля.

Список литературы

1. Анненков, В. З. Аналитический расчет импульсного сопротивления железобетонной стойки опоры ВЛ [Текст] / В. З. Анненков // *Электричество*. – 2012. – № 7. – С. 72, 73.
2. Шишигин, С. Л. Расчет сопротивления фундаментов опор ВЛ из железобетонных грибовидных подножников в неоднородном грунте [Текст] / С. Л. Шишигин, А. Н. Новикова // *Известия НИИ постоянного тока / Научно-исследовательский ин-т по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения*. – СПб. – 2011. – № 65. – С. 166 – 176.
3. Шишигин, С. Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств [Текст] / С.Л. Шишигин // *Электричество*. – 2010. – № 1. – С. 16 – 23.
4. Кремлев, И. А. Расчетная модель электрического сопротивления железобетонных фундаментов опор контактной сети [Текст] / И. А. Кремлев, Ю. В. Кондратьев, И. А. Терехин // *Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения*. – Омск. – 2014. – № 2. – С. 65 – 69.
5. Кандаев, В. А. Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / В. А. Кандаев / *Омский гос. ун-т путей сообщения*. – Омск, 2003. – 198 с.
6. Маслов, Г. П. Методика определения параметров границы раздела «арматура – бетон» [Текст] / Г. П. Маслов, Н. Ю. Свешникова, А. В. Кандаев // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т путей сообщения*. – Новосибирск. – 2008. – № 1. – С. 282 – 286.
7. Кандаев, В. А. Определение параметров границы раздела «арматура – бетон» по результатам анализа переходного процесса [Текст] / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Пономарев // *Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения*. – Омск. – 2014. – № 2 (18). – С. 85 – 92.
8. Модельное представление сухого бетона железобетонного фундамента контактной сети, как электрического проводника [Текст] / И. А. Терехин, И. А. Кремлев и др. // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта*. – Новосибирск. – 2015. – № 3. – С. 88 – 92.
9. Kießling, F. *Fahrleitungen elektrischer Bahnen* / Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A. Verlag Publicis Publishing Erlangen, 3. Auflage, 2014.
10. Проект 4182И «Железобетонные трехлучевые фундаменты с заострением в подземной части для опор контактной сети» / Научно-исследоват. ин-т транспортного строительства. – М., 2005. – 65 с.
11. Матвеев, А. Н. *Электричество и магнетизм* [Текст] / А. Н. Матвеев. – М.: Высшая школа. – 1983. – 463 с.
12. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М, 2013 – 552 с.
13. Проект капитального ремонта и реконструкции заземляющих устройств контактной сети двухпутного участка ст. Катайск – ст. Долматово [Текст] / К. Б. Кузнецов, Г. В. Звигинцева и др. / *Уральский электротехнический ин-т инж. ж.-д. трансп.* – Свердловск, 1991. – 54 с.

References

1. Annenkov V.Z. Analytical calculation of the impulse resistance of the reinforced concrete masts of overhead lines [Analitichesiy raschet impul'snogo soprotivleniya zhelezabetonnoy stoiki opori VL]. *Electrichestvo – Electricity*, 2012, no. 7, pp. 72 – 73.
2. Shishigin S. L., Novikova A. N. Calculation of the resistance of overhead masts foundation with concrete mushroom basement in heterogeneous soil [Rachet soprotivleniya fundamentov opor

VL iz zhelezobetonnih gribovidnih podnozhnikov v neodnorodnom grunte]. *Izvestiia NII postoianogo toka – News of the Research Institute of direct current*, 2011, no. 65, pp. 166 – 176.

3. Shishigin S. L. Mathematical models and methods for calculating of grounding devices [Matematicheskie modely i metody rascheta zazemliaushih ustroystv]. *Electrichestvo– Electricity*, 2010, no. 1, pp. 16 – 23.

4. Kremlev I.A., Kondratiev Yu.V., Terekhin I.A. Calculation model of electrical resistance of reinforced concrete foundations of catenary masts [Raschetnaia model elektricheskogo soprotivleniia zhelezobetonnih fundamentov opor kontaktnoi seti]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 2, pp. 65 – 69.

5. Kandaev V. A. *Sovershenstvovanie ekspluatatsionnogo kontroliia korrozionnogo sostoiianiia podzemnih sooruzhenii system elektrosnabzhenia zheleznodorozhnogo transporta* (Improvement of operational control of the corrosion condition of underground structures of power supply systems of railway transport). Omsk, 2003, p. 198.

6. Maslov G. P., Sveshnikova N. Y., Kandaev A. V. Method for determining the parameters of the «reinforcement-concrete» border [Metodika opredeleniya parametrov granitsy razdela «armatura-beton»]. *Nauchnie problem transporta Sibiri i Dalnego Vostoka – Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*, 2008, no. 1, pp. 282 – 286.

7. Kandayev V. A., Avdeeva K. V., Ponomarev A. V. Determination of the «carcass-concrete» boundary parameters by the analysis of the transient process [Opredelenie parametrov granitsy razdela «armature-beton» po rezultatam analiza perehodnogo processa]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 2, pp. 85 – 92.

8. Terekhin I. A., Kremlev I. A., Kondratiev Yu. V., Kuznetsov A. A., Skokov R. B. Model representation of dry concrete of catenary reinforced concrete foundation, as an electrical conductor [Modelnoe predstavlenie suhogo betona zhelezobetonnogo fundamenta kontaktnoi seti, kak elektricheskogo provodnika]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport Siberia and Far East*, 2015, no. 3, pp. 88 – 92.

9. Kiebling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.: *Fahrleitungen elektrischer Bahnen*. Verlag Publicis Publishing Erlangen, 3. Auflage, 2014.

10. Project 4182I «Zhelezobetonnyye trekhluchevyye fundamenty s zaostreniyem v podzemnoy chasti dlya opor kontaktnoy seti» («Reinforced concrete three-beam foundations with sharpening in the underground part for supports of the catenary system»). Moscow, 2005, 65 p.

11. Matveev A. N. *Elektrichestvo i magnetizm* (Electricity and Magnetism). Moscow, 1983, p. 463.

12. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. *Bluzhdayushchiye toki i ekspluatatsionnyy kontrol' korrozionnogo sostoyaniya podzemnykh sooruzheniy sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* (Stray currents and operational control of the corrosion condition of underground structures of power supply systems of railway transport). Moscow, 2013, p. 552.

13. *Proyekt kapital'nogo remonta i rekonstruktsii zazemlyayushchikh ustroystv kontaktnoy seti dvukhputnogo uchastka st. Kataysk – st. Dolmatovo* (The project of overhaul repair and reconstruction of grounding device of the catenary system of the double-track line st. Kataisk – art. Dolmatovo). Sverdlovsk, 1991, 54 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесников Дмитрий Валентинович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (919) 38-80-923.

E-mail: dmlesnikov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lesnikov Dmitriy Valentinovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Assistant of the department «Electric power supply of transport », USURT.

Phone: +7 (919) 38-80-923.

E-mail: dmlesnikov@yandex.ru

Паранин Александр Викторович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

Колмогорова ул., 66, г. Екатеринбург, 620034, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Paranin Alexander Viktorovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electric power supply of transport », USURT.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лесников, Д. В. О подходе к расчету оценки электрического сопротивления железобетонных конструкций [Текст] / Д. В. Лесников, А. В. Паранин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 102 – 114.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lesnikov D.V., Paranin A.V. Development of methods for valuation of reinforced concrete structures electrical resistance. Journal of Transsib Railway Studies, 2017 vol. 31, no. 3, pp. 102 – 114 (In Russian).

УДК 621.331:621.311.4:621.314

Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Т. В. Комякова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПУЛЬСОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы внедрения на тяговых подстанциях постоянного тока двадцатичетырехпульсовых выпрямителей с различными схемами выпрямления. Результаты эксплуатации двадцатичетырехпульсового выпрямителя, установленного на одной из тяговых подстанций, доказывают целесообразность использования такого преобразователя. Приведены варианты модернизации действующего оборудования, входящего в состав шести- и двенадцатипульсовых выпрямителей, с целью использования его при создании двадцатичетырехпульсовых выпрямителей, а также требования к созданию таких выпрямителей в промышленном исполнении.

Ключевые слова: тяговая подстанция, многопульсовые преобразователи, энергетическая эффективность, улучшение технико-экономических показателей, двадцатичетырехпульсовый выпрямитель.

Evgeny J. Salita, Tatiana V. Kovaleva, Tatiana V. Komyakova

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

INDICATORS IMPROVEMENT OF THE TRACTION SUBSTATIONS MULTIPLE PULSED RECTIFIERS ENERGY EFFICIENCY

Abstract. The article deals with the introduction of a twenty - four pulse rectifiers with various rectification circuits on direct current traction substations. The results of the operation of a twenty-four-pulse rectifier installed at one of the traction substations prove the expediency of using such a converter. The variants of the existing equipment modernization, which is a part of the six- and twelve-pulse rectifiers in order to use it in the creation of twenty-four-pulse rectifiers, as well as the requirements for the creation of such rectifiers in industrial design are given.

Keywords: electric railways traction substations, multi-pulse rectifiers, energy efficiency, improvement of technical and economic indicators, twenty-four-pulse rectifier.

Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций электрических железных дорог постоянного тока связано в первую очередь с увеличением количества пульсаций в кривой выпрямленного напряжения. С первых дней электрификации железных дорог нашей страны на постоянном токе на тяговых подстанциях применялись шестипульсовые выпрямители. Таким выпрямителям присущ ряд серьезных недостатков: относительно низкий коэффициент мощности; искаженная форма кри-

вой потребляемого тока и, как следствие, ухудшение качества электроэнергии в питающей энергосистеме; значительное электромагнитное влияние тяговых токов на смежные линии связи. Замена шестипульсовых выпрямителей двенадцатипульсовыми позволила увеличить коэффициент мощности тяговой подстанции до 0,97 – 0,98; повысить уровень напряжения в тяговой сети без специальных устройств для его регулирования; улучшить форму кривой выпрямленного напряжения; снизить влияние тяговых сетей и трехфазных линий продольного электроснабжения и автоблокировки на линии связи; уменьшить удельный расход электротехнических материалов, затрачиваемых на изготовление выпрямителя.

Дальнейшее повышение технико-экономических показателей возможно при использовании двадцатичетырехпульсовых выпрямителей, один из которых в настоящее время эксплуатируется на тяговой подстанции Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД).

В настоящее время разработана и принята четвертая редакция «Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и перспективу до 2030 г.» (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р.) [1].

В третьей редакции «Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г.», которая была утверждена 15 декабря 2011 г. распоряжением ОАО «РЖД» № 2718 р, вошел перечень мероприятий, в котором более подробно были освещены вопросы повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока [2, 3].

Железнодорожный транспорт является энергоемким потребителем электрической энергии. Для нужд электрической тяги используется более 40 млрд кВт·ч электроэнергии, что составляет более 5,2 % от общей выработки электрической энергии в стране.

В «Энергетическую стратегию ОАО «РЖД» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г.» [2 – 4] вошли предложения сотрудников ОмГУПСа по основным направлениям дальнейшего повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока, которые рассмотрены в настоящей работе: применение многопульсовых схем выпрямления и инвертирования ($m = 12$ и более); модернизация трансформаторов типа ТМРУ (ТМПУ) и вентильных конструкций, предназначенных для шестипульсовых нулевых схем, для использования их в составе двенадцатипульсовых выпрямителей; расширение шкалы номинальных мощностей преобразователей; модернизация преобразователей путем замены отработавших свой ресурс штыревых вентилях на лавинные вентили таблеточного типа с естественной системой охлаждения и охладителями на основе тепловых труб; применение преобразовательных агрегатов с автоматическим регулированием напряжения на тяговых подстанциях и в контактной сети на новых силовых управляемых полупроводниковых вентилях; применение трансформаторов типа ТРДТНП с двенадцатипульсовой схемой выпрямления последовательного типа, предназначенных для работы без понизительных трансформаторов (одноступенчатая трансформация 110/3 кВ); применение «сухих» трансформаторов типа ТРСЗП с двенадцатипульсовой схемой выпрямления последовательного типа, устанавливаемых на открытом воздухе; упрощение схем и оптимизация параметров сглаживающих устройств.

Одной из основных характеристик преобразователей тяговых подстанций является внешняя характеристика, определяющая уровень напряжения на выходе в зависимости от величины выпрямленного тока – $U_{dm}(I_{dm})$ [5, 6].

$$U_{dm}(I_{dm}) = U_{dm0} \left(1 - \sin \frac{\pi}{m} u_k \frac{I_{dm}}{I_{dmном}} \right), \quad (1)$$

где u_k – приведенное напряжение короткого замыкания преобразовательного трансформатора;

I_{dm} – выпрямленный ток преобразователя;

$I_{dmном}$ – номинальный выпрямленный ток;

m – число пульсаций выпрямленного напряжения за период;

U_{dm0} – напряжение на выходе выпрямителя при холостом ходе.

Коэффициент наклона внешней характеристики $A = \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)$ уменьшается с увеличением

числа пульсаций m и составляет 0,5 у шестипульсового выпрямителя; 0,26 – у двенадцатипульсового; 0,13 – у двадцатичетырехпульсового [7].

Если принять, что U_{dm0} , $S_{ном}$ и u_k при $m = 6$, $m = 12$, $m = 24$ одинаковы, то внешние характеристики будут иметь вид, представленный на рисунке 1.

Экспериментальные данные полностью подтверждают изложенное выше.

У шестипульсового выпрямителя при номинальной нагрузке уменьшение напряжения на выходе относительно уровня напряжения холостого хода составляет 310 В, у двенадцатипульсового – 165, у двадцатичетырехпульсового – 88 В.

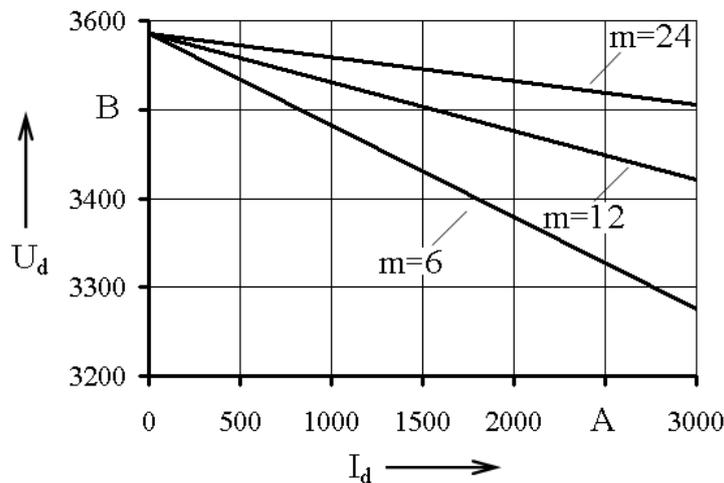


Рисунок 1 – Внешние характеристики выпрямителей

Скорость движения поездов прямо пропорциональна напряжению, подводимому к тяговым электродвигателям. Средняя участковая скорость на электрифицированных железных дорогах Российской Федерации составляет 42,9 км/ч. Если принять число пар поездов в сутки равным 60, то в год по двум путям проследует 43800 поездов. Общее время следования этих поездов по одной фидерной зоне длиной 20 км составит 20758 ч.

Учитывая, что выпрямители тяговых подстанций не всегда загружены полностью, можно принять, что в среднем разница в уменьшении напряжения на выходе двенадцатипульсового выпрямителя по сравнению с шестипульсовым составляет 105 В, а у двадцатичетырехпульсового 157 В, что составляет, соответственно, 3,2 и 4,8 %. Пропускная способность при этом увеличивается на 664 и 996 поездо-часов. При стоимости грузового поездо-часа 1500 р./ч экономическая составляющая эффективности $\mathcal{E}_{1(12)}$ за счет повышения пропускной способности составит 996 тыс. р. (1500×664); а $\mathcal{E}_{1(24)} - 1494$ тыс. р. (1500×996).

Поскольку значение выпрямленного напряжения зависит от схемы выпрямления, то при реализации одной и той же мощности значение выпрямленного тока преобразователя для различных схем также будет разным.

Предположим, что на стороне постоянного тока шестипульсового выпрямителя реализуется мощность $P_{дном(6)} = I_{дном(6)} U_{дном(6)}$. При одинаковом значении выпрямленного тока выпрямителей (если напряжения короткого замыкания $u_{k(6)} = u_{k(12)} = u_{k(24)}$ и коэффициенты нагрузки k_n одинаковы) реализуемая мощность со стороны постоянного тока будет различной в зависимости от числа пульсаций выпрямленного напряжения m пропорционально U_{dm} . Исполь-

зую выражение (1), находим при $k_n=1$ реализуемую мощность со стороны постоянного тока у двенадцатипульсового и двадцатичетырехпульсового выпрямителей:

$$P_{d(12)} = P_{\text{ном}(6)} \frac{1 - \sin \frac{\pi}{12} u_k}{1 - \sin \frac{\pi}{6} u_k}; \quad (2)$$

$$P_{d(24)} = P_{\text{ном}(6)} \frac{1 - \sin \frac{\pi}{24} u_k}{1 - \sin \frac{\pi}{6} u_k}. \quad (3)$$

Если принять $u_k = 0,2$, то $P_{d(12)} = 1,0536 P_{\text{ном}(6)}$; $P_{d(24)} = 1,0875 P_{\text{ном}(6)}$.

Кривые сетевых токов выпрямителей показаны на рисунке 2.

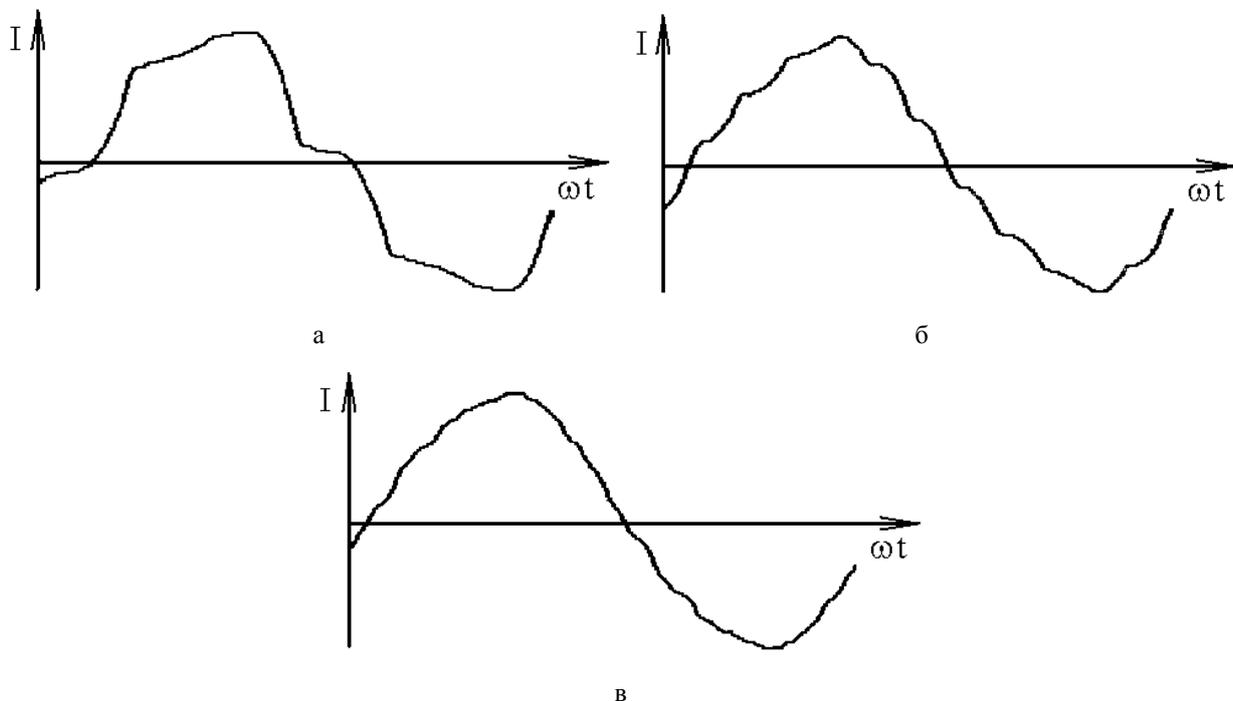


Рисунок 2 – Кривые сетевых токов выпрямителей: а – шестипульсовых; б – двенадцатипульсовых; в – двадцатичетырехпульсовых

При этом если счетчики активной электрической энергии зафиксируют одинаковый расход электрической энергии, то счетчики реактивной электрической энергии при увеличении m покажут меньший расход. Однако из изложенного выше следует, что при одном и том же расходе электрической энергии по показаниям счетчиков, установленных со стороны переменного тока выпрямителей, количество электроэнергии, полезно реализованной со стороны постоянного тока при номинальной нагрузке, у двенадцатипульсовых выпрямителей на 5 % больше, чем у шестипульсовых, а у двадцатичетырехпульсовых – на 7,5 %. При снижении коэффициента нагрузки эффект уменьшается пропорционально.

Экспериментально на действующем оборудовании эти выводы подтверждены.

В таблице приведены составляющие экономического эффекта от использования двенадцати- и двадцатичетырехпульсовых выпрямителей.

Сотрудниками ОмГУПСа на одной из тяговых подстанций Западно-Сибирской железной дороги внедрен двадцатичетырехпульсовый выпрямитель [8 – 10].

При создании двадцатичетырехпульсового выпрямителя рассматривались три схемы, представляющие собой совокупность шестипульсовых мостовых секций, собранных параллельно, последовательно-параллельно или последовательно.

Экономическая эффективность использования многопульсовых выпрямителей

Составляющие экономического эффекта	Выпрямители	
	12-пульсовые (тыс. р.)	24-пульсовые (тыс. р.)
Повышение пропускной способности участков железных дорог	996	1494
Снижение удельного расхода электрической энергии для тяги поездов при годовой переработке 25 – 30 млн кВт·ч	900 (2,5 %)	1260 (3,5 %)
Снижение эксплуатационных расходов за счет повышения коэффициента мощности	128	200
Снижение электромагнитного влияния на смежные устройства (позволит упростить конструкции сглаживающих фильтров)	25	50

При модернизации трансформатора ТМРУ-16000/10 (предназначенного для шестипульсовой нулевой схемы) для использования в двадцатичетырехпульсовой схеме была выбрана в качестве оптимальной последовательно-параллельная схема.

При изготовлении трансформатора в заводских условиях для двадцатичетырехпульсовой схемы предпочтение должно быть отдано трансформатору, изготовленному для схемы последовательного типа.

Схема двадцатичетырехпульсового выпрямителя может быть реализована с применением практически любых вентильных конструкций, так как общее число вентиляей в случае применения однотипных приборов в различных конструкциях будет одно и то же.

Схема главных электрических соединений двадцатичетырехпульсового выпрямителя последовательно-параллельного типа с использованием вентильных конструкций типа ТПЕД-3150-3,3к-У1 и реконструированного преобразовательного трансформатора ТМРУ-16000, имеющего четыре вентильных обмотки со сдвигом векторов линейного напряжения на угол 15° , приведена на рисунке 3.

Внешний вид двадцатичетырехпульсового выпрямителя, выполненного с использованием модернизированных трансформатора типа ТМРУ-16000 и вентильных конструкций типа ТПЕД-3150-3,3к-У1, приведен на рисунке 4.

Опыт эксплуатации на протяжении ряда лет подтвердил преимущества двадцатичетырехпульсового выпрямителя.

В настоящее время для двенадцатипульсовых выпрямителей тяговых подстанций ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш» изготавливаются масляный ТРДП-12500 (стоимость порядка 15 млн р.) и сухой ТРСЗП-12500 (стоимость порядка 25 млн р.) трансформаторы. Типовая мощность этих трансформаторов составляет $1,029 P_{d0}$ для схемы последовательного типа. Суммарная типовая мощность трансформатора ТРДП-12500 и уравнивающего реактора УРОМ-1000, выпускавшихся ранее для схемы параллельного типа, но снятых в настоящее время с производства, составляет $1,052 P_{d0}$. Завышенная типовая мощность трансформаторного оборудования была обусловлена необходимостью применения в схеме параллельного типа уравнивающего реактора.

Типовая мощность трансформаторов для двадцатичетырехпульсовых выпрямителей составляет $1,035 P_{d0}$ (для схемы последовательного типа) и $1,053 P_{d0}$ (для схемы последовательно-параллельного типа с использованием уравнивающего реактора), т. е. безусловные преимущества имеет трансформатор для схемы последовательного типа.

Стоимость трансформатора двадцатичетырехпульсового выпрямителя последовательного типа ($1,035 P_{d0}$) превысит (не более чем на 25 %, более точное значение определит завод-изготовитель) стоимость трансформатора, предназначенного для двенадцатипульсового выпрямителя последовательного типа ($1,029 P_{d0}$) вследствие увеличения расхода материалов на

создание схем зигзага, на установку дополнительных шин и проходных изоляторов на крышке трансформатора. Кроме того, число ограничителей перенапряжения также увеличится в схеме до двенадцати (против шести у двенадцатипульсового выпрямителя).

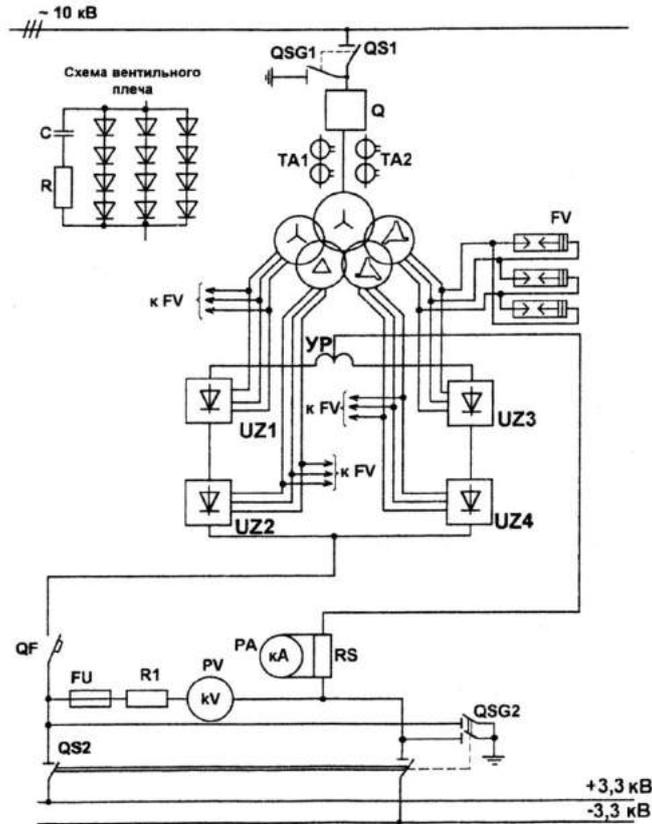


Рисунок 3 – Схема главных электрических соединений двадцатичетырехпульсового выпрямителя последовательно-параллельного типа с использованием вентильных конструкций ТПЕД-3150-3,3к-У1



Рисунок 4 – Внешний вид трансформатора типа ТМРУ-16000 и вентильных конструкций типа ТПЕД-3150, модернизированных для двадцатичетырехпульсовой схемы выпрямления

Опыт создания трансформаторов для двадцатичетырехпульсовых схем выпрямления (для цветной металлургии) обладает ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) – Уралэлектротяжмаш».

С учетом развития современного трансформаторостроения и преобразовательной техники возможно создание двадцатичетырехпульсового выпрямителя двумя путями. Первый – изготовление новых тягового трансформатора и вентильных конструкций – характеризуется значительными затратами. Второй, характеризующийся меньшими затратами, заключается в модернизации ранее установленных трансформаторов для шестипульсовых нулевых выпрямителей параллельного типа (ТМРУ, УТМРУ и ТМПУ с габаритной мощностью 6300 и 16000 кВ·А) и любых ныне эксплуатируемых вентильных конструкций.

Модернизация преобразовательных трансформаторов является возможной, несмотря на то, что календарный срок эксплуатации трансформаторов составляет 25 лет, а фактический – большинства из них – 30 лет и более. Натурное обследование внутренней части трансформаторов подтверждает, что фактический относительный износ ее составляет не более 0,15 – 0,25. Практика выполнения подобных работ на Западно-Сибирской железной дороге позволяет утверждать, что практически любой тип трансформаторов ТМРУ и ТМПУ, выпускавшихся для выпрямителей в 50-е – 70-е гг. прошедшего века, пригоден для реконструкции, чему способствуют высокая степень секционирования вентильных обмоток и большой запас по мощности, заложенный в конструкции и обеспечивающий медленный физический износ трансформаторов. Ориентировочная стоимость модернизации не превысит 30 % от стоимости нового оборудования.

Модернизация вентильных конструкций ПВЭ-5, ТПЕД-3150, В-ТПЕД (с сохранением общего числа вентиляей, предусмотренных конструкцией и прошедших диагностические испытания) не приводит к существенным затратам, так как сводится к перераспределению числа вентиляей в вентильных плечах и изменению ошиновки выпрямителя. Модернизация ранее выпущенных вентильных конструкций (ПВЭ-3, ПВЭ-5, ТПЕД-3150, В-ТПЕД) также может быть выполнена с использованием силовых блоков БСЕ, выпускаемых опытным заводом ВЭИ. В этом случае затраты на приобретение блоков не превысят 1,6 млн р. Модернизация вентильных конструкций обычно проводится на местах силами ремонтно-ревизионных участков.

На основании оценки технико-экономической эффективности многопульсовых выпрямителей [9], возможностей промышленности и структурных подразделений железных дорог разработаны предложения по реализации двадцатичетырехпульсового выпрямителя. Выпрямитель должен содержать следующее оборудование и удовлетворять требованиям:

модернизированный масляный трансформатор типа ТМРУ-16000 с соединением вентильных обмоток по схеме «звезда – треугольник» – прямой и обратный замкнутый зигзаги с мостовой схемой с последовательно-параллельным соединением мостов [10],

заводской масляный трансформатор типа ТРДП-12500 или сухой типа ТРСЗП с естественной системой охлаждения (при мощности 6300 кВ·А) или принудительной системой охлаждения (при мощности 12500 кВ·А) с соединением вентильных обмоток по схеме «звезда – треугольник» – скользящие треугольники с мостовой схемой с последовательным соединением мостов;

значения междуфазных напряжений секций вентильных обмоток преобразовательных трансформаторов должны отличаться не более чем на 0,5 % для обеспечения минимальной конструктивной несимметрии;

трансформатор заводского изготовления может иметь вариант конструктивного исполнения для применения в системе с одноступенчатой трансформацией для напряжения сетевой обмотки 110 кВ;

вентильные конструкции на базе применяемых штыревых вентиляей либо современных силовых лавинных вентиляей таблеточной конструкции;

естественную воздушную (при мощности 6300 кВ·А) или принудительную (при мощности 12500 кВ·А) систему охлаждения вентиляей;
простое и экономичное однозвенное сглаживающее устройство.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и перспективу до 2030 г. [Текст]. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 76 с.
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. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Учебник [Текст] / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов и др.; Под ред. В. А. Гапановича / МИСиС. – М.: 2012. – 620 с.
4. 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.
5. 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.
6. Магай, Г. С. Использование многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций постоянного тока с целью повышения пропускной способности участков и снижения затрат на электропотребление [Текст] / Г. С. Магай, Т. В. Комякова, Е. Ю. Салита // Энерго- и ресурсосбережение в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008. – С. 91 – 95.
7. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б. С. Барковский, Г. С. Магай и др.; Под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
8. Модернизация тяговых трансформаторов для использования в двенадцатипульсовых схемах выпрямления [Текст] / Г. С. Магай, Е. Ю. Салита и др. // Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы: Тезисы докладов международного симпозиума Eltrans'2001 / ПГУПС. – СПб, 2001. – С. 69 – 70.
9. Двадцатичетырехпульсовый выпрямительный агрегат для тяговых подстанций постоянного тока [Текст] / Б. С. Барковский, Г. С. Магай и др. // Разработка и исследование автоматизированных средств контроля и управления для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. транспорта. – Омск, 1990. – С. 37 – 42.
10. Пат. 1638779 СССР, МКИ³ Н 02М 7/12. Преобразователь переменного тока в постоянный [Текст] / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко, А. Г. Пономарев, Е. Ю. Салита; Заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 4686552 / 07; заявл. 26.04.89; опубл. 30.03.91, Бюл. № 12.

References

1. *Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossiiskie jeleznie dorogi» na period do 2020 g. i perspektivu do 2030 g.* (The energy strategy of the holding company "Russian Railways" for the period up to 2020 and prospects up to 2030). Moscow, 2016, 76 p.
2. Gapanovich V. A., Epifantsev S. N., Ovseychuk V. A. *Ehnergeticheskaya strategiya i ehlektrifikatsiya rossijskikh zheleznikh dorog* (Energy Strategy and the electrification of the Russian railroads). Moscow: Eco-Press, 2012, 196 p.
3. Gapanovich V. A. *Energoberejenie na jeleznodorojnom transporte* (Energy saving in railway transport). Moscow: MISiS, 2012, 620 p.
4. 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 post-*

oyannogo toka i sokrashhenie poter' ehlektricheskoy 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.

5. Salita E. U., Magay G. S., Komyakova T. V., Kovaleva T. V., Shvetsov S. V. *Silovye preobrazovateli tyagovykh podstantsij i ehlektropodvizhnogo sostava* (Power converters of electric traction substations and of the railway stock). Omsk: OSTU, 2013, 131 p.

6. Magay G. S., Komyakova T. V., Salita E. U. Use multiple pulsed rectifiers traction substations DC with the aim of increasing the capacity of sites and reduce costs of electricity consumption [Ispolzovanie mnogopulsovih vipryamitelei tyagovih podstancii postoyannogo toka s celyu povisheniya propusknoi sposobnosti uchastkov i snijeniya zatrat na elektropotreblenie]. *Energo_ i resursosberejenie v strukturnih podrazdeleniyah Zapadno_Sibirskoi jeleznoi dorogi: Materiali nauchno_prakticheskoi konferencii* (Energy and resource saving in the structural units of West Siberian railway). Omsk, 2008, p.p. 91 – 95.

7. Barkovskiy B. S., Magay G. S., Matsenko V. P., Panfil L. S., Shalimov M. G. *Dvenadcatipulsovie poluprovodnikovye vipryamiteli tyagovih podstancii* (Twelve-pulse semiconductor rectifiers for traction substations). Moscow: Transport, 1990, 127 p.

8. Magay G. S., Salita E. U., Komyakova T. V., Gergert A. R., Kvaschuk V. A. Modernization of traction transformers for use in twelve-pulse schemes rectification [Modernizaciya tyagovih transformatorov dlya ispolzovaniya v dvenadcatipulsovih shemah vipryamleniya]. *Elektrifikaciya i razvitie jeleznodorojnogo transporta Rossii. Tradicii_ sovremennost_ perspektivi: Tezisi dokladov Mejdunarodnogo simpoziuma Eltrans'2001* (Electrification and the development of railway transport of Russia. Traditions, modernity, perspectives). Saint Petersburg, 2001, pp. 69 – 70.

9. Barkovskiy B. S. Twenty-four-pulse rectifier units for traction substations DC [Dvadcatichetirehpulsovii vipryamitelanii agregat dlya tyagovih podstancii postoyannogo toka]. *Razrabotka i issledovanie avtomatizirovannih sredstv kontrolya i upravleniya dlya predpriyatii jeleznodorojnogo transporta: Mejevuzovskii tematicheskii sbornik nauchnih trudov* (Development and research of automated control and management to enterprises of railway transport). Omsk: OSTU, 1990, p.p. 37 – 42.

10. Barkovskiy B. S., Magay G. S., Matsenko V. P., Ponomarev A. G., Salita E. U. *Patent USSR 4686552 / 07, 1991.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салита Евгений Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

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).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Комякова Татьяна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salita Evgeny Jurievich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Cand. Tech. Sci., 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 st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Komyakova Tatiana Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, проректор по учебной работе, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-00.

E-mail: t_komyakova@mail.ru

Cand. Tech. Sci., vice-rector of education, the senior lecturer of the department «Power supply for railway transport», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-00.

E-mail: t_komyakova@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Салита, Е. Ю. Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций [Текст] / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Т. В. Комякова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 114 – 123.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Salita E. J., Kovaleva T. V., Komyakova T. V. Indicators improvement of the traction substations multiple pulsed rectifiers energy efficiency. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 114 – 123 (In Russian).

УДК 621.336

О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. С. Голубков

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

***Аннотация.** В статье рассматривается методика проектирования диагностической системы инфраструктуры электроснабжения железных дорог, основанная на применении байесовских сетей для прогнозирования вероятностей отказов. Для достижения максимальной эффективности диагностирования необходимо стремиться к минимизации количества входных параметров при сохранении требуемой точности. Предлагается диагностическая система, позволяющая оценить влияние каждого параметра на точность предсказания отказов. Восполнить недостаток исходных данных позволяет преимущество байесовских сетей – возможность задать структуру сети при помощи метода экспертных оценок, что позволит выполнить расчет вероятностей отказов при недостатке информации.*

***Ключевые слова:** контактная сеть, диагностика, байесовская сеть, вероятность отказа.*

Oleg A. Sidorov, Alexandr N. Smerdin, Anton S. Golubkov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVEMENT OF PROBABILISTIC MODELS OF FAILURE PREDICTION OF ELEMENTS OF RAILROAD POWER SUPPLY INFRASTRUCTURE

***Abstract.** The article examines the technique of designing diagnostic system of infrastructure of electrical railways based on use of bayesian networks for prediction of probabilities of failures. To achieve maximum effectiveness of diagnosis we should minimize the number of input parameters, while maintaining the required accuracy. It is proposed to create a mathematical model of the diagnostic system, that will allow to evaluate the influence of each parameter on the accuracy of prediction of failures. To compensate the lack of source data we can use the advantage of bayesian networks - the opportunity to generate network structure by the method of expert evaluations. Generated bayesian network will perform the failure probability calculation with limited information.*

***Keywords:** overhead contact line, diagnostics, , bayesian network, probability of failure.*

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Основной целью диагностики технических объектов является оценка их пригодности для выполнения заложенных функций и определение узлов, требующих ремонта и обслуживания для предотвращения отказов в процессе эксплуатации. Эффективная система диагностики должна позволять выполнять обслуживание «по состоянию», снижая эксплуатационные расходы и повышая надежность системы. Результатом работы диагностической системы является информация о вероятности отказов узлов системы на определенном отрезке времени. Качество работы диагностической системы оценивается по экономическому эффекту, достигаемому за счет внедрения данной системы.

Несмотря на постоянный рост расходов на содержание инфраструктуры системы токо-съемки отмечаются увеличение числа выходов из строя отдельных ее элементов и ухудшение всех показателей системы. С ростом скорости и интенсивности движения на участке становится затруднительным обеспечение традиционного регламента инспекционных поездок и обходов, призванных выявить предотказные состояния контактной сети. В связи с этим актуальной становится задача уточнения необходимого перечня диагностических параметров и интервалов их измерения.

В настоящее время в литературе встречается упоминания о множестве факторов, оказывающих влияние на токо-съем, к ним относятся внешние (эксплуатационные, погодные) и внутренние (особенности конструкции, качество материалов и монтажа и т. д.) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Классификация параметров, показателей и характеристик контактных подвесок

Натурное изучение влияния совокупности всех этих параметров является нетривиальной задачей в первую очередь из-за сложности постановки эксперимента. Изменение эксплуатационных параметров сопряжено с определенным риском нарушения работоспособности, снижения показателей, возникновения аварийных ситуаций. Сочетания погодных факторов

слабопредсказуемы и ожидание их возникновения сопряжено с временными и материальными затратами.

Необходимо снизить эксплуатационные расходы на диагностику инфраструктуры системы токосъема при сохранении или повышении качества ее работы в условиях скоростного и тяжеловесного движения за счет совершенствования предсказательной функции системы диагностики, позволяющей снизить число инспекционных поездок, обоснованно увеличить межремонтный интервал устройств инфраструктуры системы токосъема, прогнозировать потребность в ремонтных работах в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

Для получения количественных и качественных зависимостей между влияющими факторами и показателями токосъема необходимо составить вычислительную сеть на основе теоремы об апостериорных вероятностях Байеса.

Для корректной работы такой сети требуются вероятностные взаимосвязи между факторами и массив данных об изменении значений этих факторов во времени.

В настоящее время для обнаружения взаимосвязей используются корреляционный многофакторный анализ, метод экспертных оценок и лабораторные эксперименты.

Известны исследования отечественных и зарубежных авторов, посвященные предсказанию и раннему обнаружению повреждений и отказов контактной сети, ее спецчастей, а также нарушений взаимодействия инфраструктуры системы токосъема и токоприемников. Прогнозные модели, связывающие отказы и предшествующие им погодные условия, широко освещены в трудах Chen Y., Fumeo E., Guclu A. и других [1 – 3]. В качестве математического аппарата могут использоваться регрессионные модели, радиально-базисные нейронные сети, байесовские сети и др.

Существуют исследования в области применения байесовских сетей для предсказания отказов устройств железнодорожной инфраструктуры [4] и линий электропередачи [5], которые показали перспективность данного метода в диагностике.

В этих моделях в качестве входных параметров используются различные сочетания погодных факторов, статистика отказов, особенности эксплуатации. Результатами работы моделей чаще всего являются прогнозы или вероятности возникновения отказов отдельных элементов или подсистем в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

Известны работы, посвященные применению датчиково-диагностических комплексов для определения погодных факторов непосредственно на контактной сети, к ним можно отнести устройства для обнаружения гололеда, температуры окружающей среды, нагрева проводов, порывистого ветра. Эти комплексы используются в системах раннего обнаружения отказов и предотвращения развития повреждений. Использование информации подобных датчиково-диагностических комплексов позволит улучшить работу предлагаемой системы и не допустить возникновения отказов за счет оперативного прогнозирования.

Поскольку результаты измерения диагностических параметров являются случайными величинами, а отказы технических объектов являются случайными событиями, байесовская сеть является подходящим типом математической модели для прогнозирования отказов.

Байесовская сеть представляет собой графическую вероятностную модель, где каждый узел представляет собой случайную переменную, а связи между узлами показывают зависимости между ними.

Основными причинами выбора байесовских сетей для моделирования отказов являются возможность простой причинно-следственной интерпретации структуры сети и явное представление влияющих факторов, а также способность работать со случайными событиями. Байесовские сети широко применяются при диагностике отказов и прогнозировании повреждений в технических системах [6].

Исходными данными для построения предлагаемой вероятностной модели прогнозирования отказов на основе байесовской сети служит матрица значений переменных, полученная в ходе интерпретации предыдущих наблюдений отказов, изменения параметров и эксплуатационных показателей системы токосъема. Матрица может содержать различные типы

данных: целые или вещественные числа, именованные значения. Случайные величины в байесовской сети могут иметь различные виды и законы распределения.

Для формирования входной матрицы модели авторами используется массив исходных данных, включающий в себя результаты диагностики, случаи отказов и стоимость восстановления технического объекта. Часть необходимой информации доступна по запросу из существующих баз данных по отказам и обслуживанию оборудования, другая часть не может быть получена без дополнительных затрат.

В результате исследования статистики отказов элементов контактной сети с учетом погодных факторов было установлено, что существует взаимосвязь между различными сочетаниями погодных условий и количеством отказов видов элементов контактной сети.

Использовалась база данных об отказах контактной сети за пять лет на участке общей протяженностью 3000 км. Участок был разделен на четыре зоны, для каждой из которых метеорологические факторы определялись по данным ближайшей имеющейся метеорологической станции.

Формат метеорологических данных в соответствии с GSOD [7] а также наименования переменных, использованных при построении сети, приведены в таблице 1.

При построении байесовской сети из таблицы метеорологических данных с помощью регрессионного анализа были выделены наиболее существенные факторы, влияющие на надежность эксплуатации инфраструктуры контактной сети.

Для составления модели прогнозирования отказов записи в базе данных об отказах были условно сгруппированы по названиям элементов, вышедших из строя, изоляторы, компенсаторы, консоли и фиксаторы, воздушные стрелки, струны, тросы, контактные провода, детали контактной сети, опоры.

Сопоставление погодных факторов с отказами выполнялось по времени и координатам на местности.

Полученная в результате обобщения всех имеющихся данных реляционная таблица (таблица исходных данных «Т») использовалась для определения структуры сети.

Оценка статистической значимости каждой возможной связи между факторами и определение структуры сети выполнялось по методу Hill-Climbing [8].

Таблица 1 – Формат метеорологических данных

Обозначение GSOD	Описание данных	Единица измерения	Наименование переменной
STN-	Номер метеорологической станции		
TEMP	Средняя температура	С	temp_mean
MAX	Максимальная температура	С	temp_max
MIN	Минимальная температура	С	temp_min
DEWP	Среднее значение температуры точки росы	С	
PRCP	Атмосферные осадки	мм	rain
SNDP	Толщина снежного покрова	мм	snow
VISIB	Атмосферная видимость	км	
STP	Среднее атмосферное давление	мм рт. ст.	
WDSP	Средняя скорость ветра	м/с	wind_mean
MXSPD	Максимальная скорость ветра	м/с	wind_max
GUST	Максимальная скорость порывов ветра	м/с	
FRSHTT	Погодные явления (туман, дождь, снег или ледяной дождь, град, гроза, торнадо)		thunder

Графическая структура разработанной байесовской сети представляет собой ациклический направленный граф $G = (V, A)$, где V – множество вершин графа и A – множество ребер. Граф определяет факторизацию совместного распределения вероятностей $V = \{X_1, X_2, \dots, X_v\}$ событий, учтенных моделью. Форма факторизации определялась в соответствии с марковским свойством байесовской сети, которое утверждает, что случайная переменная X_i зависит только от своих прямых родительских переменных:

$$P(X_1, \dots, X_v) = \prod_{i=1}^v P(X_i | \Pi_{X_i}). \quad (1)$$

Первым шагом созданного алгоритма является определение структуры сети, после чего выполняется вычисление локальных распределений вероятностей на основе полученной структуры.

Алгоритм определения структуры основан на оценочном методе, при котором каждому варианту структуры сети присваивается определенная оценка, после чего выполняется эвристическая оптимизация с целью получения структуры с максимальной оценкой.

В качестве оценочной функции для структуры сети применялись различные критерии, (логарифмическая функция подобия, информационные критерии Акаике и Байеса, логарифм эквивалентной оценки Байеса – Дирихле) [9]. Наилучшие результаты были получены с помощью логарифмической функции подобия, которая и была избрана в качестве основной:

$$L(G|T) = \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^{q_i} \sum_{k=1}^{r_i} N_{ijk} \log \left(\frac{N_{ijk}}{N_{ij}} \right), \quad (2)$$

где N_{ijk} – количество случаев в таблице исходных данных «Т», в которых переменная X_i принимает свое k -е значение x_{ik} , а переменные Π_{X_i} принимают свою j конфигурацию w_{ij} ; N_{ij} – количество случаев в таблице «Т», в которых переменная X_i принимает свое k -е значение x_{ik} ; r_i – количество возможных состояний переменной X_i ; q_i – количество возможных конфигураций родительских переменных Π_{X_i} для переменной X_i .

Данная оценочная функция стремится к максимуму при полностью связанной сети, что негативно влияет на отображение связей для возможных независимых переменных, поэтому для случаев с большим количеством связей в структуре сети применялась оценочная функция Байеса – Дирихле:

$$L(G|T) = \log(P(G)) + \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^{q_i} \left(\log \left(\frac{(r_i - 1)!}{(N_{ij} + r_i - 1)!} \right) + \sum_{k=1}^{r_i} \log(N_{ijk}!) \right). \quad (3)$$

При добавлении новых исходных данных структура сети может измениться, поэтому алгоритм предусматривает обновление структуры при каждом изменении таблицы «Т».

В лаборатории «Контактные сети и линии электропередачи» ОмГУПСа создана вероятностная модель прогнозирования отказов элементов инфраструктуры системы токосъема на основе байесовской сети для Западно-Сибирской железной дороги.

На рисунке 2 приведена структура сети, автоматически сгенерированная при помощи разработанного алгоритма и программного обеспечения.

Получившаяся сеть состоит из узлов, обозначающих дискретные переменные, и связей между ними, показывающих влияние узлов друг на друга. Для независимых переменных определяется вероятность каждого из возможных исходов, сумма вероятностей которых равна единице. Для зависимых переменных составляется таблица вероятностей возможных исходов при условии наступления тех или иных исходов влияющих переменных, в таблице 2

приведена матрица условных вероятностей для факторов отказа подвесных изоляторов. Матрица позволяет оценить вероятность отказа хотя бы одного изолятора на моделируемом участке.

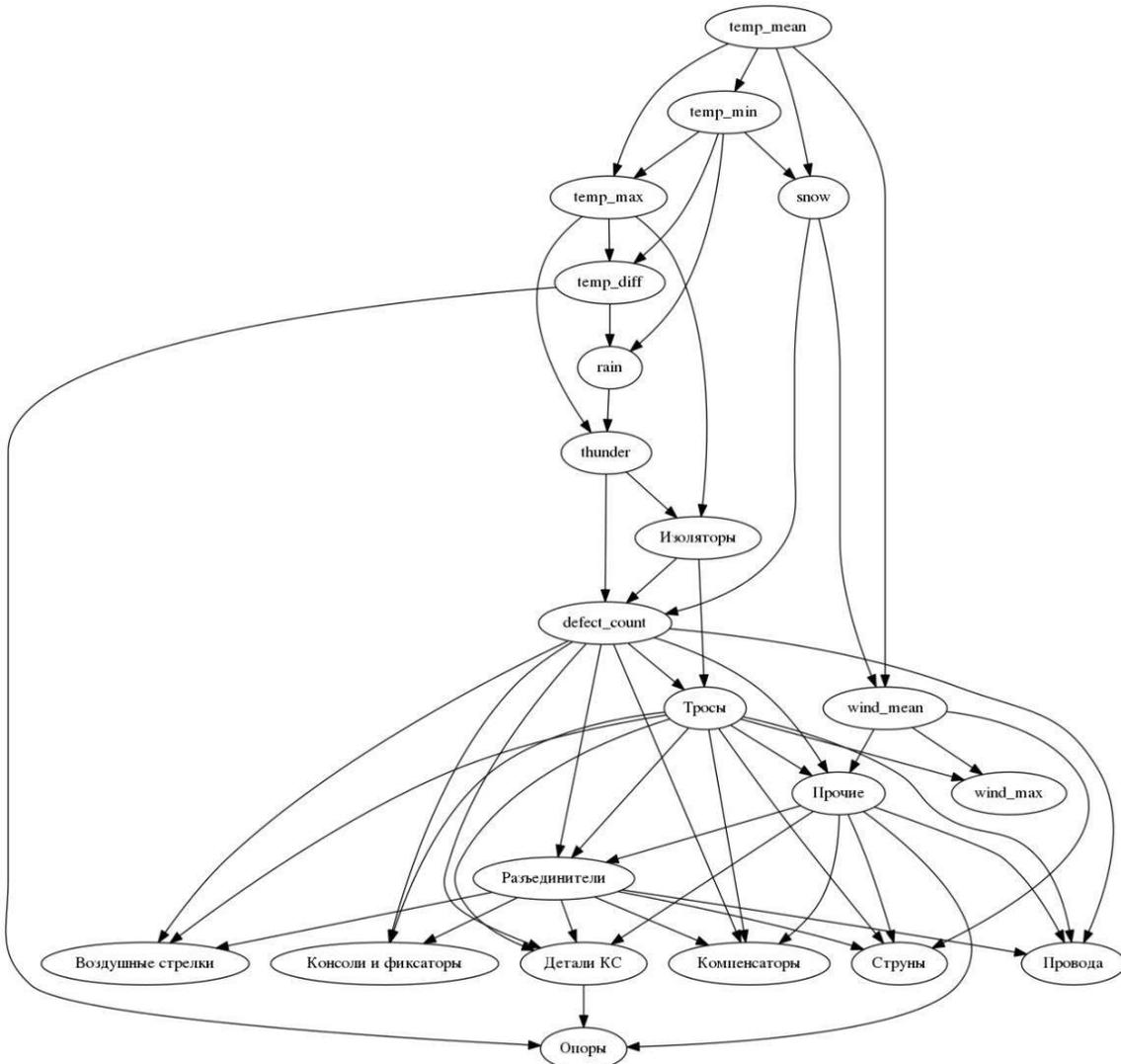


Рисунок 2 – Структура байесовской сети для прогнозирования отказов контактной сети

Таблица 2 – Матрица условных вероятностей отказа изоляторов

Влияющие факторы		Вероятность отказа	
thunder (погодные явления)	temp_max (максимальная температура)	нет отказа	отказ
0	0	0,949	0,051
0	1	0,998	0,002
0	2	0,909	0,091
1	0	0,991	0,009
1	1	0,980	0,020
1	2	0,944	0,056
2	0	0,983	0,017
2	1	0,992	0,008
2	2	0,969	0,031

В результате моделирования генерируются матрицы условных вероятностей для всех узлов, входящих в модель. Выбор влияющих факторов осуществляется в автоматическом режиме (по ранжиру) либо вручную.

Из данных таблицы 2 видно, что наибольшая вероятность отказа (0,091) наблюдается при совпадении признаков низкой грозовой активности ($\text{thunder} = 0$) и высокой температуры ($\text{temp_max} = 2$), а при снижении температуры до среднего значения вероятность отказов снижается.

Разработанное программное обеспечение позволяет генерировать структуру сети и таблицы условных вероятностей для различных факторов по таблице статистических наблюдений (рисунок 3).

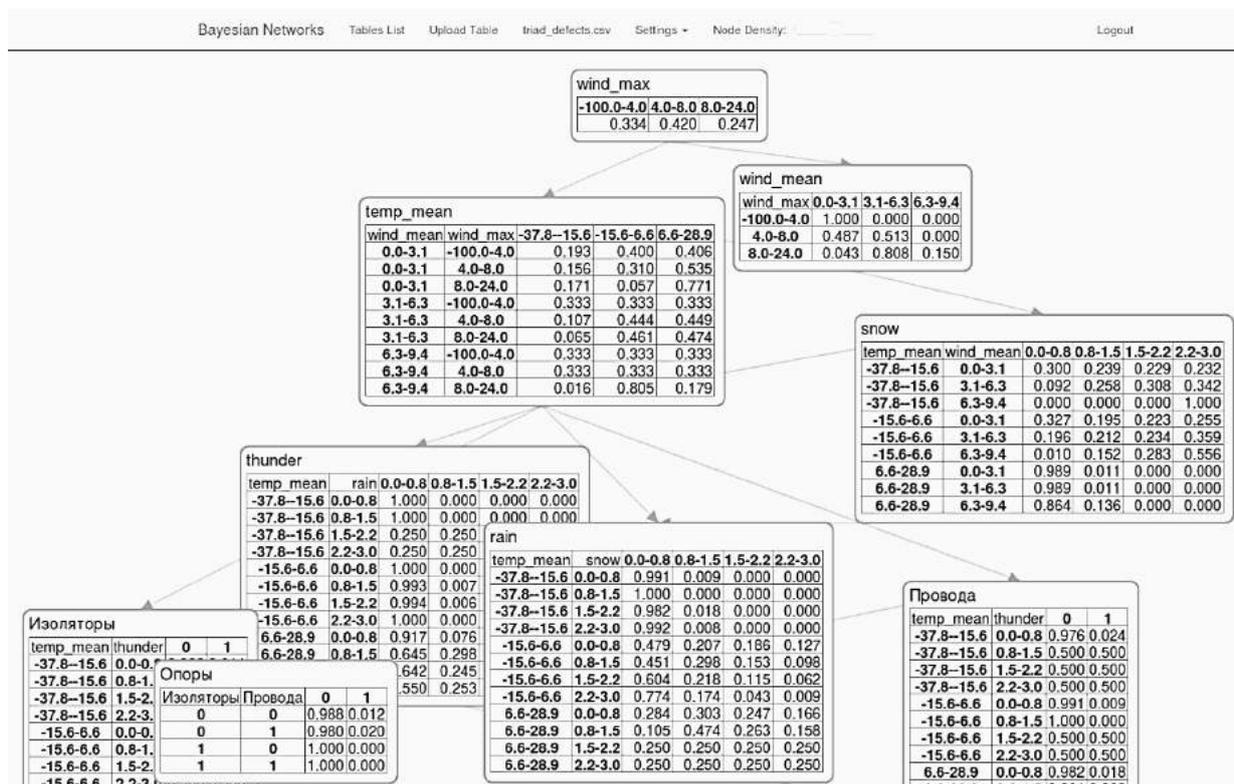


Рисунок 3 – Результат расчета условных вероятностей отказов инфраструктуры системы токосяема на участке Западно-Сибирской железной дороги за 2016 г.

Кроме прямых зависимостей между переменными байесовская сеть позволяет получать таблицы условных вероятностей между любыми узлами, при этом таблица условных вероятностей дополняется атрибутами, влияние которых планируется исследовать.

Программное обеспечение позволяет проводить моделирование на подготовленной сети. Введя искусственные значения влияющих переменных в модель, можно получить условную вероятность отказа или безотказности при сочетании указанных факторов.

Модель позволяет, опираясь на прогноз погоды, определить наиболее подверженные отказам узлы и подсистемы контактной подвески, а также рассчитать вероятность безотказной работы всей системы, принять решение о необходимости усиления готовности обслуживающего персонала, о необходимости снижения нагрузки, введения ограничения скорости на участке и т. д.

Дальнейшее совершенствование прогнозной вероятностной модели возможно при существенном расширении набора данных о погодных факторах, таких как количество молний во время грозы, наличие и толщина стенки гололеда или изморози, солнечная активность.

Большая протяженность железнодорожных линий и особенности местности приводят к резким локальным неоднородностям погодных факторов вдоль линии, которые невозможно учесть имеющимися метеорологическими станциями, расположенными вблизи железной до-

роги [10]. Необходимо размещать сеть метеорологических регистраторов вдоль железнодорожных линий с обоснованным интервалом, а также в местах возможного изменения погодных факторов. Применение таких комплексов позволит не только оперативно детектировать наличие неблагоприятных погодных условий, но и накапливать массив метеорологических данных для создания предсказательных моделей.

Необходимо отметить, что для эффективной работы предлагаемой системы ключевое значение имеют алгоритмы получения, обработки и интерпретации информации, а также программное обеспечение, позволяющее эффективно решать задачи прогнозирования отказов и подготовки оперативных решений и управляющих воздействий, касающихся подсистемы электроснабжения железных дорог [11].

В Омском государственном университете путей сообщения ведутся работы по совершенствованию методики прогнозирования отказов системы электроснабжения на основе регрессионного анализа и байесовских сетей.

Список литературы

1. Chen, Y. , & Tjandra, S. (2014). Daily collision prediction with sarimax and generalized linear models on the basis of temporal and weather variables. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2432, 26 – 36.
2. Fumeo, E. , Oneto, L. , & Anguita, D. (2015). Condition based maintenance in railway transportation systems based on big data streaming analysis. *Procedia Computer Science*, 53 (1), 437 – 446.
3. Guclu, A., Yilboga, H. , Eker, O. F., Camci, F., Jennions, I. , & Guclu, A. (2010). Prognostics with autoregressive moving average for railway turnouts. In *Conference of prognostics and health management society*. Paris, France.
4. Wang G., Xu T., Tang T., Yuan T., Wang H. A Bayesian network model for prediction of weather-related failures in railway turnout systems. *Expert Systems With Applications* 69. 2017. pp. 247 – 256.
5. Zhou, Y. , Pahwa, A. , & Yang, S. S. (2006). Modeling weather-related failures of over-head distribution lines. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (4), 1683 – 1690 .
6. Neapolitan, R.E. *Probabilistic reasoning in expert systems: theory and algorithms*, JohnWiley & Sons. 1990.
7. <https://data.noaa.gov/dataset/global-surface-summary-of-the-day-gsod>
8. *Bayesian Networks with Examples in R* M. Scutari and J.-B. Denis (2014). *Texts in Statistical Science*, Chapman & Hall/CRC (US).
9. Cooper, G. and Herskovits, E. (1992). A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data. *Machine Learning*, 9, 309 – 347.
10. Трубицин, М. А. Анализ способов обнаружения гололеда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети [Текст] / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // *Инженерный вестник Дона / Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета*. – Ростов-на-Дону. – 2016. – № 4. – С. 1 – 11.
11. Мещеряков, В. А. Предпосылки получения статистически достоверных данных в ходе имитационного моделирования токосъема / В. А. Мещеряков, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения / Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения*. – М. – 2013. – № 2 (66). – С. 104 – 121.

References

1. Chen, Y. , & Tjandra, S. (2014). Daily collision prediction with sarimax and generalized linear models on the basis of temporal and weather variables. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2432, 26 – 36.
2. Fumeo, E. , Oneto, L. , & Anguita, D. (2015). Condition based maintenance in railway trans-

portation systems based on big data streaming analysis. *Procedia Computer Science*, 53 (1), 437 – 446.

3. Guclu, A., Yilboga, H., Eker, O. F., Camci, F., Jennions, I., & Guclu, A. (2010). Prognostics with autoregressive moving average for railway turnouts. In *Conference of prognostics and health management society*. Paris, France.

4. Wang G., Xu T., Tang T., Yuan T., Wang H. A Bayesian network model for prediction of weather-related failures in railway turnout systems. *Expert Systems With Applications* 69. 2017. pp. 247 – 256.

5. Zhou, Y., Pahwa, A., & Yang, S. S. (2006). Modeling weather-related failures of over-head distribution lines. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (4), 1683 – 1690.

6. Neapolitan, R.E. Probabilistic reasoning in expert systems: theory and algorithms, JohnWiley & Sons. 1990.

7. <https://data.noaa.gov/dataset/global-surface-summary-of-the-day-gsod>

8. Bayesian Networks with Examples in R M. Scutari and J.-B. Denis (2014). *Texts in Statistical Science*, Chapman & Hall/CRC (US).

9. Cooper, G. and Herskovits, E. (1992). A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data. *Machine Learning*, 9, 309 – 347.

10. Trubicin M. A., Lukashevich O. G. Analiz sposobov obnaruzheniya gololeda na provodakh LEP i ih primenenie dlya kontaktnoy seti [Analiz sposobov obnaruzheniya gololeda na provodakh LEP i ikh primenenie dlia kontaktnoi seti]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2016, no. 4, pp. 1 – 11.

11. Meshherjakov V. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S. The prerequisites for obtaining statistically reliable data in the simulation of the current collection simulation [Predposylki poluchenija statisticheskii dostovernih dannyh v hode imitacionnogo modelirovaniya tokos"ema]. *Vestnik of the All-Russian Scientific Research and Design-Design Institute of Electric Locomotive Building – Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktor'skogo instituta elektrozostroiia*, 2013, no. 2 (66), pp. 104 – 121.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Смердин Александр Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Голубков Антон Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Dr. Sci. Tech., head of the department «Power Supply of Railroad Transport», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Smerdin Alexandr Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand. Sci. Tech., associate professor of the department «Power Supply of Railroad Transport», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Cand. Sci. Tech., associate professor of the department «Power Supply of Railroad Transport», OSTU.

Phone: +7 9043266180.

E-mail: anton.golubkov@omgups.com

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
ОмГУПС.

E-mail: anton.golubkov@omgups.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Совершенствование вероятностных моделей прогнозирования отказов элементов инфраструктуры электроснабжения железных дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 123 – 132.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorov O. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S. Improvement of probabilistic models of failure prediction of elements of railroad power supply infrastructure. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 123 – 132 (In Russian).

УДК 621.311

В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ПОСТОВ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье представлены результаты измерений электроэнергии на активных и пассивных постах секционирования системы тягового электроснабжения постоянного тока участков железных дорог с III и IV типами профиля пути. Рассмотрены основные характеристики режимов работы постов секционирования с целью оценки объема переданной электроэнергии и продолжительности работы накопителей электроэнергии в различных режимах. Определены наиболее наблюдаемые значения напряжения, объемов переданной энергии и продолжительности случаев изменения режимов работы постов секционирования. Рассмотрены теоретические законы распределения, позволяющие использовать полученные экспериментальные значения в дальнейших расчетах при моделировании режимов работы накопителя электроэнергии.

Ключевые слова: активный и пассивный посты секционирования, шины поста секционирования, пункт преобразования энергии, тип профиля пути, работа в активном режиме, объем энергии, продолжительность случая, частота наблюдения, распределение наблюдаемых значений, оценка характеристик, накопитель электроэнергии.

Vasiliy T. Cheremisin, Vladislav L. Nezevak, Viktor V. Erbes
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

RESULTS OF EVALUATION OF OPERATING MODES ACTIVE AND PASSIVE SECTIONING POSTS IN THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM FOR THE PURPOSE OF ELECTRICITY STORAGE DEVICE PARAMETERS SELECTION

Abstract. The article presents the results of measurements of electricity on active and passive sectioning posts the traction power supply system direct current sections of railways with III and IV path profile type. Basic characteristics of operating modes sectioning posts for the purpose of assessing the amount of electricity transferred and duration of work electricity storage in different modes are considered. The most observed voltage values, volumes of transmitted energy and duration of each case are defined. Choice of theoretical distribution laws, allowing to use the experimental values obtained in further calculations in modeling of operating modes electricity storage is completed.

Keywords: active and passive sectioning posts, tires of sectioning post, paragraph of energy conversion, path profile type, active mode operation, volume of energy, duration of case, observation frequency, distribution of observed values, evaluation of characteristics, electricity storage.

Публикация подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных инициатив по гранту № 17-20-01148 офу м РЖД/17.

Посты секционирования в системах тягового электроснабжения постоянного тока предназначены для решения задач, связанных с повышением надежности электроснабжения контактной сети, повышения пропускной и провозной способности, сокращения потерь электроэнергии в тяговой сети. В настоящее время в холдинге «РЖД» эксплуатируются активные и пассивные посты секционирования, отличающиеся между собой наличием или отсутствием связи с распределительным устройством тяговой подстанции [1]. Посты секционирования в системах тягового электроснабжения находят применение и на зарубежных электрифицированных линиях [2, 3]. В свете развития направления применения на постах секционирования железнодорожного транспорта накопителей электроэнергии представляется актуальной задача анализа изменения напряжения на шинах постов секционирования с целью последующего выбора границ режимов работы накопителя электроэнергии и его основных характеристик [4 – 6].

Работа поста секционирования определяется режимами питания межподстанционной зоны и уровнем тяговой нагрузки. Измерения на постах секционирования (ПС) позволяют выполнить анализ данных о тяговой нагрузке и уровне напряжения на шинах ПС, а для активных ПС дополнительно о продолжительности работы в активном режиме, объеме передаваемой в контактную сеть электроэнергии, количестве таких случаев за сутки. На основе результатов измерений на активных и пассивных ПС требуется оценить для участков железных дорог с III и IV типами профиля пути продолжительность работы накопителя электроэнергии в различных режимах по критерию уровня напряжения на шинах ПС, объем передаваемой и принимаемой энергии.

Работу активного поста секционирования рассмотрим на примере работы ПС с пунктом преобразования напряжения (ППН), расположенным на Свердловской железной дороге [7]. Рассматриваемый активный ПС расположен на двухпутном участке, эксплуатационная протяженность которого составляет 22 км, профиль пути IV типа. Рассматриваемые тяговые подстанции ТП-1 и ТП-2 по способу подключения к системе тягового электроснабжения являются транзитными. ППН на активном ПС присоединен к распределительному устройству 3,3 кВ ТП-2 с помощью линии электропередач напряжением 6,6 кВ (рисунок 1).

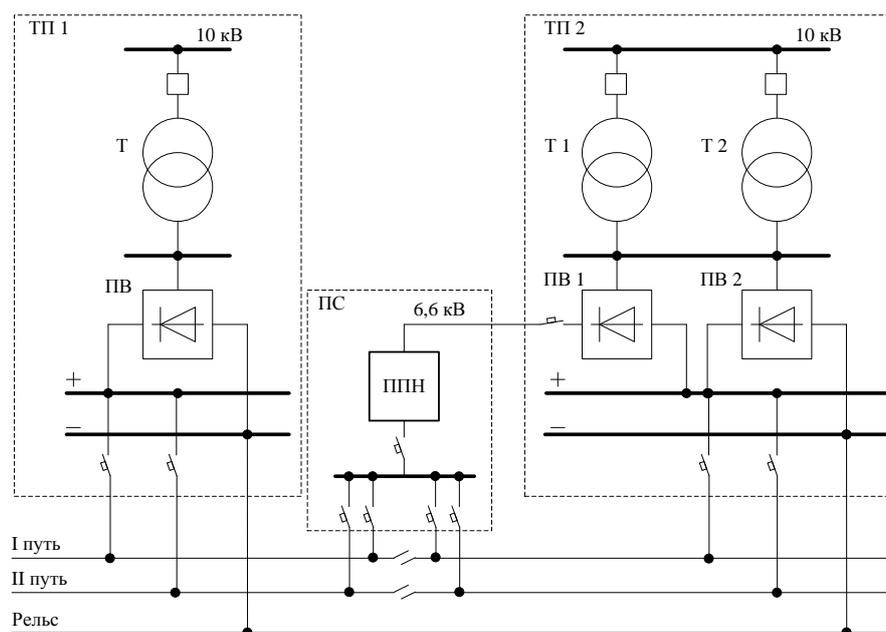


Рисунок 1 – Схема подключения активного поста секционирования

Подключение измерительного комплекса ОмГУПСа, позволяющего проводить измерения на стороне постоянного тока напряжением 3,3 кВ [8], на активном ПС дает возможность выполнить измерения тяговой нагрузки ППН и напряжения на шинах ПС, мощности и объема энергии, передаваемой в контактную сеть по одноканальным интервалам усреднения. По условиям работы ППН переход в активный режим работы осуществляется при понижении напряжения ниже уровня 3300 В таким образом, чтобы стабилизировать напряжение на указанном уровне. При дальнейшем снижении напряжения ППН выходит на номинальную мощность работы и переходит из режима стабилизации по уровню напряжения в режим стабилизации по уровню тока. Переход из режима ожидания в активный режим работы можно проиллюстрировать графиком нагрузки ППН, приведенным на рисунке 2, а.

По результатам измерений максимальная измеренная мощность ППН не превышает 2,9 МВт, время работы ППН в активном режиме не превышает 2 часов в сутки и зависит от интенсивности движения. Напряжение на шинах ПС, гистограмма изменения которого в течение суток представлена на рисунке 2, б, находится в диапазоне 3150 – 3850 В.

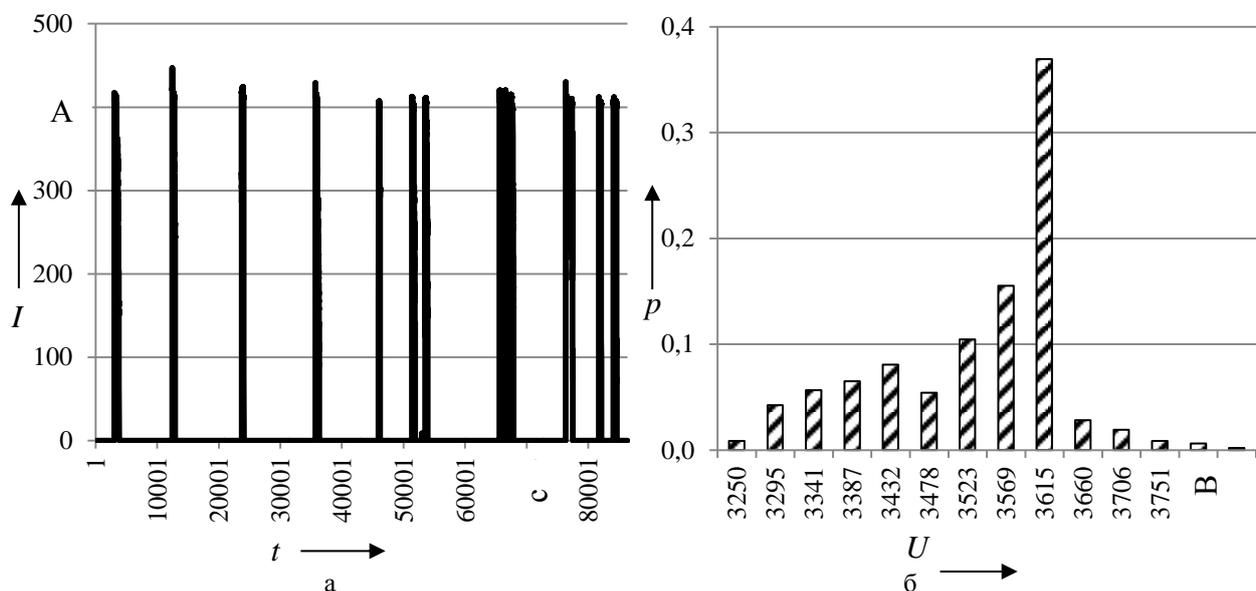


Рисунок 2 – Измерения на ППН активного ПС: а – суточный график тяговой нагрузки; б – гистограмма распределения наблюдаемых частот напряжения на шинах активного ПС

Среднее значение напряжения на шинах активного ПС за сутки составляет 3520 В, дисперсия – 111,2 В, суммарное время работы – 83 мин в сутки. Наиболее наблюдаемый диапазон напряжения на шинах активного ПС – 3540 – 3620 В, частота наблюдений значений напряжения в этом диапазоне составляет около 50 % (см. рисунок 2, б).

Переход в активный режим работы ППН определяется уставкой включения по напряжению. Переменный характер напряжения на шинах ПС определяет непостоянный режим работы ППН. Продолжительность случаев работы ПС в активном режиме по результатам измерений находится в диапазоне 80 – 1200 с. Распределение продолжительности работы ППН по случаям перехода в активный режим приведено на рисунке 3, а. Наибольшая частота наблюдений продолжительности случаев работы в активном режиме отмечается в диапазоне значений 325 – 425 с. Средняя продолжительность случая работы ППН в активном режиме (при понижении напряжения на шинах ПС ниже 3,3 кВ) составляет около 8,6 мин.

На рисунке 3, б представлено распределение объема энергии для каждого случая передачи электроэнергии ППН в контактную сеть. Среднее значение объема электроэнергии, передаваемой ППН в контактную сеть, составляет 170 кВт·ч, изменения объема наблюдаются в диапазоне 80 – 430 кВт·ч. Наиболее наблюдаемым диапазоном объема электроэнергии, передаваемого в контактную сеть за один случай, является диапазон значений 160 – 200 кВт·ч,

частота наблюдений для которого составляет около 40 % случаев, при этом для объема электроэнергии до 200 кВт·ч частота наблюдений составляет около 80 % случаев.

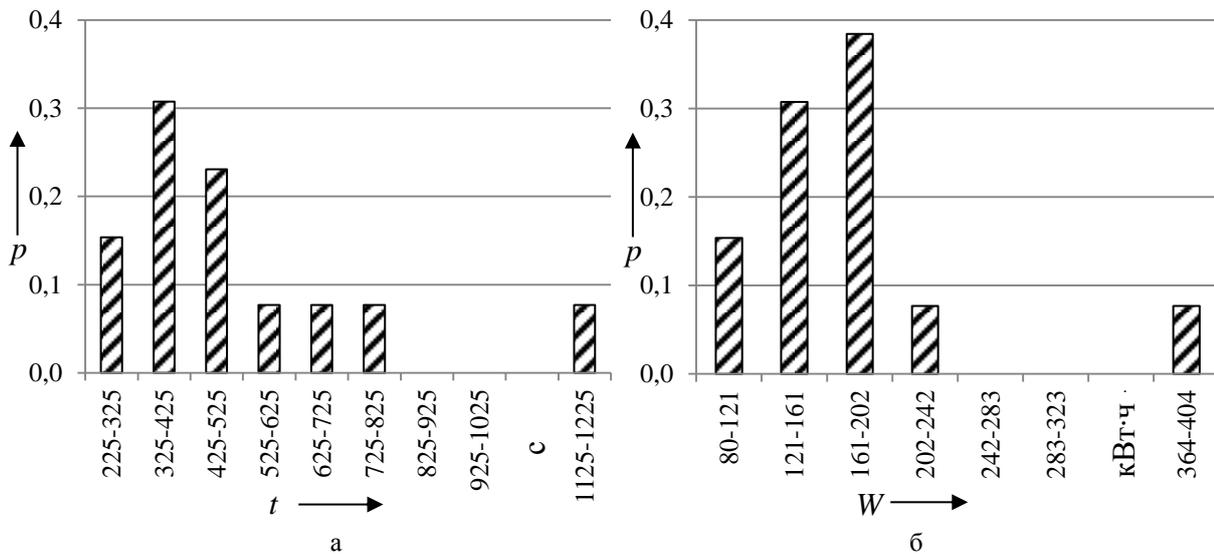


Рисунок 3 – Гистограммы распределения наблюдаемых значений:
 а – продолжительность времени работы ППН;
 б – объем электроэнергии, передаваемой ППН в контактную сеть

На рисунке 4, а представлено распределение продолжительности случаев наблюдения напряжения выше 3650 В на шинах активного ПС с ППН. В 90 % случаев продолжительность превышения напряжения носит кратковременный характер и находится в диапазоне 0 – 100 с. Наблюдаемый диапазон изменения продолжительности 0 – 500 с. Понижение напряжения ниже уровня 3300 В для 95 % случаев не превышает 60 с, при этом продолжительность времени, в течение которого напряжение ниже 3300 В, находится в диапазоне 0 – 150 с. Наиболее наблюдаемая продолжительность находится в диапазоне 0 – 10 с и составляет 75 %. Необходимо отметить, что продолжительность случаев работы ПС в активном режиме и продолжительность случаев, в которых напряжение ниже уровня 3300 В, не совпадают по диапазонам. В первом случае продолжительность выше, что объясняется задержкой по времени при переходе ПС из активного режима в режим покоя. Распределение продолжительности случаев наблюдения напряжений 3300 В представлено на рисунке 4, б.

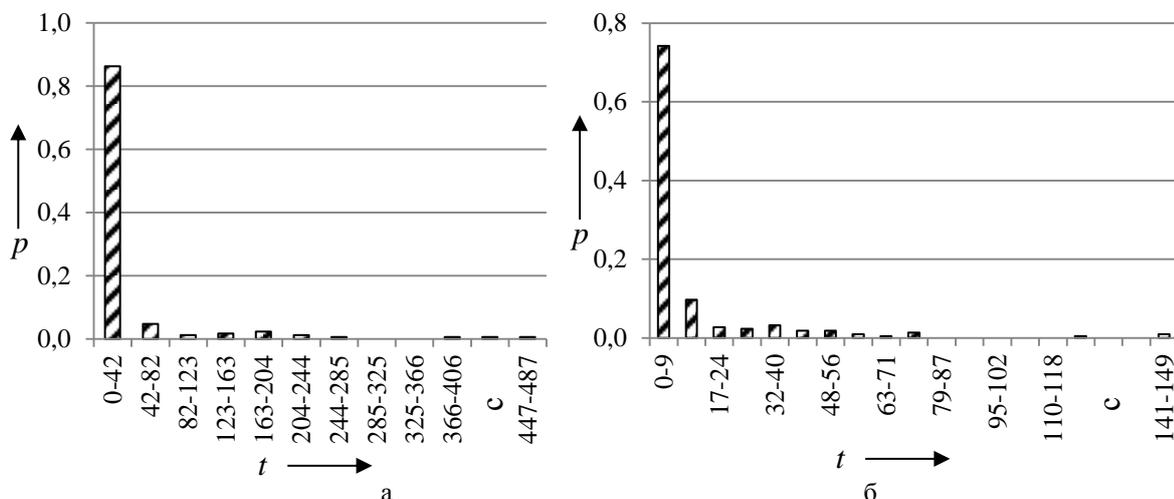


Рисунок 4 – Распределение продолжительности случаев для активного ПС:
 а – превышение напряжения уровня 3650 В; б – снижение напряжения уровня 3300 В

Измерения на пассивных постах секционирования производились на двухпутном участке с III типом профиля пути Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Объектами для измерений уровня напряжения на шинах 3,3 кВ являются два поста секционирования – ПС 1 и ПС 2. Пассивные посты секционирования в отличие от активных (см. рисунок 1) не имеют связи с распределительным устройств ТП.

Продолжительность времени, в течение которого напряжение на ПС 1 ниже уровня 3300 В, находится в диапазоне 0 – 650 с, при этом более чем в 90 % случаев продолжительность не превышает 300 с (рисунок 5). Наиболее наблюдаемая продолжительность (свыше 40 %) находится в диапазоне 0 – 50 с.

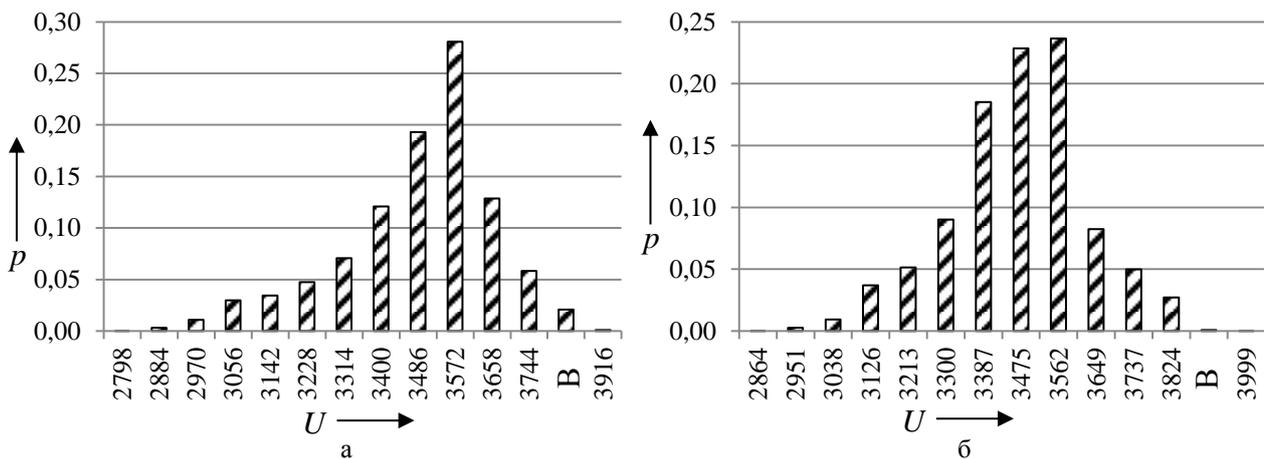


Рисунок 5 – Гистограммы распределения наблюдаемых частот напряжения на шинах: а – ПС 1; б – ПС 2

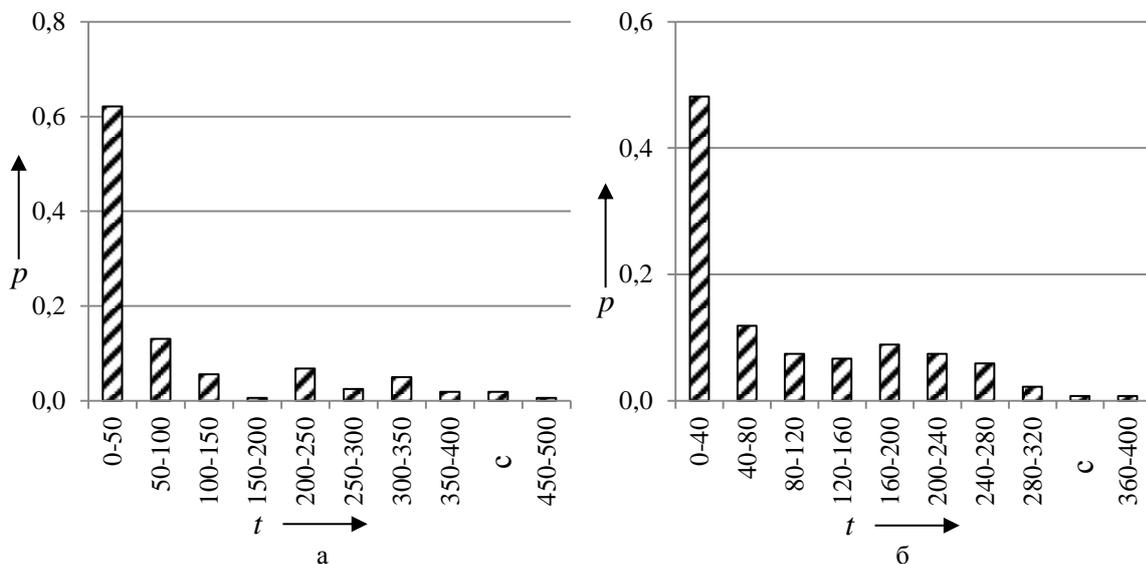


Рисунок 6 – Гистограммы наблюдаемых частот продолжительности времени для случаев с напряжением ниже 3300 В: а – ПС 1; б – ПС 2

Распределение напряжения по диапазонам наблюдаемых значений представлено на рисунке 7. Среднее значение напряжения на шинах ПС 1 за сутки составляет 3 520 В. По результатам измерений продолжительность времени, где значение напряжения выше значения холостого хода, оценивается на уровне 10 – 15 %. При этом продолжительность времени, когда напряжение ниже уровня 3 300 В, – на уровне 15 – 20 % (рисунок б). Распределение продолжительности времени для случаев, когда напряжение на шинах ПС превышает уровень 3650 В, представлено на рисунке 7. Более чем в 90 % случаев продолжительность времени для случаев превышения напряжения выше 3650 В на ПС 3688 км находится в пределах 150 с, а максимальная продолжительность времени не превышает 350 с. Суммарное время

наблюдения напряжения на шинах ПС 3688 км выше 3650 В составляет около 11600 с или около 3,2 ч в сутки (около 13 % времени суток).

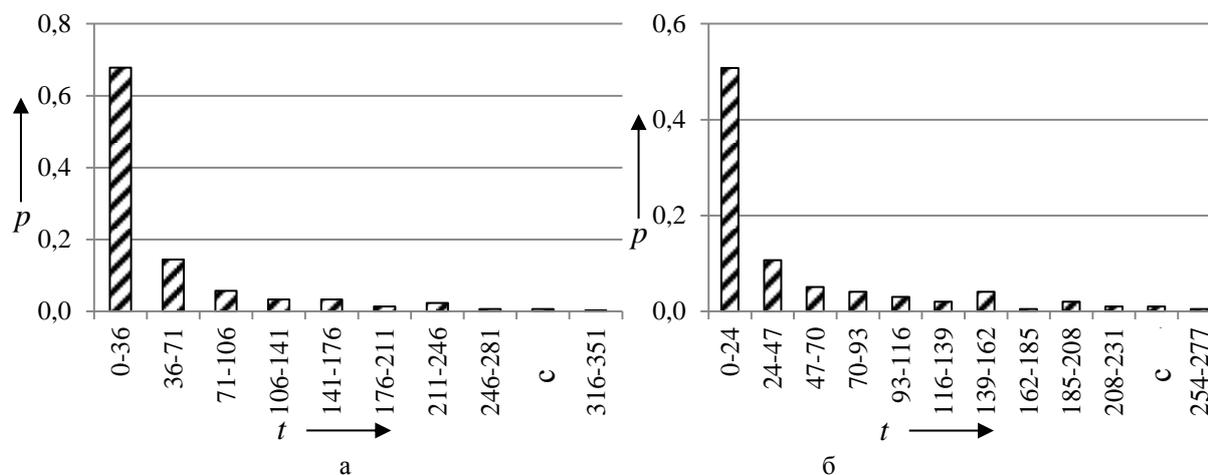


Рисунок 7 – Гистограммы наблюдаемых частот продолжительности времени для случаев с напряжением выше 3650 В: а – ПС 1; б – ПС 2

Среднее значение напряжения на шинах ПС 2 за сутки составляет 3530 В. По результатам измерений продолжительность времени, в течение которого напряжение выше уровня холостого хода, оценивается на уровне 10 – 15 %. При этом продолжительность времени, в течение которого напряжение ниже уровня 3300 В, – на уровне 20 – 25 %. Более чем в 90 % случаев продолжительность времени превышения напряжения выше 3650 В на ПС 2 находится в пределах 160 с, а максимальная продолжительность времени не превышает 300 с. Суммарное время наблюдения напряжения на шинах ПС 2 составляет около 9200 с или около 2,5 ч в сутки (около 10 % времени суток).

Продолжительность времени, в течение которого напряжения на ПС2 ниже уровня 3300 В, находится в диапазоне 0 – 450 с, при этом более чем в 95 % случаев продолжительность не превышает 300 с. Наиболее наблюдаемая продолжительность (свыше 40 %) находится в диапазоне 0 – 30 с.

Обобщение результатов измерений позволяет определить основные характеристики режимов работы накопителя электроэнергии на ПС (таблица 1). В диапазоне напряжений 3300 – 3650 В накопитель электроэнергии находится в режиме покоя или подзаряда малыми токами [9]. Случаи, в которых напряжение на шинах ПС ниже уровня 3300 В, имеют наибольшую наблюдаемость в диапазоне 0 – 5 мин. Потенциальный объем передаваемой в контактную сеть с шин ПС электроэнергии не превышает 200 кВт·ч более чем в 80 % случаев. Более чем в 90 % случаев продолжительность времени, в течение которого напряжение ниже 3300 В, наблюдается в диапазоне 0 – 5 мин. Продолжительность случаев, при которых напряжение на шинах ПС выше уровня 3650 В, в большинстве случаев (> 80 %) оценивается в диапазоне 0 – 3 мин. Объем энергии в режиме приема из контактной сети оценивается по результатам имитационного моделирования и для участков с профилями пути III и IV типов – до 150 кВт·ч. При этом максимальная мощность по результатам имитационного моделирования превышает мощность, наблюдаемую для активных постов секционирования, что обусловлено ограничением со стороны номинальной мощности ППН. Для наиболее наблюдаемого диапазона (> 80 %) максимальная нагрузка при приеме энергии из контактной сети оценивается на уровне до 1000 А или до 4,0 МВт. Данные имитационного моделирования следует получить для характерных случаев, что требует отдельного рассмотрения.

Задача использования полученных распределений в дальнейших расчетах характеристик режимов работы накопителя электроэнергии определяет необходимость статистического обобщения полученных результатов измерений тяговой нагрузки, напряжения на шинах, объемов передаваемой электроэнергии за один случай, продолжительности и количестве та-

ких случаев за сутки. С целью обобщения результатов следует выбрать теоретические законы распределения для наблюдаемых значений.

Таблица 1 – Оценка характеристик работы накопителя электроэнергии на ПС

Параметр	Характеристики режима работы накопителя электроэнергии	
	заряд	разряд
Диапазон напряжения, В	>3650	<3300
Продолжительность одного случая работы, мин (наблюдаемая частота, %)	0-3 (>80)	0-5 (>90)
Объем электроэнергии для одного случая, кВт·ч (наблюдаемая частота, %)	<150*	<200 (>80)
Максимальная мощность, МВт	4,0*	<2,9

Примечание. * – оценка по результатам имитационного моделирования для участков с III типом профиля пути.

Для исследования напряжения, объемов передаваемой электроэнергии и продолжительности времени случаев изменения напряжения на шинах активного и пассивного ПС в качестве теоретических законов распределения рассматриваются следующие: нормальное, экспоненциальное, гамма, логнормальное, хи-квадрат и три формы кривых Джонсона. Для активного и пассивного ПС подбор теоретических законов распределения напряжения, объемов передаваемой электроэнергии и продолжительности времени случаев изменения напряжения следует выполнить отдельно по суткам для возможности дальнейшего анализа изменений распределений суточных графиков. Сравнение экспериментальных и теоретических распределений выполняется с помощью критерия Пирсона [10]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}, \quad (1)$$

где n – объем выборки экспериментальных данных; n_i – эмпирическая частота; p_i – теоретическая вероятность попадания в интервал; k – количество интервалов.

Выбор теоретического закона распределения на основе кривых распределения Джонсона для случайной величины z имеет вид:

$$\begin{cases} z = \gamma + \eta f(x; \varepsilon; \lambda); \\ \text{при } \eta > 0; \\ -\infty < \gamma < \infty; \\ \lambda > 0; \\ -\infty < \varepsilon < \infty, \end{cases} \quad (2)$$

где γ , λ , ε и η – параметры распределения Джонсона;

$f(x, \lambda, \varepsilon)$ – произвольная функция.

Функции Джонсона $f(x, \lambda, \varepsilon)$ имеют вид:

$$f_1(x; \varepsilon; \lambda) = \ln\left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda}\right) \text{ при } x \geq \varepsilon; \quad (3)$$

$$f_2(x; \varepsilon; \lambda) = \ln\left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - x}\right) \text{ при } \varepsilon \leq x \leq \varepsilon + \lambda; \quad (4)$$

$$f_3(x; \varepsilon; \lambda) = \text{Arsh} \left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda} \right) \text{ при } -\infty < x < \infty. \quad (5)$$

Функциям (3) – (5) соответствуют семейства кривых S_L , S_B и S_U Джонсона.

С целью подбора функции распределения Джонсона определяются эмпирические оценки третьего (α_3) и четвертого (α_4) моментов:

$$\hat{\alpha}_3 = \frac{1}{n \cdot s^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3; \quad (6)$$

$$\hat{\alpha}_4 = \frac{1}{n \cdot s^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4, \quad (7)$$

где s определяется по выражению:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (8)$$

Результаты выбора теоретических распределений напряжения на шинах активного и пассивных ПС представлены в таблице 2, из которой видно, что наблюдаемые значения распределений нормального закона и кривой Джонсона S_B для графика напряжения значительно превышают критическое значение критерия хи-квадрат. Для других проверенных теоретических законов наблюдаемые значения критерия хи-квадрат значительно превышают критические, что объясняется случайным характером изменения напряжения на шинах, зависящим от множества факторов.

Таблица 2 – Распределения напряжения на шинах активного и пассивных ПС

Подстанция	Наблюдаемое значение распределения		Критическое значение хи-квадрат (уровень значимости, степени свободы)
	нормальное	Джонсона S_B	
Активный ПС	27 991	73 211	23,7 (0,05; 14)
Пассивный ПС 1	12 194	14 837	
Пассивный ПС 2	2 582	7 254	

Результаты выбора теоретических распределений продолжительности времени для случаев с напряжением выше 3650 В на шинах активного и пассивных ПС представлены в таблице 3, из которой видно, что наблюдаемые значения критерия хи-квадрат для гамма-распределения не превышают критического. Наблюдаемые значения критерия хи-квадрат для распределения Джонсона S_B только в одном случае превысили критическое. Другие перечисленные выше теоретические законы имеют большие расхождения между наблюдаемыми и критическими значениями. В результате при исследованиях продолжительности времени для случаев с напряжением выше 3650 В на шинах активного и пассивных ПС при подборе функции распределения рекомендуется использовать гамма-распределение.

Таблица 3 – Распределение продолжительности времени для случаев с напряжением выше 3650 В

ПС	Наблюдаемое значение распределения		Критическое значение хи-квадрат (уровень значимости, степени свободы)
	гамма	Джонсона S_B	
Активный ПС	14,3	32	19,7 (0,05; 11)
Пассивный ПС 1	8,9	9	
Пассивный ПС 2	9,9	16	

Результаты выбора теоретических распределений продолжительности времени для случаев с напряжением ниже 3300 В на шинах активного и пассивных ПС представлены в таб-

лице 4, из которой видно, что наблюдаемые значения критерия хи-квадрат для Гаусса-распределений не превышают критического. Наблюдаемые значения критерия хи-квадрат для распределения Джонсона S_b во всех случаях превысили критическое. Другие перечисленные выше теоретические законы имеют большие расхождения между наблюдаемыми и критическими значениями. В результате при исследованиях продолжительности времени для случаев с напряжением ниже 3300 В на шинах активного и пассивных ПС при подборе функции распределения рекомендуется использовать логнормальное и гамма-распределения.

Таблица 4 – Распределение продолжительности времени для случаев с напряжением ниже 3300 В

ПС	Наблюдаемое значение распределения		Критическое значение хи-квадрат (уровень значимости, степени свободы)
	Гаусса	Джонсона S_b	
Активный ПС	12,8 (логнормальное)	41	19,7 (0,05; 11)
Пассивный ПС 1	18,9 (гамма)	26	
Пассивный ПС 2	13,8 (гамма)	24	

Для активных ПС выполнено дополнительное исследование наблюдаемых распределений продолжительности работы ППН и объема электроэнергии, передаваемой ППН в контактную сеть [11, 12]. Результаты подбора законов распределения представлены в таблице 5. В результате получено, что во всех случаях наблюдаемые значения критерия хи-квадрат для распределений Гаусса и Джонсона S_b превысили критическое. Однако наилучшую сходимость наблюдаемых и теоретических частот распределений продолжительности работы ППН и объем электроэнергии показали распределения Джонсона S_b .

Таблица 5 – Исследование продолжительности работы и объемов электроэнергии активного ПС с ППН

Активный ПС	Наблюдаемое значение распределения		Критическое значение хи-квадрат (уровень значимости, степени свободы)
	Гамма	Джонсона S_b	
Продолжительность работы	1618	64	19,7 (0,05; 11)
Объем электроэнергии	4529	163	

Таким образом, по результатам выполненных измерений наиболее наблюдаемая (более 80 %) продолжительность случаев, при которой напряжение на шинах ПС превышает уровень 3650 В, находится в диапазоне 0 – 3 мин, ниже 3300 В – 0 – 5 мин (более 90 %). Объем энергии, передаваемый в контактную сеть с шин ПС на участках с IV типом профиля пути, в 80 % случаев не превышает 200 кВт·ч, при этом наиболее наблюдаемые диапазоны значений (более 20 %) 120 – 150 и 170 – 200 кВт·ч. Наблюдаемая продолжительность случаев, при которых напряжение превышает уровень выше 3650 В, для пассивных постов составляет 1 – 2 мин, а для активных ПС – 2 – 3 мин, что объясняется расположением рассматриваемого активного ПС на участке, где напряжение на шинах ТП стабилизируется на уровне 3600 – 3650 В. Для случаев, при которых напряжение на шинах активных ПС ниже уровня 3300 В, продолжительность времени не превышает 60 с при наблюдаемости свыше 95 % от общего количества случаев. Для пассивных ПС количество случаев, в течение которого напряжение ниже 3300 В, выше – в 95 % случаев она не превышает 490 с, при этом продолжительность до 60 с наблюдается в среднем в 60 % случаев. Определяемая условиями тяговой нагрузки продолжительность случаев передачи энергии и ее объемы требуют дополнительного исследования для условий пропуска различных унифицированных масс поездов, пропуска тяжеловесных и длиннооставных поездов и размеров движения. Результаты выбора теоретических законов распределения показывают, что для описания распределения напряжения и объема передаваемой электроэнергии следует руководствоваться полученными экспериментальными распределениями. Наилучшую сходимость наблюдаемых и теоретических частот продолжительности работы в различных режимах показывают распределения Джонсона. Результаты исследования позволяют сформировать технические требования к

режимам работы накопителя электроэнергии на посту секционирования в системе тягового электроснабжения постоянного тока, относящиеся к уставкам по напряжению, продолжительности работы в различных режимах и энергоёмкости.

Список литературы

1. ГОСТ 32895-2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения [Текст]. М.: Стандартинформ, 2014. 83 с.
2. Lilien J. L. Transport et Distribution de l'Energie Electrique / J. L. Lilien / Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore Université de Liège. Загл. с экрана: <http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/intro.pdf>. – 2006.
3. Clifford F Bonnett. Practical railway engineering. 2nd Edition. Imperial College Press. – 2005. – 189 с.
4. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии [Текст] / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Томского политехн. ун-та // Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 54 – 64.
5. Черемисин, В. Т. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак // Бюллетень результатов научных исследований. – 2015. – № 1 (14). – С. 76 – 83.
6. Незевак, В. Л. Влияние уставок режимов работы накопителя электроэнергии на посту секционирования на эффективность его работы [Текст] / В. Л. Незевак // Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 138 – 144.
7. Аржанников, Б. А. Усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при пропуске тяжеловесных поездов [Текст] / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2015. – № 2 (45). – С. 13 – 17.
8. Хряков, А. А. Измерение тока в счётчиках электрической энергии постоянного тока подвижного состава и тяговых подстанций [Текст] / А. А. Хряков // Омский научный вестник. – Омск. – 2010. – № 3 (93). – С. 196 – 198.
9. Пат. 155368 на полезную модель Российская Федерация, МПК В60М3/00 (2006.01), Н02J1/00 (2006.01). Пост секционирования постоянного тока с емкостным накопителем энергии / Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П. (РФ). – 2015114253/11; заявлено 16.04.2015; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28.
10. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
11. Комяков, А. А. Повышение достоверности определения энергетической эффективности эксплуатации энергосберегающих устройств и технологий в системах электроснабжения железных дорог [Текст] / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, О. О. Комякова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – С. 13 – 17.
12. Комяков, А. А. Исследование законов распределения расхода электроэнергии в системах тягового и нетягового электроснабжения [Текст] / А. А. Комяков, В. Л. Незевак // 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, 2016. – С. 186 – 191.

References

1. *Elektrifikatsiia i elektrosnabzhenie zheleznikh dorog. Terminy i opredeleniia, GOST 32895-2014*. Ofitsial'noe izdanie. M.: Standartinform, 2014, 83 p.
2. Lilien J. L. Transport et Distribution de l'Energie Electrique / J. L. Lilien / Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore Université de Liège. Загл. с экрана: <http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/intro.pdf>. – 2006.

3. Clifford F Bonnett. Practical railway engineering. 2nd Edition. Imperial College Press. – 2005. 189 с.
4. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Increase of energy efficiency of traction power supply system in the conditions of partitioning sectioning posts with electric energy storage devices [Povyshenie energeticheskoi effektivnosti sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia v usloviakh raboty postov seksionirovaniia s nakopiteliami elektricheskoi energii]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Engineering of georesources*, 2015, no. 10, pp. 54 – 64.
5. Nezevak V. L., Cheremisin V. T. Prospects for the use of electrical energy storage in the DC traction power supply system [Perspektivy primeneniia nakopitelei elektricheskoi energii v sisteme tiagovogo elektrosnabzheniia postoiannogo toka]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of the results of scientific research*, 2015, no. 1 (14), pp. 76 – 83.
6. Nezevak V. L. Influence of the settings of the operating modes of the power storage device on the position of sectioning on the efficiency of its operation [Vliianie ustavok rezhimov raboty nakopitelia elektroenergii na postu seksionirovaniia na effektivnost' ego raboty]. *Materialy nauchnoi konferentsii, posviashchennoi Dniu rossiiskoi nauki* (Materials of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science). Omsk, 2016, pp. 138 – 144.
7. Arzhannikov B. A., Naboichenko I. O. Strengthening of DC traction power supply system 3.0 kV for passing heavy trains [Usilenie sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia postoiannogo toka 3,0 kV pri propuske tiazhelovesnykh poezdov]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2015, no. 2 (45), pp. 13 – 17.
8. Khriakov A. A. Measurement of current in electric energy meters of direct current of rolling stock and traction substations [Izmerenie toka v schetchikakh elektricheskoi energii postoiannogo toka podvizhnogo sostava i tiagovykh podstantsii]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2010, no. 3 (93), pp. 196 – 198.
9. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Shatokhin A. P. *Patent RU 155368*, 10.10.2015.
10. Kobzar' A. I. *Prikladnaia matematicheskaiia statistika. Dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied mathematical statistics. For engineers and scientists). Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p.
11. Komyakov A. A. Increasing the reliability of determining the energy efficiency of operation of energy saving devices and technologies in the railway power supply systems [Povyshenie dostovernosti opredeleniya energeticheskoy effektivnosti ekspluatatsii energosberegayuschih ustroystv i tehnologiy v sistemah elektrosnabzheniya zheleznykh dorog]. *Materialy nauchnoi konferentsii, posviashchennoi Dniu rossiiskoi nauki* (Materials of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science). Omsk, 2016, pp. 13 – 17.
12. Komyakov A. A. Study of the laws of distribution of electricity consumption in the power of railways [Issledovanie zakonov raspredeleniya rashoda elektroenergii v sistemah tyagovogo i netyagovogo elektrosnabzheniya]. *Materialyi vtoroy vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnyim uchastiem* (Materials of the second All-Russian scientific and technical conference with international participation). Omsk, 2016, pp. 186 – 191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Cheremisin Vasilii Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, heard of the department «Rolling stock of electric railways », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Эрбес Виктор Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, инженер-проектировщик научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electricity supply of railway transport », OSTU.

Erbes Viktor Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, engineer of research-and-production laboratory «Energy-efficient technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Черемисин, В. Т. Результаты оценки режимов работы активных и пассивных постов секционирования в системе тягового электроснабжения с целью выбора параметров накопителей электроэнергии [Текст] / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 132 – 143.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Erbes V. V. Results of evaluation of operating modes active and passive sectioning posts in the traction power supply system for the purpose of electricity storage device parameters selection. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 132 – 143 (In Russian).

УДК 004.94

В. И. Хабаров, К. В. Красникова

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИАГЕНТНОГО И ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО ПОДХОДОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. В данной статье рассматриваются задачи имитационного моделирования потоков на железнодорожном транспорте. Основной целью данной работы является создание новой технологии моделирования такой сложной системы, как железнодорожная сеть. Научная новизна состоит в применении комбинации агентного и дискретно-событийного подходов в данной предметной области. В ходе исследования были разработаны модели поведения агентов, выделена проблемная ситуация, для которой построена дискретно-событийная часть модели. Проанализированы основные категории штатных и нештатных ситуаций, составлен список ситуаций для реализации их в модели. Были рассмотрены варианты к устранению нештатных ситуаций, выбран алгоритм по их обработке (дискретно-событийная составляющая модели). Иллюстрацией выполнения работы является имитационная модель железнодорожного участка Западно-Сибирской железной дороги с возможностью перестроения графика движения поездов в зависимости от добавления штатной или нештатной ситуации. В результате моделирования формируются выходные данные: график движения и информационная таблица. В перспективе планируется использовать полученную технологию для создания транспортной модели типа «пересадочный узел».

Ключевые слова: многоподходный, агентный, дискретно-событийный, имитационное моделирование, железнодорожный перегон.

CREATING A SIMULATION MODEL OF TRAFFIC WITH USING MULTI-AGENT AND DISCRETE-EVENT APPROACHES BY THE EXAMPLE OF THE WEST-SIBERIAN RAILWAY TRAFFIC

Abstract. *In this article the tasks of simulation of flows on the railways are discussed. The main purpose of this work is to create a new simulation technology such a complex system as the rail network. Scientific novelty consists in the application of a combination of agent-based and discrete-event approaches in a given subject area. During the conducted study the models of behavior of agents were created, the problematic situation was highlighted and discrete-event part of the model was developed for this situation. The main categories of regular and emergency situations are analyzed, a list of situations for modelling are created. Choices for removal emergency situations were discussed, an algorithm for their processing (discrete-event part of the model) was chosen. An illustration of the study is a simulation model of the railway section of the West-Siberian railway with the possibility of rebuilding the train schedule, which depend on the addition of regular or emergency situation. As a result of the simulation, output such as a traffic graph and an information table are generated. There are plans to use new technology for creating model of "transport hub".*

Keywords: *multi-method, agent-based, discrete-event, simulation, railway section.*

Целью работы является разработка новой технологии имитационного моделирования в сфере организации железнодорожного движения. Технология подразумевает собой соединение двух подходов к моделированию: агентно- и дискретно-событийного. Иллюстрацией применения новой технологии является создание имитационной модели движения поездов на железнодорожном участке Западно-Сибирской железной дороги для поддержки принятия решений в случае штатных и нештатных ситуаций.

В качестве штатной ситуации для моделирования выбрано ограничение скорости на перегоне, в качестве нештатной – пропуск незапланированного поезда. Существуют следующие варианты пропуска незапланированного поезда:

ожидание окончания аварии на перегоне, затем пропуск задержанных поездов по приоритетам;

пропуск незапланированного поезда по «неправильному» пути (путь другого направления);

пропуск поезда по обходному маршруту.

В настоящее время реализован первый вариант пропуска незапланированных поездов – после окончания аварии.

Для иллюстрации работы модели были выбраны данные по движению поездов на Западно-Сибирской железной дороге. На основании анализа существующих подходов к имитационному моделированию были выделены следующие задачи:

разработать имитационную модель в существующих парадигмах моделирования;

разработать модели поведения агентов, среду взаимодействия агентов, дискретно-событийные модели;

оценить модель на адекватность;

разработать средства когнитивной графики для представления результатов моделирования;

разработать удобную среду взаимодействия с моделью для работников железной дороги.

Имитационное моделирование имеет широкий спектр применения: бизнес-процессы, дорожное движение, логистика, информационная безопасность. Имитационное моделирование позволяет заменить изучаемую систему на модель, с которой можно провести различные эксперименты для получения информации об этой системе. Поэтому главной задачей создания рассматриваемой модели является не только пропуск поездного потока, но и анализ возникающих ситуаций на основании модели и нахождение решений по восстановлению штатного движения.

Можно выделить три основных подхода к имитационному моделированию: системная динамика, дискретно-событийный и агентный подходы [1].

Системная динамика – подход к изучению и моделированию сложных систем, исследующий поведение во времени и взаимодействие составляющих системы между собой, другими словами, это метод изучения динамики процессов в сложных системах [1, 2]. Системная динамика применяется в основном в стратегических моделях, в которых присутствует высокий уровень абстракции. Например, для транспортных моделей минимальной единицей будет не автомобиль, а транспортный поток, т. е. в системной динамике каждый элемент представлен как система в целом, а не отдельными элементами.

Дискретно-событийный, или процессный, подход – подход к моделированию процессов, которые происходят в хронологической последовательности, т. е. система меняет свое состояние только в момент наступления определенного события. Дискретно-событийный подход по факту – способ задания систем массового обслуживания. Главными составляющими дискретно-событийной диаграммы являются заявки, элементы очереди, элементы задержки, различные блоки, обрабатывающие заявки, а также связи между ними, которые определяют последовательность действий [1, 2].

В агентном подходе ключевой составляющей является агент, чье поведение зависит от среды, в которой он находится. Агентная модель состоит из множества независимых объектов, каждый из которых имеет свое собственное поведение (свои правила) и могут взаимодействовать как с окружающей средой, так и друг с другом. Сложность всей системы описывается взаимодействием большого числа агентов, которое трудно проследить. В основном агентные диаграммы задаются в виде конечных автоматов.

Разработкой многоподходных имитационных моделей занимаются многие ученые в различных предметных областях. Например, авторы Рахмангулов А. Н. и Муравьев Д. С. создали имитационную модель системы «морской порт – «сухой» порт», которая позволяет учесть множество факторов и особенностей функционирования контейнерных терминалов. В состав модели системы «морской – «сухой» порт» входили

- динамические агенты, содержащие характеристики контейнеров, морских судов, вагонов, поездов;
- статические агенты, имитирующие причалы, контейнерные площадки, краны и др.;
- управляющие агенты, контролирующие взаимодействие различных агентов в модели [3].

Авторы Бабкин Е. А. и Копица Е. В. в своей статье рассказывают о методологии имитационного моделирования бизнес-процессов на основе агентного и дискретно-событийного подходов [4]. Так же, как и предыдущие авторы, названные исследователи в качестве агентов рассматривают заявки, обслуживаемые системой, а на основе механизма обработки этих заявок конструируют набор алгоритмов функционирования агентов.

В ходе исследования был проведен анализ существующих программных средств имитационного моделирования, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Программные средства имитационного моделирования

Система моделирования	Реализуемый подход к моделированию	Преимущества подхода	Недостатки подхода
1	2	3	4
Arena	Дискретно-событийный	Создание собственных шаблонов решений и модулей. Возможность провести серию имитаций	Реализация только одного подхода
AGNES	Агентный с дискретными событиями	Кроссплатформенность, отказоустойчивость, возможность распределенного запуска, возможность полунатурного моделирования	Распространяется по лицензии

Окончание таблицы 1.

1	2	3	4
GPSS	Дискретно-событийный	Объектно-ориентированный интерфейс, программные эксперименты, простота использования	Один подход, необходимость написания дополнительного ПО для работы с интерфейсной частью проекта
AnyLogic	Все	Многоподходность, визуализация моделей, модуль оптимизации, возможность создания своих библиотек	Невозможность редактирования кода напрямую, ограниченность различных версий
Simplex3	Дискретно-событийный	Визуализация результатов в виде диаграмм, кроссплатформенность	Один подход, публично не распространяется
Simio	Дискретно-событийный, агентный	Визуализация моделей, разные формы представления результатов	Ограниченность различных версий, небольшой функционал
SeSAm	Агентный	Импорт векторных и растровых файлов, работа с текстовыми файлами	Один подход, ПО не поддерживается
SimPy	Дискретно-событийный	Возможность запуска модели в режиме реального и модельного времени, кроссплатформенность	Один подход, отсутствует визуализация результатов
Aivika	Все	Кроссплатформенность, основой является функциональное программирование, возможность параллельных вычислений	Сложность использования

В результате в качестве примера применения технологии была создана имитационная модель движения поездов с использованием комбинации дискретно-событийного и агентного подходов. Выбранной системой моделирования стал инструмент многоподходного имитационного моделирования AnyLogic. Полученная модель позволяет провести анализ транспортных потоков в различных режимах для установления условий и мест возникновения простоев, выхода из расписания, снижения пропускной способности.

Основным этапом моделирования железнодорожной сети стало создание агентной модели. В данной модели были реализованы простые рефлексные агенты, поведение которых зависит от взаимодействия агентов между собой и внешней средой [5]. Было выделено четыре типа агентов: агент-поезд, агент-перегон, агент-станция и агент-диспетчер. В таблице 2 представлены цели и атрибуты каждого из агентов.

Таблица 2 – Агенты модели

Агент	Цель	Атрибуты	Примечания
1	2	3	4
Агент-поезд	Добраться до пункта назначения, с допустимым отклонением от расписания ± 5 мин	Тип поезда (грузовой, пассажирский), номер поезда, индекс (индекс агента в модели), приоритет (2 – пассажирский, 1 – грузовой), состояние (в пути, на станции), скорость, время отправления, время прибытия, текущая станция (номер), следующая станция (номер), текущий перегон (номер), следующий перегон (номер), время стоянки на станции	От данного агента наследуются агенты – пассажирский и грузовой поезда Поведение данного агента задается диаграммой состояний Поведение агента: влияет на агент-станцию и агент-перегон (занимает соответствующие пути), передает в агент-станцию тип поезда, время прибытия на станцию, время отправления со станции (по расписанию)

Окончание таблицы 2.

1	2	3	4
Агент-станция	Переработать максимально возможное количество поездов, с максимально возможной пропускной способностью и с оптимальным коэффициентом использования станции	Количество приемоотправочных путей, название и номер станции	Поведение агента задается диаграммой состояний Получает время стоянки пришедшего поезда от агента-диспетчера в зависимости от его типа и ситуации на ближайшем перегоне (авария, ремонт, занятость вне расписания и в случае нагона более приоритетным поездом) Принимает данные от агента-поезда и агента-диспетчера
Агент-перегон	Пропустить максимально возможное количество поездов относительно возможностей ограничивающих его станций	Номер, состояние (занят, свободен, авария, ремонт), вместимость перегона, направление (четное, нечетное), протяженность, начальная станция (название), конечная станция (название)	Поведение агента: передает в агент-станцию (в данном случае значение в поле «Начальная станция») сообщение в случае ремонта, аварии на перегоне либо занятости не по расписанию, обычное сообщение при штатных ситуациях
Агент-диспетчер	Выполнить график движения поездов по обслуживаемому им участку без простоев с оптимальными или улучшенными коэффициентами работы	Атрибуты агента-поезда, агента-станции, агента-перегона в зависимости от рассматриваемой нештатной ситуации	Рассчитывает время стоянки поезда на станции (вне расписания) в зависимости от ситуации, контролирует работу агентов, передавая и получая информационные сообщения

В отличие от данной модели ученые из Индии А. Бхардвай, С. Гош и А.Дутта разработали модель с тремя типами агентов: агент-поезд, агент-станция и агент-железнодорожный узел [6]. Их модель построена по принципу BDI (вера – желание – намерение) [7] для индийской железной дороги с целью предотвращения столкновений на дороге. На рисунке 1 представлена схема системы, на которой изображено взаимодействие всех трех типов агентов. На рисунке 2 представлена железнодорожная модель с циклом, т. е. рассматривается ситуация объездных путей в случае нахождения на перегоне другого поезда.



Рисунок 1 – Схема мультиагентной системы

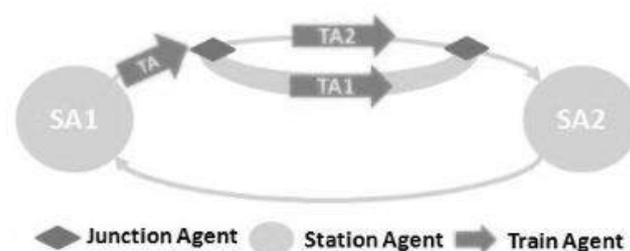


Рисунок 2 – Модель с циклом

Поведение агентов в данной модели задается с помощью изменения аргументов предикатов: $CurrentSpeed(x)$ – текущая скорость агента-поезда равна x , $TrainPriority(x)$ – приоритет агента-поезда x , $NextStation(x)$ – следующая станция агента-поезда x и др.

Так же, как и в данной модели, разработчики из Индии реализуют модель с помощью Java-ориентированного программного обеспечения.

Преимуществом созданной в данной работе модели является наличие таких агентов, как агент-перегон и агент-диспетчер. Агент-перегон информирует остальных агентов модели о своем текущем состоянии, а агент-диспетчер позволяет контролировать поведение агентов-поездов и агентов-станций.

В соответствии с агентами из таблицы 2 были выделены дополнительные сущности модели, такие как заявка, приемоотправочный путь, нештатная ситуация. Атрибутами сущности «нештатная ситуация» являются номер, название и время устранения; сущности «заявка»: атрибуты агента «поезд» – номер, тип, индекс, приоритет, а также атрибут «отправитель»; сущности «приемоотправочный путь»: направление (четное, нечетное), состояние (свободен, занят).

Поведение каждого агента представлено в модели своей диаграммой состояний [8]. На рисунках 3 – 6 изображены модели поведения агентов в программной среде AnyLogic.

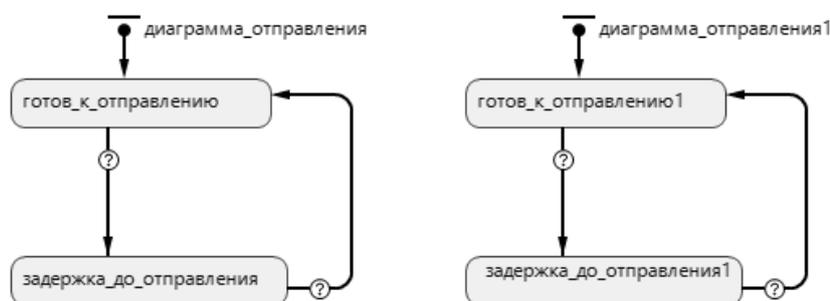


Рисунок 3 – Модель поведения агента-станции

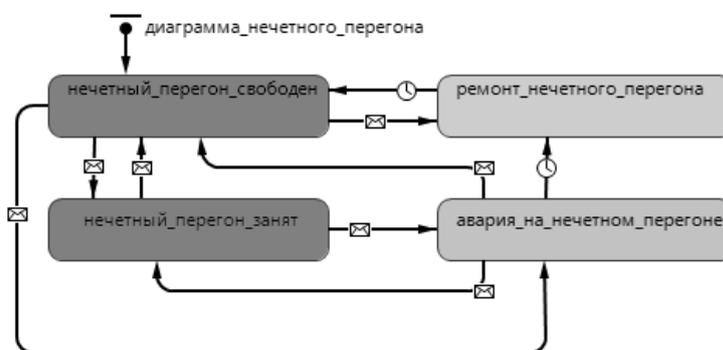


Рисунок 4 – Модель поведения агента-перегона

На железной дороге могут возникать нештатные ситуации, такие как аварии, транспортные происшествия и иные события, связанные с нарушением безопасности движения и эксплуатацией железнодорожного транспорта. При таких случаях необходимо срочно перекрыть соответствующий перегон для проведения на нем операций по восстановлению работоспособности.

Также возможны нештатные ситуации, которые не требуют перекрытия путей. Например, может возникнуть ситуация, когда нужно пропустить пассажирский поезд, не предусмотренный расписанием движения.

Нештатная ситуация территориально (на железнодорожном транспорте) может произойти на станции и на перегоне.

По видам возникновения, в самом общем виде, нештатные ситуации подразделяется на возникающие внезапно (выход из строя инфраструктуры, подвижного состава) и на возникающие по вине оперативного персонала.

В качестве рассматриваемых причин нештатных ситуаций были выбраны только те ситуации, которые мешают отправлению поезда и связаны с перегонем. Примеры ситуаций и время их устранения представлены в таблице 3.

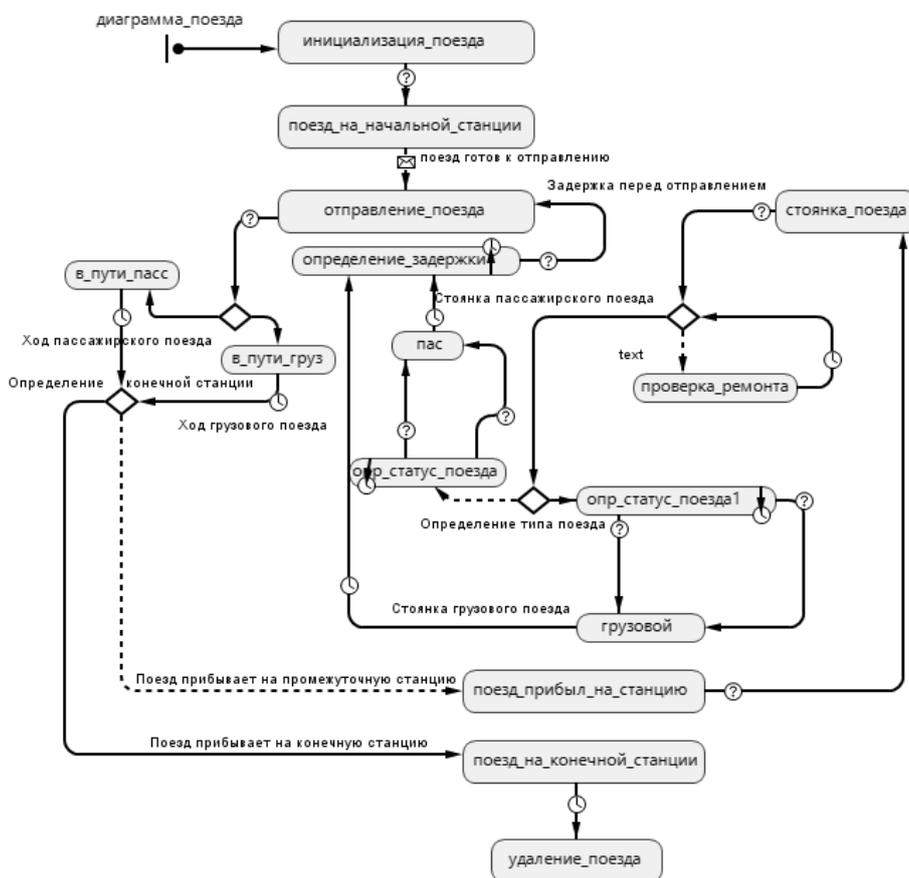


Рисунок 5 – Модель поведения агента-поезда

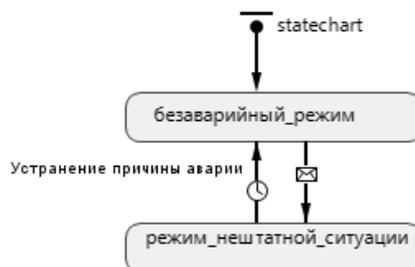


Рисунок 6 – Модель поведения агента-диспетчера

Таблица 3 – Причины нештатных ситуаций

Номер причины	Описание причины	Время устранения, мин
1	2	3
66	Остановка поезда по подтвержденным показаниям КТСМ	31,4
22	Неисправность устройств СЦБ	39,8
109	Остановка поезда по показаниям КТСМ (грение буксы)	34,5
9	Остановка грузового поезда по технической неисправности вагона	45,7

Окончание таблицы 3.

1	2	3
67	Остановка поезда по показаниям УКСПС	38,9
23	Неисправность светофора, в том числе красная точка	43,5
120	Падение давления в тормозной магистрали	44,2
21	Необеспечение электроснабжения устройств СЦБ	39,4
121	Остановка поезда на перегоне для устранения неисправности грузового вагона	35,7
82	Нарушение работы рельсовых цепей по вине работников службы П	56,6
112	Неисправность системы управления тормозами поезда СУТП	45,5
10	Самоторможение поезда (утечки, неотпуск и т. д.)	55,6
17	Отсутствие напряжения в контактной сети	47,3
6	Неисправность электро-, дизель-поезда	22,8
49	Излом токоприемника	58,6
146	Злонамеренное повреждение устройств, подвижного состава	59,5
65	Перекрытие сигнала без проезда	23,3
31	Неисправности устройств локальной сети ВЦ и вычислительной техники, включая АРМы	47,1
150	Остановка поезда по вине локомотивной бригады	48
18	Пониженное напряжение в контактной сети	17,4
124	Сбой в работе систем ДЦ/ДК	36,9
38	Остановка пассажирского поезда из-за технической неисправности	15,9
25	Ложное показание ДИСК, ПОНАБ, КТСМ из-за их неисправности	23,1

В данной системе реализована возможность добавления нештатной ситуации в любой момент работы модели, так как необходимо проанализировать, что может произойти после этого события на ближайших перегонах, станциях и как нужно действовать, чтобы возобновить движение по графику. Поэтому вероятность возникновения самой ситуации и способы её устранения находятся за пределами данной модели, так как существуют отдельные регламенты и алгоритмы действий по выходу из нештатной ситуации.

Агентный подход позволяет создать большое количество экземпляров агентов с одним поведением, например, поезда, следующие по одинаковым перегонам, сами перегоны между станциями и станции.

Некоторые механизмы работы железнодорожной сети сложно описать только диаграммами состояний. В основном это действия, выполняемые в определенной последовательности: отправление поездов, расставление поездов по приемоотправочным путям. При использовании только дискретно-событийного подхода для моделирования движения поездов каждый маршрут необходимо было бы моделировать отдельной диаграммой, а при добавлении каких-то изменений на железнодорожном участке (перекрытие перегона, ограничение скорости) пришлось бы вносить правки в каждый маршрут [9]. Поэтому дискретно-событийный подход использовался только для некоторых механизмов работы железнодорожной сети. Один из таких механизмов, реализованный в данном исследовании, – это модель разрешения конфликтных ситуаций при пропуске задержанных поездов.

Рассмотрим ситуацию: на перегоне А – Б произошла авария в нечетном направлении. Время устранения причины составляет 30 минут, поэтому в течение этого времени на станции А задерживается некоторое количество пассажирских и грузовых поездов. Как только перегон А – Б откроется, необходимо отправить все задержанные поезда. Допустим, на станции А задержано три поезда, таким образом, организовалась очередь: первый пассажирский, следом за ним два грузовых. В данной ситуации поезда отправляются в обычном порядке FIFO: первый пришел в очередь, первый вышел, так как приоритет пассажирского поезда выше и необходимо уменьшить количество минут простоя пассажирского поезда. Но если очередь задержанных поездов выглядела так: грузовой поезд, пассажирский поезд, грузовой поезд, первым поездом по порядку FIFO был бы отправлен грузовой, а простой пассажирского поезда увеличился бы на интервал между отправлениями поездов. Чтобы разрешить данную ситуацию, можно построить модель поведения диспетчера, который сортировал бы по

приоритетам все задержанные поезда, однако данная диаграмма получится довольно сложной, так как надо просчитать все возможные исходы (правила поведения), количество которых увеличивается в зависимости от числа задержанных поездов.

Возможным вариантом решения данной проблемы является использование возможностей встроенной библиотеки AnyLogic для сортировки, синхронизации и отправления заявок [10], что увеличивает скорость выполнения операций в модели и не нагружает модель дополнительными вычислениями и проверками в случае построения собственной модели поведения диспетчера для сортировки задержанных поездов по условиям и приоритетам. Для разрешения ситуации с пропуском задержанных поездов при нештатной ситуации была создана дискретно-событийная модель отправления задержанных поездов, которая представлена на рисунке 7.

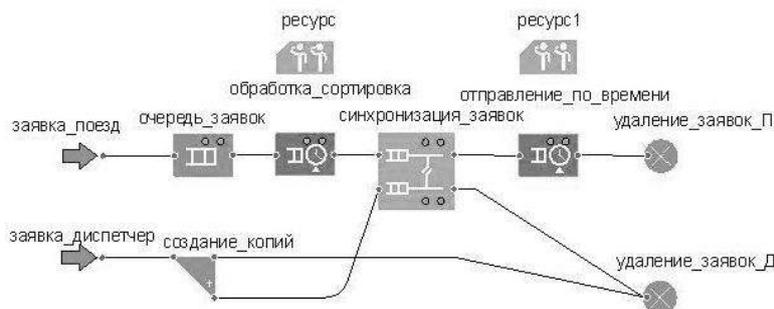


Рисунок 7 – Дискретно-событийная модель отправления задержанных поездов

Выходными данными модели являются информационное табло и график движения поездов. Информационное табло, представленное на рисунке 8, содержит информацию об отправленных поездах: номер поезда, время и станция отправления, время и станция прибытия.

№ поезда	Время отправления	Станция отправления	Время прибытия	Станция прибытия	статус_поезда	Время хода
3548	01.02.2016 0:42:00	Жеребцово	01.02.2016 0:59:00	Сокур	в_пути	35
979/981/983/985	01.02.2016 0:56:00	Берикульская	01.02.2016 1:31:00	Ижморская	в_пути	43
58/98	01.02.2016 0:48:00	Ояш	01.02.2016 1:03:00	Чебула	в_пути	31
55/85	01.02.2016 0:46:00	Антибесский	01.02.2016 1:06:00	Берикульская	в_пути	23
2402	01.02.2016 0:44:00	Издравая	01.02.2016 1:04:00	Жеребцово	в_пути	15
2401	01.02.2016 0:56:00	Антибесский	01.02.2016 1:16:00	Берикульская	в_пути	23
992	01.02.2016 0:48:00	Машково	01.02.2016 1:06:00	Ояш	в_пути	13

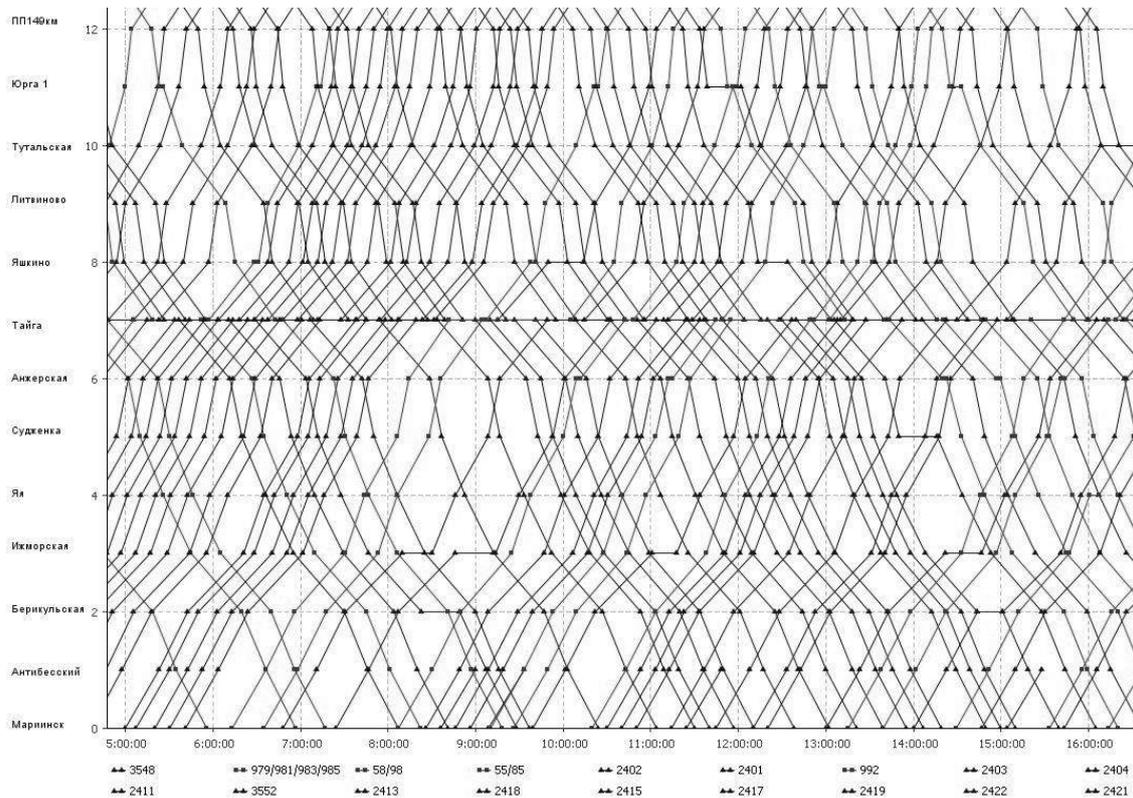
Рисунок 8 – Информационное табло

График движения поездов, который представлен на рисунке 9, строится по ходу движения поезда. По оси ОХ расположено время, по оси ОУ – станции. Грузовые поезда на графике отображены линиями с треугольными маркерами на станциях, пассажирские – с квадратными маркерами.

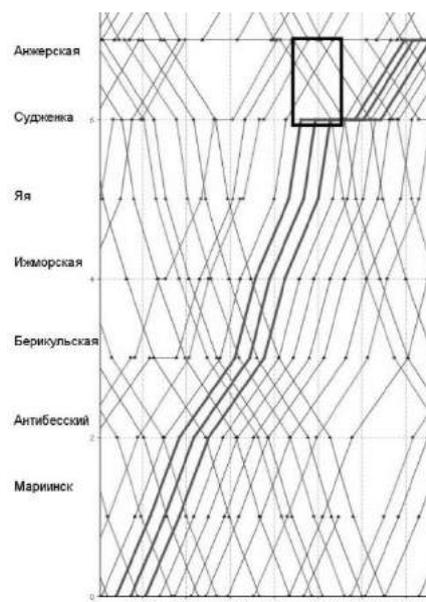
В модель добавлена возможность ограничения скорости на перегоне с отображением нового времени хода для поездов, которые попали в данное ограничение. При добавлении на перегон нештатной ситуации график также перестраивается в зависимости от новых данных, не нарушая правила пропуска поездов. На перегон Анжерская – Тайга была добавлена нештатная ситуация в 18:40 под номером 66 «Остановка поезда по подтвержденным показаниям КТСМ» и со временем устранения 31,4 мин. Задержанные перед этим участком поезда были отправлены, начиная с 19:25, и отображены на графике линиями с большей толщиной. Далее поезда встроились в общий график движения, не нарушая правил пропуска поездов. На рисунке 10 представлен измененный график движения поездов в связи с добавлением нештатной ситуации, прямоугольником обозначен перегон в момент нештатной ситуации.

Планируется в ходе дальнейшего исследования использовать полученную технологию для построения модели транспортно-пересадочного узла – объединение пешеходной, железнодорожной модели (станция метро), а также модели движения общественного транспорта.

В данной работе рассмотрены подходы и инструментарий для моделирования таких сложных организационно-технических объектов, как железная дорога, на примере участка Западно-Сибирской железной дороги. Методы, которые использованы в работе, позволяют моделировать объекты сети более крупного масштаба. Модель позволяет прогнозировать штатные и нештатные ситуации, может быть использована работниками железной дороги для моделирования различных решений в построении новых обходных маршрутов, изменении количества отправляемых поездов, рассмотрении ситуаций ремонта инфраструктуры. Преимуществом данной системы является то, что принятие решений в системе происходит в режиме модельного времени, что соответствует необходимому интервалу принятия решения.



Рисунки 9 – Построенный график движения поездов



Рисунки 10 – Измененный график движения поездов

1. Борщев, А. В. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты [Текст] / А. В. Борщев // URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>.
2. Попков, Т. В. Многоподходное моделирование: практика использования [Текст] / Т. В. Попков // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов четвертой всерос. науч.-практ. конф. «ИММОД-2009» / ОАО «ЦТСС». – СПб, 2009. – Т. 1. – С. 62 – 67.
3. Рахмангулов, А. Н. Оценка направлений развития систем «морской порт – «сухой» порт» методом имитационного моделирования [Текст] / А. Н. Рахмангулов, Д. С. Муравьев // Вестник Уральского гос. ун-та путей сообщения / Уральский гос. ун-та путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 3. – С. 54 – 72.
4. Бабкин, Е. А. О методологии имитационного моделирования бизнес-процессов на основе агентного и дискретно-событийного подходов [Текст] / Е. А. Бабкин, Е. В. Копица // Auditorium. Электронный научный журнал Курского гос. ун-та / Курский гос. ун-т. – Курск. – 2016. – № 2 (10) // URL: <http://auditorium.kursksu.ru/pdf/010-012.pdf>
5. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход: Пер. с англ. [Текст] / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
6. Bhardwaj A., Ghosh S., Dutta A., Modeling of Multiagent Based Railway System using BDI Logic // Proc. of the Intl. Conf. on Future Trends in Computing and Communication – FTCC 2013.
7. Bonabeau Eric, Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proc. National Academy of Sciences 99(3): 7280-7287, 2002.
8. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование на AnyLogic 5 [Текст] / Ю. Г. Карпов. – СПб: БХВ_Петербург, 2005. – 400 с.
9. Рахмангулов, А. Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе AnyLogic [Текст] / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкоров / Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education. – 2012. – 11 с.
10. AnyLogic Многоподходное имитационное моделирование // URL: <http://www.anylogic.com>.

References

1. Borshchev A.V. From System Dynamics and traditional simulation to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools [Ot sistemnoi dinamiki i traditsionnogo IM – k prakticheskim agentnym modeliam: prichiny, tekhnologiya, instrumenty] // URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>
2. Popkov T. V. Multi-approach simulation: practice of using [Mnogopodkhodnoe modelirovanie: praktika ispol'zovaniia] / Simulation. Theory and Practice: Proceedings of the Fourth All-Russian scientific-practical conference IMMOD-2009. Vol. 1. St. Petersburg, 2009. – p. 62 – 67.
3. Rakhmangulov A. N. Assessment of development options for «sea port – “dry” port» system using simulation method [Otsenka napravlenii razvitiia sistem «morskoi port – “sukhoi” port» metodom imitatsionnogo modelirovaniia]. Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – Herald of the Ural State University of Railway Transport, 2016, no. 3 (31), pp. 54 – 72
4. Babkin E. A. About combination of agent based and discrete event simulation modeling [O metodologii imitatsionnogo modelirovaniia biznes-protsessov na osnove agentnogo i diskretno-sobytiinogo podkhodov]. Auditorium. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta – Auditorium. Electronic scientific journal of Kursk State University, 2016, no. 2 (10). // URL: <http://auditorium.kursksu.ru/pdf/010-012.pdf>
5. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyi podkhod* (Artificial Intelligence: A Modern Approach). Moscow: Vil'iams, 2006, 1408 p.

6. Bhardwaj A., Ghosh S., Dutta A., Modeling of Multiagent Based Railway System using BDI Logic // Proc. of the Intl. Conf. on Future Trends in Computing and Communication – FTCC 2013.
7. Bonabeau Eric, Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proc. National Academy of Sciences 99(3): 7280-7287, 2002
8. Karpov Yu. G. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie na AnyLogic5* (Simulation modeling systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5). St. Petersburg, 2005, 400 p.
9. Rakhmangulov A. N., Mikshurov P. N. Special aspects of railroad station working method simulation model development within AnyLogic system [Osobennosti postroeniia imitatsionnoi modeli tekhnologii raboty zheleznodorozhnoi stantsii v sisteme AnyLogic]. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education*, 2012, 11 p.
10. AnyLogic Multimethod Simulation Software // URL: <http://www.anylogic.com>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хабаров Валерий Иванович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии транспорта», СГУПС.

E-mail: khabarov51@mail.ru

Красникова Ксения Викторовна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Аспирант, преподаватель кафедры «Информационные технологии транспорта», СГУПС.

Тел.: +7 (923) 246-64-27.

E-mail: zemlyanskayakv@edu.stu.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Хабаров, В. И. Создание имитационной модели движения поездов с использованием мультиагентного и дискретно-событийного подходов на примере Западно-Сибирской железной дороги [Текст] / В. И. Хабаров, К. В. Красникова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 143 – 154.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khabarov Valery Ivanovich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, the head of the department «Information transport technology», SSTU.

E-mail: khabarov51@mail.ru

Krasnikova Ksenia Victorovna

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Post-graduate student, instructor of the department «Information transport technology», SSTU.

Phone: +7 (923) 246-64-27.

E-mail: zemlyanskayakv@edu.stu.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khabarov V. I., Krasnikova K. V. Creating a simulation model of traffic with using multi-agent and discrete-event approaches by the example of the West-Siberian railway traffic. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 132 – 143 (In Russian)..

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 представляется:

рукопись 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;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую 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 в себя 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 на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском 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, подрисовочные 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* (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 статьи 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 (31) 2017

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 СМИ ПИ № ФС77-66605 от 21 июля 2016 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

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.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 28.10.2017.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 29.10.2017.

