

ИЗВЕСТИЯ

№ 4(28)

2016

Транссиб



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПСа, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
5. Бокарев Сергей Александрович – проректор по научной работе СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. Демин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. Каргапольцев Сергей Константинович – первый проректор ИрГУПСа, 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» ОмГУПСа, 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» ОмГУПСа, д.т.н., профессор.

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Cheremisin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Bokaryov Sergey Alexandrovich – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
7. Demin 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

- Климович А. В., Ерошенко А. В. Обоснование возможности снижения энергозатрат на тягу электропоездов в Омском территориальном управлении Западно-Сибирской железной дороги 2
- Нехаев В. А. Определение резонансных скоростей подвижного состава 11
- Обрывалин А. В., Дюндин В. В. Повышение прочности соединения «бандаж – колесный центр» вследствие равномерного распределения объема материала бандажа 24
- Рябко К. А., Рябко Е. В. Повышение долговечности крышек цилиндров тепловозных дизелей 30
- Стороженко Д. Ю., Рыжков А. В. Совершенствование методики применения устройств встроенной диагностики контактной сети 37
- Тэттэр В. Ю., Тэттэр А. Ю. Методика реализации сигналов для тестирования вибро-диагностического оборудования подвижного состава 46
- Четвергов В. А., Анисимов А. С., Балагин О. В., Свечников А. А. Настоящее и будущее энергосиловых установок автономных локомотивов 52
- Шкодун П. К., Долгова А. В. Применение аппарата нечеткой логики при диагностировании коллекторно-щеточного узла тяговых электрических двигателей подвижного состава 59

Транспортная энергетика

- Горькин А. В. Снижение числа неселективных отключений быстродействующих выключателей фидеров контактной сети 69
- Закарюкин В. П., Крюков А. В., Алексеенко Е. А. Анализ применимости эквивалентов внешнего электроснабжения для расчетов токов короткого замыкания в тяговой сети 27,5 кВ 76
- Комогорцев М. Г., Осипова В. Э. Разработка модели определения межпоездных интервалов с использованием аппарата искусственных нейронных сетей 87
- Манусов В. З., Палагушкин Б. В., Бумцэнд У. Электрификация международного транспортного железнодорожного коридора «Азия – Европа» как путь устойчивого развития электроэнергетической системы Монголии 94
- Москалев Ю. В. Определение параметров компенсирующего устройства с несимметричной структурой для уменьшения несимметрии напряжений и компенсации реактивной мощности в низковольтной трехфазной электрической сети 101
- Сидоров О. А., Тарасенко А. В. Совершенствование токоприемников монорельсового транспорта для высоких скоростей движения 108
- Чернорай В. А. Оценка эффективности применения режимной автоматики резервных преобразовательных агрегатов на основе анализа графиков нагрузки при существующих уставках 115

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Лаврухин А. А., Малютин А. Г., Окишев А. С., Кильдибеков А. Б. Алгоритмы и структурные решения для построения автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети 124

Организация производства на транспорте

- Белов А. А., Ларин А. Н. Организация эксплуатационного контроля методом последовательного анализа 134

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 621.33

А. В. Климович, А. В. Ерошенко

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

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ТЯГУ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ В ОМСКОМ ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. В статье рассматриваются возможности снижения энергозатрат на тягу при движении электропоездов в условиях равнинного профиля Западно-Сибирской железной дороги за счет отключения тяговой секции электропоезда и рационального распределения времени хода по всему направлению движения.

При расчете и построении графиков скоростных режимов движения поезда по участку используется аналитический метод решения дифференциального уравнения движения поезда. Для анализа оптимальных графиков движения поезда на каждом этапе их моделирования проводится проверка вычислений, которая позволяет гарантировать достоверность получаемых результатов.

Для определения потенциальных возможностей снижения энергозатрат на тягу при управлении движением электропоезда проанализирована конкретная поездка электропоезда ЭД4М по маршруту Омск – Иртышская. Приводятся расчетные графики скоростных режимов движения электропоезда в рассматриваемой поездке, а также режима движения с отключением одной тяговой секции. Стандартными средствами системы компьютерного моделирования определяются средняя по пути скорость электропоезда, дисперсия скорости по пути, энергопотребление. Полученная величина затрат энергии на тягу с отключенной тяговой секцией значительно меньше потребления энергии в реальной поездке. Рациональное распределение времени хода электропоезда по всему направлению движения из условия сохранения времени его прибытия на конечную станцию также позволяет уменьшить расход электроэнергии на тягу.

На основании данных о расходе электроэнергии в целом по депо ТЧ-31 Омск определяется возможная экономия энергозатрат на тягу за счет применения предложенных способов.

Ключевые слова: энергозатраты электропоезда, график движения, сопротивление движению поезда, режимы работы локомотива, отключение тяговых электродвигателей.

Andrey V. Klimovich, Alexandra V. Eroshenko

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

RATIONALE THE POSSIBILITY OF ELECTRIC TRAIN ENERGY CONSUMPTION DECREASE AT WEST SIBERIAN RAILWAY OMSK DEPARTMENT

Abstract. In article the possibilities of decrease in energy consumption on draft at the movement of electric trains in the conditions of a flat profile of West Siberian Railway due to shutdown of traction section of an electric train and rational distribution of time of the course in all direction of the movement are considered.

During the calculating and creation of schedules of the train for site is used an analytical method of the solution of the differential equation of the movement of the train. For the analysis of optimum schedules of the train at each stage of their modeling an inspection of calculations which allows to guarantee reliability of the received results is carried out.

For definition of potential opportunities of decrease in energy consumption on draft at traffic control of an electric train the concrete trip of an electric train of ED4M along a route Omsk – Irtyshskaya is analysed. Settlement schedules of an electric train are provided in the considered trip, and also with shutdown of one traction section. Average is defined by standard means of system of computer modeling on the way the electric train speed, dispersion of speed on the way, energy consumption. The received size of energy consumption for draft with the disconnected traction section is much less than energy consumption on a real trip. Rational distribution of time of the course of the electric train in all direction of movement from a condition of preserving time of its arrival also allows to reduce an electric power expense on draft by the terminal station.

Based on consumption data of the electric power in general possible economy of energy costs on draft due to application of the offered methods is determined by Omsk TCh-31 depot.

Keywords: electric train energy consumption, train schedule, resistance to the movement of the train, operation modes of the locomotive, disconnection of traction motors.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 г. предполагает создание интеллектуальной системы железнодорожного транспорта. Согласно данной стратегии локомотивы оборудуются системами автоматического ведения поезда, автоматического определения технического состояния подвижного состава, системами передачи информации в режиме реального времени о фактическом состоянии локомотива и рядом других. Необходимость совершенствования систем управления поездом обусловлена требованиями не только точности исполнения расписания движения поездов, но и внедрения ресурсосберегающих технологий.

При анализе движения рельсового транспортного средства массой m по участку между станциями N и M длиной l_{NM} заданного произвольного плана и профиля и перегонного времени хода t_{MN} [1, 2] была получена целевая функция, которую необходимо минимизировать для снижения энергозатрат на тягу:

$$J = \frac{gm(\omega(M_s[v]) + c_\omega D_s[v])l_{NM}}{\eta_{cp}},$$

где $\omega(v) = a_\omega + b_\omega v + c_\omega v^2$ – зависимость основного удельного сопротивления движению поезда от скорости; a_ω , b_ω , c_ω – постоянные коэффициенты; g – ускорение свободного падения; $M_s[v]$ и $D_s[v]$ – соответственно математическое ожидание и дисперсия скорости движения поезда, полученные в результате математической обработки его режима движения по участку $v = f(s)$; η_{cp} – средневзвешенный коэффициент полезного действия локомотива при движении поезда по всему рассматриваемому участку.

Подробный анализ приведенной целевой функции выполнен в работе [3]. Здесь же отметим, что числитель приведенного выражения представляет собой расчетное значение полезной работы, выполненной поездом при перемещении груза из пункта N в пункт M в рассматриваемой поездке. Заметим также, что приведенная целевая функция обязательно имеет минимум для некоторых заранее заданных условий выполнения поездки. Очевидно, что максимальные значения функция будет иметь в двух случаях. Во-первых, если установленное время хода поезда по рассматриваемому участку будет минимально возможным. Здесь возможен только один график движения, когда на станции отправления поезд будет разгоняться до максимально допустимой скорости с максимальным ускорением, реализуемым при полном использовании мощности локомотива и максимальном коэффициенте сцепления колес локомотива с рельсом. Далее до станции прибытия должна поддерживаться максимально допустимая скорость движения, а торможение при остановке поезда должно выполняться с максимально допустимым замедлением.

Другим предельным случаем, приводящим к максимальному значению рассматриваемой функции, следует считать движение по участку за время, стремящееся к бесконечности. Теоретически это соответствует, например, движению по участку в течение недели, месяца, года. Полезная работа, выполненная при перемещении поезда в этих случаях, будет примерно одинаковой, но энергозатраты на собственные нужды локомотива начнут стремительно возрастать.

Поиск оптимального по энергозатратам на тягу режима управления движением рельсового транспортного средства с использованием приведенной целевой функции должен выполняться в результате сравнения нескольких графиков его движения по участку, отвечающих двум обязательным требованиям. Во-первых, пройденный поездом путь во всех рассматриваемых графиках движения должен быть одинаковым с учетом заранее заданной погрешности вычислений (например, ± 100 м). Во-вторых, время хода поезда по участку должно быть неизменным (допустимой погрешностью следует считать отклонение на ± 10 с). В противном случае сравнение энергозатрат на тягу в анализируемых графиках движения будет математически не корректным.

Наиболее удобно выполнять анализ нескольких скоростных режимов движения поезда по участку $v = f(s)$, если для их расчета и построения используется аналитический метод ре-

шения дифференциального уравнения движения поезда [4]. Это возможно, если все тяговые характеристики локомотива на возможных позициях контроллера машиниста, а также тормозные характеристики при рекуперативном, реостатном либо пневматическом торможении аппроксимировать квадратными трехчленами, подобными зависимости основного удельного сопротивления движению поезда от скорости. Объясняется это следующими причинами. Во-первых, все расчеты и необходимые построения расчетных графиков можно выполнять с помощью известных программ компьютерного моделирования, что существенно ускоряет вычислительный процесс. Во-вторых, при расчете приведенной выше целевой функции необходима соответствующая математическая обработка расчетных скоростных режимов движения для определения математического ожидания $M_s[v]$ и дисперсии $D_s[v]$ скорости движения поезда по пути. Большинство современных программ компьютерного моделирования имеют все необходимые для этого средства.

Важная особенность описанной выше методики расчета и анализа оптимальных графиков движения поезда заключается в возможности проверки всех вычислений на любом этапе их выполнения. Эта проверка основывается на известном законе сохранения энергии. Суть проверки заключается в соответствующем балансе выполненной работы сил тяги и торможения при движении поезда и изменений его кинетической (при изменении скорости) и потенциальной (на подъемах и спусках) энергии в пределах отдельного элемента профиля пути и на всем участке движения. Такая поэтапная проверка позволяет надежно гарантировать достоверность вычислений.

В соответствии с приведенной целевой функцией минимальные энергозатраты на тягу любого рельсового транспортного средства могут быть достигнуты, если, во-первых, добиться минимума дисперсии скорости поезда $D_s[v]$ в его скоростных режимах движения по участку $v = f(s)$. Это возможно, если машинист выбирает так называемую «ровную езду», когда скорость поезда незначительно отклоняется от средней ходовой скорости по участку, а разгон и торможение выполняются с максимальным комфортным ускорением (замедлением). Во-вторых, необходимо выбирать режимы работы локомотива, обеспечивающие максимальное значение его средневзвешенного коэффициента полезного действия [3, 5].

Рассматривая с представленной точки зрения возможности снижения энергозатрат на тягу при движении электропоездов в условиях равнинного профиля Западно-Сибирской железной дороги, отметим следующее. Мощность тяговых двигателей электропоезда такова, что даже при полной загрузке он достаточно быстро разгоняется до ходовой скорости, необходимой для прохождения участка пути между остановочными пунктами за время, предусмотренное расписанием движения. Однако теоретически оптимальный скоростной режим движения (на рисунке 1 показан под номером 1), характеризующийся поддержанием этой скорости на всем межостановочном участке пути постоянной, по известным техническим причинам невозможен. Поэтому для электропоездов становится оптимальным так называемый «пилообразный» скоростной режим движения, характеризующийся чередованием режимов разгона и выбега (на рисунке 1 показан под номером 2).

Зависимость КПД любого тягового двигателя, в том числе электропоезда, от потребляемого тока всегда имеет явно выраженный максимум при номинальных режимах работы (рисунок 2). Система управления электропоезда обычно настраивается таким образом, чтобы во время его разгона после отправления со станции N ток тяговых двигателей соответствовал зоне максимальных значений КПД (зона 1 на рисунке 2). При этом потребляемая энергия расходуется на преодоление сопротивления движению поезда и на создание необходимого значения кинетической энергии. После разгона для поддержания нужной ходовой скорости электропоезда на равнинных участках пути ток тяговых двигателей существенно снижается, так как при этом энергия расходуется только на преодоление сопротивления движению (зона 2 на рисунке 2). В результате КПД электропоезда также заметно снижается.

Следовательно, для снижения энергозатрат на тягу целесообразным становится отключение одной из трех тяговых секций электропоезда, что обеспечивает поддержание скорости,

близкой к требуемой ходовой, двумя секциями. В этом случае уменьшение затрат энергии на перемещение поезда будет происходить по двум причинам. Во-первых, уменьшается дисперсия скорости поезда $D_s[v]$ в его скоростном режиме движения (на рисунке 1 показан под номером 3), а следовательно, уменьшается и полезная работа при его перемещении. Во-вторых, увеличивается нагрузка на тяговые двигатели оставшихся в работе двух тяговых секций электропоезда. При этом ток двигателей становится близким к $I_{ном}$ (зона 1 на рисунке 2), а КПД возрастает. Ожидаемое снижение энергозатрат на тягу составляет 3 – 4 % от потребления энергии при существующем режиме вождения электропоездов.

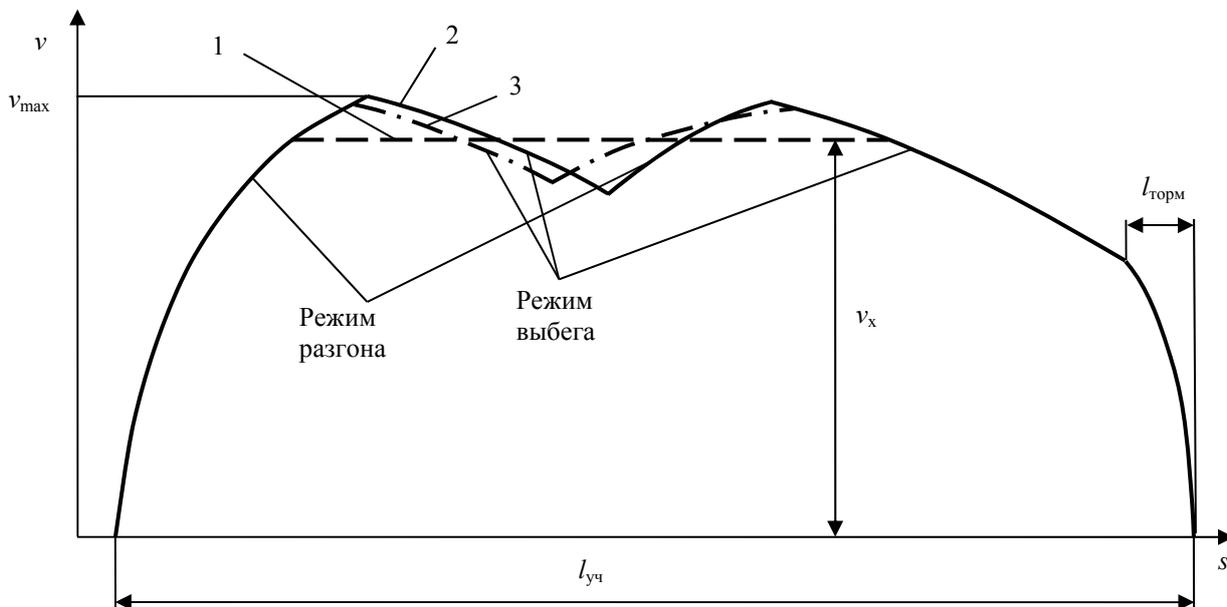


Рисунок 1 – Оптимальные скоростные режимы движения электропоезда

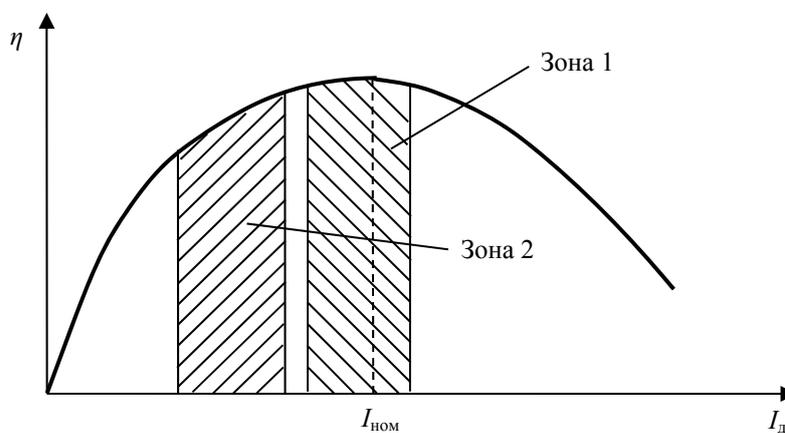


Рисунок 2 – Зависимость КПД тягового двигателя от тока

Недостатком предлагаемого режима управления является неравномерная нагрузка тяговых двигателей электропоезда. Этот недостаток легко устраняется, если в системе управления предусмотреть поочередное отключение тяговых секций: на первом межстаночном перегоне отключается первая тяговая секция, на втором – вторая, на третьем – третья, на четвертом – первая и т. д.

Для определения потенциальных возможностей снижения энергозатрат на тягу при управлении движением электропоезда с отключенной тяговой секцией проанализирована конкретная поездка электропоезда ЭД4М по маршруту Омск – Иртышская, выполненная 1 мая 2011 г. Рассматривался наиболее протяженный межстаночный перегон 131 км –

Иртышская. Фрагмент графика режимов движения электропоезда на указанном перегоне представлен на рисунке 3 (информация взята из файла РПДА). Длина рассматриваемого перегона составляет 17,9 км. Электропоезд проследовал по перегону за 18,75 мин. При этом затраты электроэнергии на тягу составили 80,25 кВт·ч.

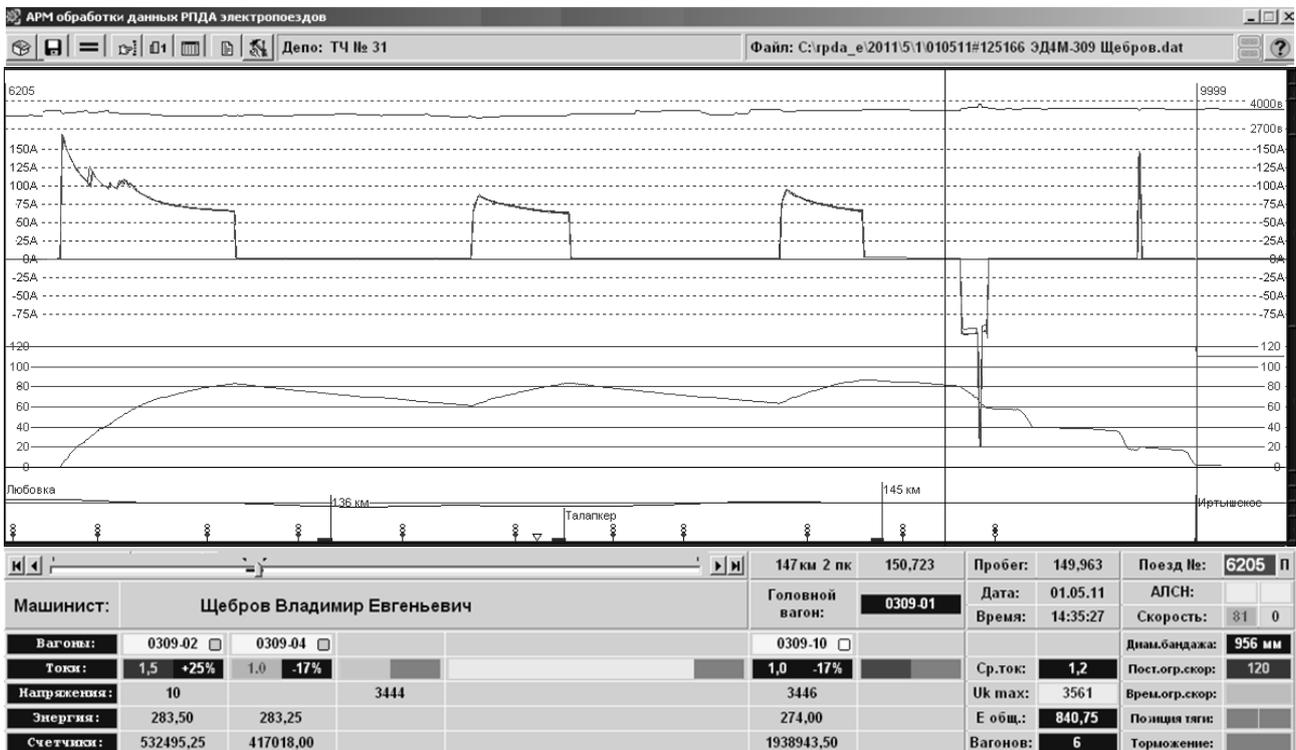


Рисунок 3 – Фрагмент графика скоростных режимов движения электропоезда ЭД4М на межстаночном перегоне 131 км – Иртышская

Первоначально выполнено моделирование движения электропоезда с помощью системы компьютерного моделирования Mathcad. Использовалась аналитическая методика выполнения тяговых расчетов, согласно которой тяговые характеристики электропоезда аппроксимировались квадратными трехчленами. Расчетный график скоростных режимов движения электропоезда в рассматриваемой поездке представлен на рисунке 4. Длина пути, пройденная электропоездом по представленному графику, составляла 17,85 км, а расчетное время хода по перегону равно 18,7 мин. Таким образом, погрешность расчета по пути и по времени не превышает 0,3 %.

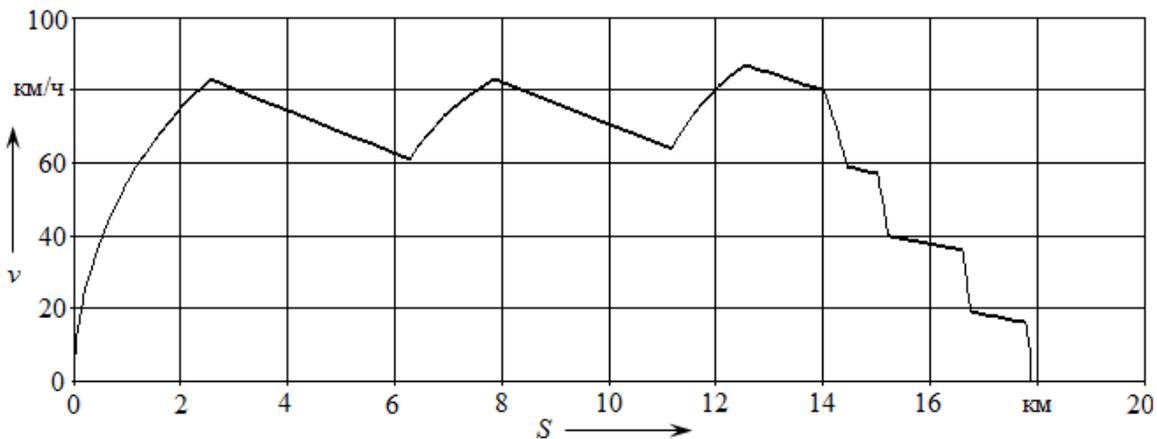


Рисунок 4 – Компьютерное моделирование движения электропоезда ЭД4М по рассматриваемому перегону

Отметим, что здесь, как и в реальной поездке, набор скорости при разгоне до 20 км/ч выполняется на маневровой позиции (позиция М), а дальнейший разгон, как и два последующих включения режима тяги для набора скорости после длительных режимов выбега, осуществляются на позиции 1 (позиция П1). Первое торможение электропоезда при приближении к ст. Иртышская выполняется в режиме ограниченной рекуперации, а последующие торможения пневматические.

Стандартными средствами системы компьютерного моделирования Mathcad для расчетного графика скоростных режимов движения определены средняя по пути скорость электропоезда и дисперсия скорости по пути, которые составили соответственно 64,44 км/ч и $375,6 \text{ км}^2/\text{ч}^2$.

Расчетный график скоростных режимов движения электропоезда по рассматриваемому перегону с одной отключенной тяговой секцией приведен на рисунке 5. Его основные параметры: пройденный электропоездом путь – 17,97 км, время хода – 18,4 мин.

В данном случае разгон электропоезда выполняется в том же тяговом режиме, что и на реальном графике (позиция М – до 20 км/ч, позиция П1 – до максимальной скорости). Различается максимальная скорость разгона: на реальном графике – 83 км/ч, на расчетном с отключенной тяговой секцией – 64,4 км/ч. Достичь снижения максимальной скорости движения представилось возможным благодаря исключению длительного во времени подъезда к конечной станции чередованием режимов торможения и выбега.

Вероятно, машинист ошибочно выбрал завышенную скорость в начале расчетного перегона, что потребовало замедления движения в конце с целью прибытия на конечную станцию в заданное время. Требуемая средняя ходовая скорость движения электропоезда по перегону на расчетном графике достигается чередованием режимов выбега и тяги на позиции 2 (П2). Торможение на расчетном графике скоростных режимов движения поезда до скорости 40 км/ч рекуперативное, а затем пневматическое. В результате средняя по пути скорость электропоезда и дисперсия скорости по пути составили соответственно 56,77 км/ч и $64,97 \text{ км}^2/\text{ч}^2$.

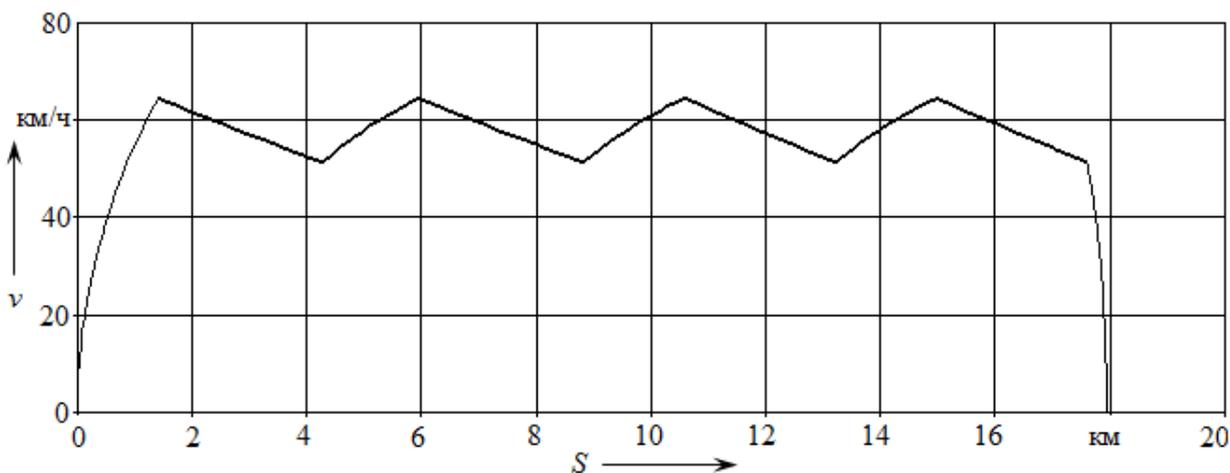


Рисунок 5 – График скоростных режимов движения электропоезда ЭД4М на рассматриваемом перегоне с отключенной тяговой секцией

Расчетные энергозатраты при движении с отключенной тяговой секцией составили 64,8 кВт·ч, что на 19,25 % меньше реальных. Для выявления составляющей снижения энергозатрат за счет отключения тяговой секции дополнительно был рассчитан график скоростных режимов движения поезда без отключения тяговой секции, но исключая длительное торможение на конечной станции (здесь не приводится). Его отличие от представленного на рисунке 4 заключается в опускании вниз ходовой части до диапазона изменения скорости 47,4 – 68,5 км/ч, некотором увеличении режима выбега и исключении длительного торможения на ст. Иртышская (как показано на рисунке 5). Расчетные значения средней по пути ско-

рости электропоезда и дисперсии скорости по пути составили соответственно 57,857 км/ч и 157,7 км²/ч². Расчетные энергозатраты в этом случае составили 68,7 кВт·ч, что на 14,6 % меньше реальных.

Таким образом, на расчетном межостановочном перегоне 131 км – Иртышская снижение расхода электроэнергии за счет отключения одной тяговой секции составляет 4,65 %. Экономия энергозатрат на 14,6 % может быть достигнута благодаря использованию системы автоведения поезда. Как отмечают практически все эксплуатирующие ее специалисты, основным преимуществом данной системы является способность определения требуемой ходовой скорости из условия заданного прибытия электропоезда на конечную станцию.

Следует отметить, что на всем направлении движения электропоезда в исследуемой поездке Омск – Иртышская имеется 21 межостановочный перегон. Только на девяти из них машинист несколько превысил требуемую ходовую скорость, что потребовало несколько замедлить прибытие на остановочный пункт. Причем эти ошибки машиниста были существенно меньше по сравнению с рассмотренным перегонем, так как длина остальных перегонов меньше. На перегонах длиной 1,5 – 2,5 км такие ошибки практически исключены.

Улучшить график движения по коротким перегонам на равнинном участке пути, где кроме позиции П1 другие позиции контроллера машинист не может использовать, система автоведения не способна. В результате в общей величине затрат электроэнергии непосредственно на тягу по всему направлению Омск – Иртышская, которые в рассматриваемой поездке составили 1143,75 кВт·ч, доля экономии энергозатрат, получаемая благодаря использованию систем автоведения, существенно снижается. Расчеты показали, что в анализируемой поездке исключение ошибок машиниста при выборе поддерживаемой ходовой скорости для обеспечения заданного времени прибытия электропоезда на остановочные пункты позволяет экономить примерно 69,8 кВт·ч, т. е. 6,1 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу.

Отключение одной тяговой секции из трех на рассматриваемом направлении движения Омск – Иртышская оказывается эффективным на 15 межостановочных перегонах из 21. В результате общая эффективность рассматриваемого режима управления также несколько уменьшается, но остается ощутимой. По всему направлению движения расчетная экономия электроэнергии составила 48 кВт·ч, или 4,2 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу.

Имеется еще одна возможность снижения общих затрат электроэнергии на тягу в рассматриваемой поездке, которая заключается в рациональном распределении времени хода электропоезда по всему направлению движения из условия сохранения времени его прибытия на конечную станцию. На рисунке 6 в сжатом виде приведен весь график скоростных режимов движения электропоезда в рассматриваемой поездке. Здесь хорошо видно, что максимальная скорость движения электропоезда по отдельным межостановочным перегонам значительно различается: на одних перегонах она достигает 100 км/ч, а на других не превышает 80 км/ч. Если на последних максимальную скорость несколько увеличить, то сэкономленное время можно использовать для увеличения времени хода по другим участкам, тем самым снижая поддерживаемую ходовую скорость. Так как основное сопротивление движению пропорционально квадрату скорости движения, затраты электроэнергии на тягу также зависят от квадрата скорости. Поэтому уменьшение максимальной скорости на некоторых перегонах даст существенную экономию энергозатрат. Расчетная экономия расхода электроэнергии на тягу в рассматриваемой поездке при рациональном времени хода электропоезда по отдельным перегонам составила 37,4 кВт·ч, или 3,3 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу.

Таким образом, суммарный резерв экономии затрат электроэнергии на тягу за счет изменения режима отключения одной тяговой секции и перераспределения времени хода по отдельным межостановочным перегонам составляет 82,7 кВт·ч на одну поездку (7,5 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу).

Для расчета возможной экономии электроэнергии по всему моторвагонному депо ТЧ-31 Омск за счет применения режима отключения одной тяговой секции и перераспределения времени хода по отдельным межстаночным перегонам будем исходить из предположения, что величина возможного снижения энергозатрат не зависит от типа электроподвижного состава, что вполне оправданно, так как на всех электропоездах доля мощности тяговых двигателей, приходящаяся на единицу массы, примерно одинакова. Расчет величины затрат электроэнергии непосредственно на тягу в целом по депо в первом полугодии 2011 г. приведен в таблице.

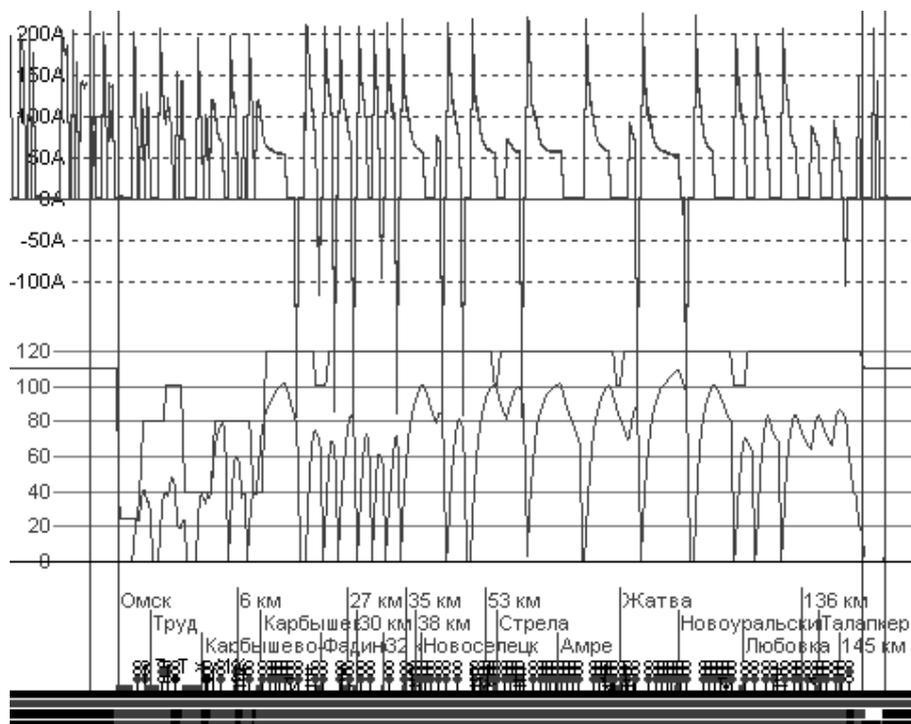


Рисунок 6 – Общий график скоростных режимов движения электропоезда по направлению Омск – Иртышская

Расход электроэнергии непосредственно на тягу

Параметр	Месяц года					
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
Расход электроэнергии по счетчикам ЭПС, кВт·ч	1 675 692	1 381 699	1 257 404	1 163 324	1 096 432	1 059 949
Доля затрат электроэнергии на тягу, %	55,6	58	63	71	81,5	94,8
Затраты электроэнергии на тягу, кВт·ч	931 685	801 385	792 165	825 960	893 592	1 004 832
Суммарные затраты электроэнергии на тягу, кВт·ч	5 249 618					
	в пригородном движении			4 288 938		
	в пассажирском движении			866 187		

Учитывая примерно одинаковые технические условия выполнения поездной работы электропоездов в Омском территориальном управлении Западно-Сибирской железной дороги в пригородном и пассажирском движении с точки зрения возможности использования режима их вождения с отключением одной тяговой секции при поддержании требуемой скорости

вой скорости, экономию электроэнергии, расходуемой на тягу, определим для суммарных энергозатрат: $5\,249\,618 \cdot 0,042 = 220\,484$ кВт·ч.

Экономия расхода электроэнергии на тягу при рациональном распределении времени хода электропоездов по отдельным перегонам возможна только в пригородном движении: $4\,288\,938 \cdot 0,033 = 141\,535$ кВт·ч. Следует отметить, что это максимально возможная экономия электроэнергии при условии практической возможности реализации расчетного перераспределения времени хода по перегонам. Это обусловлено тем, что время прибытия на промежуточную станцию часто не может быть сдвинуто из-за наличия других ниток графика движения поездов, а также из-за необходимости выполнения норм пропускной и провозной способности участка.

Суммарная экономия электроэнергии составляет 362 019 кВт·ч, что при стоимости электроэнергии 2,05 р. за 1 кВт·ч составляет 742 тыс. р.

Список литературы

1. Пат. № 2237589 РФ, МПК В 61 L 27/00. Способ выбора наиболее экономичного режима движения поезда на заданном участке пути / А. В. Климович, В. Д. Авилов (РФ). – № 2003121717/11; Заявлено 13.07.2003; Опубликовано 10.10.2004. Бюл. № 28.
2. Климович, А. В. Метод поиска оптимального по энергозатратам графика движения поезда [Текст] / А. В. Климович // Вестник Томского гос. ун-та. Общественно-науч. периодич. журнал. Бюл. оперативной науч. информации. – 2004. – № 32. – С. 78 – 83.
3. Климович, А. В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу: Монография [Текст] / А. В. Климович. – М.: Компания Спутник+, 2008. – 263 с.
4. Климович, А. В. Аналитический метод решения дифференциального уравнения движения поезда [Текст] / А. В. Климович // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 2. – С. 52 – 54.
5. Климович, А. В. Построение оптимального графика движения поезда по заданному участку при помощи целевой функции [Текст] / А. В. Климович, А. А. Кообар, А. В. Харламова // Омский научный вестник. – Омск. – 2006. – № 9 (46). – С. 88 – 91.

References

1. Klimovich A. V., Avilov V. D. Patent RU 2237589 B 61 L 27/00 10.10.2004.
2. Klimovich A. V. Method of search of the trains schedule, optimum on energy consumption [Metod poiska optimalnogo po energozatratam grafika dvizheniya poezda]. *Vestnik Tomskogo gos. universiteta – Journal of Tomsk state university*, 2004, no. 32, pp. 78 – 83.
3. Klimovich A. V. *Optimizaciya upravleniya dvizheniem poezda po minimumu zatrat energoresursov na tyagu* (Optimization of traffic control of the train on a minimum of costs of energy resources for draft). Moscow: Company Sputnik+, 2008, 263 p.
4. Klimovich A. V. Analytical method of the solution of the differential equation of the movement of the train [Analiticheskij metod resheniya differencialnogo uravneniya dvizheniya poezda]. *Izvestiia vuzov Elektromehaniika – The journal of Electromecanics Studies*, 2006, no. 2, pp. 52 – 54.
5. Klimovich A. V., Koobar A. A., Kharlamova A. V. Creation of the optimum schedule of the train on the set site by means of criterion function [Postroenie optimalnogo grafika dvizheniya poezda po zadannomu uchastku pri pomoschi celevoi funkicii]. *Omskii nauchnii vectnik – The journal Omsk scientific bulletin*, 2006, no. 9 (46), pp. 88 – 91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Климович Андрей Владимирович
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Klimovich Andrey Vladimirovich
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, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: enklm@mail.ru

Ерошенко Александра Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: avx_firka@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Климович, А. В. Обоснование возможности снижения энергозатрат на тягу электропоездов на Омском отделении Западно-Сибирской железной дороги [Текст] / А. В. Климович, А. В. Ерошенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 2 – 11.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: enklm@mail.ru

Eroshenko Alexandra Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: avx_firka@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Klimovich A. V., Eroshenko A. V. Rationale the possibility of electric train energy consumption decrease at West Siberian railway Omsk department. Journal of Transsib Railway Studies, vol. 27, no. 3, pp. 2 – 9. (In Russian).

УДК 629.04

В. А. Нехаев

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В статье рассмотрено такое важное понятие, как резонанс для трех случаев, когда подвижной состав описывается системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, когда математическая модель подвижного состава представляется нелинейной системой дифференциальных уравнений и когда в последней учитывается мультипликативное возмущение со стороны железнодорожного пути, а именно его междушпальная неравноупругость. В этом случае правильно и корректно говорить не о конкретной величине резонансной скорости, а об областях параметрической неустойчивости.

Ключевые слова: подвижной состав, железнодорожный путь, продольная неравноупругость пути, простые и комбинационные параметрические резонансы, резонансная скорость движения.

Victor A. Nekhaev

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

DEFINING FOR RMS-VELOCITY OF ROLLING STOCK

Abstract. The article deals with such important concept as the resonance to three cases: when rolling stock is described by a system of linear differential equations with constant coefficients, when the mathematical model of rolling stock represented a nonlinear system of differential equations, and when in the latter we take into account the multiplicative disturbance from railway, namely its non-equal-elasticity between sleepers. In this case, speak properly and correctly is not about a particular value of RMS-velocity, but on parametric instability areas.

Keywords: rolling stock, railroad, longitudinal non-equal-elasticity of railway, simple and Raman parametric resonances, RMS-velocity for motion.

Как хорошо известно, динамическая система колебательного типа обладает некоторыми собственными частотами, а их совпадение с частотами внешнего возмущения, действующими на механический, электрический или электромеханический объект, приводит к тому, что в системе устанавливается резонансный режим, следовательно, это повышенные нагрузки на элементы системы. Высказанная мысль верна только при одном условии, математическая модель такой динамической системы представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Она наиболее хорошо укрепилась в динамике подвижного состава железных дорог.

Действительно, само понятие резонанса является самым важным и основным, всем хорошо известным понятием со средней школы. Все также хорошо знают, что явления резонанса имеют место не только в области звука и электричества, но и в механике, оптике, физике, что резонанс может быть, например, причиной разрушения моста, тоннеля под действием периодических сил, крушения поезда из-за интенсивных колебаний подпрыгивания, галопирования, отбоя, боковой качки, виляния или отбоя, поломки валов при критических числах оборотов и т. п. С эволюцией понятия резонанса можно подробно ознакомиться по работе Н. Д. Папалекси [1]. Именно потому, что роль резонанса в науке чрезвычайно велика, а в реальной жизни мы практически постоянно встречаемся с теми или иными проявлениями резонанса, весьма важно глубокое и четкое понимание того, что же все-таки мы подразумеваем под резонансом.

Наше исследование будем вести на примере условного одноосного железнодорожного экипажа с тремя степенями свободы. Как доказано в работе [2], такую модель механической колебательной системы «экипаж – путь» можно считать корректно обоснованной. Ее расчетная схема показана на рисунке 1.

Здесь приняты следующие обозначения: M_k , M_t , $M_{к.п}$, $M_{п}$ – массы соответственно кузова, тележки, колесной пары и «приведенная» масса железнодорожного пути; $J_{ц}$, $J_{б}$, $J_{п}$ – жесткости центрального и буксового подвешиваний и жесткость железнодорожного пути; $\beta_{ц}$, $\beta_{б}$, $\beta_{п}$ – коэффициенты вязкого трения центрального и буксового подвешиваний и коэффициент вязкого трения железнодорожного пути; z_k , z_t , $z_{кп}$ – обобщенные координаты экипажа, характеризующие подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары и отсчитываемые от положений статического равновесия. Считаем безотрывным движение колесной пары по рельсам. Более того, полагаем, что диссипативные силы, действующие в экипаже, малы – это обычное допущение для теории колебаний и выражается оно в виде:

$$\left\| (A^{-1}B)^2 \right\| / \left\| A^{-1}C \right\| \ll 1, \quad (1)$$

здесь $\| \dots \|$ – норма матрицы. Для выбранного примера имеем: $0,241432 \ll 1$.

В качестве математической модели был взят условный одноосный экипаж – электровоз ВЛ10, исходные данные которого приняты следующими: 1,208; 0,5015; 0,562; 0,0516 – массы кузова, тележки, колесной пары и «приведенной» массы железнодорожного пути соответственно (тс·с²/м); 97; 304; 7860 – жесткости центрального, буксового подвешиваний и средняя на рельсовом звене жесткость пути соответственно (тс/м); 4,74; 4,1; 27,8 – коэффициенты вязкого трения в центральном и буксовом подвешиваниях и железнодорожном пути соответственно (тс·с/м); $l_{шп} = 0,54348$ (м) – среднее междушпальное расстояние.

Применяя известный алгоритм Лагранжа второго рода [3, 4], получим систему линейных дифференциальных уравнений для рассматриваемого условного обобщенного одноосного железнодорожного экипажа:

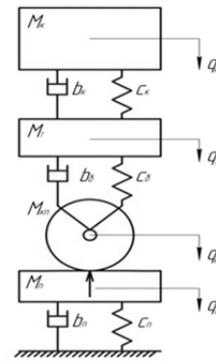


Рисунок 1 – Расчетная схема условного одноосного железнодорожного экипажа

$$\begin{cases} M_k \ddot{z}_k + \beta_{\text{ц}} (\dot{z}_k - \dot{z}_t) + \mathcal{J}_{\text{ц}} (z_k - z_t) = 0; \\ M_t \ddot{z}_t - \beta_{\text{ц}} \dot{z}_k + (\beta_{\text{ц}} + \beta_{\text{б}}) \dot{z}_t - \beta_{\text{б}} \dot{z}_{\text{к.п}} - \mathcal{J}_{\text{ц}} z_k + (\mathcal{J}_{\text{ц}} + \mathcal{J}_{\text{б}}) z_t - \mathcal{J}_{\text{б}} z_{\text{к.п}} = 0; \\ (M_{\text{к.п}} + M_{\text{п}}) \ddot{z}_{\text{к.п}} - \beta_{\text{б}} \dot{z}_t + (\beta_{\text{б}} + \beta_{\text{п}}) \dot{z}_{\text{к.п}} - \mathcal{J}_{\text{б}} z_t + (\mathcal{J}_{\text{б}} + \mathcal{J}_{\text{п}}) z_{\text{к.п}} = M_{\text{п}} \ddot{\eta} + \beta_{\text{п}} \dot{\eta} + \mathcal{J}_{\text{п}} \eta, \end{cases} \quad (2)$$

где $\eta(t)$ – геометрическая неровность железнодорожного пути, и пока для нас неважно каким образом она описывается. Преобразуем систему уравнений (2) к векторно-матричной форме записи, которая является наиболее удобной для аналитического или численного решения задачи:

$$A \ddot{\vec{q}} + B \dot{\vec{q}} + C \vec{q} = \vec{F}(t), \quad (3)$$

здесь $A = \text{diag}(M_k, M_t, M_{\text{к.п}} + M_{\text{п}})$ – матрица инерционных коэффициентов условного обобщенного одноосного экипажа, имеющая диагональный вид;

$$B = \begin{pmatrix} \beta_{\text{ц}} & -\beta_{\text{ц}} & 0 \\ -\beta_{\text{ц}} & \beta_{\text{ц}} + \beta_{\text{б}} & -\beta_{\text{б}} \\ 0 & -\beta_{\text{б}} & \beta_{\text{б}} + \beta_{\text{п}} \end{pmatrix} \text{ – матрица диссипативных коэффициентов экипажа;}$$

$$C = \begin{pmatrix} \mathcal{J}_{\text{ц}} & -\mathcal{J}_{\text{ц}} & 0 \\ -\mathcal{J}_{\text{ц}} & \mathcal{J}_{\text{ц}} + \mathcal{J}_{\text{б}} & -\mathcal{J}_{\text{б}} \\ 0 & -\mathcal{J}_{\text{б}} & \mathcal{J}_{\text{б}} + \mathcal{J}_{\text{п}}(t) \end{pmatrix} \text{ – матрица жесткостных коэффициентов экипажа;}$$

$$\vec{q} = \begin{pmatrix} z_k \\ z_t \\ z_{\text{к.п}} \end{pmatrix} \text{ – вектор обобщенных координат условного обобщенного одноосного экипажа;}$$

$$\vec{F}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{\text{п}} \ddot{\eta}(t) + \beta_{\text{п}} \dot{\eta}(t) + \mathcal{J}_{\text{п}} \eta(t) \end{pmatrix} \text{ – вектор внешнего возмущения, действующего на же-}$$

лезнодорожный экипаж.

Далее решение задачи ветвится в зависимости от того, будут ли элементы матрицы C постоянными величинами или нет.

1. Примем жесткость железнодорожного пути постоянной, т. е. $\mathcal{J}_{\text{п}} = \text{const}$. Вычислим собственные частоты экипажа для консервативного случая, воспользовавшись математическим пакетом Mathcad $\vec{k}_0 = \text{eigenvals}(A^{-1}C)$. В результате получим вектор собственных частот

$$\vec{k}_0 = (k_{0\text{к}} \quad k_{0\text{т}} \quad k_{0\text{к.п}})^T, \quad (4)$$

где $k_{0\text{к}}$, $k_{0\text{т}}$, $k_{0\text{к.п}}$ – собственные частоты подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары соответственно. Индекс T означает транспонирование. Например, для исходных данных электровоза ВЛ10 они оказались такими: 1,42; 4,49 и 18,37 – соответственно для подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары (Гц). Если допустить, что геометрическая неровность описывается гармонической функцией (это предположение допустимо для волнообразного износа железнодорожного пути)

$$\eta(t) = \eta_0 \sin \omega t, \quad (5)$$

здесь η_0 – амплитуда геометрической неровности; $\omega = \pi V / 1,8L$ – частота внешнего возмущения; V – скорость движения, км/ч; L – длина геометрической неровности, м, то несложно определить три значения резонансной скорости движения железнодорожного экипажа:

$$\left(V_{\kappa} = \frac{1,8k_{0\kappa}L}{\pi}; \quad V_{\tau} = \frac{1,8k_{0\tau}L}{\pi}; \quad V_{\kappa,\Pi} = \frac{1,8k_{0\kappa,\Pi}L}{\pi} \right)^T. \quad (6)$$

А так как на железнодорожном пути можно обнаружить множество различных длин неровностей условно периодических, то какой-либо узел экипажа будет находиться в резонансном режиме даже в диапазоне эксплуатационных скоростей конкретного участка железной дороги. Нужно, конечно же, еще помнить о галопировании кузова и тележки (в нашей расчетной схеме они опущены), следовательно, добавятся еще две собственных частоты и соответственно две резонансных скорости.

Если геометрическая неровность является стационарным случайным процессом с известной спектральной плотностью $S_{\eta}(V, \omega)$, то внешнее возмущение можно записать так:

$$\zeta(t) = M_{\Pi} \left[\ddot{\zeta}(t) + 2n_{\Pi}\dot{\zeta}(t) + k_{0\Pi}^2\zeta(t) \right]. \quad (7)$$

Далее несложные действия и применение преобразования Лапласа дают нам такое значение спектральной плотности для переменной $\zeta(t)$:

$$S_{\zeta}(V, \omega) = M_{\Pi}^2 \left[(k_{0\Pi}^2 - \omega^2)^2 + 4n_{\Pi}^2\omega^2 \right] S(V, \omega), \quad (8)$$

где $k_{0\Pi}^2 = \alpha_{\Pi}/M_{\Pi}$, $2n_{\Pi} = \beta_{\Pi}/M_{\Pi}$ – вспомогательные параметры для принятой по умолчанию дискретной инерционной математической модели железнодорожного пути. Воспользовавшись известной методикой Винера – Хопфа, можно написать:

$$\begin{cases} S_{z_{\kappa}}(V, \omega) = |W_{z_{\kappa}}(j\omega)|^2 S_{\zeta}(V, \omega); \\ S_{z_{\tau}}(V, \omega) = |W_{z_{\tau}}(j\omega)|^2 S_{\zeta}(V, \omega); \\ S_{z_{\kappa,\Pi}}(V, \omega) = |W_{z_{\kappa,\Pi}}(j\omega)|^2 S_{\zeta}(V, \omega), \end{cases} \quad (9)$$

здесь $|W_{z_{\kappa}}(j\omega)|$, $|W_{z_{\tau}}(j\omega)|$, $|W_{z_{\kappa,\Pi}}(j\omega)|$ – модули передаточных функций подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары соответственно.

Кратко остановимся на методике прямого вычисления передаточных функций системы дифференциальных уравнений (3). Выполним преобразование Лапласа над системой дифференциальных уравнений (3), тогда получим:

$$(Ap^2 + Bp + C)\vec{q}(p) = \vec{F}(p), \quad (10)$$

где p – оператор дифференцирования; $\vec{q}(p)$, $\vec{F}(p)$ – изображения векторов выходных и входных координат экипажа. Распишем выражение для правой части уравнения (10):

$$\vec{F}(p) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{\Pi} [p^2 + 2n_{\Pi}p + k_{0\Pi}^2] \eta(p) \end{pmatrix} = M_{\Pi} [p^2 + 2n_{\Pi}p + k_{0\Pi}^2] \eta(p) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Следовательно, разделив левую и правую части системы (10) на изображение возмущения $\eta(p)$ и введя обозначение для вектора передаточных функций $\vec{W}(p)$, имеем вместо (10) следующее:

$$(Ap^2 + Bp + C)\vec{W}(p) = M_{\Pi} (p^2 + 2n_{\Pi}p + k_{0\Pi}^2) (0 \ 0 \ 1)^T, \quad (12)$$

здесь $\vec{W}(p) = \begin{pmatrix} W_{z_k}(p) \\ W_{z_T}(p) \\ W_{z_{к.п}}(p) \end{pmatrix}$ – вектор передаточных функций системы «экипаж – железнодорожный путь».

Возвращаясь к оригиналам, полагая, что $p = j\omega$ и $\vec{W}(j\omega) = \vec{W}_R(\omega) + j\vec{W}_I(\omega)$, имеем:

$$D(\omega)\vec{X} = \vec{Q}, \quad (13)$$

где

$$D(\omega) = \begin{pmatrix} C - \omega^2 A & -\omega B \\ \omega B & C - \omega^2 \end{pmatrix}; \quad (14)$$

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} \vec{W}_R \\ \vec{W}_I \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{\Pi}(k_{0\Pi}^2 - \omega^2) \\ 0 \\ 0 \\ 2M_{\Pi}n_{\Pi}\omega \end{pmatrix}; \quad (16)$$

$$\vec{W}_R(j\omega) = \begin{pmatrix} W_{Rz_k}(j\omega) \\ W_{Rz_T}(j\omega) \\ W_{Rz_{к.п}}(j\omega) \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$\vec{W}_I(j\omega) = \begin{pmatrix} W_{Iz_k}(j\omega) \\ W_{Iz_T}(j\omega) \\ W_{Iz_{к.п}}(j\omega) \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Таким образом, резонансы будут проявлять себя на спектральных плотностях выходных координат z_k , z_T и $z_{к.п}$ в виде «пиков». Дальнейшая идентификация геометрической неровности железнодорожного пути состоит в том, что скорость экипажа и резонансные частоты известны, поэтому следует определять длины:

$$\left(L_k = \frac{\pi V}{1,8k_{0k}}; \quad L_T = \frac{\pi V}{1,8k_{0T}}; \quad L_{к.п} = \frac{\pi V}{1,8k_{0к.п}} \right). \quad (19)$$

Для линейной динамической системы справедлив принцип суперпозиции, поэтому геометрические неровности железнодорожного пути представляют собой сумму соответствующих гармоник.

2. Гораздо сложнее дело обстоит в том случае, если **механическая система «экипаж – путь» описывается нелинейными дифференциальными уравнениями**. Тогда понятие резонанса трактуется по-другому. Известно, что собственные частоты таких динамических систем зависят от соответствующих амплитуд колебаний, следовательно, уже нельзя утверждать, что при совпадении собственных частот с частотами возмущающих факторов возникает резонанс, ведь собственные частоты меняются со временем и в последующие моменты времени совпадение частот невозможно. Обычно в этом случае исходят из равенства работ дис-

сипативных и возмущающих сил на периоде колебаний узлов подвижного состава железных дорог. Известно, что амплитудно-частотные характеристики таких систем с жесткими упругими свойствами изгибаются вправо. Это значит, что резонансные скорости экипажа будут зависеть от соответствующих амплитуд колебаний узлов экипажа.

Подробно познакомиться со свойствами нелинейных колебательных систем можно по работе [6]. В нелинейной системе резонансные явления возникают не только при $\omega \approx k_{0n}$, как в обычных линейных системах, но и в случае, если одна из комбинационных частот внешнего воздействия близка к какой-либо собственной частоте системы. Следовательно, в нелинейных системах резонанс может наступить при выполнении условия:

$$k_{0n} = \frac{p}{q} \omega, \quad (20)$$

здесь p и q – целые взаимно простые числа (обычно небольшие); k_{0n} – n -я собственная парциальная частота механической системы. Сегодня в теории колебаний принята следующая классификация различных случаев резонанса:

- 1) «главный», или основной, резонанс, когда $p=q=1$, т. е. $k_{0n} \approx \omega$;
- 2) резонанс на обертоне собственной частоты, или параметрический резонанс, когда $p = 1$, т. е. $\omega \approx qk_{0n}$ или $k_{0n} \approx \omega/q$; резонанс данного типа возможен в линейных системах с периодическими коэффициентами;
- 3) резонанс на обертоне внешней частоты, когда $q = 1$, т. е. $k_{0n} \approx p\omega$.

Таким образом, при аналитическом, или численном, исследовании необходимо тщательно анализировать области указанных выше частот, иначе можно прийти к неверным заключениям. К сожалению, математика не представляет нам регулярных методов интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений, следовательно, мы вынуждены применять приближенные методы, в которых нужно задаваться каким-либо видом решения (3), при этом легко можно ошибиться.

3. В предыдущих пунктах жесткость пути считалась постоянной по его длине. **Железнодорожный путь в действительности не является равноупругим по его протяженности** из-за большого числа физических факторов, которые нам неважны, а важны математические аспекты учета этого обстоятельства в математических моделях подвижного состава. Неравноупругость пути, очевидно, будет проявлять себя в математических моделях мультипликативным и аддитивным образом.

Так как мы интересуемся резонансными скоростями железнодорожного подвижного состава, то необходимо помнить о том, что в параметрических дифференциальных уравнениях существуют простые, комбинационные суммарного или разностного типа параметрические резонансы (области неустойчивости, где решения неограниченно возрастают). Следовательно, и резонансные скорости нужно уметь определять для указанных выше параметрических резонансов. Поэтому в качестве математической модели можно принять такую систему дифференциальных уравнений, т. е. учесть только мультипликативную составляющую неравноупругости пути, отбросив ее аддитивную составляющую, которая характеризует изменение положения статического равновесия экипажа на пути (фактически это переносные ускорения, действующие на узлы подвижного состава):

$$A\ddot{\vec{q}} + B\dot{\vec{q}} + C(t)\vec{q} = 0, \quad (21)$$

где матрица жесткостных коэффициентов имеет теперь следующий вид:

$$C(t) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\text{ц}} & -\varepsilon_{\text{ц}} & 0 \\ -\varepsilon_{\text{ц}} & \varepsilon_{\text{ц}} + \varepsilon_{\text{б}} & -\varepsilon_{\text{б}} \\ 0 & -\varepsilon_{\text{б}} & \varepsilon_{\text{б}} + \varepsilon_0 (1 + 2\mu \cos 2\omega t) \end{pmatrix}, \quad (22)$$

здесь ε_0 – средняя на рельсовом звене жесткость железнодорожного пути; μ – коэффициент параметрического возбуждения; ω – частота параметрического возмущения:

$$\omega = \pi V / 3,6 l_{\text{шп}}; \quad (23)$$

V – скорость движения железнодорожного экипажа, км/ч; $l_{\text{шп}}$ – междушпальное расстояние железнодорожного пути (для заданной эпоры шпал в 1840 шт./км $l_{\text{шп}} \approx 0,54348$), м. Преобразуем уравнение (21) так:

$$A\ddot{\vec{q}} + B\dot{\vec{q}} + (C_0 + 2\mu F \cos 2\omega t)\vec{q} = 0, \quad (24)$$

где

$$C_0 = \begin{pmatrix} \mathcal{K}_y & -\mathcal{K}_y & 0 \\ -\mathcal{K}_y & \mathcal{K}_y + \mathcal{K}_\delta & -\mathcal{K}_\delta \\ 0 & -\mathcal{K}_\delta & \mathcal{K}_\delta + \mathcal{K}_0 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathcal{K}_0 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Используя нормальные координаты, вместо выражения (24) получим уравнение в главных осях матрицы $A^{-1}C_0$:

$$\ddot{\vec{X}} + \tilde{B}\dot{\vec{X}} + \tilde{C}(1 + 2\mu\tilde{F} \cos 2\omega t)\vec{X} = 0. \quad (27)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{cases} \tilde{B} = U^{-1}A^{-1}BU; \\ \tilde{C} = U^{-1}A^{-1}C_0U = \text{diag}(k_{0k}, k_{0r}, k_{0k.n}); \\ \tilde{F} = \tilde{C}^{-1}U^{-1}A^{-1}FU, \end{cases} \quad (28)$$

где U – матрица, составленная по столбцам из собственных форм консервативной системы, которые легко находятся с помощью математического пакета Mathcad, а именно стандартной функции $U = \text{eigenvals}(A^{-1}C_0)$, $\vec{q} = U\vec{X}$. Положив, что диагональные элементы матрицы диссипации $\gamma_j = \tilde{b}_{jj}/k_{0j}$, а при малой диссипации именно эти величины в основном определяют демпфирование свободных колебаний системы, и элементы матрицы \tilde{F} – это f_{jk} . Тогда допус-

тимо воспользоваться несколько откорректированными формулами для границ областей параметрической неустойчивости, полученными методом малого параметра в работах [7–10]. Границы главных областей параметрической неустойчивости при простых главных резонансах

$$\omega = k_{0j} \quad =$$

$= k_{0j}$ определяются по формуле:

$$\omega \approx k_{0j} \left(1 \pm \frac{1}{2} \sqrt{\mu^2 f_{jj}^2 - 4\gamma_j^2} \right), \quad (29)$$

границы главных комбинационных резонансов суммарного типа $\omega = (k_{0j} + k_{0k})/2$ определяются по выражению:

$$\omega \approx \frac{1}{2} \left(k_{0j} + k_{0k} \pm \frac{\gamma_j k_{0j} + \gamma_k k_{0k}}{\sqrt{\gamma_j \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 f_{jk} f_{kj} - 4\gamma_j \gamma_k} \right), \quad (30)$$

если $f_{jk}f_{kj} < 0$, то вычисляем границы главных комбинационных резонансов разностного типа $\omega = (k_{0j} - k_{0k})/2$ по формуле:

$$\omega \approx \frac{1}{2} \left(|k_{0j} - k_{0k}| \pm \frac{|\gamma_j k_{0j} - \gamma_k k_{0k}|}{\sqrt{\gamma_j \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 |f_{jk} f_{kj}| - 4\gamma_j \gamma_k} \right). \quad (31)$$

С учетом соотношения (23) формулы для главных границ областей неустойчивости (29) – (31) могут быть переписаны так (они, разумеется, являются приближенными, ибо не учитывают взаимодействия форм колебаний между собой, и мы вынуждены были ограничивать число гармоник):

$$V \approx \frac{3,6l_{\text{шп}}k_{0j}}{\pi} \left(1 \pm \frac{1}{2} \sqrt{\mu^2 f_{jj}^2 - 4\gamma_j^2} \right), \quad (32)$$

$$V \approx \frac{1,8l_{\text{шп}}}{\pi} \left(k_{0j} + k_{0k} \pm \frac{\gamma_j k_{0j} + \gamma_k k_{0k}}{\sqrt{\gamma_j \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 f_{jk} f_{kj} - 4\gamma_j \gamma_k} \right), \quad (33)$$

$$V \approx \frac{1,8l_{\text{шп}}}{\pi} \left(|k_{0j} - k_{0k}| \pm \frac{|\gamma_j k_{0j} - \gamma_k k_{0k}|}{\sqrt{\gamma_j \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 |f_{jk} f_{kj}| - 4\gamma_j \gamma_k} \right). \quad (34)$$

Выражения (32) – (34) позволяют найти главные резонансные скорости железнодорожных экипажей, но следует помнить о том, что кроме главных областей существуют зоны второго, третьего и так далее порядков и что мы учли только колебания подпрыгивания подвижного состава. Колебания галопирования кузова, тележек и тяговых электрических двигателей при опорно-осевом их подвешивании также дадут области параметрической неустойчивости и, следовательно, найдутся еще зоны резонансных скоростей, которые, разумеется, нужно добавить к уже найденным формулам (32) – (34).

Из формул для комбинационных параметрических резонансов (33), (34) очевидно, что они могут возникать и развиваться только в диссипативных системах. Заметим, что диссипативные силы подвижного состава железных дорог создают порог, превышение которого коэффициентом мультипликативного возмущения просто недопустимо, ибо в отличие от обычного гармонического резонанса амплитуды колебаний колесной пары, тележки и кузова не будут ограничены, а устремятся в бесконечность, следовательно, через какое-то время экипаж перестанет существовать.

В результате математического моделирования были найдены области главных параметрических резонансов частей экипажа для консервативного случая (рисунки 2, 3).

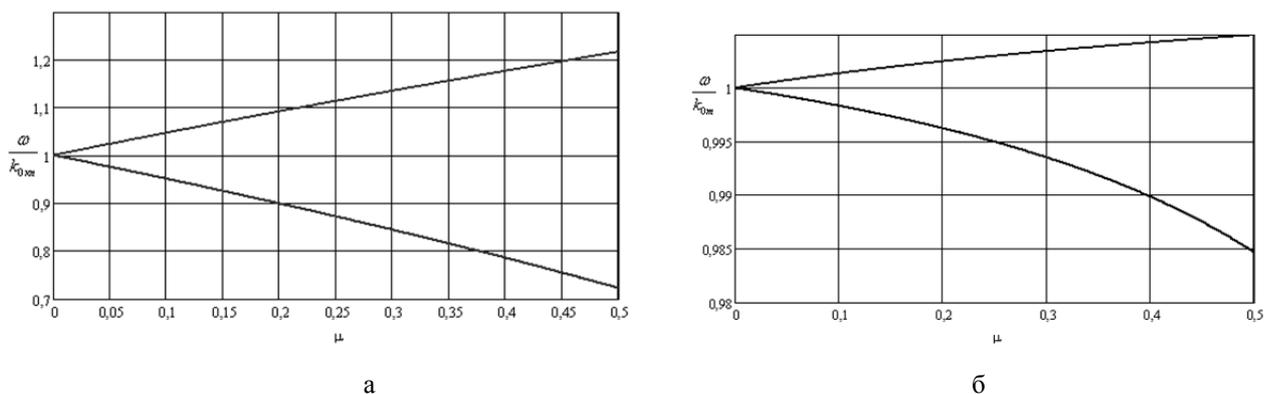


Рисунок 2 – Главные области параметрической неустойчивости в консервативном случае:
а – колесной пары экипажа; б – тележки экипажа

С учетом зависимости (22) были определены зоны резонансных скоростей экипажа (рисунки 4, 5).

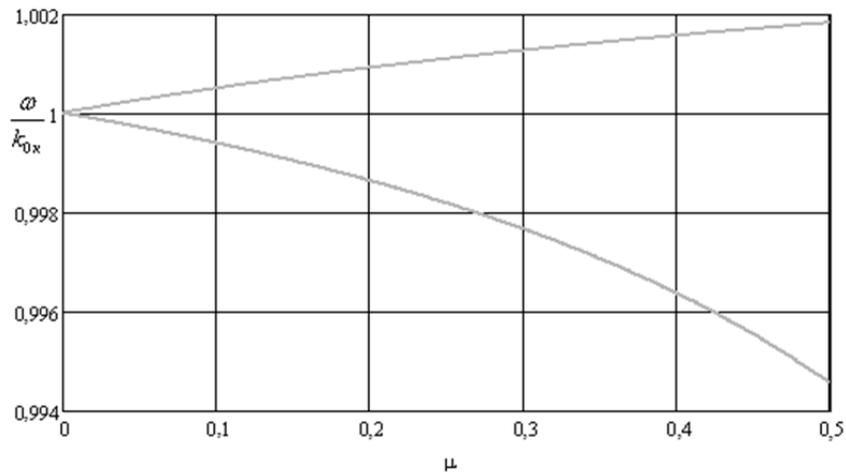


Рисунок 3 – Главная область параметрической неустойчивости кузова экипажа в консервативном случае

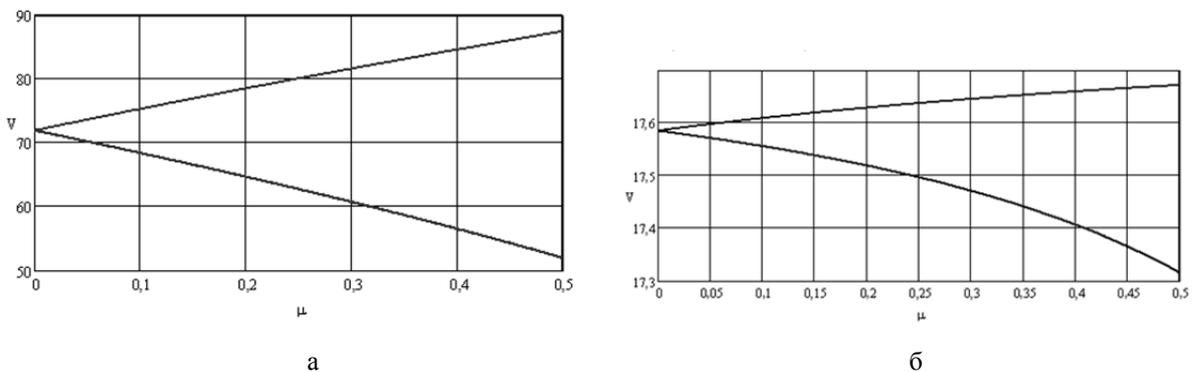


Рисунок 4 – Зоны резонансных скоростей консервативной системы: а – колесной пары экипажа, б – тележки экипажа

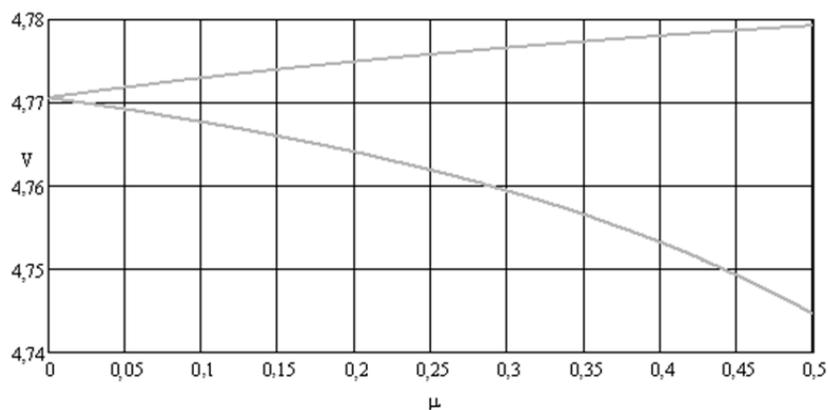


Рисунок 5 – Зона резонансных скоростей кузова экипажа без диссипации

Анализ представленных на рисунках 4, 5 графиков для резонансных скоростей различных частей железнодорожного экипажа убеждает в том, что в область эксплуатационных скоростей подвижного состава попадает только колесная пара. Следует отметить, что с ростом коэффициента параметрического возмущения μ область резонансных скоростей существенно образом расширяется. Однако нужно иметь в виду, что реальное значение коэффициента параметрического возбуждения μ не превышает 0,04 – 0,05.

Для экипажа, обладающего диссипативными силами, собственные частоты подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары равны 1,216; 4,205 и 17,866 (Гц) соответственно. Их сравнение с консервативным случаем указывает на уменьшение собственных частот подпрыгиваний кузова, тележки и колесной пары на 16,8; 6,78 и 2,82 % соответственно. Таким образом, можно сделать вывод о том, что силы вязкого трения в основном влияют на кузов и тележку экипажа и в незначительной степени на его колесную пару.

На рисунке 6 показаны зона главного и второго параметрических резонансов колесной пары экипажа в консервативном и диссипативном случаях, из которого нетрудно установить существование критического значения коэффициента мультипликативного возмущения, так, для колесной пары $\mu_{кр} \approx 0,461$ для главной и $\mu_{кр} \approx 0,59$ для второй зоны.

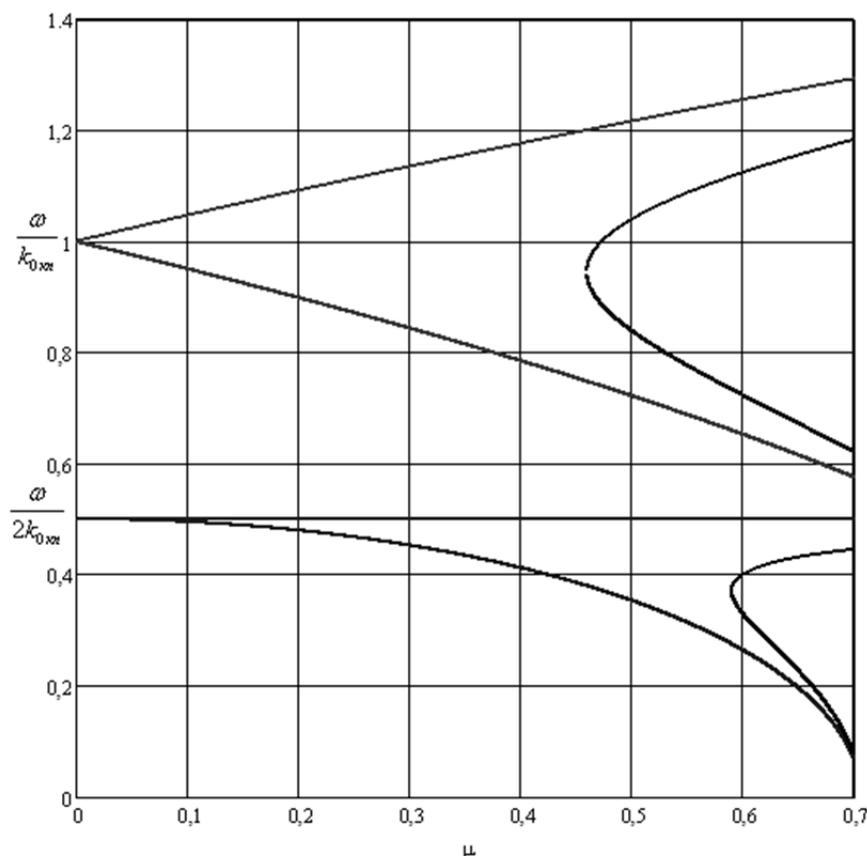


Рисунок 6 – Главная и вторая зоны параметрической неустойчивости колесной пары экипажа: красная и коричневая линии для консервативного случая, синяя и черная линии для диссипативного случая

Критические коэффициенты параметрического возбуждения представлены ниже в виде матрицы, где по главной диагонали даны значения $\mu_{кр}$ для простых резонансов, сверху главной диагонали находятся критические коэффициенты для суммарных комбинационных резонансов, снизу главной диагонали – для разностных комбинационных резонансов:

$$\mu_{кр} = \begin{pmatrix} 26,987 & 24,465 & 3,579 \\ 24,465 & 22,178 & 3,245 \\ 3,579 & 3,245 & 0,475 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Учитывая, что практически значения средней жесткости железнодорожного пути и коэффициента параметрического возмущения можно вычислить по максимальному и минимальному значениям жесткости в шпальном ящике:

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0 = \frac{1}{2}(\mathcal{H}_{\max} + \mathcal{H}_{\min}); \\ \mu = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{H}_{\max} - \mathcal{H}_{\min}}{\mathcal{H}_{\max} + \mathcal{H}_{\min}}, \end{cases} \quad (36)$$

можно утверждать, что μ находится в диапазоне приблизительно 0,04 – 0,05. Следовательно, в чистом виде ни простые параметрические, ни комбинационные суммарного или разностного типов резонансы не могут возбудиться. На рисунке 7 приведены области резонансных скоростей колесной пары железнодорожного экипажа для консервативного и диссипативного случаев.

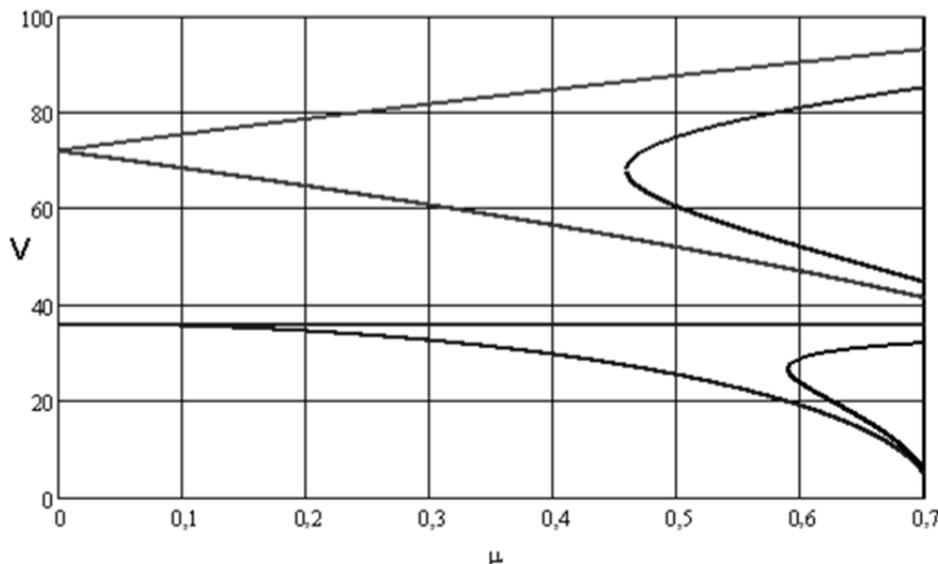


Рисунок 7 – Области резонансных скоростей колесной пары экипажа:
красная и коричневая кривые для консервативного случая,
синяя и черная кривые для диссипативного случая

В заключение отметим, что в чистом виде любые параметрические резонансы в диссипативной системе, каковой является любой железнодорожный экипаж, возникнуть не могут. Но попадание в ограниченные области (между красными и синими линиями, коричневыми и черными) параметрического резонанса приводит в действие другой эффект мультипликативного возмущения, заключающийся во взаимодействии вынужденных и параметрически возбуждаемых колебаний, и амплитуды вынужденных колебаний могут как увеличиваться, так и уменьшаться (все зависит от фазовых соотношений) [7 – 9, 11].

Согласно выводам работ [7 – 9, 11] нужно иметь в виду, что если все элементы матрицы F в уравнении (23) имеют одинаковый порядок, то относительная ширина всех главных областей неустойчивости, измеряемая по отношениям частот, обладает одинаковым порядком μ . При слабой связи между обобщенными координатами области комбинационных резонансов могут оказаться по ширине уже областей простых резонансов. Напротив, если диагональные элементы матрицы F в главных осях матрицы $A^{-1}C$ равны нулю или малы по модулю по сравнению с недиагональными элементами (для рассматриваемого примера имеем

$$\begin{pmatrix} 0,01092 & 0,044167 & -1,121581 \\ 0,007389 & 0,029884 & -0,758858 \\ -0,009339 & -0,037773 & 0,959196 \end{pmatrix}),$$

то области простых резонансов будут по ширине уже областей комбинационных резонансов того же порядка.

Как и в системах с одной степенью свободы, диссипация приводит к невозможности возникновения неустойчивости при малых глубинах параметрической модуляции, это прояв-

ляется в большей степени на побочных резонансах, чем на главных. Установлено [7 – 10], что в системах с несколькими степенями свободы возможен дестабилизирующий эффект диссипации, состоящий в расширении малых комбинационных областей при введении в систему без диссипации диссипативных сил с существенно различными парциальными коэффициентами.

Что же в действительности происходит в зонах комбинационных параметрических резонансов в настоящее время автору неизвестно, так как их теория еще слабо развита и достаточно громоздка. Видимо, продольная неравноупругость железнодорожного пути должна нормироваться, ибо создает достаточно большие переносные ускорения, действующие на узлы подвижного состава [12]. Кроме шпальной неравножесткости встречаются другие длины волн, а это может отразиться, например, на колебаниях подпрыгивания и галопирования кузова и тележки железнодорожного подвижного состава.

Таким образом, необходимо составлять жесткостные карты железных дорог, что возможно осуществить только с помощью натуральных экспериментов, о чем мечтал мой учитель заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Пахомов Михаил Прокопьевич.

Список литературы

1. Папалекси, Н. Д. Эволюция понятия резонанса. Успехи физических наук [Текст] / Н. Д. Папалекси. – М., 1947. – Т. XXXI. – Вып. 4. – С. 447 – 460.
2. 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.
3. Суслов, Г. К. Теоретическая механика [Текст] / Г. К. Суслов. – М.-Л.: Гостехиздат, 1946. – 656 с.
4. Колесников, К. С. Курс теоретической механики [Текст] / Под ред. К. С. Колесникова / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2002. – 736 с.
5. Галиев, И. И. Методы и средства виброзащиты железнодорожных экипажей [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2010. – 340 с.
6. Колебания нелинейных механических систем. Вибрации в технике: Справочник [Текст] / Под ред. И. И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 2. – 351 с.
7. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.
8. . Болотин, В. В. Колебания линейных систем. Вибрации в технике: Справочник [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 352 с.
9. Шмидт, Г. Параметрические колебания [Текст] / Г. Шмидт. – М.: Мир, 1978. – 337 с.
10. F.Weidenhammer. Zufallschwingungen. – Zeitschr. angew. Math. Und Mech., Sonderheft (GAMM – Tagung), Bd. 47, 1967, p. 25 – 28.
11. Нехаев, В. А. Взаимодействие экипажа с квазиинвариантной системой подвешивания и неравноупругого по протяженности пути [Текст]: Дис... канд. техн. наук. – Омск, 1983. – 217 с.
12. Неравноупругость пути и динамика железнодорожного экипажа с учетом нелинейной связи между обобщенными координатами [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев и др. / Казахская академия транспорта и коммуникаций. – Алматы, 2014. – 134 с.

References

1. Papaleksi N. D. *Evoliutsiia poniatiiia rezonansa. Uspekhi fizicheskikh nauk* (Evolution of the concept of resonance. Successes of physical sciences). – Moscow, 1947, T. XXXI, no. 4, pp. 447 – 460.

2. Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Cheltygmashev E. P. Justification of the choice of the design scheme of the railway crew for the evaluation 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.

3. Suslov G. K. *Teoreticheskaia mekhanika* (Theoretical mechanics). Moscow L.: Gostekhizdat, 1946, 656 p.

4. Kolesnikov K. S. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* (Course of theoretical mechanics). Moscow: MG TU, 2002, 736 p.

5. Galiev I. I., Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. *Metody i sredstva vibrozashchity zheleznodorozhnykh ekipazhei* (Methods and means of vibration protection of railway carriages). Moscow: GOU «Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniuu na zheleznodorozhnom transporte», 2010, 340 p.

6. Blekhmana I. I. *Kolebaniia nelineinykh mekhanicheskikh sistem. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik* (Oscillations of nonlinear mechanical systems. Vibration in technology). Moscow: Mashinostroenie, 1979, T. 2, 351 p.

7. Bolotin V. V. *Dinamicheskaiia ustoichivost' uprugikh sistem* (Dynamic stability of elastic systems). Moscow: Gostekhizdat, 1956, 600 p.

8. Bolotin V. V. *Kolebaniia lineinykh sistem. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik* (Oscillations of linear systems. Vibration in technology). Moscow: Mashinostroenie, 1978, T. 1, 352 p.

9. Shmidt G. *Parametricheskie kolebaniia* (Parametric oscillations). Moscow: Mir, 1978, 337 p.

10. F. Weidenhammer. Zufallschwingungen. – *Zeitschr. angew. Math. Und Mech.*, Sonderheft (GAMM – Tagung), Bd. 47, 1967, pp. 25 – 28.

11. Nekhaev V. A. *Vzaimodeistvie ekipazha s kvaziinvariantnoi sistemoi podveshivaniia i neravnouprugogo po protiazhennosti puti* (Interaction of a crew with a quasi-invariant suspension system and a non-uniformly elastic path length). Ph. D. thesis, Omsk, OmIIT, 1983, 217p.

12. Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Solonenko V. G., Makhmetova N. M. *Neravnouprugost' puti i dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha s uche-tom nelineinoi sviazi mezhd u obobshchennymi koordinatami* (Nonuniformity of the path and dynamics of the railway crew, taking into account the nonlinear connection between the generalized coordinates). Almaty: KazATK, 2014, 134 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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, +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: NехаevVA@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nekhaev Victor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Theoretical Mechanics» Omsk State Transport University.

Phone: +7 (3812) 37-60-82, +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: NехаevVA@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Определение резонансных скоростей подвижного состава [Текст] / В. А. Нехаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 11 – 23.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V. A. Defining for RMS-velocity of rolling stock. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 11 – 23. (In Russian).

УДК 629.4.027.4

А. В. Обрывалин, В. В. Дюндин

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

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ «БАНДАЖ – КОЛЕСНЫЙ ЦЕНТР» ВСЛЕДСТВИЕ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА МАТЕРИАЛА БАНДАЖА

***Аннотация.** В статье рассмотрены основные причины ослабления посадки бандажей колесных пар локомотивов, приводящие к их провороту на колесном центре. Предложено новое конструктивно-технологическое решение, направленное на повышение прочности посадки бандажа на колесный центр. При этом рассмотрены основные варианты получения предложенного соединения. Представлены предварительные расчеты, определяющие наиболее эффективные варианты сопряжения, направленные на обеспечение равномерного натяга и повышения площади контакта при посадке бандажа на колесный центр.*

Конструктивное решение, приведенное в статье, может быть использовано при совершенствовании технологии формирования колесных пар тягового подвижного состава, что в свою очередь способствует повышению надежности колесных пар локомотивов и сокращению простоя локомотивов на ремонте.

Ключевые слова: колесная пара, бандаж, колесный центр, проворот, посадка с натягом, конус.

Aleksey V. Obryvalin, Vadim V. Dyundin

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

RAISING THE BONDING STRENGTH «BANDAGE – WHEEL CENTER» DUE TO A UNIFORM DISTRIBUTION OF THE VOLUME OF THE BANDAGE MATERIAL

***Abstract.** In article the questions connected with cranking of bandages on the wheel center arising because of weakening of interference fit. Authors suggest to consider the possibility of use of conic interference fit instead of cylindrical. For this purpose considered possible options for manufacturing the proposed connection. Revealed of the optimum angles conjugation aimed at a uniform distribution of metal bandage volume.*

Designed wheel design can be widely used in traction rolling stock. The result is reduced the duration of the repair of locomotives associated with the replacement and constriction bandages.

Keywords: wheelset, bandage, wheel center, cranking, interference fit, cone.

Повышение эксплуатационной надежности колесных пар тягового подвижного состава (ТПС) является в настоящее время актуальным направлением. От надежности колесных пар напрямую зависит безопасность как пассажирских, так и грузовых перевозок.

Одной из основных неисправностей составных колес тягового подвижного состава является проворот бандажа, возникающий вследствие ослабления натяга бандажа на колесном центре. По оценке специалистов, от 2 до 6 % всех эксплуатируемых бандажей на российских железных дорогах выходят из строя по причине ослабления их посадки на обод колесного центра, вследствие чего локомотив вынужден находиться в длительном простое на ремонте, направленном на перетяжку и замену бандажа [1].

К основным факторам, оказывающим отрицательное влияние на прочность посадки соединения «бандаж – колесный центр», можно отнести

несоблюдение микро- и макрогеометрии при обработке посадочных поверхностей бандажа и колесного центра;

нарушение режимов тепловой посадки бандажа на колесный центр;

ударные воздействия, возникающие в эксплуатации при прохождении рельсовых стыков колесной парой;

тепловое воздействие, вызванное фрикционным торможением, которое в совокупности с другими факторами может привести к разупрочнению бандажа на колесном центре.

В настоящее время одним из приоритетных направлений является внедрение локомотивов нового поколения. В связи с повышением тяговых и скоростных качеств локомотива возрастают требования к колесным парам. Повышение мощности локомотивов приведет к увеличению вероятности проворота бандажей в эксплуатации. Таким образом, повышение прочности соединения бандажа с колесным центром является одной из первоочередных задач.

В последние годы существует тенденция повышения прочности посадки бандажа на колесный центр путем разработки новых конструкторско-технологических решений, направленных на изменение сопряжения посадочных поверхностей. Авторами работы [2] предложено повышение прочности соединения путем установки в колесный центр дополнительных элементов. В предложенной авторами конструкции силами сжатия упругих элементов вставок создаются зоны сопряжения, обеспечивающие дополнительное сопротивление к провороту бандажа. Повышение прочности соединения достигается тем, что сила сжатия упругих элементов, установленных в пазах колесного центра, превышает посадочное давление при посадке с натягом бандажа на колесный центр.

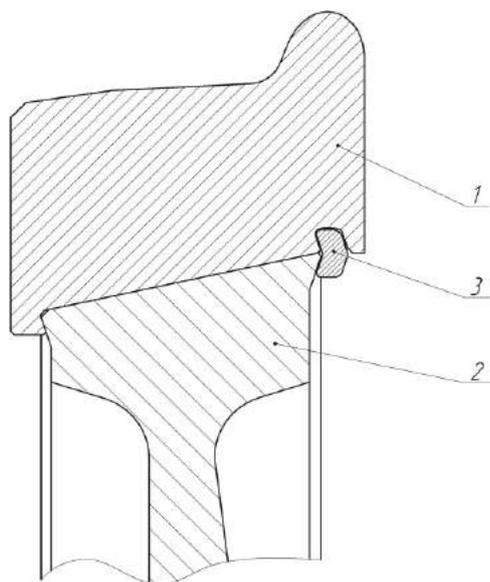


Рисунок 1 – Соединение бандажа с колесным центром по коническому сопряжению: 1 – бандаж; 2 – колесный центр; 3 – бандажное кольцо

Целью данной работы является предложение решения по повышению прочности соединения «бандаж – колесный центр» путем изменения профиля сопряжения без установки дополнительных элементов. Такой подход обоснован тем, что установка дополнительных элементов или промежуточных материалов в соединении приведет не только к усложнению конструкции, что повлияет на стоимость изготовления и ремонта, но и существенно усложнит его дальнейшее обслуживание и контроль.

Авторами предлагается новое конструктивное исполнение колеса тягового подвижного состава, в котором сборка соединения «бандаж – колесный центр» осуществляется по коническому сопряжению без увеличения регламентированного натяга. Эскиз предлагаемой посадки бандажа на колесный центр приведен на рисунке 1.

Повышение прочности предложенного соединения достигается путем придания сопряженным поверхностям бандажа и колесного центра конической формы. Такое конструктивное изменение посадки направлено на повышение точности сборки и выравнивание объема металла по поперечному сечению.

Для составных колес ТПС можно выделить три основных способа получения конической посадки. В качестве примера рассмотрен бандаж составного колеса тепловоза, имеющего по кругу катания диаметр 1050 мм. Для сравнения на рисунке 2, а представлен стандартный вариант цилиндрической посадки с натягом бандажа на колесный центр.

Первый способ посадки бандажа возможен при увеличении диаметра колесного центра и уменьшении толщины бандажа. Рассматриваемый вариант, приведенный на рисунке 2, б, по предварительной оценке нецелесообразен, так как приведет к значительному сокращению эксплуатационного ресурса бандажа.

Второй способ, приведенный на рисунке 2, в, возможен при незначительном изменении объема материала бандажа и колесного центра, при этом объем металла бандажа равномерно распределяется в поперечном сечении.

Третий способ, приведенный на рисунке 2, г, возможен за счет уменьшения колесного центра и увеличения толщины бандажа. Рассматриваемый вариант по предварительной

оценке, как и первый, нецелесообразен, так как приведет к уменьшению колесного центра, что способствует снижению надежности колесной пары.

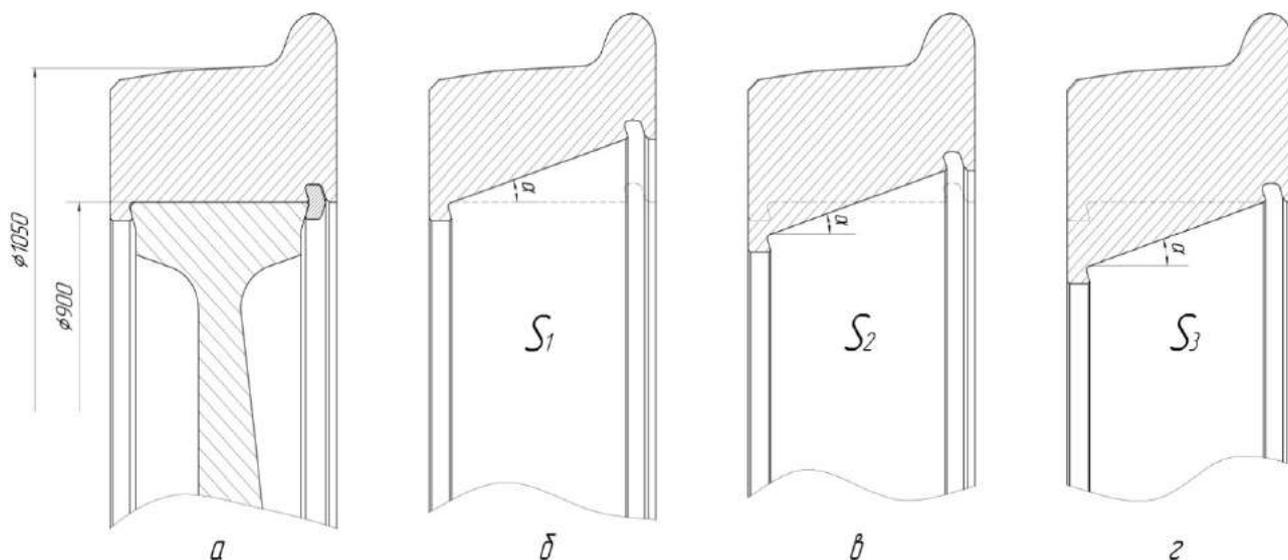


Рисунок 2 – Варианты посадки бандажа на колесный центр

Для предложенных вариантов посадки бандажа на колесный центр проведены расчеты площади контакта сопряженных поверхностей S в зависимости от угла сопряжения α . Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов площади контакта бандажа с колесным центром

Угол сопряжения α , °	Номинальная площадь контакта сопряжения «бандаж – колесный центр» $S \times 10^2$, мм ²					
	первый способ (S_1)	увеличение площади контакта, %	второй способ (S_2)	увеличение площади контакта, %	третий способ (S_3)	увеличение площади контакта, %
0	3026,202	–	3026,202	–	3026,202	–
2	3040,622	0,48	3028,047	0,06	3015,472	-0,35
4	3058,819	1,08	3033,592	0,24	3008,365	-0,59
6	3080,905	1,81	3042,871	0,55	3004,838	-0,71
8	3107,017	2,67	3055,942	0,98	3004,867	-0,71
10	3137,322	3,67	3072,886	1,54	3008,450	-0,59
12	3172,013	4,82	3093,809	2,23	3015,605	-0,35
14	3211,321	6,12	3118,845	3,06	3026,369	0,01
16	3255,510	7,58	3148,156	4,03	3040,803	0,48
18	3304,888	9,21	3181,937	5,15	3058,986	1,08

По полученным расчетам построена зависимость, изображенная на рисунке 3, площади контакта от угла сопряжения соединения «бандаж – колесный центр» для трех вариантов посадки.

Анализируя полученные данные, можно заключить, что наиболее оптимальным вариантом конической посадки соединения «бандаж – колесный центр» является способ, показанный на рисунке 2, в. Сравнение второго варианта сопряжения со стандартной цилиндрической посадкой дает основание утверждать, что объем материала колесного центра и бандажа существенно не изменится и это не повлияет на эксплуатационную надежность конструкции в целом.

Прочность цилиндрических и конических соединений с натягом в осевом и окружном направлениях ориентировочно оценивают по формулам [3]:

$$F = \pi d l p (f_{oc} \pm tg\alpha); \quad (1)$$

$$M_{кр} = \pi d^2 l p f_{кр} / 2, \quad (2)$$

где d – посадочный диаметр соединения, мм;
 l – длина посадочной поверхности, мм;
 p – удельное давление на поверхности посадки, МПа;
 $f_{кр}, f_{ос}$ – коэффициенты трения при кручении и осевом сдвиге;
 α – угол уклона конуса, град.

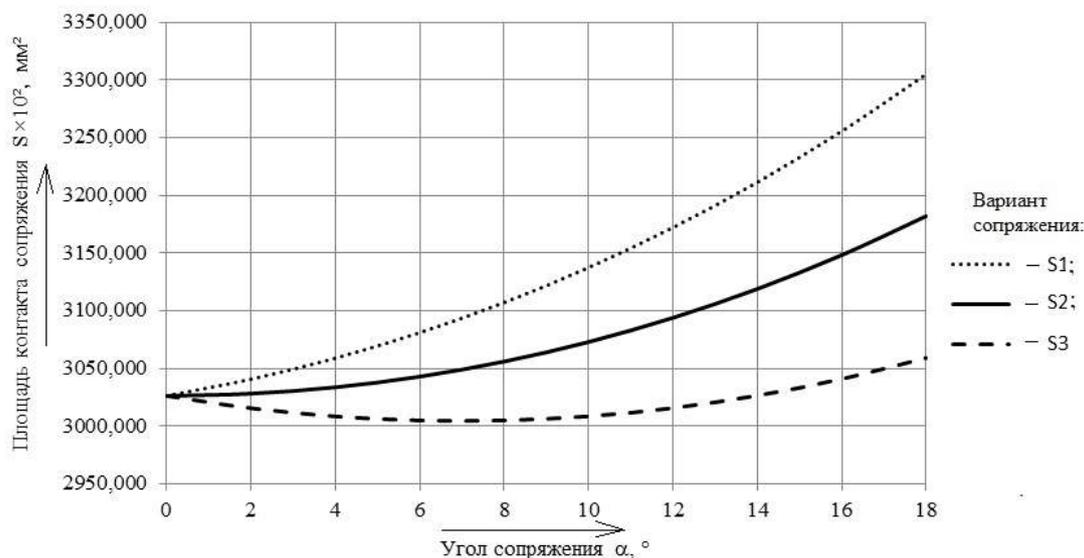


Рисунок 3 – График зависимости площади контакта соединения от угла сопряжения

Из зависимостей (1) и (2) следует, что прочность посадки зависит от контактного давления, эффективной площади сопряжения и коэффициента трения.

Известно, что сборка бандажа с колесным центром осуществляется посредством тепловой посадки с натягом. Тепловую посадку осуществляют при нагреве бандажей до температуры 250 – 300 °С [4]. Режим нагрева для металлов устанавливается в зависимости от свойств нагреваемой стали, размеров и формы деталей. Неравномерное нагревание и охлаждение бандажа при выполнении операции насадки бандажа на колесный центр способствует неравномерному прилеганию сопряженных поверхностей. При проведении экспериментальных исследований в ряде колесных цехов депо и локомотиворемонтных заводов было выявлено, что на отдельных колесных парах площадь прилегания достигала 30 – 45 % и редко доходила до 90 % [5]. Уменьшение площади фактического контакта посадочных поверхностей может быть обусловлено не только геометрическими погрешностями, но и неравномерным

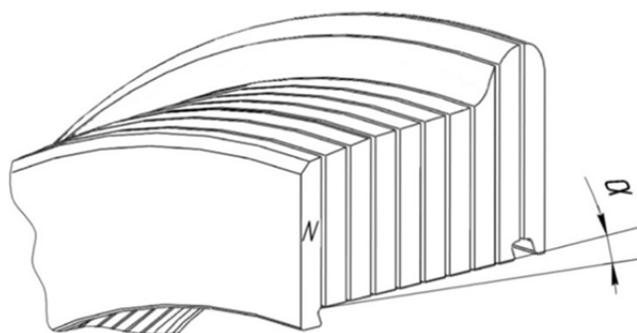


Рисунок 4 – Схема расчета объема бандажа по сегментам

распределением удельного давления при тепловой посадке вследствие криволинейного профиля бандажей.

Как уже было указано, новое конструктивное изменение посадки направлено на выравнивание объема металла по поперечному сечению, что будет способствовать равномерному деформированию металла бандажа и увеличит плотность и качество посадки.

Для определения угла сопряжения α , при котором достигается выравнивание объема материала в поперечном направлении, было произведено разбиение бандажа по сегментам N (рисунок 4).

Расчет объемов произведен для углов сопряжения бандажа с колесным центром от 0 до 18°. Расчет углов, превышающих заданный диапазон, считается нецелесообразным, так как приводит к существенному сокращению толщины бандажа со стороны гребня. Результаты расчетов объемов металла по сегментам в зависимости от угла сопряжения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет объемов металла по сегментам

Сегмент <i>N</i>	Объем металла по сегменту $V \times 10^3, \text{ мм}^3$									
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 2^\circ$	$\alpha = 4^\circ$	$\alpha = 6^\circ$	$\alpha = 8^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 12^\circ$	$\alpha = 14^\circ$	$\alpha = 16^\circ$	$\alpha = 18^\circ$
1	3930,59	4002,91	4075,10	4147,34	4219,79	4292,63	4366,05	4440,23	4515,36	4591,65
2	3719,84	3784,66	3849,39	3914,20	3979,25	4044,69	4110,68	4177,40	4245,01	4313,72
3	3813,63	3859,16	3904,69	3950,32	3996,17	4042,34	4088,96	4136,15	4184,03	4232,74
4	3869,27	3895,49	3921,74	3948,07	3974,56	4001,26	4028,26	4055,61	4083,39	4111,70
5	3902,29	3909,18	3916,08	3923,01	3929,99	3937,03	3944,16	3951,38	3958,73	3966,22
6	3935,37	3922,90	3910,39	3897,81	3885,13	3872,31	3859,32	3846,13	3832,69	3818,96
7	3969,58	3937,74	3905,76	3873,56	3841,07	3808,20	3774,85	3740,95	3706,38	3671,04
8	4344,51	4293,27	4241,76	4189,84	4137,39	4084,26	4030,32	3975,40	3919,36	3862,00
9	5127,47	5057,28	4986,64	4915,38	4843,31	4770,25	4695,99	4620,32	4543,01	4463,81
10	4994,34	4919,44	4844,05	4767,98	4691,04	4613,01	4533,69	4452,85	4370,23	4285,58

По полученным данным построена зависимость распределения объема металла от угла сопряжения по сегментам бандажа (рисунок 5).

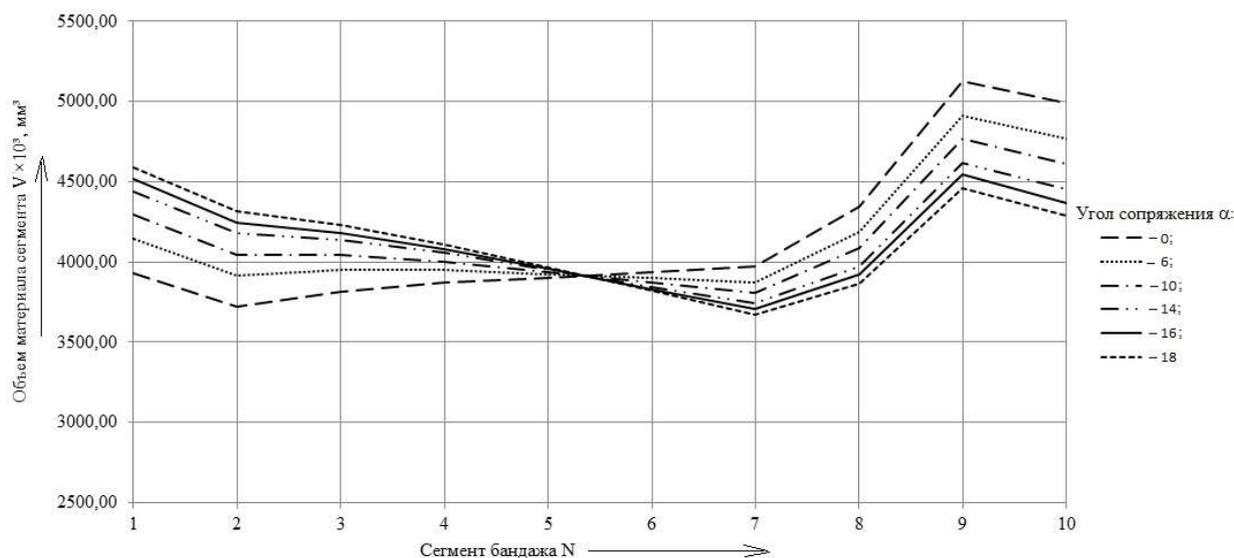


Рисунок 5 – График зависимости распределения объема металла по сегментам бандажа

Анализируя график зависимости, приведенный на рисунке 5, можно сделать вывод о том, что выравнивание объема материала бандажа достигается уже при углах сопряжения $\alpha = 6 - 8^\circ$. Следовательно, выравнивание объема материала бандажа может способствовать повышению плотности посадки бандажа на колесный центр. Это предположение авторов требует экспериментальной проверки.

Таким образом, проводя дополнительно теоретические и экспериментальные исследования, направленные на возможность применения конического сопряжения при посадке бандажа на колесный центр, можно подтвердить существенное повышение прочности предложенного соединения, что в свою очередь способствует повышению надежности колесных пар тягового подвижного состава.

На основании выполненных расчетов будет проводиться дальнейшее теоретическое исследование, направленное на оценку прочности предложенного соединения с учетом динамических нагрузок, возникающих в эксплуатации.

Список литературы

1. Буйносов, А. П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава: Монография [Текст] / А. П. Буйносов / УМЦ ЖДТ. – М., 2010. – 224 с.
2. Бородин, А. В. Повышение несущей способности соединения колесный центр-бандаж [Текст] / А. В. Бородин, Л. В. Ярышева // Локомотив. – 2015. – № 6. – С. 39 – 41.
3. Гречищев, Е. С. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление [Текст] / Е. С. Гречищев, А. А. Ильяшенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
4. Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм с изменениями и дополнениями, утвержденными указанием МПС России от 23.08.2000 – № К-2273у: ЦТ/329. – М.: Транспорт, 2000. – 78 с.
5. Сашко, А. А. Отчего повреждаются бандажи [Текст] / А. А. Сашко // Локомотив. – 2005. – № 10. – С. 36, 37.

References

1. Buinosov A. P. *Metody povysheniia resursa kolesnykh par tiagovogo podvizhnogo sostava* (Methods of increasing the resource of wheel pairs locomotives). Moscow, 2010, 224 p.
2. Borodin A. V., Iarysheva L. V. Increasing the carrier compound to the center of the wheel-bandage [Povyshenie nesushchei sposobnosti soedineniia kolesnyi tsentr-bandazh]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2015, no. 6, pp. 39 – 41.
3. Grechishchev E. S., Ilyashenko A. A. *Soedineniia s natiagom: Raschety, proektirovanie, izgotovlenie* (Compounds with interference: Calculation, design, manufacture). Moscow: Mashinostroenie, 1981, 247 p.
4. *Instruktsiia po formirovaniuu, remontu i sodержaniuu kolesnykh par tiagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog kolei 1520 mm* (Instructions for the formation and repair of wheel pairs locomotives railways of 1520 mm), Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation, 2000, 78 p.
5. Sashko A. A. Why damaged bandages [Otchego povrezhdaiutsia bandazhi]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2005, no. 10, pp. 36, 37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Обрывалин Алексей Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

Дюндин Вадим Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: DyundinVV@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Obryvalin Aleksey Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

Dyundin Vadim Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Graduate student of the department «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: DyundinVV@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Обрывалин, А. В. Повышение прочности соединения «бандаж – колесный центр» вследствие равномерного распределения объема материала бандажа [Текст] / А. В. Обрывалин, В. В. Дюндин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 24 – 30.

Obryvalin A. V., Dyundin V. V. Raising the bonding strength bandage – wheel center due to a uniform distribution of the volume of the bandage material. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 24 – 30. (In Russian).

УДК 629.424.3

К. А. Рябко, Е. В. Рябко

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ), г. Донецк, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КРЫШЕК ЦИЛИНДРОВ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Аннотация. Долговечность крышек цилиндров тепловозных дизелей оказывает существенное влияние на эффективность функционирования силовой установки тепловоза.

Актуальным направлением является изыскание резервов повышения долговечности цилиндропоршневой группы дизелей тепловозов.

В статье обобщена совокупность факторов, влияющих на долговечность цилиндровых крышек тепловозного дизеля, выделены их основные группы и подгруппы. В предложенной классификации преобладают субъективные факторы, которые зависят непосредственно от деятельности человека. Снизить влияние субъективных факторов можно посредством уменьшения ошибочных решений человеческой деятельности при эксплуатации и ремонте тепловозов.

Рассмотрены мероприятия, совершенствующие работу дизеля тепловоза и положительно влияющие на показатели надежности крышек цилиндров. Предложены простые в реализации и экономически целесообразные способы продления ресурса службы цилиндропоршневой группы.

Для уменьшения температурного перепада в зимнее время года между дизелем тепловоза после его останова и окружающей средой предложена установка теплоизоляционного экрана, что позволит снизить перепад температур от дизеля в окружающую среду и, как следствие, повысит долговечность цилиндропоршневой группы в процессе эксплуатации.

Наиболее перспективным способом продления ресурса крышек цилиндров тепловозных дизелей является усовершенствование гидродинамических параметров в полостях охлаждения. Для обеспечения необходимой циркуляции охлаждающей жидкости с учетом режимов нагрузки предлагается установить в водяную систему дополнительный насос с электрическим приводом.

Ключевые слова: тепловозный дизель, крышка цилиндра, эксплуатация, совокупность факторов, долговечность, градиент температур, система охлаждения, модернизация.

Konstantin A. Ryabko, Evgeniya V. Ryabko

Donetsk institute of railway transport (DIRT), Donetsk, Ukraine

THE INCREASE OF THE DIESEL LOCOMOTIVE ENGINES CYLINDER HEADS DURABILITY

Abstract. The technical condition of the cylinder-piston group has significant effect on the reliable operation of the diesel locomotive engines. The most susceptible to the premature failure is the head of cylinders. It is caused by the heat release rate of the combustion chamber detail.

The increase of the diesel locomotive engines cylinder heads durability in operation causes the relevance of the researches.

In the article the set of the factors influencing on the diesel locomotive engine cylinder heads durability is defined, their main groups and subgroups are found. In the offered classification the subjective factors which directly depend on the human activity are dominated. It is possible to reduce the influence of the subjective factors by means of the human activity wrong solutions reduction while operating and repairing locomotives.

The measures that improve diesel locomotive engine operation and positively affect the reliability of the cylinder heads are considered. Simple in implementation methods to extend the service life of the cylinder-piston group are of-

ferred. They are decreasing temperatures gradient during the post-stopping period of the power point and upgrading cooling system.

Keywords: diesel locomotive engine, cylinder head, operation, set of factors, durability, gradient of temperatures, cooling system, upgrade.

Работоспособное состояние цилиндропоршневой группы во многом зависит от правильной эксплуатации, своевременного технического обслуживания и соблюдения технического состояния систем, обеспечивающих работу дизель-генераторной установки. Работоспособное состояние крышек цилиндров оказывает большое влияние на надежность силовой установки, вследствие чего необходимо рассмотреть все возможные причины возникновения неисправности и отказов крышек цилиндров. При разработке мероприятий, улучшающих показатели надежности цилиндровых крышек, необходимо учитывать весь комплекс факторов, влияющих непосредственно на долговечность. Соответственно возникает необходимость в разработке и внедрении мероприятий по улучшению условий эксплуатации дизелей тепловозов.

Целью настоящей статьи является определение факторов, влияющих на долговечность крышек цилиндров тепловозного дизеля, их детальное рассмотрение для предупреждения причин отказов узлов цилиндропоршневой группы и предложение комплекса мероприятий, направленных на повышение надежности цилиндровых крышек и обеспечение безотказной работы силовой установки в целом.

Надежность тепловозного дизеля зависит от длительной и безотказной работы цилиндровых крышек, которые испытывают значительные нагрузки от температуры и давления газов со стороны огневого днища. Высокий уровень остаточных напряжений возникает из-за значительного перепада температур между краями днища и центральной частью, вследствие чего возникают трещины в межклапанных перемычках. Образование сетки разгарных трещин на поясах гнезд выпускных клапанов ниже и выше плавающих седел объясняется действием рабочих газов, которые движутся с высокой скоростью и температурой по зазорам между телом крышки и седлом выпускного клапана. Сетка разгарных трещин является концентратором напряжений, способствующих возникновению сквозных термических трещин усталостного происхождения [1, 2].

На описанный механизм разрушения крышек цилиндров оказывает влияние множество факторов, главные из которых необходимо определить и детально проанализировать. Эти факторы можно разделить на две основные группы: объективные и субъективные, которые делятся на ряд подгрупп.

К объективным факторам относятся воздействие рабочих газов (давление газов, образование нагара), температурный режим (климатические факторы, сезонные колебания температуры, температура окружающей среды, градиент температур, циклические колебания температуры газов в цилиндре), режимы работы дизеля, термомеханические свойства материала, время эксплуатации.

Субъективные факторы подразделяются на такие подгруппы: техническое состояние топливной системы, техническое состояние охлаждающей системы, условия эксплуатации, технология ремонта, система диагностики.

Некоторые факторы оказывают большее влияние на надежность крышек цилиндров и требуют более детального рассмотрения:

влияние теплового напряжения (резкое повышение температуры газов при горении топлива неизбежно ведет к нагреванию поверхностного слоя цилиндрической крышки). Процесс нагревания металла приводит к его расширению, которое наблюдается в поверхностных слоях огневого днища. Параллельно с этим происходит процесс расширения газов, при выталкивании которых возникает резкое снижение температуры. Данный процесс объясняется присутствием конвективного и лучистого теплообмена со стороны газов. В процессе интенсивного сгорания доля лучистой составляющей теплового потока приближается к 40 %. В

зависимости от нагрузки на дизель теплообмен со стороны охлаждения может осуществляться в режиме вынужденной конвекции, или поверхностного кипения [2 – 4]. Резкий режим нагружения и резкая остановка тепловозного дизеля приводят к возникновению в элементах цилиндропоршневой группы, в том числе и в огневом днище крышки цилиндра, высоких температурных и механических напряжений [5];

влияние температуры окружающей среды на температуру крышки цилиндров. В ряде работ [6 – 8] авторы исследовали влияние повышенных температур окружающего воздуха на тепловое состояние крышек цилиндров дизелей Д50 и Д49. Повышение температуры окружающего воздуха вызывает рост температуры в стенках деталей цилиндропоршневой группы, вследствие чего наблюдается повышение температуры газов и уменьшение коэффициента избытка воздуха. Данная зависимость носит линейный характер. Увеличение температуры окружающего воздуха вызывает повышение температуры в межклапанных перемычках цилиндрической крышки, что способствует возникновению сквозных трещин в огневом днище;

техническое состояние охлаждающей системы тепловоза. Водяная система играет важную роль в работе дизеля и контролирует температурные параметры. Засоренность секций холодильников и каналов охлаждающей системы ведет к нарушению циркуляции охлаждающей жидкости, ухудшая тем самым теплоотвод от дизеля и его составных частей;

скорость протекания охлаждающей жидкости через полости охлаждения цилиндрических крышек. При малых нагрузках в тепловозных дизелях теплообмен в полостях охлаждения осуществляется в режиме вынужденной конвекции, вследствие чего коэффициент теплоотдачи напрямую зависит от расхода охлаждающей жидкости. Теплообмен при средних и близких к номинальным нагрузкам протекает в режиме поверхностного кипения [9];

химический состав охлаждающей жидкости. Охлаждающая жидкость требует проведения определенных технологических процессов перед ее экипировкой (приготовление воды с добавлением присадки, предотвращающей появление твердой пленки накипи и возникновение коррозии в системе охлаждения, или использование антифризов);

нормальное функционирование системы автоматического регулирования температуры. Разрегулировка и выход из строя приборов автоматики существенно влияют на процесс охлаждения тепловозного дизеля. Ранее или позднее открытие и закрытие жалюзи, несвоевременное включение вентиляторов охлаждения приводит к перегреву или переохлаждению жидкости водяной системы. Последствием указанных неисправностей является возникновение термических напряжений дизеля в целом и в основных его узлах, в частности, в крышках цилиндров, что приводит к образованию и развитию трещин усталости, способствующих разрушению огневого днища цилиндрических крышек тепловозного дизеля;

влияние человеческого фактора. В некоторых случаях возможно влияние на систему охлаждения человеческого фактора. При правильной работе всех систем тепловоза нормальным положением тумблера «Управление холодильником» является автоматическое. При возникновении неисправностей, а также ситуаций, требующих интенсивного охлаждения, машинисту необходимо перейти на «ручное» управление системой охлаждения, переключив при этом тумблер в соответствующее положение. Невнимательность локомотивной бригады является последствием несвоевременного включения или отключения вентиляторов, что приведет к перегреву или переохлаждению дизеля;

неудовлетворительное техническое состояние топливной системы. Топливная система тепловозного дизеля имеет непосредственное влияние на долговечность работы крышек цилиндров. Некачественное топливо отрицательно влияет на работоспособность дизеля.

На образование нагаров и отложений в камере сгорания, в цилиндрах и поршнях двигателя влияет большое содержание в дизельном топливе серы, воды и твердых взвешенных частиц.

на процессы топливоподачи, смесеобразования, самовоспламенения и сгорания влияют физико-химические свойства топлива, которые должны соответствовать требованиям в процессе эксплуатации;

неудовлетворительное состояние фильтрующих элементов также оказывает негативное влияние на рабочий процесс дизеля. Попадание загрязняющих частиц в прецизионные пары нарушает работу топливной аппаратуры;

неисправное состояние топливного насоса высокого давления. Увеличение зазоров между прецизионными поверхностями (изменение их состояния – шероховатости и геометрической формы) происходит по причине абразивного износа. Данный вид повреждения способствует интенсивно нарастающему износу головки плунжера в рабочей зоне между нагнетательной и отсечной кромками, что в свою очередь оказывает существенное влияние на давление впрыска топлива [10];

неисправности топливоподающей форсунки. Наличие бесшумного и нечеткого впрыска топлива форсункой тепловозного дизеля и отсутствие снижения давления являются внешними признаками нарушения ее работоспособности. Наиболее распространенные причины, обуславливающие недостаточно резкую отсечку: засоренность колодца в корпусе распылителя, нарушение герметичности, изменение размеров притирочного пояса иглы, зависание иглы, неплотное сопряжение поверхности иглы и отверстия в корпусе распылителя.

Существенное влияние на температурные напряжения в крышке цилиндров оказывает подтекание форсунки. Основные причины подтекания: неудовлетворительная притирка иглы к седлу распылителя, нарушение геометрических параметров притирочного пояса иглы, возникновение второго пояса на конусе иглы форсунки, односторонняя притирка пояса, риски и волнообразность на уплотнительном конусе седла распылителя.

Перечисленные причины нарушения работоспособности форсунки тепловозного дизеля неблагоприятно влияют на дизель в целом, снижая экономичность его использования, и повышают интенсивность износа, в особенности шатунно-поршневой группы, крышек цилиндров, шеек коленчатого вала.

Увеличенная подача топлива в камеру сгорания осуществляется из-за неисправностей форсунки или топливного насоса высокого давления. Отсутствие достаточного распыления влечет за собой неполное сгорание топлива, повышая тем самым температуру рабочих газов, что влечет за собой возникновение трещин в огневом днище цилиндрической крышки, прогар клапанов, выход из строя глушителей и лопастей турбин;

брак при изготовлении или недостаточный контроль проверки крышек цилиндров на заводе-производителе.

Перечисленные факторы оказывают значительное влияние на техническое состояние крышек цилиндров и их преждевременный выход из строя.

Научно обоснованный, комплексный подход в разработке мероприятий по повышению надежности позволит существенно снизить влияние перечисленных факторов.

Одним из способов продления ресурса цилиндрических крышек является комплексное применение мероприятий по повышению надежности путем применения различных устройств и технических решений.

Рассмотрим наиболее перспективные методы продления срока службы крышек цилиндров.

Для уменьшения градиента температуры при остывании дизеля после его остановки предлагается разработка устройства, которое способствует снижению растягивающих усилий в поверхностных слоях металла цилиндрической крышки, падению скорости развития трещин и тем самым увеличивает ее ресурс.

Огневое днище крышки цилиндра тепловозного дизеля Д49 подвергается циклическим сменным режимам нагрева и охлаждения. В эксплуатации не исключаются ситуации, когда максимальное значение градиента температур может быть не на поверхности днища, а на некоторой глубине этой поверхности. Следовательно, возникает необходимость изучения полей температур в огневом днище с учетом реального изменения температуры газов в цилиндре и влияния температуры наружного воздуха на скорость охлаждения крышек цилиндров.

Скорость охлаждения дизеля и его деталей связана с интенсивностью отвода теплоты. Плотность теплового потока может быть выражена уравнением Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha(t - t_{\text{воз}}),$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

α – коэффициент теплоотдачи, учитывающий теплоотдачу конвекцией и излучением, Вт/(м²·К);

t – температура массы двигателя, °С (К);

$t_{\text{воз}}$ – температура наружного воздуха, °С (К).

Из приведенной формулы следует, что плотность теплового потока q , а следовательно, и скорость охлаждения дизеля при данной температуре t зависят от значения температуры наружного воздуха $t_{\text{воз}}$ и суммарного коэффициента теплоотдачи α . При этом чем ниже температура наружного воздуха $t_{\text{воз}}$, тем выше плотность теплового потока q и скорость охлаждения, способствующая развитию трещин усталости.

Можно предположить, что при низкой температуре наружного воздуха будет наблюдаться более интенсивное изнашивание крышек и существенное сокращение их ресурса. Теоретическое предположение подтверждается опытом эксплуатации тепловозов и анализом статистических данных количества отказов крышек цилиндров.

Для уменьшения температурного перепада между дизелем тепловоза и окружающей средой предлагается установить теплоизоляционный экран, позволяющий снизить температурный градиент [11].

Теплоотражающий экран представляет собой рольставни, изготовленные из алюминиевого сплава или стальной жести. В машинном отделении магистрального тепловоза устанавливаются по четыре направляющие с каждой боковой стороны дизеля, по которым перемещаются роллеты. Над дизелем крепятся валы, на которые сматывается полотно рольставен при отсутствии необходимости теплоизоляции.

Со стороны дизеля роллеты выполнены в виде зеркальной поверхности для отражения лучистого тепла обратно к дизелю. Полости ламелей роллет заполнены вспененным экструдированным полистиролом, который замедляет теплоотдачу от дизеля в окружающую среду.

Данное конструктивное решение позволит регулировать скорость охлаждения дизеля в зависимости от температуры окружающей среды величиной подъема полотна роллет. В теплое время года, когда отсутствует необходимость уменьшения градиента температуры от дизеля в окружающую среду, теплоизоляционный экран сматывается на валы и фиксируется в собранном положении.

Разработанное конструктивное решение является наиболее простым в реализации и не требует больших капитальных вложений. Конструкция теплоизоляционного экрана не предусматривает его обслуживания. Опускание и подъем рольставен представляет собой нетрудоемкий процесс и легко реализуем локомотивной бригадой при проведении ТО-1. Также возможна автоматизация процесса подъема и опускания теплового экрана с применением электропривода вала с привязкой работы электродвигателя к системе автоматического регулирования температуры тепловоза, температуре окружающей среды в машинном отделении и за бортом тепловоза. Теплоизоляционный экран не препятствует визуальному контролю работы силовой установки, так как в процессе эксплуатации он находится в собранном положении. Необходимость уменьшения скорости охлаждения дизеля возникает в постостановочный период силовой установки, когда визуальный осмотр и регламентные работы локомотивной бригады выполнены.

Данное техническое решение позволит снизить градиент температур от дизеля в окружающую среду и, как следствие, повысит надежность цилиндропоршневой группы в процессе эксплуатации.

Усовершенствование гидродинамических параметров в полостях охлаждения цилиндрических крышек также способствует продлению их ресурса. Скорость протекания жидкости через полости охлаждения крышек цилиндров значительно влияет на температуру огневого днища. В дизелях тепловозов теплообмен в полостях охлаждения при малых нагрузках осуществляется в режиме вынужденной конвекции, при котором коэффициент теплоотдачи в значительной степени зависит от расхода охлаждающей жидкости. Теплообмен при средних нагрузках и нагрузках, близких к номинальным, происходит в режиме поверхностного кипения.

Для того чтобы обеспечить необходимую циркуляцию охлаждающей жидкости с учетом режимов нагрузки, предлагается установить в водяную систему дополнительный водяной насос. Подключение дополнительного насоса производится параллельно основному насосу. Привод дополнительного водяного насоса, в отличие от штатного, электродвигательный с питанием от вспомогательного генератора. Регулировка частоты вращения вала электродвигателя осуществляется с помощью микроконтроллера, который учитывает частоту вращения коленчатого вала дизеля, нагрузку, температуру окружающей среды и охлаждающей жидкости. В зависимости от частоты вращения коленчатого вала, нагрузки и ряда параметров работы силовой установки регулируется производительность дополнительного насоса.

Данное техническое решение позволит повысить циркуляцию воды в охлаждающей системе тепловоза независимо от нагрузок дизеля и улучшит отвод тепла от наиболее нагретых участков крышки цилиндра.

В статье определена совокупность факторов, которые оказывают влияние на долговечность цилиндрических крышек тепловозных дизелей, выявлены их основные группы и подгруппы. Как видно из предложенной классификации, преобладают субъективные факторы, которые напрямую зависят от действий обслуживающего персонала, уровня организации технического обслуживания, соблюдения правил эксплуатации. Снизить влияние субъективных факторов на ресурс крышек цилиндров значительно проще, так как существует возможность предусмотреть, не допустить, уменьшить ошибочные решения человеческой деятельности и их последствия при эксплуатации и ремонте тепловозов.

Предложены рациональные мероприятия, совершенствующие работу тепловозного дизеля и влияющие на надежность крышек цилиндров. Применение устройства снижающего градиент температур в постостановочный период силовой установки и модернизация системы охлаждения являются наиболее простыми в реализации и экономически выгодными способами продления срока службы цилиндропоршневой группы, в частности, цилиндрических крышек тепловозных дизелей.

Список литературы

1. Костин, А. К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А. К. Костин, В. В. Ларионов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.
2. Луканин В. Н. Теплотехника [Текст] / В. Н. Луканин. – М.: Высшая школа, 1999. – 671 с.
3. Петриченко, Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / Р. М. Петриченко / Ленинградский гос. ун-т. – Л., 1983. – 244 с.
4. Петриченко, Р. М. Элементы и системы автоматизированного проектирования ДВС [Текст] / Р. М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. – 328 с.
5. Костин, А. К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник [Текст] / А. К. Костин, Б. П. Пугачев, Ю. Ю. Кочинев. – Л.: Машиностроение, 1989. – 284 с.
6. Орлин, А. С. Двигатели внутреннего сгорания: конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / А. С. Орлин, Д. Н. Вырубов. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.

7. Розенблит, Г. Б. Теплопередача в дизелях [Текст] / Г. Б. Розенблит. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
8. Дульнев, Р. А. Термическая усталость металлов [Текст] / Р. А. Дульнев, П. И. Котов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
9. Стефановский, Б. С. Теплонапряженность деталей быстроходных поршневых двигателей [Текст] / Б. С. Стефановский. – М.: Машиностроение, 1978. – 128 с.
10. Федотов, Г. Б. Топливные системы тепловозных дизелей. Ремонт, испытание, совершенствование [Текст] / Г. Б. Федотов, Г. И. Левин. – М.: Транспорт, 1983. – 192 с.
11. Горобченко, А. Н. Исследование влияния температуры окружающей среды на работоспособность крышек цилиндров тепловозных дизелей [Текст] / К. А. Рябко, Е. В. Рябко, А. М. Гушин // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2016. – № 1 (61). – С. 34 – 42.

References

1. Kostin A. K., Larionov V. V. *Teplonapryazhennost' dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Thermal stress of the internal combustion engine). Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979, 222 p.
2. Lukanin V. N. *Teplotekhnika* (Thermotechnics). Moscow: Vyssh. shk., 1999, 671 p.
3. Petrichenko P. M. *Fizicheskiye osnovy vnutritsilindrovyykh protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* (Physical bases intracylinder processes in internal combustion engines). Leningrad: «LGU» Publ., 1983, 244 p.
4. Petrichenko P. M. *Elementy i sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya DVS* (Elements and Computer Aided Design ICE). Leningrad: Mashinostroyeniye, 1990, 328 p.
5. Kostin A. K., Pugachev A. K., Kochinev Yu. Yu. *Rabota dizeley v usloviyakh ekspluatatsii: Spravochnik* (Work diesel engines in operating conditions: Directory). Leningrad: Mashinostroyeniye, 1989, 284 p.
6. Orlin A. S., Vyubov D. N. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: konstruirovaniye i raschet na prochnost' porshnevyykh i kombinirovannykh dvigateley* (Internal combustion engines: design and calculation of the strength of the piston and combined engines). Moscow: Mashinostroyeniye, 1984, 384 p.
7. Rozenblit G. B. *Teplperedacha v dizelyakh* (Heat transfer in diesel engines). Moscow: Mashinostroyeniye, 1977, 216 p.
8. Dul'nev R. A., Kotov P. I. *Termicheskaya ustalost' metallov* (Thermal fatigue of metals). Moscow: Mashinostroyeniye, 1980, 200 p.
9. Stefanovskiy B. S. *Teplonapryazhennost' detaley bystrokhodnykh porshnevyykh dvigateley* (Thermal stress components of high-speed reciprocating engines). Moscow: Mashinostroyeniye, 1978, 128 p.
10. Fedotov G. B., Levin G. I. *Toplivnyye sistemy teplovoznnykh dizeley. Remont, ispytaniye, sovershenstvovaniye* (Fuel system diesel engines. Repair, testing, improvement). Moscow: Transport, 1983, 192 p.
11. Gorobchenko A. N., Riabko K. A., Riabko E. V., Gushchin A. M. Research of influence environment temperature on serviceability of cylinder covers of diesel engine locomotives [Issledovanie vliianiia temperatury okruzhaiushchei sredy na rabotosposobnost' kryshek tsilindrov teplovoznnykh dizelei]. *Vestnik RGUPS – Scientific and Technical Journal*, 2016, no. 1 (61), pp. 34 – 42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рябко Константин Александрович

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДониЖТ).

Горная ул., д. 6, г. Донецк, 83018, Украина.

Кандидат технических наук, декан факультета «Управление на железнодорожном транспорте», ДониЖТ.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ryabko Konstantin Aleksandrovich

Donetsk institute of railway transport (DIRT).

6 Gornaya str., Donetsk, 83018 Ukraine.

Ph. D. in Engineering, Dean of the faculty «Railway transport management», DIRT.

Phone: +38 (062) 319-04-37.

E-mail: railroader@yandex.ru

Тел.: +38 (062) 319-04-37.
E-mail: railroader@yandex.ru

Рябко Евгения Владимировна

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДонИЖТ).

Горная ул., д. 6, г. Донецк, 83018, Украина.

Инженер 1-й категории кафедры «Подвижной состав железных дорог», ДонИЖТ.

Тел.: +38 (062) 319-21-76.

E-mail: railroader@yandex.ru

Ryabko Evgeniya Vladimirovna

Donetsk institute of railway transport (DIRT).

6 Gornaya str., Donetsk, 83018 Ukraine.

Engineer 1st category of the department «Railway rolling stock», DIRT.

Phone: +38 (062) 319-21-76.

E-mail: railroader@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Рябко, К. А. Повышение долговечности крышек цилиндров тепловозных дизелей [Текст] / К. А. Рябко, Е. В. Рябко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 30 – 37.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ryabko K. A., Ryabko E. V. The increase of the diesel locomotive engines cylinder heads durability. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 30 – 37. (In Russian)..

УДК 621.317

Д. Ю. Стороженко, А. В. Рыжков

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ВСТРОЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Аннотация. В статье рассмотрены приоритетные задачи в сфере токосъема для повышения безопасности движения, развития скоростного и высокоскоростного движения. Для обеспечения движения и нормального функционирования железнодорожного транспорта необходима бесперебойная передача электроэнергии. Диагностирование элементов контактной сети является важной задачей для предупреждения неисправностей системы электроснабжения, в том числе тех, которые могут привести к аварийной ситуации. В статье рассмотрены системы встроенного диагностирования, принципы их работы, представлен вариант их применения.

Ключевые слова: контактная сеть, система диагностики, системы встроенной диагностики, модулятор, демодулятор, сервер.

Dmitriy Yu. Storozhenko, Alexander V. Ryzhkov

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

IMPROVEMENT BUILT-IN DIAGNOSTICS DEVICES OF CONTACT NETWORK

Abstract. The article describes the priorities in the sphere tokosema to improve traffic safety, the development of high-speed and high-speed traffic. To ensure the normal functioning of traffic and rail transport need uninterrupted transmission of electricity. Diagnosis of elements of contact network is one of the important task to prevent power system faults, including those that could lead to an emergency situation. The article deals with the built-in diagnostic system, how they work, an embodiment of their application.

Keywords: contact network, system diagnostics, system built-in diagnostics, modulator, demodulator, server.

Согласно перечню приоритетных направлений инновационной политики компании ОАО «РЖД» в XXI в. внедрение новых типов техники и технологии, совершенствование корпоративной системы управления качеством, обеспечение безопасности движения, а также развитие высокоскоростного и скоростного движения являются катализаторами применения принципиально новых перспективных технологий и технических решений [1].

Одним из таких перспективных направлений является повышение надежности эксплуатации путем широкого внедрения систем встроенной диагностики, в том числе в системах тягового электроснабжения. Элементы указанной системы, как правило, размещены на исследуемых объектах или расположены в непосредственной близости от них. При этом измеряются текущие значения диагностических параметров, при превышении допускаемых значений подается сигнал на индикатор либо обеспечивается дистанционная передача сигнала на диспетчерский пульт [2].

Постоянно повышающийся уровень требований к надежности контактных подвесок и токоприемников и создает предпосылки для разработки и внедрения долговечных и малообслуживаемых систем токосъема. Перспективность применения систем встроенной диагностики на железных дорогах повышается по мере применения технически сложного и дорогостоящего тягового подвижного состава, увеличения скоростей движения и массы поездов [3].

Внедрение встроенных систем диагностики контактных подвесок позволит способствовать предотвращению возможных повреждений, накапливать данные для определения параметров надежности и прогнозировать сроки службы элементов при обслуживании «по состоянию». С помощью инспекционных вагонов (ВИКСов) производится периодическая оценка состояния контактной сети. Использование ВИКСов ресурсозатратно, а оперативность их применения зависит от графика движения поездов. Внедрение встроенных систем диагностики целесообразно потому, что они позволяют определять наиболее значимые параметры дистанционно и в любой момент времени.

Главной задачей при создании диагностического комплекса систем инфраструктуры железных дорог в настоящее время можно считать разработку комплекса датчиков, способного измерять достоверные диагностические параметры и передавать их на сервер. При этом датчики должны работать автономно и сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях мощного электрического и электромагнитного влияния, акустического воздействия источников шума, влажности и низкой температуры окружающей среды, осадков (снег, дождь, гололед), раскачиваний и вибраций опорных и поддерживающих конструкций контактных подвесок. Диагностический комплекс должен исправно функционировать при отключении связи и электроэнергии на контактной подвеске и в линиях продольного электроснабжения. Для уменьшения зависимости от внешних факторов и снижения стоимости блоков диагностики предпочтительным является применение автономного питания и беспроводной связи (радиоканала) для передачи данных [4].

В соответствии с назначением состав системы встроенной диагностики может включать в себя большое многообразие датчиков. При этом структурная схема (рисунок 1) в общем случае включает в себя четыре основных модуля.

Модуль № 1 (измерительный) отвечает за получение актуальных значений диагностических параметров. Содержит датчики, блок питания и устройства для передачи сигнала. При необходимости модуль дооснащается блоком изоляции и шифратором.

Модуль № 2 (приемопередающий) отвечает за передачу сигнала от источника к приемнику. Состоит из среды передачи данных, модулятора/демодулятора и приемопередающих устройств. Большинство распространенных вариантов реализаций предусматривают усиление сигнала для увеличения длины канала связи.

Модуль № 3 (сервер БД) предназначен для предварительной обработки сигнала, в том числе для фильтрации, усиления, интегрирования и записи в базу данных. База данных (БД) доступна для операций только авторизованных пользователей (программ и устройств), что исключает возможность искажения или правки информации.

Модуль № 4 (АРМ) выполняет набор программируемых функций, таких как индикация, ведение журнала, выполнение статистической обработки, и являются автоматизированным рабочим местом (АРМом). Интерфейс с оператором системы реализуется посредством веб-сервера, установленного в данном модуле.



Рисунок 1 – Структурная схема системы встроенной диагностики контактной сети

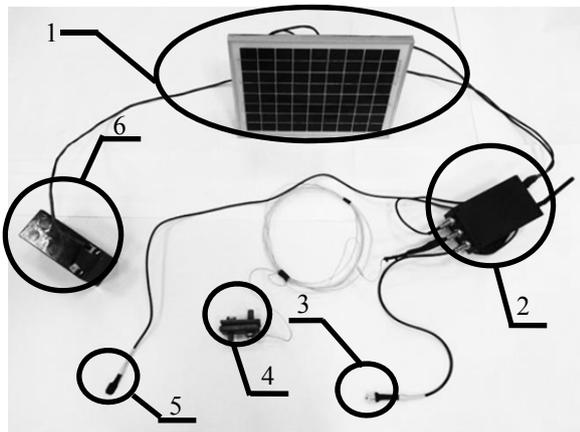


Рисунок 2 – Компоненты автономной системы встроенной диагностики для текущего контроля температуры фидера контактной сети

При использовании современных надежных и компактных электронных устройств, предназначенных для контроля и диагностики, все, представленные на рисунке 1, составляющие могут обладать необходимой работоспособностью [5, 6].

Сотрудниками кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС предложена автономная система для контроля температуры фидеров на линиях скоростного и тяжеловесного движения. Кроме основных элементов, представленных на рисунке 1, предлагаемая система имеет устройство автономного питания, которое позволяет решить проблему электроснабжения устройств и систем встроенной диагностики.

Опытный образец разработанной системы (рисунок 2) имеет следующие составляющие: фотоэлектрическую панель, микроконтроллер с GPRS-модемом, цифровой датчик температуры и влажности окружающей среды, датчик температуры фидера, акселерометр, аккумуляторную батарею.

Система работает следующим образом:

фотоэлектрический элемент вырабатывает электроэнергию, заряжает аккумуляторную батарею, что позволяет ввести устройство в работу;

датчики температуры (цифровой датчик температуры и влажности окружающей среды, датчик температуры фидера) передают информацию в микроконтроллер;

акселерометр фиксирует ускорение (перемещение) контактного провода и аналогично всем датчикам передает информацию в микроконтроллер;

в устройстве имеются датчики напряжения аккумуляторной батареи и фотоэлектрического элемента, что позволяет судить, насколько удачно подобраны для данного региона аккумуляторная батарея, площадь солнечной панели, ее тип и структура. Это позволит своевременно модернизировать устройство (оно имеет модульную структуру, что позволяет бо-

лее гибко подобрать модули питания и набор необходимых датчиков). Информация с датчиков напряжения также направляется в микроконтроллер;

микроконтроллер записывает полученные данные в имеющийся модуль памяти, параллельно формируя пакеты для отправки их на сервер;

микроконтроллер с помощью GPRS-модема, подключенного к нему, отправляет данные на сервер (беспроводная передача);

на сервере данные обрабатываются и представляются в виде таблиц и графиков;

при превышении заданных граничных значений на АРМ передается соответствующий сигнал (к примеру, п – «перегрев по фидеру X», где X – фидер, на котором установлен датчик).

Согласно исследованиям солнечной радиации России (рисунок 3) [7] и проведенным расчетам электроэнергии, получаемой за счет фотоэлектрического элемента, будет достаточно для работоспособности системы на территории всей страны (по данным лаборатории возобновляемых источников энергии и энергосбережения Объединенного института высоких температур РАН).



Рисунок 3 – Схема солнечной радиации в России

Основным направлением использования солнечной энергии является получение электричества с помощью фотоэлектрических преобразователей. Произведем оценку солнечного потенциала местности, исходными данными для расчета являются географические координаты места нахождения объекта и значение максимальной солнечной радиации. Местом расположения объекта исследования является Омская область.

Исходные данные для расчета:

1) географические координаты объекта: $54^{\circ}59'$ северной широты, $73^{\circ}22'$ восточной долготы;

2) значение максимальной солнечной радиации $R_{h \max} = 702,8 \text{ Вт/м}^2$.

Расчет производится по следующему методу. Склонение Солнца δ в данные сутки n определяется по формуле Купера:

$$\delta = \delta_0 \cdot \sin(360 \cdot (284 + n) / 365), \quad (1)$$

где $\delta_0 = 11^{\circ}5'$ для северного полушария;

n – номер суток с начала года.

Продолжительность солнечного дня T_c в данные сутки рассчитывается по формуле:

$$T_c = 2 / 15^\circ \cdot (\arccos [-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta]), \quad (2)$$

где φ – координаты северной широты объекта;
 δ – склонение солнца.

Следующим этапом будет расчет изменения мощности потока солнечной радиации. Расчет производим по формуле:

$$R_h = R_{h \max} \cdot \sin \left(\frac{180 \cdot t}{T_c} \right), \quad (3)$$

где $R_{h \max}$ – максимальная солнечная радиация для данной территории;

t – порядковый номер часа солнечной активности;

T_c – продолжительность солнечного дня.

Среднемесячный график изменения солнечной энергии приведен на рисунке 4. Исходя из полученных данных выбираем устройства и их параметры, опираясь на значения солнечной радиации в Омской области.

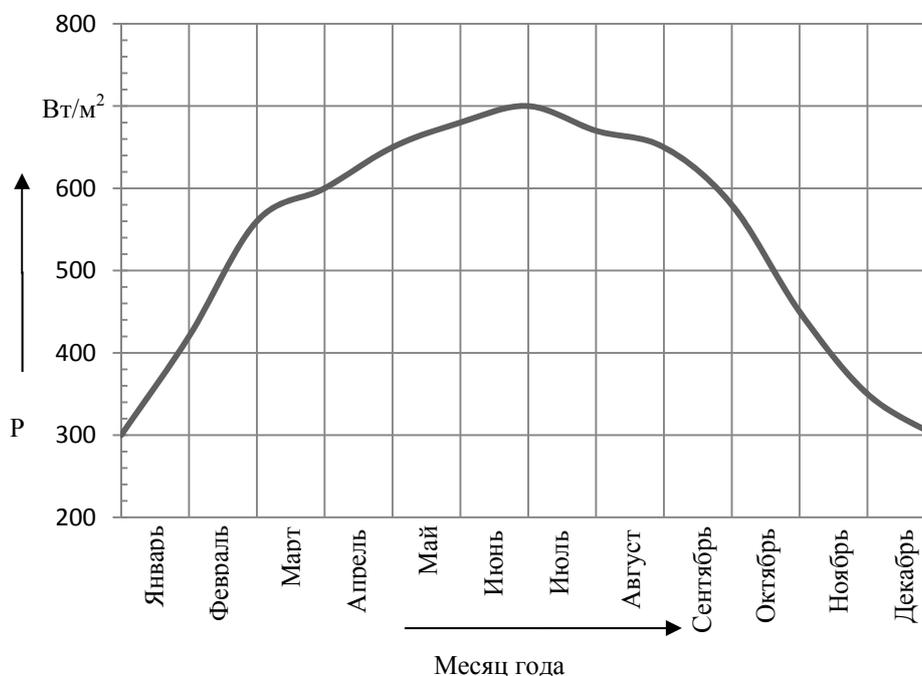


Рисунок 4 – Среднемесячный график изменения солнечной энергии

Площадь солнечной батареи $S = 0,075 \text{ м}^2$, значит, вырабатываемая энергия солнечной батареи на первое января

$$E = P_{\text{ч}} \cdot t, \quad (4)$$

где E – энергия вырабатываемая в день, Вт·ч;

$P_{\text{ч}}$ – мощность вырабатываемая в час, Вт;

t – продолжительность солнечного дня, ч.

$$E = 48,41 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Запас аккумуляторной батареи:

$$C = E \cdot 0,2, \quad (5)$$

где C – энергия накопленная аккумуляторной батареи за день, Вт·ч;

0,2 – коэффициент КПД аккумуляторной батареи.

$$C = 9,68 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Сделав аналогичные подсчеты за весь год, получим 11740 Вт·ч.

Далее определим количество потребляемой опытным образцом энергии для оценки правильности подбора комплектующих изделий.

Модуль GPRS поддерживает четыре диапазона: 850/900/1800/1900 МГц, передает (принимает) голосовые вызовы, работает с СМС, делает ussd-запросы и работает с сетью через GPRS с поддержкой протоколов FTP, HTTP или TCP/UDP.

Основные характеристики модуля: для модулей необходимо питание от 3,2 до 4,8 В; ток потребления существенно зависит от текущего режима работы и может колебаться от 20 до 500 мА.

Требуемая мощность для GPRS-модуля рассчитывается по уравнению:

$$P_{GPRS} = I \cdot U, \quad (6)$$

где P_{GPRS} – необходимая мощность GPRS модуля, мВт;

I – потребляемый модулем GPRS ток, мА;

U – напряжение питания, В.

В режиме ожидания (сна) $P_{GPRS} = 2,8$ мВт, в режиме работы $P_{GPRS} = 2000$ мВт.

Энергия, потребляемая GPRS, Вт,

$$E_{\text{потр}} = \frac{P_{GPRS} \cdot 8760}{1000}, \quad (7)$$

где 8760 – количество часов в году.

В режиме ожидания (сна): $E_{\text{потр(сон)}} = 24,53 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$, в режиме работы $E_{\text{потр(раб)}} = 365 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

Микроконтроллер имеет 14 цифровых входов (выходов) (шесть из которых могут использоваться как выходы ШИМ), шесть аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки.

Основные характеристики модуля: рабочее напряжение – 5 В, ток потребления – 50 мА.

Требуемая мощность для микроконтроллера определяется аналогично расчету для GPRS-модуля.

В режиме ожидания (сна) $P_{\text{мк. контр. сон}} = 2,5$ мВт, в режиме работы:

$$P_{\text{мк. контр. раб.}} = 3000 \text{ мВт}.$$

Энергия, потребляемая микроконтроллером, рассчитывается аналогично расчету для GPRS-модуля.

В режиме ожидания (сна) $E_{\text{потр(сон)}} = 30,66 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$, в режиме работы $E_{\text{потр(раб)}} = 547,5 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

Все датчики получают питание от микроконтроллера. Энергия, потребляемая устройством за год, будет равна сумме энергий микроконтроллера и GPRS-модуля: в режиме ожидания – 30,6625 Вт·ч, в режиме работы – 550,5 Вт·ч. По результатам расчета видно, что выбранные параметры устройств удовлетворяют всем необходимым требованиям для работы опытного образца.

Помимо автономного питания система диагностики оборудована собственным модулем памяти для записи снятых параметров на случай, если основной канал связи выйдет из строя и данные перестанут поступать на сервер. Модуль памяти для системы диагностики выбран таким образом, чтобы обеспечить сохранение данных до восстановления связи. По истече-

нии заданного времени память перезаписывается. На опытном образце устанавливался модуль, объем которого позволял сохранять данные, полученные в течение 24 часов.

Функциональная схема системы представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Функциональная схема автономного измерителя

Микроконтроллер с GPRS-модемом позволяет получать данные и отправлять их на сервер для обработки на АРМе.

Технические характеристики устройства:

- номинальное напряжение питания: 12 В;
- область применения: линии постоянного и переменного тока;
- климатическое исполнение: У1;
- диапазон измеряемых температур фидера: 0 ... + 250 °С;
- объем собственной памяти: 16 Мб;
- стандарт радиосвязи: GSM-1800;
- емкость аккумуляторной батареи: 12 А·ч;
- количество аналоговых каналов: 6;
- количество цифровых каналов: 8;
- частота дискретизации: 5 кГц;
- длительность записи данных: 24 ч.

Если установить систему встроенной диагностики с датчиком температуры окружающей среды, а второй датчик температуры прикрепить к фидеру питания, появится возможность оценки температуры нагрева фидера и зависимости этого нагрева от параметров окружающей среды или от процессов, протекающих в системе токосъема. Это позволит также получить статистические данные об окружающей среде в тех местах, где установлены системы диагностирования.

На рисунке 6 представлены данные, полученные с помощью автономной системы встроенной диагностики и с поверенного устройства измерения температуры в месте присоединения системы диагностирования и измерения температуры в точке соединения контактного провода и зажима.

Из полученных данных видно, что информация с сервера устройства диагностики и образцового прибора отличаются не более чем на 4 °.

На рисунке 7 представлены данные, обрабатываемые на сервере, которые могут быть получены как в графическом, так и в табличном виде.

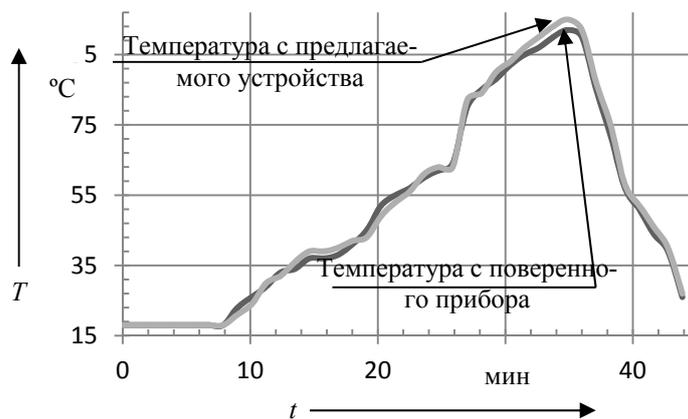


Рисунок 6 – Диаграмма температуры

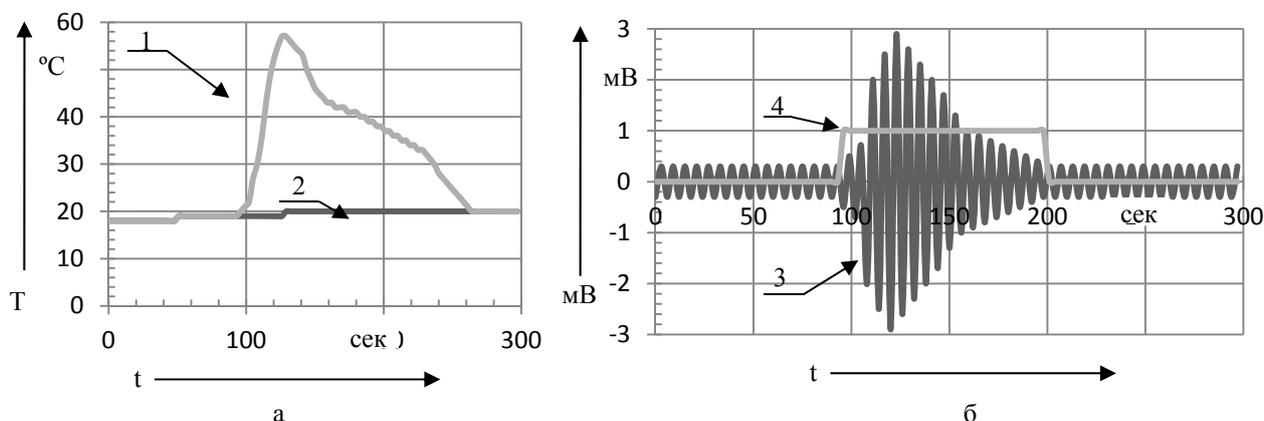


Рисунок 7 – Диаграмма данных, обрабатываемых на сервере: а – данные с датчиков температуры; б – данные с акселерометра

На диаграмме (см. рисунок 7) представлены следующие данные: температура фидера, температура окружающей среды, сигнал акселерометра, преобразованный сигнал акселерометра.

Автономная система встроенной диагностики для текущего контроля температуры фидера контактной сети оборудована акселерометром. Акселерометр нужен для снятия виброграммы контактной сети (рисунок 7, б, линия 3) и определения наличия на участке электроподвижного состава (ЭПС). Виброграмма позволяет определить время прохождения токоприемника по исследуемому участку контактной сети. При обработке данных акселерометра нужно учитывать наличие автоколебаний датчика и контактной сети. Для этого непрерывный сигнал акселерометра (см. рисунок 7, б, линия 3) преобразовывается в дискретный сигнал (см. рисунок 7, б, линия 4), где значения акселерометра $0 \dots \pm 0,3$ мВ приняты равными 0 (отсутствует ЭПС на участке), а значения, превышающие $\pm 0,3$ мВ, равны 1 (ЭПС проходит по участку). Таким образом, можно определить, в какое время на участке находился ЭПС. Калибровку акселерометра производят путем анализа данных в момент прохода ЭПС, при необходимости можно скорректировать допуск автоколебаний.

По графикам, представленным на рисунке 7, можно определить, от чего зависит температура фидера контактной сети в тот или иной промежуток времени и заблаговременно определить перегревающиеся фидеры и одну из возможных причин этого перегрева.

Система смонтирована и испытана в лаборатории устройств токосъема кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа [6]. Оценка работоспособности си-

стемы диагностики показала, что она функционирует и позволяет непрерывно и достоверно определять диагностируемые характеристики.

Список литературы

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года («Белая книга» ОАО «РЖД») [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2011. – 340 с.
2. Михеев, В. В. Система диагностики параметров контактной сети [Текст] / В. В. Михеев, А. С. Брюханов, В. В. Свешников // Железнодорожный транспорт. Сер. Электроснабжение железных дорог. ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. – 1990. – Вып. 2. – С. 24 – 34.
3. Беляев, И. А. Устройство контактной сети на зарубежных дорогах [Текст] / И. А. Беляев. – М.: Транспорт, 1991. – 192 с.
4. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог: Учебник [Текст] / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин / УМК МПС. – М. – 2000. – 512 с.
5. Сидоров, О. А. Совершенствование методов испытаний контактных подвесок и токоприемников [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин // Железнодорожный транспорт. – М.: ОАО «РЖД», 2010. – № 11. – С. 72 – 74.
6. Пат. 2444449 С1, МПК В 60 М1/12. Способ и система диагностики и удаленного мониторинга контактной сети железной дороги [Текст]. Непомнящий В. Г., Осадчий Г. В., Пристенский Д. Н., Лыков А. А., Соколов В. А., Соколов В. Б., Долинский К. Ю.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Мостовое бюро». – № 2010137656/11; заявл. 07.09.2010; опубл. 10.03.2012, Бюл. № 7.

References

1. *Strategiia razvitiia kholdinga «RZhD» na period do 2030 goda («Belaia kniga» ОАО «RZhD»)* (The development strategy of the holding «RZD» for the period until 2030 («White Paper» of JSC «RZD»)). Moscow: JSC «RZD», 2011, 340 p.
2. Mikheev V. V., Bruchanov A. S., Sveshnikov V. V. System for diagnosing the parameters of the contact network [Sistema diagnostiki parametrov kontaktnoi seti]. *Zheleznodorozhnyi transport – Rail transport*, 1990, no. 2, pp. 24 – 34.
3. Belyaev I. A. *Ustroistvo kontaktnoi seti na zarubezhnykh dorogakh* (The device of the contact network on foreign roads). Moscow: Transport, 1991, 192 p.
4. Efimov A. V., Galkin A. G. *Nadezhnost' i diagnostika sistem elektrosnabzheniia zheleznikh dorog: Uchebnik* (Reliability and diagnostics of power supply systems of railways: Textbook). Moscow: UMK MPS, 2000, 512 p.
5. Sidorov O. A., Smerdin A. N. Perfection of test methods for contact suspensions and current collectors [Sovershenstvovanie metodov ispytaniia kontaktnykh podvesok i tokopriemnikov]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway Transport*, 2010, no. 11, pp. 72 – 74.
6. Nepomnyashchii V. G., Osadchy G. B., Pristensky D. N., Lykov, A. A., Sokolov V. A., Sokolov V. B., Dolinsky K. Y. *Patent RU 2444449 C1*, 10.03.2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стороженко Дмитрий Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: Storozhenko_d@mail.ru

Рыжков Александр Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Storozhenko Dmitriy Yur'yevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

E-mail: Storozhenko_d@mail.ru

Ryzhkov Alexander Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: Ryzhkov55@inbox.ru

Post-graduate student of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

E-mail: Ryzhkov55@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Стороженко, Д. Ю. Совершенствование методики применения устройств встроенной диагностики контактной сети [Текст] / Д. Ю. Стороженко, А. В. Рыжков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. – 37 – 46.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Storozhenko D. Y., Ryzhkov A. V. Improvement built-in diagnostics devices of contact network / Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28 no. 4, pp. – 37 – 46. (In Russian).

УДК 625.1: 656.2

В. Ю. Тэттер, А. Ю. Тэттер

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

МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

***Аннотация.** Обоснована актуальность задачи по созданию тестовых сигналов вибрации. Описаны возможные способы реализации тестовых сигналов вибрации. Предложена методика реализации тестовых сигналов путем корректировки амплитуд отдельных гармонических составляющих вибросигнала. Приведены результаты моделирования. Показан возможный эффект от использования предложенного способа реализации тестовых сигналов вибрации.*

***Ключевые слова:** вибрация, тестовый сигнал, моделирование, временной сигнал, спектр, диагностика, дефект.*

V. Yu. Tetter, A. Yu. Tetter

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

METHOD OF IMPLEMENTATION SIGNALS FOR TESTING VIBRO-DIAGNOSTIC EQUIPMENT OF ROLLING STOCK

***Abstract.** The urgency of the task of creating test signals of vibration. Described possible ways of implementation of the test vibration signals. A method of forming a test signal by adjusting amplitudes of the individual harmonic components of the vibration signal. Showing the results of modeling. Shows the possible effect of using the proposed method.*

***Keywords:** vibration, test signal, simulation, time signal, spectrum, diagnostics, defect.*

В соответствии с отраслевыми нормативными документами вибродиагностическое оборудование (ВДО) является обязательным элементом технологии ремонта подвижного состава железных дорог. Таким оборудованием должно быть оснащено каждое депо по ремонту локомотивов и вагонов. От эффективности работы указанного оборудования зависят показатели безопасности движения и величина коэффициента технической готовности.

Тестовые сигналы играют важную роль при проверке работоспособности, определении функциональных возможностей диагностического оборудования (ДО) и при проведении метрологической аттестации (поверке, калибровке) средств измерений (СИ). Наибольшее распространение получили электрические тестовые сигналы, в частности, сигналы напряжения. Такие сигналы используются для проверки и аттестации электроизмерительной части средств измерения параметров вибрации.

В ряде случаев, например, при выборе и сравнении средств для их поставки на ремонтные предприятия, возникает необходимость произвести объективную оценку функциональных возможностей и заявляемых свойств ВДО. ВДО в настоящее время представляет собой достаточно сложные программно-аппаратные комплексы. Стоимость таких комплексов достигает 10 – 20 тыс. долларов, причем стоимость программного обеспечения (ПО), в частности диагностических программ, составляет около половины общей стоимости ВДО.

Метрологическая аттестация характеристик аппаратной части оборудования не позволяет производить в достаточном объеме проверку функциональных возможностей ВДО, которые во многом определяются методами обработки сигналов и диагностическим ПО. В связи с этим становится актуальной задача по созданию тестовых сигналов вибрации, которые соответствовали бы определенному техническому состоянию диагностируемого оборудования (исправному или неисправному, работоспособному или неработоспособному, предельному) таких, например, механических узлов, как подшипники качения и скольжения, редукторные узлы с зубчатым зацеплением.

Сформировать и воспроизвести тестовые сигналы вибрации можно несколькими способами. Первый способ предполагает проведение большого количества активных экспериментов и заключается в следующем. С помощью образцовых СИ производится запись сигналов вибрации с диагностируемых узлов, имеющих разное техническое состояние. Виды технического состояния определяются нормативной документацией [1]. Естественно, что техническое состояние оборудования, с которого были сняты сигналы, должно быть оценено по результатам его разборки и осмотра на основании критериев нормативно-технической документации на это оборудование. Количество экспериментов должно быть достаточно велико – по предварительным оценкам, от 10 до 30 экспериментов для каждого вида неисправности (дефекта). Современное ВДО способно идентифицировать до 15 видов дефектов подшипников качения. При наиболее распространенной классификации степени развития «слабый» – «средний» – «сильный» (недопустимый) только для одного типа подшипника минимальное количество экспериментов составит 45, а с учетом того, что информационная выборка должна быть репрезентативной, количество экспериментов возрастет до 450 – 500. Проведение такого количества активных экспериментов с разборкой и ревизией диагностируемых узлов связано со значительными временными и материальными затратами и вследствие этого крайне затруднительно в практической реализации. Еще одним препятствием в реализации этого способа является то обстоятельство, что ВДО, как правило, фиксирует и сохраняет в памяти не выборки временного сигнала, а только результаты его обработки в виде спектров.

Исходя из изложенного был предложен второй (альтернативный) способ формирования тестовых (эталонных) сигналов [2].

Этот способ заключается в восстановлении временного сигнала из трех различных видов спектров (прямой спектр, широкополосный, спектр огибающей сигнала). Авторами, в частности, была доказана правомерность использования восстановленного временного сигнала в качестве тестового (эталонного) [2].

Дальнейшее изучение вопроса и выполненные экспериментальные работы по моделированию тестовых сигналов показали, что можно обоснованно сократить процедуру их формирования. Суть заключается в моделировании тестовых сигналов с дефектных узлов, имеющих разную степень развития одного и того же дефекта. Так, например, при наличии записанного сигнала с узла, имеющего определенный дефект сильной степени развития, по определенному алгоритму можно получить сигнал, соответствующий средней и слабой степени развития дефекта. Или, наоборот, имея сигнал, соответствующий слабой степени развития, можно сформировать (трансформировать) его в сигналы, соответствующие средней и сильной степени развития дефекта.

Реализация указанного способа формирования тестовых сигналов возможна с помощью ВДО, которое осуществляет идентификацию дефектов оборудования по результатам спектрального анализа вибросигналов.

Вид дефектов идентифицируется по пяти основным и нескольким дополнительным группам гармоник [3] в спектре огибающей вибросигнала. К основным группам в порядке снижения вероятности их появления в спектре огибающей относятся следующие гармоники:

с частотами, кратными частоте вращения кольца подшипника $kf_{вр}$, где $f_{вр}$ – частота вращения кольца (ротора), k – кратность гармоники;

с частотами, кратными частоте перекачивания тел качения по наружному кольцу kf_n , где

$$f_n = 1/2 \cdot f_{вр} \cdot \frac{1 - d_{т.к}}{d_c \cdot \cos \alpha} \cdot z, \quad (1)$$

где $d_{т.к}$ – диаметр тела качения; d_c – диаметр сепаратора; α – угол контакта тел и дорожек качения; z – число тел качения в одном ряду подшипника;

с частотами, кратными частоте перекачивания тел качения по внутреннему кольцу kf_b , где

$$f_b = 1/2 \cdot f_{вр} \cdot \frac{1 + d_{т.к}}{d_c \cdot \cos \alpha} \cdot z; \quad (2)$$

с частотами, кратными частоте вращения сепаратора kf_c , где

$$f_c = 1/2 \cdot f_{вр} \cdot \frac{1 - d_{т.к}}{d_c \cdot \cos \alpha}; \quad (3)$$

с частотами, кратными частоте вращения тел качения $kf_{т.к}$, где

$$f_{т.к} = 1/2 \cdot f_{вр} \cdot \frac{d_{т.к}}{d_c} \cdot \frac{1 - d_{т.к}^2}{d_c^2 \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (4)$$

Число дополнительных групп гармоник достаточно велико (более 10).

Российские специалисты [4] установили, что существует пропорциональная связь между степенью развития дефекта и величиной глубины модуляции случайной составляющей сигнала вибрации. Формулы (в различных видах) для расчета глубины модуляции приводятся в источниках [3, 5 – 7]. Наиболее удачной авторы считают формулу, представленную в следующем виде:

$$m = \sqrt{\left(\frac{s(f)^2}{s_0(f)^2} - 1 \right)} \cdot \frac{\Delta f}{f_{filtr}} \cdot 100 \%; \quad (5)$$

где $S(f)$ – амплитуда спектральной (гармонической) составляющей в спектре огибающей; $S_0(f)$ – уровень огибающей (уровень случайной составляющей) сигнала; Δf – разрешение (шаг) по частоте в спектре огибающей; f_{filtr} – ширина полосового фильтра при выделении огибающей.

При представлении вибрации в относительных единицах – децибелах – формула (5) принимает вид [5]:

$$m = \sqrt{\left(10^{\Delta L/10} - 1 \right)} \cdot \frac{\Delta f}{f_{filtr}} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где ΔL – разница уровней между гармонической составляющей спектра огибающей и средним уровнем случайной составляющей этого же спектра.

Таким образом, задача формирования тестового сигнала вибрации дефектных узлов заключается в изменении глубины модуляции случайной составляющей сигнала огибающей до заранее определенных уровней, т. е. в изменении амплитуд отдельных гармонических составляющих в спектре огибающей.

В настоящее время не существует единой классификации степени развития дефектов, обнаруживаемых по сигналам вибрации. Большинство разработчиков вибродиагностического оборудования выделяют три степени развития дефектов: «слабый» (незначительный, допустимый), «средний» (обратить внимание, следить за развитием), «сильный» (недопустимый, запретить эксплуатацию, заменить узел). Находит применение и бинарная классификация: «в допуске» (норма, допустить в эксплуатацию), «не в допуске» (брак, запретить эксплуатацию). Различия в классификациях можно объяснить как спецификой и технологией использования диагностируемого оборудования, так и возможностями вибродиагностического оборудования. Попытки привязать степень развития дефекта к виду технического состояния [1] диагностируемого узла не находят практического применения и вряд ли будут использованы в будущем.

По мнению авторов, вопрос классификации степени развития идентифицируемых дефектов в настоящее время остается открытым, требует изучения, после которого должны появиться соответствующие нормативные документы (возможно ведомственной принадлежности).

Для формирования тестовых сигналов вибрации предлагается использовать трехпороговую классификацию – «слабый», «средний», «сильный».

На рисунке 1 показан спектр огибающей, полученный после обработки вибросигнала с подшипника (при его прокрутке), имеющего сильно развитый дефект «Раковины наружного кольца». На спектре отчетливо видны первые пять гармоник характерной частоты для указанного дефекта. Из имеющегося спектра в совокупности с соответствующим прямым и широкополосным спектром (предполагается отсутствие исходного временного сигнала) по определенному алгоритму был сформирован временной сигнал, при спектральном анализе которого степень развития того же дефекта стала определяться как «слабая». Процедура восстановления временного сигнала из трех видов спектров подробно описана в статье [8]. Если имеются не только спектры сигнала, а и исходный временной сигнал, то процедура восстановления временного сигнала не требуется, но, как показывает практика, в большинстве случаев вибродиагностическое оборудование формирует базы данных именно спектров, а не временных сигналов, которые занимают значительный объем памяти устройства. В связи с этим разработка способа корректного восстановления временного сигнала из спектральной области является актуальной задачей.

На рисунке 2 показан спектр огибающей сформированного (скорректированного) сигнала вибрации. В этом спектре видна только первая гармоническая составляющая характерной частоты. Для первого спектра («сильный дефект») расчетный показатель глубины модуляции составил 15 %, а для второго («слабый») – 4 %.

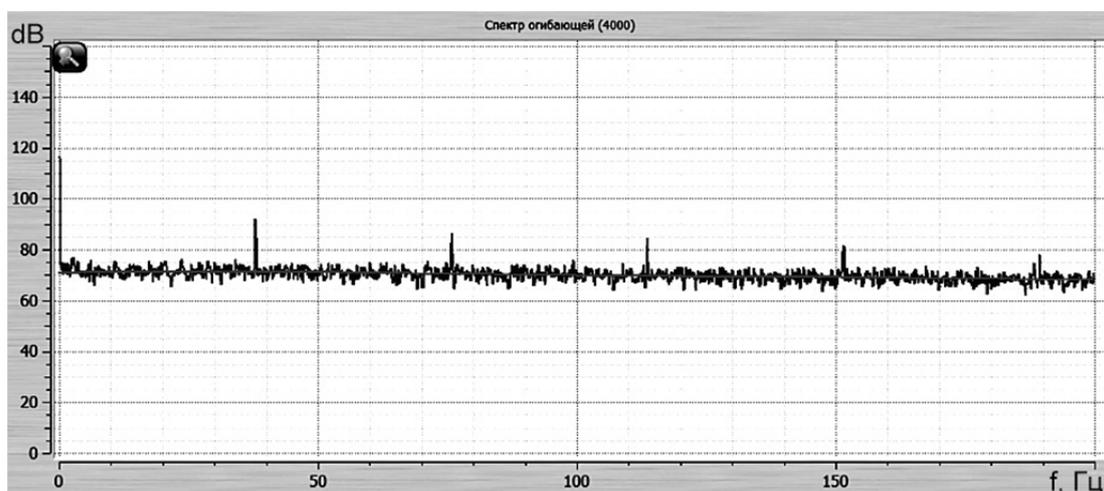


Рисунок 1 – Спектр огибающей с подшипника с сильно развитым дефектом «Раковины наружного кольца»

Для получения спектра, представленного на рисунке 2, были произведены следующие действия:

- 1) восстановление временного сигнала из трех видов спектров;
- 2) корректировка временного сигнала по амплитуде отдельных гармонических составляющих с целью приведения диагностических признаков (показателя глубины модуляции) до пороговых уровней, соответствующих величине развития дефекта «слабый»;
- 3) спектральный анализ сформированного временного сигнала с помощью ВДО, на основе которого было получено заключение о наличии в подшипнике дефекта «Раковины наружного кольца» со степенью развития «слабый».

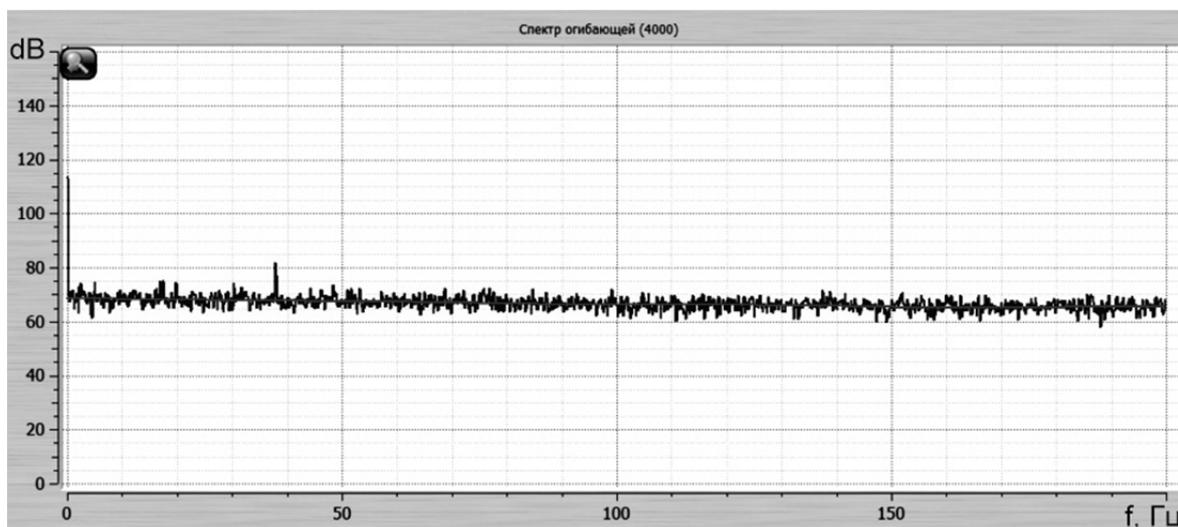


Рисунок 2 – Спектр огибающей, сформированный из предыдущего спектра (соответствует «слабому» дефекту «Раковины наружного кольца» подшипника)

Такая же процедура была использована для получения вибросигнала, соответствующего степени развития дефекта «средний» (иллюстрация спектра не приводится).

Следует отметить, что градация степени развития дефектов на «слабый», «средний», «сильный» является условной классификацией для ВДО, использующегося в локомотивном хозяйстве при определении остаточного ресурса узла или рекомендуемой даты проведения следующего диагностирования. В вагонном хозяйстве результаты диагностирования представляются в виде «да» – «нет» (допустить в эксплуатацию или не допустить). Классификация дефектов в ВДО никак не связана с классификацией, приводимой в нормативной документации по ремонту подшипников, например, в документе 3-ЦВРК (Инструктивные указания по эксплуатации и ремонту вагонных букс с роликовыми подшипниками), где приводятся геометрические размеры дефектов. Проблема гармонизации классификаторов дефектов (степень развития – геометрия дефекта) еще не решена и требует большого объема исследовательских работ.

В данном материале отсутствует описание процедуры корректировки временного сигнала, которая была разработана коллегой авторов Е. А. Сидоровым. Предполагается, что этот вопрос более подробно будет раскрыт в отдельной совместной статье.

Приведенная методика реализации тестовых сигналов вибрации позволяет формировать их по ограниченному количеству информации (при отсутствии исходного временного сигнала используются имеющиеся спектры). Диагностирование смоделированных временных сигналов на ВДО и получение соответствующих диагнозов показали корректность использованных процедур. Формирование с помощью предлагаемой процедуры тестовых сигналов позволяет отказаться от трудоемкого проведения активных экспериментов, которые требуют значительных материальных затрат и существенно сократить время формирования базы таких сигналов для каждого типа диагностируемого оборудования. Наборы тестовых сигналов вибрации могут быть использованы для объективной оценки функциональных возможностей вибродиагностического оборудования (что в настоящее время затруднительно) и для проверки его работоспособности и метрологической аттестации.

Список литературы

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения [Текст]. М.: Стандартиформ, 2009. – 10 с.
2. Тэттэр, В. Ю. Оценка возможности реализации вибрационных эталонов дефектов роторных механических узлов [Текст] / В. Ю. Тэттэр // Измерительная техника. – 2013. – № 5. – С. 20 – 23.
3. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев / СПбГМТУ. – СПб., 2000. – 159 с.
4. Барков, А. В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по сигналу вибрации [Текст] / А. В. Барков // Судостроение. – 1985. – № 3. – С. 21 – 23.
5. Зусман, Г. В. Вибродиагностика [Текст] / Г. В. Зусман, А. В. Барков. – М.: Спектр, 2011. – С. 148 – 149.
6. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин [Текст] / В. Н. Костюков, А. П. Науменко / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2011. – С. 173.
7. Barkov, A. V. Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings. Part 1 [Text] / A. V. Barkov, N. A. Barkova, J. S. Mitchel // Sound and Vibration. – 1955. – № 6. – P. 10 – 17.
8. Tetter V. Modeling of virtual standards of vibration of defective bearing units/ V. Tetter, E. N. Sidorov, E. A. Sidorova // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56. – Issue 3. – P. 278 – 282.

References

1. Tekhnicheskaja diagnostika. Terminy i opredeleniia, GOST 20911-89 (Technical diagnostics. Terms and definitions. State Standart 20911-89). Moscow, Standartinform, 2009, 10 p.
2. Tetter V. Y. Assessment of the feasibility of the vibration standards of the defects in the rotary mechanical units [Otsenka vozmozhnosti realizatsii vibratsionnykh etalonov defektov rotornykh mekhanicheskikh uzlov]. *Izmeritel'naia tekhnika – Measurement techniques*, 2013, no. 5, pp. 20 – 23.
3. Barkov A. V., Barkova N. A. Azovtsev A. Yu. *Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii* (Monitoring and diagnosis of rotating machines by vibration). St. Petersburg, 2000, 159 p.
4. Barkov A. V. Diagnostics and forecasting technical condition of rolling bearings by vibration signal [Diagnostika i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoianiia podshipnikov kacheniiia po signalu vibratsii]. *Sudostroenie – Shipbuilding*, 1985, no. 3, pp. 21 – 23.
5. Zusman G. V., Barkov A. V. *Vibrodagnostika* (Vibrodiagnostics). Moscow: Spectrum, 2011, pp. 148 – 149.
6. Kostjukov V. N., Naumenko A. P. *Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin* (Bases of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines) Omsk: Omsk state technical University, 2011, pp. 173.
7. Barkov, A. V. Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings. Part 1 [Text] / A. V. Barkov, N. A. Barkova, J. S. Mitchel // Sound and Vibration. – 1955. – № 6. – P. 10 – 17.
8. Tetter V. Modeling of virtual standards of vibration of defective bearing units/ V. Tetter, E. N. Sidorov, E. A. Sidorova // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56. – Issue 3. – P. 278 – 282.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тэттэр Владимир Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tetter Vladimir Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: te@omgups.ru

E-mail: te@omgups.ru

Тэттэр Александр Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: te@omgups.ru

Tetter Aleksandr Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Theoretical electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: te@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Тэттэр, В. Ю. Методика реализации сигналов для тестирования вибродиагностического оборудования подвижного состава / В. Ю. Тэттэр, А. Ю. Тэттэр // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 46 – 52.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Tetter V. Yu., Tetter A. Yu. Method of implementation signals for testing vibro-diagnostic equipment of rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies – Omsk – 2016, vol. 28, no. 4, pp. 46 – 52. (In Russian).

УДК 629.424.3:621.436

В. А. Четвергов¹, А. С. Анисимов¹, О. В. Балагин¹, А. А. Свечников²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В статье рассмотрены этапы развития энергосиловых установок автономных локомотивов от паровой машины до газотурбинных двигателей и двигателей на топливных элементах.

Ключевые слова: энергосиловая установка, паровая машина, паровоз, дизель, тепловоз, удельный расход топлива, коэффициент полезного действия, газотурбинный двигатель, атомный локомотив, топливные элементы.

Vitaly A. Chetvergov¹, Alexander S. Anisimov¹, Oleg V. Balagin¹, Alexander A. Svechnikov²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Samara State Transport University (SamSTU), Samara, the Russian Federation

PRESENT AND FUTURE OF POWER PLANTS AUTONOMOUS LOCOMOTIVES

Abstract. In article stages developments of power plants autonomous locomotives from the steam-engine to gas-turbine engines and engines on fuel elements are considered.

Keywords: power plant, steam-engine, engine, diesel, locomotive, specific fuel consumption, efficiency, gas-turbine engine, atomic locomotive, fuel elements.

За многовековую историю развития человеческой цивилизации человеком создано множество технических систем и объектов (инструментов, машин, аппаратов, приборов и т. п.), которые в настоящее время составляют техносферу, стоящую между человеком и природой. При этом каждое техническое устройство создавалось в свое время для выполнения определенной функции.

Во все эпохи развития человечества в деятельности человека по удовлетворению своих потребностей существовала транспортная функция, т. е. перемещение тел, предметов, ве-

ществ и самого себя в пространстве. Для выполнения этой функции человеком создано огромное число чередующихся во времени все более эффективных технических средств для транспортировки – от элементарных катков до современных автомобилей и локомотивов, самолетов.

На основе качественно анализа стадий «жизни» технических объектов определенного функционального назначения и их потребительских качеств можно сделать вывод о том, что создаваемые человеком технические объекты со временем изменяются, совершенствуются, т. е. развиваются [1]. И этот процесс развития имеет вполне определенную тенденцию во времени, так как происходит под воздействием стремления человека к удовлетворению своих постоянно растущих потребностей (как по их количеству, так и по качеству). Очевидно, это свойственно и такому виду технических объектов, как энергосиловая установка автономного локомотива. Она в течение двух столетий развития железнодорожного транспорта и автономных локомотивов (паровоз – тепловоз – газотурбовоз) также изменялась (паровая поршневая машина, паровая турбина, двигатель внутреннего сгорания, газотурбинный двигатель), также развивалась [2].

Не вызывает сомнения, что результативность и эффективность современного творчества ученых и инженеров по совершенствованию имеющейся и созданию новой техники в значительной степени зависят от полноты учета ими эволюции техники в прошлом, от знания законов ее развития, изменения (улучшения) критериев качества, которые могут быть установлены на основе анализа истории уже состоявшегося развития технических объектов.

Изучение эволюции техники позволяет выявить и описать положительный опыт эффективного решения возникавших раньше задач инженерного творчества, а потом использовать его в решении современных задач. Анализ конструктивной эволюции позволяет осмыслить в деталях и «пропустить через себя» процесс получения выдающихся изобретений, углубленно изучить работу и опыт выдающихся конструкторов и ученых. Изучение эволюции дает основу для формирования закономерностей строения и развития техники, знание которых облегчает нахождение новых, эффективных и перспективных технических решений.

Наиболее важным и общим из уже открытых и сформулированных законов развития техники является закон прогрессивного развития техники. Действие этого закона в мире техники аналогично действию закона естественного отбора Дарвина в живой природе. Он отвечает на вопросы: почему происходит переход от предшествующего поколения технических объектов к следующему (улучшенному) поколению; при каких условиях, когда и какие структурные изменения происходят при переходе от поколения к поколению. Закон прогрессивного развития техники имеет следующую формулировку.

Для технических объектов, предназначенных для выполнения определенной функции, переход от одного поколения к следующему поколению вызван необходимостью устранения выявленного главного дефекта (дефектов), связанных, как правило, с улучшением критериев качества, и происходит при наличии необходимого научно-технического уровня и социально-экономической целесообразности следующими наиболее вероятными путями иерархического исчерпания возможностей конструкции:

А) при неизменных физическом принципе действия и техническом решении улучшаются параметры эффективности (качества) технического объекта до приближения их к максимально возможному значению путем улучшения конструктивно-технологических мер и интенсификации рабочих параметров;

Б) после исчерпания возможностей цикла А происходит переход к более рациональному техническому решению (структуре), после чего развитие (совершенствование) опять идет по циклу А, т. е. путем улучшения параметров качества за счет повышения рабочих параметров; циклы А и Б повторяются до приближения к глобальному максимуму показателей эффективности при сохранении принципа действия;

В) после исчерпания возможностей циклов А и Б происходит переход к более рациональному физическому принципу действия, после чего развитие опять идет по циклам А и Б.

Циклы А, Б, В повторяются до приближения к глобальному экстремуму по принципу действия для множества известных физических эффектов, использующих те или иные законы природы.

Суть закона прогрессивного развития техники в приложении к энергосиловой установке автономных локомотивов описывается следующей схемой (рисунок 1). Первым типом локомотивной энергосиловой установки первого локомотива – паровоза – явилась поршневая паровая машина, использующая для выработки энергии рабочее тело в виде водяного пар, получаемого в паровом котле за счет сжигания в топке топлива. Паровая машина является одной из разновидностей тепловых двигателей, принципом действия которых является использование химической энергии топлива, выделяемой при его сжигании для получения механической энергии.

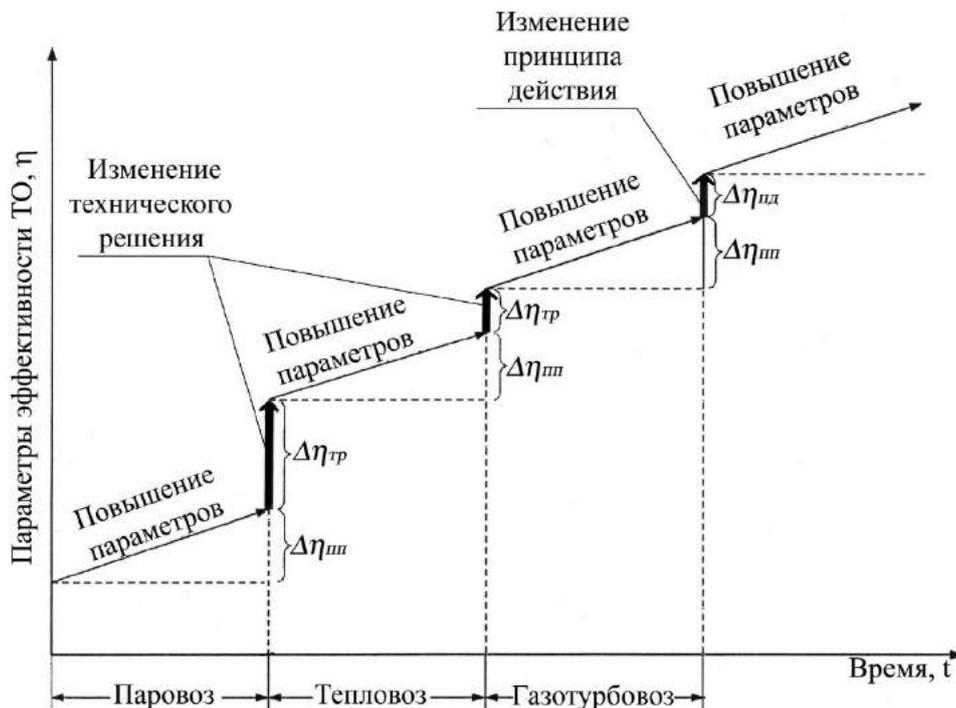


Рисунок 1 – Схема смены поколений технических объектов (ТО) и повышения их эффективности

Эффективность тепловых двигателей в качестве энергосиловой установки автономного локомотива оценивается совокупностью следующих параметров: мощность, коэффициент полезного действия, удельный расход топлива на единицу вырабатываемой энергии и его стоимость, габариты и масса, регулируемость, динамические характеристики, вредное воздействие на окружающую среду. Более чем за полуторавековой период применения коэффициент полезного действия паровоза возрос от 2 – 3 % до 9 – 12 % за счет изменения параметров паросиловой установки (повышения давления и температуры пара, применения пароперегревателей и компаундного расширения, совершенствования парораспределения, применения конденсации пара и др.). При этом неизменным оставалось техническое решение – рабочее тело (пар) получалось из воды, на что затрачивалась значительная доля выделяющейся энергии при сжигании в топке топлива, которая бесполезно выбрасывалась в атмосферу с отработавшим паром. Это был главный дефект применяемого в паровозе технического решения. Проследим изменение параметров паросиловой установки пассажирских паровозов по данным таблицы 1.

Изменение параметров паросиловой энергоустановки во времени и их влияние на эффективные показатели паровоза графически показаны на рисунке 2.

Повышение эффективных показателей паровоза во многом зависит от давления и температуры пара. Температура пара определяется площадью колосниковой решетки, располо-

Подвижной состав железных дорог

женной в топке, и поверхностью нагрева парового котла. Одновременное увеличение этих параметров и применение конструктивных дополнений в паросиловой энергоустановке дало прирост КПД паровоза.

Таблица 1 – Параметры паросиловых установок пассажирских паровозов

Серия паровоза	Год постройки	Давление пара P_n , МПа	Площадь колосниковой решетки S , м ²	Поверхность нагрева котла, м ²	КПД паровоза η , %	Особенности паросиловой установки
П	1891	1,18	1,9	146	2	Паровая машина двукратного расширения пара
У ^У	1906	1,37	2,8	192	5	Увеличенный диаметр малых цилиндров, наличие пароперегревателя
М	1926	1,28	6	356	9	Пароперегреватель Шмидта, наличие одноклапанного регулятора за пароперегревателем
ПЗ6	1950	1,47	6,75	242	12	Двухоборотный перегреватель, парораспределительный механизм Гейзингера, наличие водоподогревателя

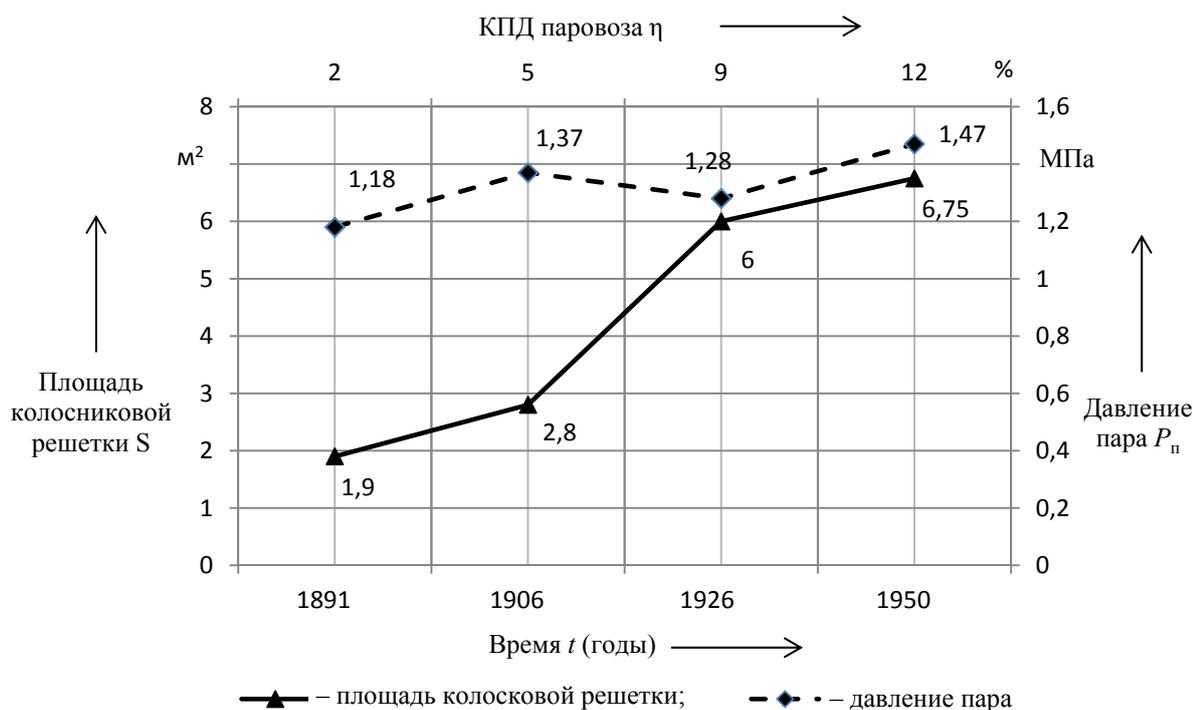


Рисунок 2 – Изменение параметров паросиловой энергоустановки во времени

Переход от паровозов к тепловозам осуществлен за счет замены паросиловой установки двигателем внутреннего сгорания (дизелем), в котором применено новое техническое решение теплового двигателя – получение рабочего тела из воздуха и продуктов сгорания топлива в рабочей полости цилиндра. При этом отсутствуют потери энергии на процесс «жидкость – пар», т. е. тепло тратится лишь на повышение температуры и давления рабочего тела, т. е. его потенциальной энергии. Это позволило в несколько раз повысить КПД тепловоза по сравнению с КПД паровоза. В дальнейшем за счет применения ряда конструктивных усовершенствований, направленных на улучшение параметров (повышение степени сжатия, применение непосредственного впрыска топлива для внутреннего смесеобразования, само-

воспламенения рабочей смеси, различных схем наддува и др.), коэффициент полезного действия тепловозов был повышен от 0,15 – 0,20 до 0,35 – 0,4. Проследим изменение параметров теплосилового устройства тепловозов советской и российской постройки по данным таблицы 2.

Таблица 2 – Параметры теплосиловых установок тепловозов

Дизель	Год постройки	Степень сжатия ϵ	Давление наддува P_n , МПа	Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	Особенности теплосилового устройства
6ЧН31,8/33	1946	11,8	0,0319	224	Дизель простого действия с бескомпрессорным распылением топлива и турбонаддувом
12ДН23/30	1965	13	0,0981	226,4	Двухрядное V-образное расположение цилиндров, комбинированный двухступенчатый наддув
16ЧН26/26	1971	13,5	0,134	214,2	V-образный дизель с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха
12ЧН26/26	2006	13,5	0,181	191,5	Импульсная система подачи топлива с электронным управлением

Повышение эффективных показателей тепловоза во многом зависит от степени сжатия и давления наддува. Увеличение этих параметров и применение конструктивных дополнений в дизельной энергоустановке дало снижение удельного эффективного расхода топлива с 224 до 191,5 г/кВт·ч.

Изменение параметров дизельной энергоустановки во времени и их влияние на эффективные показатели паровоза графически показаны на рисунке 3.

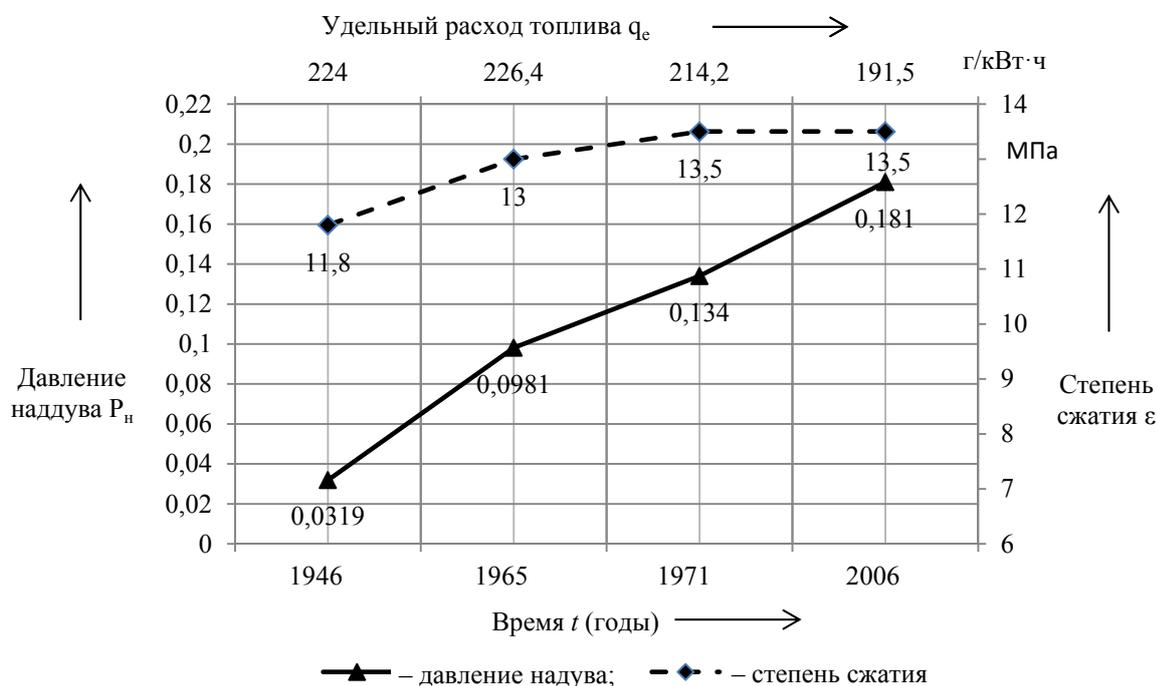


Рисунок 3 – Изменение параметров дизельной энергоустановки во времени

В ходе развития тепловозной тяги к настоящему времени выявился дефект тепловозов – ограничение дальнейшего роста агрегатной мощности дизеля по габаритам и массе, что вызвано в основном наличием у него возвратно-поступательно движущихся масс кривошипно-шатунного механизма. Недостатком является и необходимость использовать высококачественное, дорогостоящее топливо. Эти дефекты могут быть устранены заменой дизеля на га-

зотурбинный двигатель (тоже разновидность теплового двигателя), в котором использованы такие технические решения, как сжигание топлива в отдельной камере сгорания и преобразование потенциальной энергии рабочего тела в механическую энергию в каналах между лопатками вращающегося ротора [3]. Это позволяет значительно снизить массу и габаритные размеры энергосилового устройства, уменьшить ее сложность и существенно снизить трудоемкость и стоимость технического обслуживания и ремонта, применять более дешевые сорта топлива.

Максимум КПД газотурбинного двигателя находится в области 70 – 80 %-ной мощности, что в наибольшей степени соответствует закону использования мощностей магистральных локомотивов в условиях эксплуатации. Выбор схемы и конструкции газотурбинных двигателей целесообразно увязывать с назначением, условиями работы локомотива, с возможностями отечественного газотурбостроения. Для газотурбовозов грузовой службы необходимо стремиться к достижению максимально возможного (на уровне дизельного) КПД даже за счет серьезного усложнения и удорожания машины.

В 60-х гг. в СССР возник интерес к атомным локомотивам. Таких локомотивов и сегодня в мире еще нет, но проработки проектов выполняются в наше время и на самом современном уровне. Принцип действия локомотива с ядерной силовой установкой не отличается от принципа действия всех автономных локомотивов. Ядерная силовая установка – атомный реактор – является тепловым генератором, т. е. источником тепловой энергии, которая выделяется в процессе цепной реакции деления (распада) атомов ядерного топлива. При помощи теплоносителя эта энергия так же, как на АЭС, должна быть передана в теплообменнике рабочему телу, которое в каком-то тепловом двигателе, в свою очередь, преобразует свою тепловую энергию в механическую работу, которую далее можно использовать для создания силы тяги.

При реализации этого принципа возникает необходимость решения ряда сложных технических задач: определение вида рабочего тела, невозможность быстрого изменения нагрузки, значительная масса биологической защиты реактора. К тому же, пока нет ясности, где на железных дорогах мира можно эффективно использовать преимущества ядерной силовой установки, дающей возможность локомотиву длительно находиться в автономном и безостановочном движении.

Резкое усиление требований к безопасности ядерной силовой установки, экологической чистоте и абсолютной радиационной защите, трудно обеспечиваемых в условиях напряженной работы железнодорожного транспорта, делает в настоящее время задачу создания атомного локомотива пока не актуальной.

Развитие криогенной техники и ее изучение специалистами локомотивостроения в процессе создания газотепловозов позволили рассматривать в качестве перспективных энергетических установок для автономных локомотивов некоторые источники энергии, еще не достигшие стадии промышленного применения, например, топливные элементы [3]. Локомотив на топливных элементах теоретически мог бы иметь определенные преимущества по сравнению с обычным тепловозом – отсутствие теплового генератора и связанных с преобразованием в нем потерь энергии. Однако для энергетической установки на топливных элементах необходимы значительно большие размеры охлаждающих устройств, чем у тепловозного дизеля. Требуются аккумуляторы энергии для обеспечения собственных нужд локомотива, прицепной криогенный тендер для запаса жидкого водорода и т. п. Выполненные расчеты показали, что локомотив такого типа не может иметь очевидных технико-экономических преимуществ по сравнению с обычным тепловозом – сокращение затрат на топливо в эксплуатации будет перекрываться в приведенных расходах значительно большей стоимостью самого локомотива и увеличением затрат на его обслуживание.

Таким образом, развитие энергосиловых установок автономных локомотивов за два века связано с изменениями технических решений в рамках тепловых двигателей (паровая машина – двигатель внутреннего сгорания – газотурбинный двигатель) и более многочислен-

ными конструктивными изменениями в рамках каждого технического решения, направленными на улучшение параметров.

Список литературы

1. Половинкин, А. И. Основы инженерного творчества [Текст]: Учебное пособие / А. И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
2. Четвергов, В. А. Основы методологии научно-технической деятельности [Текст] / В. А. Четвергов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008. – 78 с.
3. Локомотивные энергетические установки [Текст]: Учебник / А. И. Володин, В. З. Зюбанов и др.; Под ред. А. И. Володина. – М.: Желдориздат, 2002. – 718 с.

References

1. Polovinkin A. I. *Osnovy inzhenernogo tvorchestva* (The fundamentals of engineering creativity). Moscow: Mashinostroenie, 1988, 368 p.
2. Chetvergov V.A. *Osnovy metodologii nauchno-tekhnicheskoi deiatel'nosti* (Fundamentals of the methodology of scientific and technical activities). Omsk, 2008, 78 p.
3. Volodin A. I., Ziubanov V. Z., Kuz'mich V. D. *Lokomotivnye energeticheskie ustanovki* (Locomotive power plants). Moscow: Zheldorizdat, 2002, 718 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Четвергов Виталий Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор-консультант кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-17.

Анисимов Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: AnisimovAS@omgups.ru

Балагин Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-17.

Свечников Александр Александрович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

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

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

Тел.: +7 (846) 262-41-12.

E-mail: alexzander751@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chetvergov Vitaly Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-17.

Anisimov Alexander Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: AnisimovAS@omgups.ru

Balagin Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-17.

E-mail: BalaginOV@omgups.ru

Svechnikov Alexander Aleksandrovich

Samara State Transport University (SSTU).

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

Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the department «Locomotives», SSTU.

Phone: +7 (846) 262-41-12.

E-mail: alexzander751@mail.ru

Четвергов, В. А. Настоящее и будущее энергосиловых установок автономных локомотивов / В. А. Четвергов, А. С. Анисимов, О. В. Балагин, А. А. Свешников // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 52 – 59.

Chetvergov V. A., Anisimov A. S., Balagin O. V., Svechnikov A. A. Present and future of power plants autonomous locomotives. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 52 – 59. (In Russian).

УДК 621.313

П. К. Шкодун, А. В. Долгова

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

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Целью настоящей статьи является создание математической модели для комплексной оценки качества выполненного ремонта коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя подвижного состава, включающей в себя оценку механической и коммутационной составляющих произведенного ремонта. Задачами настоящего исследования являются определение лингвистических переменных на основании сформированного набора диагностических признаков, в том числе биения рабочей поверхности коллектора, среднего квадратического отклонения относительных высот коллекторных ламелей, амплитуд первой, второй гармонических составляющих профиля коллектора, среднего квадратического отклонения относительных высот коллекторных ламелей без учета первой и второй гармонических составляющих, минимального значения второй производной функции профиля коллектора, среднего квадратического отклонения второй производной функции профиля коллектора, действующего значения высших гармонических составляющих функции профиля коллектора с наибольшей диагностической ценностью и определение их функций принадлежности, а также определение комплексных показателей качества ремонта и его составляющих: комплексных показателей качества механической обработки и коммутации в коллекторно-щеточном узле тягового электродвигателя. Решение поставленных задач выполнено с использованием математического аппарата нечеткой логики на основе использования результатов статистической обработки данных экспериментальных исследований и расчета диагностической ценности измеренных и рассчитанных параметров. В результате выполненного исследования сформированы математические модели качества ремонта в пространстве выбранных признаков с использованием аппарата нечеткой логики, позволяющие рассчитывать значение предложенных комплексных показателей для произвольных значений диагностических параметров. Полученные результаты можно использовать для контроля качества выполненного ремонта коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава.

Ключевые слова: подвижной состав, тяговый электродвигатель, коллекторно-щеточный узел, диагностические параметры, функция принадлежности, база правил деятельности алгоритма нечеткого вывода.

Pavel K. Shkodun, Anna V. Dolgova

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

FUZZY LOGIC APPLICATION IN THE DIAGNOSIS THE ROLLING STOCK TRACTION MOTOR COMMUTATOR-BRUSH UNIT

Abstract. The purpose of this article is to create mathematical models for a comprehensive assessment of the quality of repairs of collector-brush assembly drive motor vehicles, including an assessment of mechanical and switching components. The objectives of this study are to determine the linguistic variables based on the generated set of diagnostic features, including "beating of the working surface of the collector", "RMS heights collector lamellae", "amplitude of the first harmonic component of the profile of the collector", "the amplitude of the second harmonic component of the profile of the collector" "RMS heights collector slat excluding the first and second harmonic components", "minimum value of the second derivative of the profile of the collector function", "standard deviation of the second derivative of the profile of the reservoir function," "effective value of the higher harmonic components of the collector profile fea-

tures" that have the greatest diagnostic value and determination of their membership functions, as well as the definition of the complex index of quality of repair and its components: complex index of quality of machining and integrated commutation quality index in the collector-brush unit of the traction motor. Solution of tasks performed using the mathematical apparatus of fuzzy logic through the use of statistical processing of the results of these pilot studies and the calculation of the diagnostic value of the measured and calculated parameters. As a result of the research formed the mathematical model of quality repair in the space of selected features using the apparatus of fuzzy logic for calculating the value of the proposed integrated indicators for arbitrary values of diagnostic parameters. The results may be used to control the quality of repairs of collector-brush assembly of traction motors of the rolling stock.

Keywords: rolling stock, traction motor, commutator-brush unit, diagnostic parameters, membership function, fuzzy logic rules base.

Одним из приоритетных направлений развития железнодорожного транспорта является снижение издержек при ремонте тягового подвижного состава, обеспечение ресурсосбережения и поддержание надлежащего технического состояния локомотивов, находящихся в эксплуатации. Интенсивность использования и повышение требований к надежности и безопасности тягового подвижного состава обуславливают необходимость осуществления технического диагностирования его деталей и узлов. Сложность конструкции узлов электровозов затрудняет определение их технического состояния, поэтому возникает необходимость разработки и применения достоверных методов и специализированных средств диагностирования.

Надежность деталей и узлов локомотива, в частности тяговых электрических двигателей (ТЭД), определяет его работоспособность и стабильность функционирования в эксплуатации. ТЭД представляет собой сложную техническую систему, включающую в себя электроизоляционную конструкцию, коллекторно-щеточный аппарат, механическую часть. Алгоритм диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла (КЩУ) ТЭД и его деталей определяется комплексом утвержденных технологических операций, включающих в себя контроль механических и электрических параметров. Следует отметить, что контроль перечисленных параметров в ряде случаев не позволяет получить достоверные результаты о техническом состоянии КЩУ ТЭД. Отсюда возникает задача создания комплексной методики технического диагностирования, позволяющей получать достоверные сведения о качестве ремонта, отражающем техническое состояние КЩУ ТЭД [1].

В основу различных методик диагностирования положены методы математического анализа и моделирования, при этом большинство систем технического диагностирования используют информацию о состоянии узла в виде набора диагностических признаков, определяющих его технические свойства. Создание предлагаемой диагностической модели системы «коллектор – щетка» с применением методов нечеткой логики позволит повысить достоверность диагностирования и распознавания состояний работоспособности КЩУ ТЭД.

Диагностическая модель КЩУ ТЭД представлена в виде уточненной граф-модели диагностирования системы «коллектор – щетка» в процессе приемосдаточных испытаний, параметры которой являются компонентами нелинейного дифференциального уравнения первого порядка, описывающего процесс коммутации в электродвигателе [2]:

$$L \frac{di}{dt} + \sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt} = \Delta u_1(J) - \Delta u_2(J) - iR_S - e_k(t), \quad (1)$$

где $e_L = -L \frac{di}{dt}$ – ЭДС самоиндукции; $e_M = -\sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt}$ – ЭДС взаимной индукции; $\Delta u_1(J)$ и $\Delta u_2(J)$ – переходные падения напряжения под набегающим и сбегаящим краями щетки; R_S – сопротивление коммутируемой секции; $e_k(t)$ – коммутирующая ЭДС, наводимая в секции при ее взаимодействии с магнитными полями в зоне коммутации.

Анализ результатов проведенных статистических исследований [3] и декомпозиция рабочей граф-модели [4] позволили определить набор диагностических признаков, для которых

рассчитана их диагностическая ценность [5]. На основании полученных результатов выделен набор наиболее значимых диагностических параметров, характеризующих воздействие состояния профиля коллектора на процесс коммутации, значения которых являются входными переменными при реализации деятельности процесса нечеткого вывода (таблица 1).

Таблица 1 – Диагностические параметры

Наименование параметра	Обозначение параметра
Биение рабочей поверхности коллектора	δ
Среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных ламелей	σ_h
Амплитуда первой гармонической составляющей профиля коллектора	A_1
Амплитуда второй гармонической составляющей профиля коллектора	A_2
Среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных ламелей без учета первой и второй гармонических составляющих	$\sigma_h _{v=3..n}$
Минимальное значение второй производной функции профиля коллектора	$\ddot{\eta}_{\min}$
Среднее квадратическое отклонение второй производной функции профиля коллектора	$\sigma_{\ddot{\eta}}$
Действующее значение высших гармонических составляющих функции профиля коллектора	$\eta_{\text{действ}}$

Задачи контроля и повышения качества ремонта и надежности системы «коллектор – щетка» решаются путем совершенствования методов технического контроля и разработкой новых критериев принятия решения о соответствии технического состояния паспортным данным оборудования. Разработка нового критерия принятия решения о техническом состоянии объекта с применением метода нечеткой логики состоит из нескольких этапов, причем на начальном этапе осуществляется описание диагностических признаков в терминах нечетких множеств.

Сформулируем предметную область «качество ремонта» в терминах теории нечетких множеств [6]. Комплексный показатель качества ремонта (КПКР) определим в виде функции нескольких параметров, которая определена в декартовом пространстве как произведение множеств возможных значений диагностических параметров и принимает значения в диапазоне от нуля до единицы.

Для проведения дальнейшего анализа КПКР выделим две его составляющие: комплексный показатель качества механической обработки (КПКМО) и комплексный показатель качества коммутации (КПКК), характеризующиеся, соответственно, лингвистическими переменными «качество механической обработки» и «качество коммутации».

Выделим восемь лингвистических переменных: «биение рабочей поверхности коллектора», «среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных ламелей», «амплитуда первой гармонической составляющей профиля коллектора», «амплитуда второй гармонической составляющей профиля коллектора», «среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных ламелей без учета первой и второй гармонических составляющих», «минимальное значение второй производной функции профиля коллектора», «среднее квадратическое отклонение второй производной функции профиля коллектора», «действующее значение высших гармонических составляющих функции профиля коллектора». Для каждой из выделенных переменных в качестве первичных термов (интуитивно определенных выражений формального языка, являющихся формальными именами объектов) применим следующие высказывания: «нормальное (номинальное) значение величины», «малое значение величины», «большое значение величины» [7].

Составим терм-множество для лингвистической переменной «биение рабочей поверхности коллектора», используя кроме первичных термов дополнительные связи.

T (биение рабочей поверхности коллектора) = очень малое значение биения рабочей поверхности коллектора + малое значение биения рабочей поверхности коллектора + нормальное значение биения рабочей поверхности коллектора + ненормальное значение биения рабочей поверхности коллектора + ненормальное и небольшое значение биения рабочей поверхности коллектора + небольшое значение биения рабочей поверхности коллектора + большое значение биения рабочей поверхности коллектора + очень большое значение биения рабочей поверхности коллектора + ...

Составим терм-множества лингвистических переменных «качество ремонта», «качество механической обработки» и «качество коммутации», используя в качестве основы терм-множество лингвистической переменной «истина», рассмотренной в источниках [8, 9].

T (качество ремонта) = некачественный ремонт + недостаточно качественный ремонт + ремонт среднего качества + качественный ремонт + очень качественный ремонт + существенно качественный ремонт + ...

T (качество механической обработки) = некачественная механическая обработка + недостаточно качественная механическая обработка + механическая обработка среднего качества + качественная механическая обработка + очень качественная механическая обработка + существенно качественная механическая обработка + ...

T (качество коммутации) = некачественная коммутация + недостаточно качественная коммутация + коммутация среднего качества + качественная коммутация + очень качественная коммутация + ...

Представим для выделенных лингвистических переменных функции принадлежности.

Для нечеткой переменной «нормальное значение биения рабочей поверхности коллектора» лингвистической переменной «биение рабочей поверхности коллектора» сформируем функцию принадлежности в виде Z-образной кривой [9] на основании наличия граничного значения. В общем виде функция принадлежности описывается выражением:

$$f_{z_1}(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x < a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-a}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases}, \quad (2)$$

где a, b – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением $a < b$.

Для каждой нечеткой переменной статистически определены диапазон изменения значений x и числовые параметры a и b (таблица 2).

Для нечеткой переменной «нормальное значение биения рабочей поверхности коллектора» функция принадлежности лингвистической переменной примет следующий вид:

$$f_{z_1}(\delta; 50, 80) = \begin{cases} 1, & \delta < 50 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\delta-50}{30} \pi\right), & 50 \leq \delta \leq 80 \\ 0, & \delta > 80 \end{cases}. \quad (3)$$

Для нечеткой переменной «большое значение биения рабочей поверхности коллектора» лингвистической переменной «биение рабочей поверхности коллектора» сформируем функцию принадлежности в виде наиболее соответствующей ей S-образной кривой [9]. В общем виде функция принадлежности описывается выражением:

$$f_{s_1}(x; a, b) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-b}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases}, \quad (4)$$

где a, b – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением $a < b$.

Таблица 2 – Числовые параметры нечетких переменных

Нечеткая переменная	Диапазон значений x	Значение параметра a	Значение параметра b
Биение рабочей поверхности коллектора	0 ... 150 мкм	50 мкм	80 мкм
Среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных ламелей	5 ... 25 мкм	10 мкм	20 мкм
Амплитуда первой гармонической составляющей функции профиля коллектора	3 ... 35 мкм	10 мкм	20 мкм
Амплитуда второй гармонической составляющей функции профиля коллектора	0 ... 20 мкм	5 мкм	15 мкм
Среднее квадратическое отклонение относительных высот коллекторных ламелей без учета первой и второй гармонических составляющих	0 ... 20 мкм	5 мкм	15 мкм
Минимальное значение второй производной функции профиля коллектора	-10 ... -80 мкм ⁻²	-15 мкм ⁻²	-70 мкм ⁻²
Среднее квадратическое отклонение второй производной функции профиля коллектора	5 ... 20 мкм ⁻²	11 мкм ⁻²	17 мкм ⁻²
Действующее значение высших гармонических составляющих функции профиля коллектора	3 ... 20 мкм ⁻²	8 мкм ⁻²	15 мкм ⁻²

Учитывая установленные ранее значения числовых параметров a и b , запишем:

$$f_{s_1}(\delta; 50, 80) = \begin{cases} 0, & \delta < 50 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-80}{30} \pi\right), & 50 \leq \delta \leq 80 \\ 1, & \delta > 80 \end{cases} \quad (5)$$

Для нечеткой переменной «ненормальное и небольшое значение биения рабочей поверхности коллектора» лингвистической переменной «биение рабочей поверхности коллектора» сформируем функцию принадлежности в виде П-образной кривой [9], поскольку имеется интервал, в котором переменная имеет максимум. В общем виде функция принадлежности описывается выражением:

$$f_{\Pi}(x; a, b, c, d) = f_s(x; a, b) \cdot f_z(x; c, d), \quad (6)$$

где a, b, c, d – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением $a \leq b < c \leq d$.

Примем следующие значения числовых параметров: $a = 40, b = 60, c = 70, d = 90$. Графики функций принадлежности рассмотренных нечетких переменных лингвистической переменной «биение рабочей поверхности коллектора» изображены на рисунке 1.

Аналогичным способом составим функции принадлежности для остальных лингвистических переменных (рисунки 2 – 8), используя значения параметров для формирования функций принадлежности лингвистических переменных (см. таблицу 2).

Получим функцию принадлежности нечеткого множества «качество ремонта», используя $(L - R)$ -функцию [10] вида:

$$L(x) = R(x) = e^{-|x|^p}, \quad (4)$$

где p – параметр, удовлетворяющий условию $p \geq 0$.

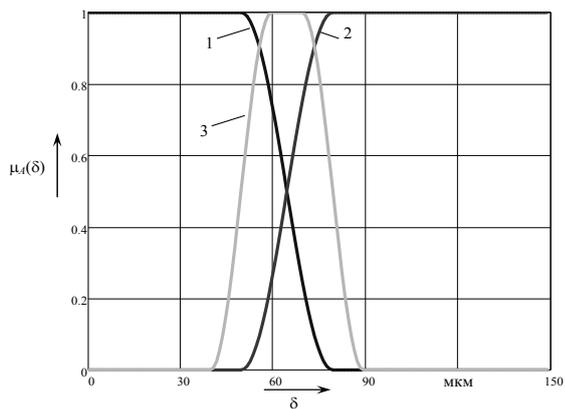


Рисунок 1 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термины:

- 1 – нормальное значение δ ;
- 2 – большое значение δ ;

3 – ненормальное и небольшое значение δ

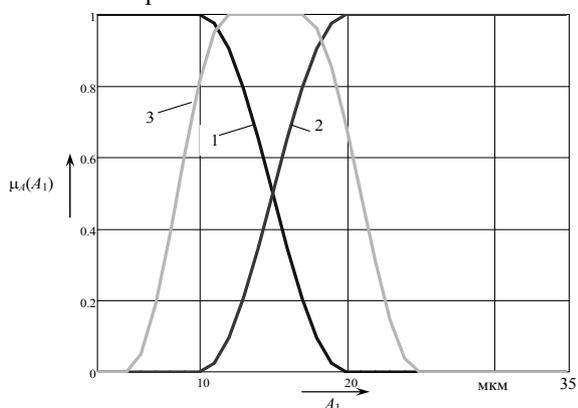


Рисунок 3 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термины:

- 1 – нормальное значение A_1 ;
- 2 – большое значение A_1 ;

3 – ненормальное и небольшое значение A_1

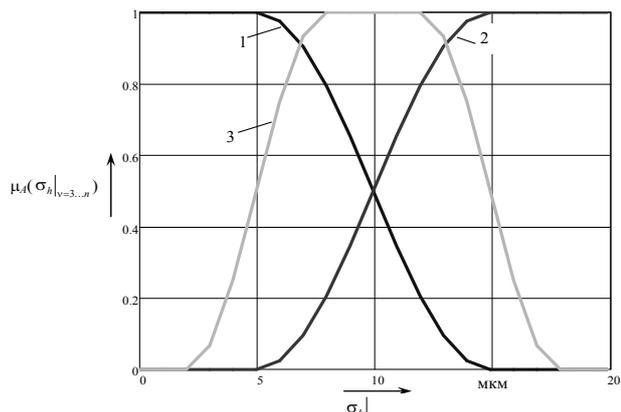


Рисунок 5 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термины:

- 1 – нормальное значение $\sigma_h|_{v=3..n}$;
- 2 – большое значение $\sigma_h|_{v=3..n}$;

3 – ненормальное и небольшое значение $\sigma_h|_{v=3..n}$

3 – ненормальное и небольшое значение $\sigma_h|_{v=3..n}$

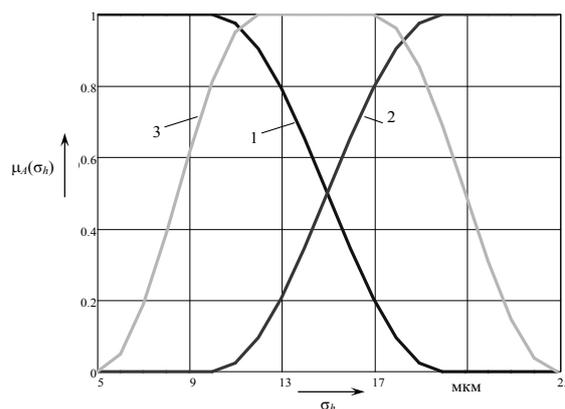


Рисунок 2 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термины:

- 1 – нормальное значение σ_h ;
- 2 – большое значение σ_h ;

3 – ненормальное и небольшое значение σ_h

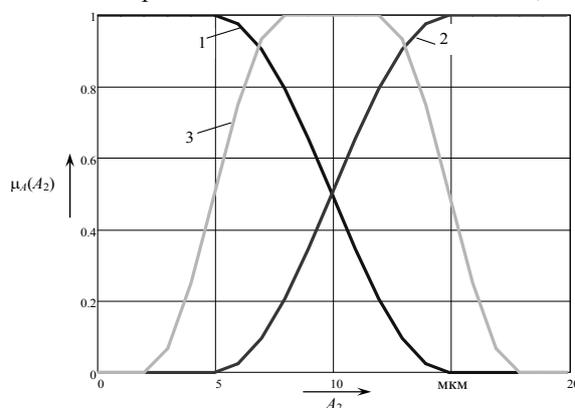


Рисунок 4 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термины:

- 1 – нормальное значение A_2 ;
- 2 – большое значение A_2 ;

3 – ненормальное и небольшое значение A_2

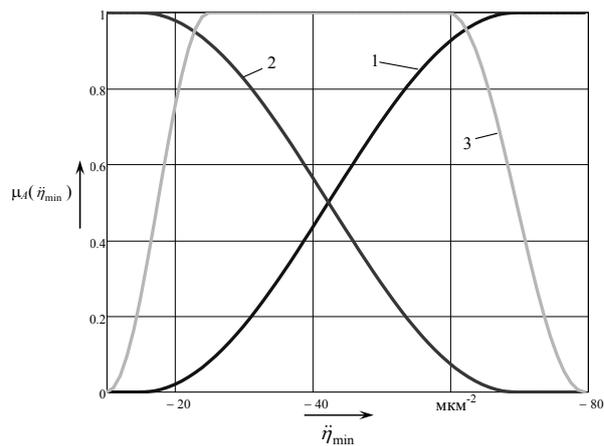


Рисунок 6 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термины:

- 1 – нормальное значение $\dot{\eta}_{\min}$;
- 2 – большое значение $\dot{\eta}_{\min}$;

3 – ненормальное и небольшое значение $\dot{\eta}_{\min}$

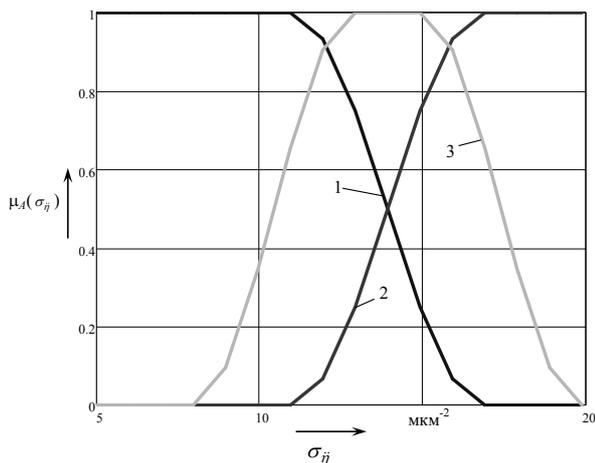


Рисунок 7 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термы:
 1 – нормальное значение σ_{ij} ;
 2 – большое значение σ_{ij} ;
 3 – ненормальное и небольшое значение σ_{ij}

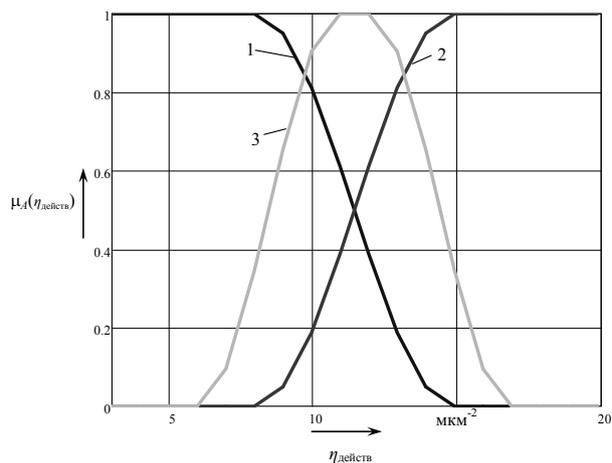


Рисунок 8 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термы:
 1 – нормальное значение $\eta_{действ}$;
 2 – большое значение $\eta_{действ}$;
 3 – ненормальное и небольшое значение $\eta_{действ}$

Составим функции принадлежности для нечетких переменных «качество ремонта», «качество механической обработки» и «качество коммутации» (рисунок 9).

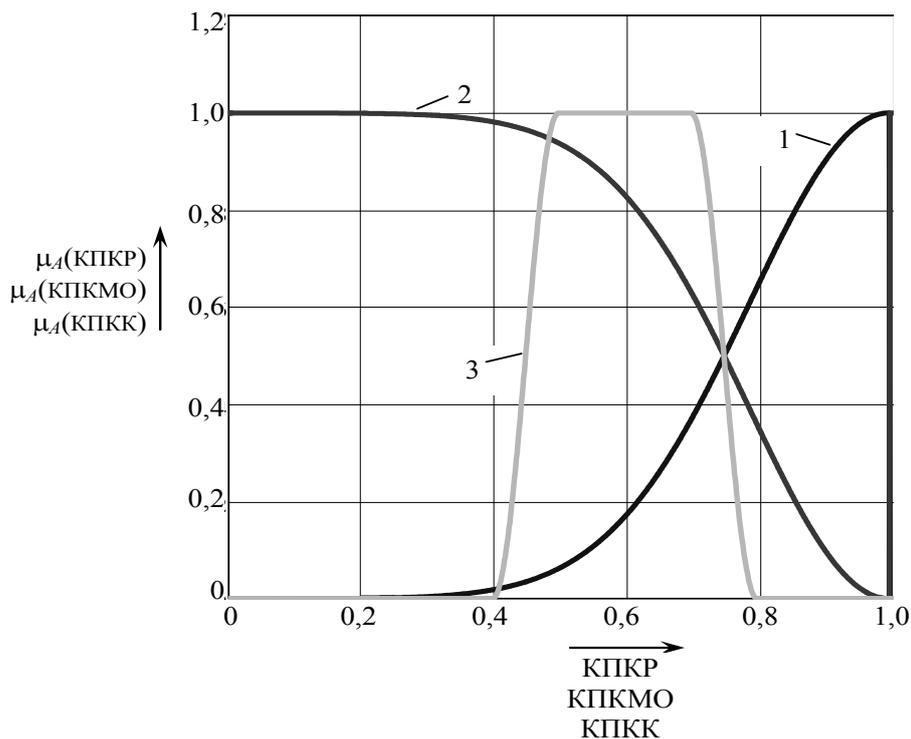


Рисунок 9 – Графики функций принадлежности нечетких переменных, выражающих термы:
 1 – качественный ремонт (механическая обработка, коммутация);
 2 – некачественный ремонт (механическая обработка, коммутация);
 3 – ремонт среднего качества (механическая обработка, коммутация)

Функция принадлежности нечеткого множества «качество ремонта», учитывающая введенные лингвистические переменные, в общем случае имеет вид:

$$\mu(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), & \text{если } x \leq a; \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), & \text{если } x > a, \end{cases} \quad (5)$$

где a – модальное значение нечеткого числа;

α, β – левый и правый коэффициент нечеткости.

В рассматриваемом случае значение имеет только левый коэффициент нечеткости, позволяющий определить момент, когда ремонт становится качественным. Поскольку значение правого коэффициента нечеткости не определено, то $\beta \rightarrow \infty$. Подставив формулу (4) в формулу (5) при $p = 2, a = 1, \alpha = 0,3$ и $\beta \rightarrow \infty$, получим формулу функции принадлежности нечеткого множества «качество ремонта» (см. рисунок 9).

$$\mu_{\text{КПКР}}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ e^{-\frac{|1-x|^2}{0,3}}, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & x > 1 \end{cases}. \quad (6)$$

Согласно рекомендациям работы [10] основными этапами нечеткого вывода являются следующие: формирование базы правил, фазсификация входных переменных, агрегирование подусловия, активизация подзаклучений и аккумуляирование заклучений.

Сформулируем правила нечеткой продукции для рассматриваемой системы в рамках реализации алгоритма нечеткого вывода Мамдани.

Правило 1. Если « δ имеет нормальное значение» и « σ_h имеет нормальное значение» и « A_1 имеет нормальное значение», и « A_2 имеет нормальное значение», и « $\sigma_h|_{v=3..n}$ имеет нормальное значение», то «качественная механическая обработка».

Правило 2. Если « δ имеет ненормальное и небольшое значение» и « σ_h имеет не нормальное и небольшое значение», и « A_1 имеет не нормальное и не большое значение», и « A_2 имеет ненормальное и небольшое значение», и « $\sigma_h|_{v=3..n}$ имеет ненормальное и небольшое значение», то «механическая обработка среднего качества».

Правило 3. Если « δ имеет большое значение» и « σ_h имеет большое значение», и « A_1 имеет большое значение», и « A_2 имеет большое значение», и « $\sigma_h|_{v=3..n}$ имеет большое значение», то «некачественная механическая обработка».

Правило 4. Если « $\dot{\eta}_{\min}$ имеет нормальное значение» и « $\sigma_{\dot{\eta}}$ имеет нормальное значение», и « $\eta_{\text{действ}}$ имеет нормальное значение», то «качественная коммутация».

Правило 5. Если « $\dot{\eta}_{\min}$ имеет ненормальное и небольшое значение» и « $\sigma_{\dot{\eta}}$ имеет ненормальное и небольшое значение», и « $\eta_{\text{действ}}$ имеет ненормальное и небольшое значение», то «коммутация среднего качества».

Правило 6. Если « $\dot{\eta}_{\min}$ имеет большое значение» и « $\sigma_{\dot{\eta}}$ имеет большое значение», и « $\eta_{\text{действ}}$ имеет большое значение», то «некачественная коммутация».

Правило 7. Если «КПКМО имеет нормальное значение» и «КПКК имеет нормальное значение», то «ремонт качественный».

Правило 8. Если «КПКМО имеет малое значение» и «КПКК имеет малое значение», то «ремонт некачественный».

Правило 9. Если «КПКМО имеет ненормальное и немалое значение» и «КПКК имеет ненормальное и немалое значение», то «ремонт среднего качества».

Правило 10. Если «КПКМО имеет нормальное значение» и «КПКК имеет малое значение», то «ремонт среднего качества».

Правило 11. Если «КПКМО имеет малое значение» и «КПКК имеет нормальное значение», то «ремонт некачественный».

Правило 12. Если «КПКМО имеет ненормальное и немалое значение» и «КПКК имеет малое значение», то «ремонт некачественный».

Правило 13. Если «КПКМО имеет ненормальное и немалое значение» и «КПКК имеет нормальное значение», то «ремонт среднего качества».

Правило 14. Если «КПКМО имеет нормальное значение» и «КПКК имеет ненормальное и немалое значение», то «ремонт среднего качества».

Правило 15. Если «КПКМО имеет малое значение» и «КПКК имеет ненормальное и немалое значение», то «ремонт некачественный».

В результате проведенных исследований сформирован набор нечетких переменных для выделенных диагностических параметров, представлены функции принадлежности для каждой лингвистической переменной, сформирована база правил деятельности процесса нечеткого вывода. В виде сформулированных правил нечеткого вывода представлены математические модели качества ремонта в пространстве выбранных признаков с использованием аппарата нечеткой логики, позволяющие рассчитывать значение предложенных комплексных показателей для произвольных значений диагностических параметров с использованием систем нечеткого вывода. Полученные результаты можно использовать для контроля качества выполненного КЩУ ТЭД подвижного состава.

Список литературы

1. Совершенствование технологии диагностирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, В. Н. Горюнов и др. // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – Омск. – 2013. – № 3 (123). – С. 196 – 199.

2. Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун и др. // Известия Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов / Томский политехн. ун-т. – Томск. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 84 – 90.

3. Определение диагностических параметров для оценки состояния профиля коллектора тягового электродвигателя [Текст] / В. В. Харламов, Р. В. Сергеев и др. // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – Омск. – 2011. – № 1 (97). – С. 121 – 125.

4. Диагностирование на граф-моделях: На примерах авиационной и автомобильной техники [Текст] / Я. Я. Осис, Я. А. Гельфандбейн и др. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.

5. Шкодун, П. К. Выбор диагностических параметров для оценки влияния профиля коллектора на процесс коммутации коллекторных электрических машин [Текст] / П. К. Шкодун, Р. В. Сергеев, Д. А. Ахунов // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе: Материалы науч.-практ. конф. / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2012. – С. 373 – 375.

6. Борисов, А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования [Текст] / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.

7. Aliev, R. A. Fundamentals of the Fuzzy Logic-Based Generalized Theory of Decisions / R. A. Aliev. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 322 p.

8. Azar, A. T. Fuzzy System / A. T. Azar. – Intech, 2010. – 216 p.

9. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

10. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech [Текст] / А. В. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

References

1. Kharlamov V. V., Goriunov V. N., Shkodun P. K., Dolgova A.V. Improving the technology of diagnosing the rolling stock traction motors collector-brush unit [Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniia kollektorno-shchetchnogo uzla tiagovykh elektrodvigateli podvizhnogo sostava]. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriya Pribory, mashiny i tekhnologii*, 2013, no. 3 (123), pp. 196 – 199.
2. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Khloptsov A. S., Dolgova A.V. Creating the graph model of diagnosing traction motor collector-brush unit, taking thermal factor into account [Formirovanie graf-modeli diagnostirovaniia kollektorno-shchetchnogo uzla tiagovogo elektrodvigatelia s uchetom teplovykh faktorov]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geoesursov*, 2016, Vol. 327, no. 1, pp. 84 – 90.
3. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Akhunov D. A., Dolgova A.V. Determination of diagnostic parameters for the assessment of the profile of the traction motor commutator [Opredelenie diagnosticheskikh parametrov dlia otsenki sostoianiia profilia kollektora tiagovogo elektrodvigatelia]. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriya Pribory, mashiny i tekhnologii*, 2011, no. 1 (97), pp. 121 – 125.
4. Osis Ia. Ia., Gel'fandbein Ia. A., Markovich Z. P., Novozhilov N. V. *Diagnostirovanie na graf-modeliakh: Na primerakh aviatsionnoi i avtomobil'noi tekhniki* (Diagnosis on the graph-models: the case of aircraft and motor vehicles). Moscow: Transport, 1991, 244 p.
5. Shkodun P. K., Sergeev R. V., Akhunov D. A. Selection of diagnostic parameters to assess the impact on the profile of the collector switching process of commutator electric machines [Vybor diagnosticheskikh parametrov dlia otsenki vliianiia profilia kollektora na protsess kommutatsii kollektornykh elektricheskikh mashin]. *Innovative factors of development at the present stage of Transsib. Siberian Transport University*, Novosibirsk, 2012, pp. 373 – 375.
6. Borisov A. N., Krumberg O. A., Fedorov I. P. *Priniatie reshenii na osnove nechetkikh modelei: Primery ispol'zovaniia* (The adoption of decisions based on fuzzy models: Examples of use). Riga: Zinatne, 1990, 184 p.
7. Aliev R. A. *Fundamentals of the Fuzzy Logic-Based Generalized Theory of Decisions*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 322 p.
8. Azar A. T. *Fuzzy System*, Intech, 2010, 216 p.
9. Zade L. A. *Poniatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k priniatiuu priblizhennykh reshenii* (The concept of linguistic variable and its application to the adoption of the approximate solutions). Moscow: Izdatel'stvo «Mir», 1976, 165 p.
10. Leonenkov A. V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTECh). Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005, 736 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкодун Павел Константинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Долгова Анна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Dolgova Anna Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: pmm@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шкодун, П. К. Применение аппарата нечеткой логики при диагностировании коллекторно-щеточного узла тяговых электрических двигателей подвижного состава [Текст] / П. К. Шкодун, А. В. Долгова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 59 – 69.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: emoe@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shkodun P. K., Dolgova A. V. Fuzzy logic application in the diagnosis the rolling stock traction motor commutator-brush unit. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 59 – 69. (In Russian).

УДК 621.331:621.311

А. В. Горькин

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

СНИЖЕНИЕ ЧИСЛА НЕСЕЛЕКТИВНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Аннотация. В статье описаны возможности снижения числа неселективных отключений быстродействующих выключателей путем применения релеедифференциального шунта при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения. Приведены результаты экспериментальной оценки работы релеедифференциальный шунт при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения и его опытной эксплуатации. Сделаны выводы о ранее не описанном свойстве релеедифференциального шунта при полном снятии пакета стали на ветви меньшего сечения – с увеличением скорости нарастания тока появляется значительная задержка во времени срабатывания реле.

Ключевые слова: быстродействующий выключатель; релеедифференциальный шунт; пакет стали; выдержка времени срабатывания реле, неселективные отключения.

Artem V. Gor'kin

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

DECREASE IN NUMBER OF NOT SELECTIVE SHUTDOWNS OF HIGH-SPEED SWITCHES FEEDERS OF OVERHEAD CONTACT SYSTEM

Abstract. In article possibilities of decrease in number of not selective shutdowns of high-speed switches by use of the relay – the differential shunt are described at full removal of a package of steel on a branch of smaller section. Results of experimental evaluation of the work of the relay - the differential shunt are given at full removal of a package of steel in a branch of smaller section and its trial operation. Conclusions are drawn on earlier undescribed property of the relay - the differential shunt, at full removal of a package of steel on a branch of smaller section – with increase in speed of increase of current, the considerable time lag of operation of the relay appears.

Keywords: high-speed switch; differential shunt relay; steel package; pickup delay relays; non-selective shutdown.

Ежегодно на российских железных дорогах постоянного тока возрастает количество отключений быстродействующих выключателей (БВ). Это происходит из-за развития скоростного и тяжеловесного движения, приводящего к увеличению максимальных рабочих токов, потребляемых электроподвижным составом (ЭПС). Увеличение количества отключений БВ в совокупности с увеличением максимальных рабочих токов приводит к повышению вероят-

ности появления дуги при проходе ЭПС изолирующего сопряжения (ИС) контактной сети, когда возникает режим перераспределения тока, потребляемого локомотивом, между двумя фидерами контактной сети (ФКС) 3,3 кВ. Все это может привести к пережогам контактного провода [1, 2].

Различные схемы и решения защиты от ложных отключений и пережога контактного провода, которые применяются на российских железных дорогах, были рассмотрены в работах [3 – 6].

Преимущества предложенных ранее решений можно свести к одному – они в разной степени помогают снизить вероятности ложных отключений БВ и пережога контактного провода. Вместе с тем недостатки этих решений значительны:

- увеличение затрат, как единовременных, так и эксплуатационных, на устройства защиты контактной сети;

- усложнение (часто очень значительное) конструкции ИС и защиты контактной сети;

- вследствие первых двух причин и в связи с увеличением тяговых токов в условиях развития скоростного и тяжеловесного движения ЭПС эффективность применения данных методов и устройств ограничена и продолжает снижаться.

Существующую не одно десятилетие проблему прохода ЭПС воздушных промежутков под током и связанных с этим ложных отключений быстродействующих выключателей ФКС и пережогов контактного провода, которая становится все более актуальной, можно решить новыми методами, используя массово внедряющиеся в эксплуатацию цифровые защиты ФКС-3,3 кВ [1].

В настоящее время основными защитами ФКС-3,3 кВ являются быстродействующие выключатели и цифровые терминалы защит ЦЗАФ-3,3 кВ / ИнТер-3,3 кВ (далее – ЦТ), которые в момент прохода ЭПС изолирующего сопряжения под током не обеспечивают нужной избирательности в выделении признаков, отличающих аварийные режимы от нормальных [1].

В статье предлагается метод исключения неселективной работы быстродействующих выключателей, отличающийся от приведенных в работах [3 – 7]. Метод заключается в выполнении максимальной импульсной защиты (МИЗ) на реледифференциальном шунте (РДШ) с выдержкой времени путем уменьшения пакета стали на ветви шины меньшего сечения. При этом РДШ будет работать в качестве дополнительной защиты, а в роли основной и резервной – дистанционная защита и ЗСНТ (защита по скорости нарастания тока), выполненные на базе ЦТ.

РДШ применяется на значительном количестве тяговых подстанций, которые оборудованы выключателями типа ВАБ-49 или аналогичными. РДШ формирует команду на отключение этих БВ. Неселективная работа МИЗ обусловлена особенностями срабатывания РДШ при разной скорости нарастания измеряемого тока – реле чувствительно к крутизне нарастания тока: при быстром нарастании аварийного тока в момент короткого замыкания величина уставки реле снижается. Это связано с разным индуктивным сопротивлением ветвей шины РДШ.

Уменьшение пакета стали на ветви шины меньшего сечения в эксплуатации допускается согласно отраслевой инструкции Российских железных дорог [8]. Согласно инструкции решение о применении выдержки времени в резервных устройствах защиты для рассматриваемой межподстанционной зоны принимает руководитель службы электрификации и электрообеспечения территориальных подразделений ОАО «РЖД».

Проведенные в лабораторных условиях испытания РДШ показали, что в случае наличия полного пакета стали при скорости нарастания тока 400 – 600 А/мс, что соответствует близкому к подстанции короткому замыканию, и при незначительном превышении установившегося тока короткого замыкания над уставкой реле собственное время реледифференциального шунта будет равняться 5 – 7 мс. При той же скорости нарастания тока и полном снятии пакета стали на ветви шины меньшего сечения задержка срабатывания реле составит уже порядка 60 – 65 мс, а с увеличением разности между величиной установившегося тока коротко-

го замыкания и током уставки задержка срабатывания реле будет уменьшаться до значений менее 20 мс.

Зависимость времени срабатывания РДШ от скорости нарастания тока при полном снятии пакета стали показана на рисунке 1.

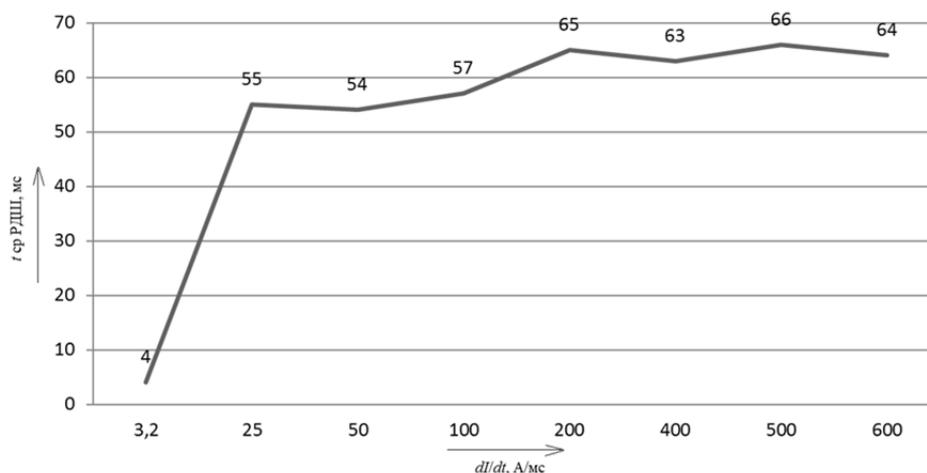


Рисунок 1 – Зависимость времени срабатывания РДШ от скорости нарастания тока при полном снятии пакета стали

Выдержки времени порядка 60 мс, в большинстве случаев будет достаточно, чтобы обеспечить несрабатывание БВ фидеров тяговой подстанции (ТПС) при прохождении ЭПС изолирующих сопряжений под током.

Для проверки выводов, полученных при лабораторных испытаниях, данная методика защиты ФКС была реализована на одной из тяговых подстанций Западно-Сибирской железной дороги, где складывалась ситуация, практически аналогичная отключениям БВ при проходе ЭПС изолирующего сопряжения контактной сети под током.

При коротком замыкании на одном из отходящих фидеров распределительном посту (РП) Инская – Восток отключается быстродействующий выключатель этого присоединения, и, практически одновременно с ним, неселективно срабатывает БВ фидера контактной сети Ф3-3,3 кВ или Ф9-3,3 кВ подстанции Инская, питающего соответствующую секцию РП. В этом случае одновременно пропадает напряжение в контактной сети подъездных путей цехов периодического ремонта, кранового, основного депо и в части парков станции Инская, вследствие чего могут возникать ситуации с задержкой поездов.

Схема питания и секционирования представлена на рисунке 2, а тип выключателей, протяженность и сечение питающих фидеров, уставки защиты и среднее число отключений в месяц – в таблице 1.

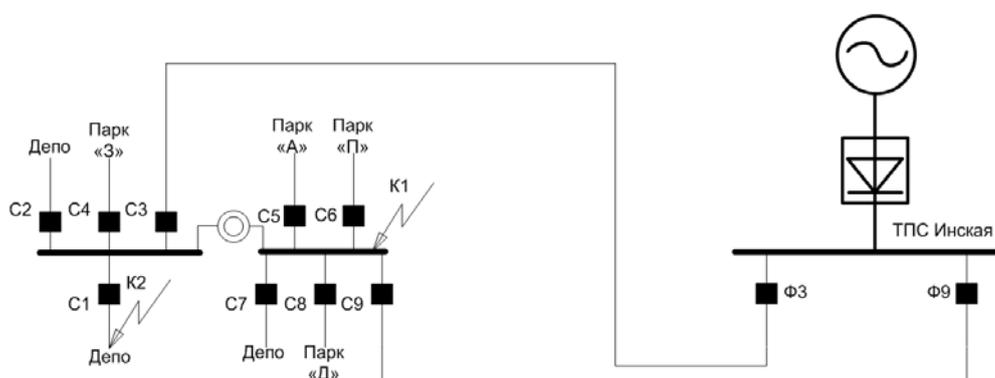


Рисунок 2 – Схема питания и секционирования РП Инская – Восток

Наибольшее число отключений БВ Ф3 ТПС связано с короткими замыканиями на участках тяговой сети, питаемых выключателями фидеров Ф1 и Ф2 РП (таблица 1).

На фидерах Ф3, Ф9 подстанции и Ф1, Ф2 РП установлены выключатели типа ВАБ-49. Команду на отключение этих выключателей формирует РДШ. Неселективная работа защиты обусловлена малой длиной фидеров Ф3 и Ф9 подстанции и, как следствие, большой скоростью нарастания тока при коротком замыкании, в результате чего выключатель на РП еще не успевает отключить ток коротко замыкания, когда БВ Ф3 или Ф9 на подстанции срабатывает.

Для исключения неселективной работы выключателей на фидере Ф-3 путем уменьшения пакета стали на ветви шины меньшего сечения была реализована максимальная импульсная защита на РДШ с выдержкой времени. В этом случае МИЗ будет работать в качестве дополнительной защиты, а в роли основной и резервной – ДЗ и ЗСНТ, выполненные на базе цифрового терминала ЦЗАФ-3,3 кВ (таблица 2).

Таблица 1 – Параметры присоединений ФКС подстанции и поста

Объект	Информация о фидере			Тип выключателя	I _{умиз} , А	Среднемесячное число отключений за первое полугодие 2016 г.
	№	длина, м	сечение			
ЭЧЭ-250 Инская	3	2 100	3 × А185	2хВАБ-49-5000	4 000	22,7
	9	2 100	3 × А185	2хВАБ-49-3200	4 000	10
РП Инская- Восток	1	400	3 × А185	ВАБ-49-3200	3 000	15,2
	2	600	3 × А185	ВАБ-49-3200	2 900	11,7
	3	2 100	3 × А185	ВАБ-43-4000	3 400	–
	4	620	3 × А185	ВАБ-43-4000	2 900	0,7
	5	610	3 × А185	ВАБ-43-4000	2 900	3,0
	6	672	3 × А185	ВАБ-43-4000	2 900	4,2
	7	123	3 × А185	ВАБ-43-4000	2 900	3,3
	8	123	3 × А185	ВАБ-43-4000	2 900	0
	9	2 100	3 × А185	ВАБ-43-4000	3 000	–

Таблица 2 – Уставки защиты фидеров контактной сети Ф3 и Ф-9 ТПС Инская

№ фидера	Тип БВ	Вид защиты	I _{к.з.} /R _{к.з.} , А/Ом	Уставка	Выдержка времени
Ф-3, Ф-9	2×ВАБ-49	МИЗ, А	20 100 / 0,13	4 500	≈110 мс
		МТЗ, А		8 000	–
		ДЗ, Ом		0,3	20 мс
		ДЗ-2, Ом (на сигнал)		0,6	–
		ЗСНТ, А/мс		760	–
		КВТЗ		$t_{пред}=72\text{ }^{\circ}\text{C}; t_y=80\text{ }^{\circ}\text{C};$ $K_n=0,994\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{с}\cdot\text{A}^2)\cdot 10^{-7};$ $K_o=0,57, 1/\text{с}\cdot 10^{-2}$	–

Выдержки времени в 60 мс будет достаточно, чтобы обеспечить селективность МИЗ Ф3 и Ф9 ТПС при коротких замыканиях на отходящих фидерах поста, так как полное время отключения аварийного тока выключателями типа ВАБ-49 и ВАБ-43, установленными на РП, обычно не превышает 20 мс.

В дальнейшем были проведены дополнительные замеры времени срабатывания реле РДШ выключателя БВФ3-3,3, которые проводились с различной величиной пакета стали на ветви меньшего сечения – 1,0; 0,75; 0,5 и 0,0 от общего объема. В качестве регистраторов использовались цифровой осциллограф и цифровой терминал ЦЗАФ-3,3 с действием встроенной защиты «на сигнал».

Итогом проведенных измерений стало построение временной зависимости срабатывания РДШ при полном отсутствии пакета стали (рисунок 3).

Полученная выдержка времени около 120 мс отличается от результатов эксперимента в лабораторных условиях (см. рисунок 1), по следующим причинам:

1) уставка МИЗ РДШ в лабораторных условиях была равна 2,9 кА при максимальном значении тока прогрузочного устройства ПРУС, равном 3,9 кА; а в случае эксперимента на ТПС Инская соответственно 3,5 кА при значении тока ПРУС в 4 кА;

2) эксперимент в лабораторных условиях проводился только с РДШ без участия непосредственно выключателя, который вносит дополнительную индуктивность;

3) расположение прогрузочного аппарата ПРУС с кабелями относительно РДШ в обоих случаях было различным, что также могло повлиять на результаты измерений.

Выдержка времени при пакете стали 0,75; 0,5 и 0,25 от общего объема минимальна и составляет около 10 – 15 мс, что является недостаточной величиной для решаемой задачи.

БВ фидеров Ф-3 и Ф-9 подстанции Инская с уменьшенным до нуля пакетом стали на шине меньшего сечения РДШ были введены в работу 19 августа и 13 сентября 2016 г. соответственно с уставками защиты, приведенными в таблице 2.

За две недели наблюдений выключатель Ф-3 отключился один раз при штатном среднем количестве отключений 11 (см. таблицу 1).

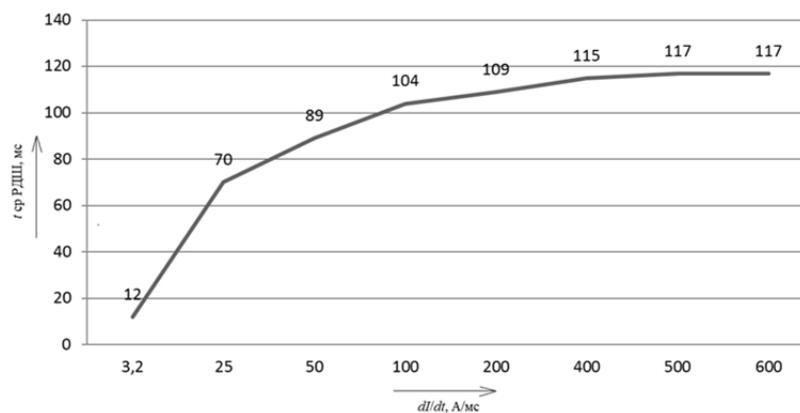


Рисунок 3 – Зависимость времени срабатывания РДШ от скорости нарастания тока при полном отсутствии пакета стали

Осциллограмма единственного отключения приведена на рисунке 4. В этом случае выключатель отключился от действия РДШ, которое сработало несмотря на большую выдержку времени из-за длительных и больших тяговых нагрузок.

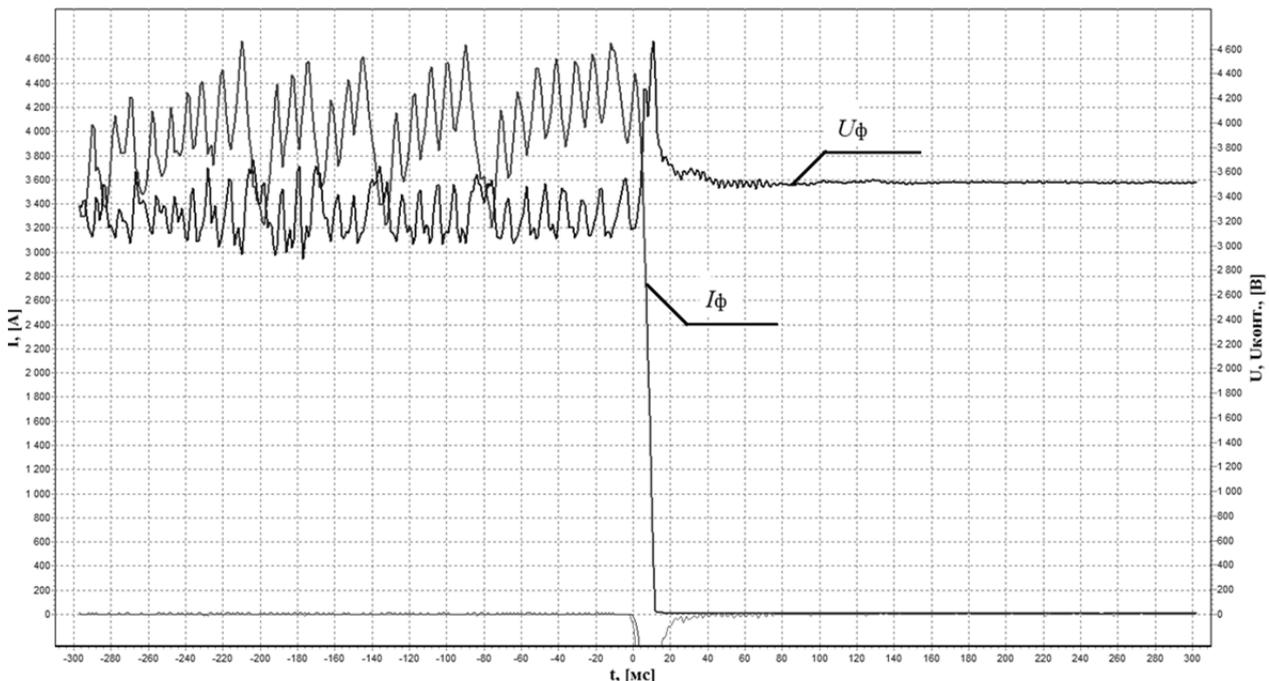


Рисунок 4 – Осциллограмма отключения выключателя от действия РДШ с выдержкой времени

Кроме этого было зафиксировано три отключения на РП Инская – Восток с помощью дистанционной защиты ДЗ-2 ЦТ фидера Ф3 на ТПС Инская, установленной на сигнал. Параметры всех трех отключений, осциллограмма одного из которых приведена на рисунке 5, идентичны. Отключения выключателя Ф3 подстанции при этом не происходило, хотя при использовании РДШ с полным пакетом стали выключатель в подобной ситуации всегда отключался.

На осциллограмме рисунка 5 видно, что время отключения выключателя на РП составило не более 22 мс, что является удовлетворительным показателем для выключателя одиночного исполнения.

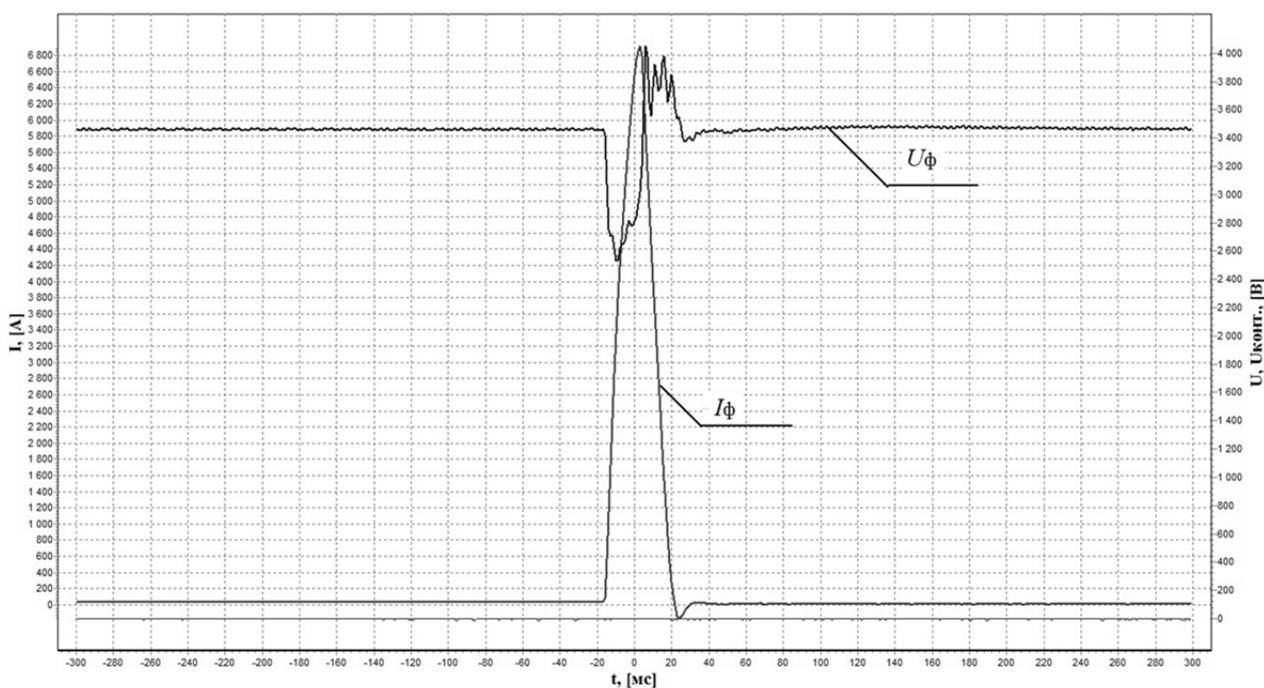


Рисунок 5 – Осциллограмма отключения выключателя на РП Инская – Восток

Анализ работы выключателей фидеров Ф3 и Ф9 на основе осциллограмм, полученных с помощью цифровых терминалов ЦЗАФ-3,3, показал, что количество их неселективных срабатываний при коротких замыканиях на участках контактной сети, защищаемой выключателями распределительного поста Инская – Восток, уменьшилось практически до нуля, что является положительным результатом применения предложенной методики выбора уставок выключателей и проведенного анализа работы РДШ без пакета стали.

В качестве основного вывода можно выделить экспериментально полученный результат – возможно снижение числа отключения БВ при проходе ЭПС изолирующих сопряжений без снижения надежности защиты ФКС, а уменьшение количества неселективных отключений выключателей позволяет снизить эксплуатационные затраты на их капитальный ремонт и обслуживание.

Кроме того, в ходе эксперимента выявлено свойство РДШ, не описанное ни в одном научном источнике, посвященном рассмотрению работы указанного реле (например, [5, 7, 9]), что в перспективе позволит дополнить существующую теорию работы и характеристики реле дифференциальных шунтов выключателей типа ВАБ-28 и ВАБ-49 [9].

Список литературы

1. 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. – 425 с.

2. Горькин, А. В. Анализ процессов изменения токов смежных фидеров при прохождении электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током [Текст] / А. В. Горькин // Метрологическое и нормативное обеспечение качества и безопасности продукции: Материалы всерос. науч.-техн. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – 224 с.

3. Колин, А. Ф. Предупреждение пережогов проводов в местах секционирования контактной сети [Текст] / А. В. Колин, В. А. Савченко. – М.: Транспорт, 1978. – 72 с.

4. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.

5. Такарлыкова, А. С. Изолирующий промежуток тяговой сети постоянного тока для условий скоростного и тяжеловесного движения [Текст]: Автореферат дис... канд. техн. наук / А. С. Такарлыкова. – М., 2009. – 20 с.

6. Фигурнов, Е. П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог [Текст] / Е. П. Фигурнов – М.: Транспорт, 1981. – 215 с.

7. Гречишников, В. А. Измерительно-аналитическая программно-аппаратная система защиты и диагностики основного оборудования тяговых подстанций постоянного тока [Текст]: Дис... доктора техн. наук / В. А. Гречишников. – М., 2013. – 182 с.

8. Инструкция о порядке расчета и выбора уставок защиты тяговой сети постоянного тока [Текст] / Управление электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» – 16 января 2012 г. № ЦЭТ-2/1 (П-01/12). – М., 2012. – 97 с.

9. 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 // Вопросы энергоснабжения электрических железных дорог: Труды МИИТа. – М., 1965. – Вып. 213. – С. 61 – 85.

References

1. Gor'kin, A. V. Job analysis of switching offices of traction substation of a direct current in the conditions of passing by electrailway 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.

2. Gor'kin, A. V. Organizational and technological parameters of operation of the linter-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.

3. Kolin, A. F. *Preduprezhdenie perezhogov provodov v mestakh sektsionirovaniia kontaktnoi seti* (The prevention of perezhog of wires in places of sectioning of contact network). Moscow: Transport, 1978. – 72 p.

4. Veksler, M. I. *Zashchita tiagovoi seti postoiannogo toka ot tokov korotkogo замыканиia* (Protection of traction network of a direct current against currents of short circuit). Moscow: Transport, 1976. – 120 p.

5. Takarlykova, A. S. *Izoliruiushchii promezhutok tiagovoi seti postoiannogo toka dlia uslovii skorostnogo i tiazhelovesnogo dvizheniia* (The isolating interval of traction network of a direct current for conditions of high-speed and heavy movement). Abstract of the thesis for a degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow, 2009, 153 p.

6. Figurnov, E. P. *Releinaia zashchita ustroystv elektrosnabzheniia zheleznykh dorog* (Relay protection of devices of power supply of the railroads). Moscow: Transport, 1981, 215 p.

7. Grechishnikov, V. A. *Izmeritel'no-analiticheskaiia programmno-apparatnaia sistema zashchity i diagnostiki osnovnogo oborudovaniia tiagovykh podstantsii postoiannogo toka* (Measuring and analytical hardware-software system of protection and diagnostics of the capital equipment of traction substations of a direct current). Thesis for a degree of the Doctor of Engineering, Moscow, 2013, 182 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. Pupyin, 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, pp 65 – 81.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горькин Артем Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (960) 991-23-56.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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.

Phone: +7 (960) 991-23-56.

E-mail: wert_81_06_28@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Горькин, А. В. Снижение числа неселективных отключений быстродействующих выключателей фидеров контактной сети [Текст] / А. В. Горькин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 69 – 76.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gor'kin A. V. Decrease in number of not selective shutdowns of high-speed switches feeders of overhead contact system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 69 – 76. (In Russian).

УДК 621.331: 621.311

В. П. Закарюкин¹, А. В. Крюков¹, Е. А. Алексеенко²

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

²Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ЭКВИВАЛЕНТОВ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ 27,5 кВ

Аннотация. Предметом исследований, результаты которых представлены в статье, являются аварийные режимы в системах тягового электроснабжения (СТЭ) 27,5 кВ, вызванные короткими замыканиями (КЗ).

Цель исследований состояла в анализе погрешностей расчета токов КЗ, возникающих при упрощенном эквивалентировании внешней сети на основе реактансов, определяемых мощностью короткого замыкания. Для достижения сформулированной цели выполнены сопоставительные расчеты токов КЗ для ряда типовых схем СТЭ при использовании полных моделей в фазных координатах и упрощенных, сформированных на основе реактансов электроэнергетической системы (ЭЭС).

Моделирование показало, что расчеты токов КЗ в контактной сети тупиковой тяговой подстанции (ТП) по реактансам ЭЭС дают приемлемую точность для тока фидера контактной сети ТП, вблизи которой происходит короткое замыкание. Однако погрешность расчета тока удаленной от места КЗ подстанции может достигать 100 % при мощности КЗ на вводах ТП около 300 МВ·А и снижается до значений порядка 10 % при увеличении этого параметра до 2500...3000 МВ·А. При питании группы тяговых подстанций от двух линий 110 кВ погрешности расчетов по эквивалентным реактансам значительно меньше, однако при мощности КЗ 300 МВ·А они достигают 35 % и снижаются до 10 % при мощности КЗ на вводах более 550 МВ·А. Вариант питания тяговых подстанций от двух ЛЭП-220 отличается небольшими погрешностями расчетов токов КЗ по эквивалентным реактансам внешнего электроснабжения: отличия от расчетов по полной схеме не превышают 9 % при мощности КЗ 1200 МВ·А и более.

Полученные результаты могут использоваться при совершенствовании существующих и создании новых методик определения токов КЗ в тяговых сетях 27,5 кВ.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, короткие замыкания, эквиваленты внешнего электроснабжения.

Vasiliy P. Zakaryukin¹, Andrey V. Kryukov¹, Evgeniya A. Alekseenko²

¹Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia.

²East Siberian directorate on power supply – structural division Transpower JSC Russian Railway, Irkutsk, Russia,

ANALYSIS OF APPLICABILITY OF EXTERNAL POWER SUPPLY EQUIVALENTS FOR SHORT CIRCUIT CURRENTS' CALCULATIONS IN 1x25 kV TRACTION NETWORK

Abstract. Researching subject which are presented in article is the emergency modes in 25 kV traction power supply systems caused by the short circuits (SC). The research purpose consisted in the analysis of calculation SC currents errors evolving from the reactances determined by SC power at the simplified modeling of external network. For achievement of formulated purpose comparative calculations of SC currents for a number of standard schemes of 25 kV system when using full models in phase coordinates and with use of simplified electric power system (EPS) reactances are executed.

Modeling has shown that calculations of SC currents of contact network of deadlock substation by EPS reactances give the acceptable accuracy for feeder current of substation near which there is a short circuit. The calculation error of remote substation feeder current can reach +100% at SC power on inputs of substation about 300 MV·A, but decrease to values about 10% at the SC power of 2500 ... 3000 MV·A. At food of group of traction substations from two 110 kV lines calculation error for equivalent reactances it is much less, however at SC power about 300 MV·A errors reach 35% and decrease to 10% at SC power on substation inputs more than 550 MV·A. Variant of traction substations power supply from two 220 kV power lines differs in small calculation errors of SC currents for equivalent external power supply reactances: differences from full scheme don't exceed 9% at SC powers of 1200 MV·A or more.

The received results can be used at improvement existing and creation of new definition techniques for SC currents in 25 kV traction networks.

Keywords: traction power supply system, emergency mode, external power supply equivalent

Для решения задач проектирования и эксплуатации систем тягового электроснабжения необходимы методы и алгоритмы [1, 2], обеспечивающие моделирование аварийных режимов (АР). Эти методы, по мнению авторов, должны удовлетворять следующим требованиям: адекватность и точность моделирования, надежность получения необходимого результата и универсальность.

Адекватность моделирования может быть обеспечена на основе корректного использования законов электротехники и учета всех факторов, влияющих на процессы в СТЭ при возникновении АР. Критерии точности и надежности являются взаимосвязанными и обеспечиваются при использовании математических моделей, сводящихся к невырожденным системам линейных уравнений или нелинейным уравнениям с хорошо обусловленными матрицами Якоби. Критерий универсальности имеет три аспекта: структурный, конструктивный и режимный.

Структурный аспект подразумевает реализацию единого методического подхода к определению аварийных режимов во внешней сети, СТЭ и районах электроснабжения нетяговых потребителей. Конструктивная универсальность связана с возможностью моделирования систем различного исполнения, например, СТЭ повышенного напряжения [3] или СТЭ, выполненных с использованием коаксиальных кабелей [4]. Под режимной универсальностью можно понимать возможность моделирования различных АР без модификации алгоритмов и программного обеспечения: коротких замыканий, обрывов фаз, синхронных качаний генераторов и т. д.

Для решения задач определения аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог предложено большое число эффективных методов и алгоритмов [5 – 7], большинство из которых основано на применении метода симметричных составляющих или его модификаций, использующих другие диагонализующие преобразования матриц сопротивлений и проводимостей. В некоторых широко применяемых на практике методах используется эквивалентирование внешней сети на основе реактансов, определяемых мощностью короткого замыкания. В ряде случаев такое эквивалентирование может приводить к появлению заметных погрешностей определения АР. Ниже приведены результаты исследований, направленных на анализ этих погрешностей.

Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения [7] предписывают при расчете токов короткого замыкания в тяговой сети электрифицированной железной дороги переменного тока 27,5 кВ пользоваться эквивалентным реактансом внешнего электроснабжения, заданным в форме мощности короткого замыкания на вводах в подстанцию. В развернутом виде формула для определения тока КЗ [7] без учета допусков по напряжению КЗ трансформатора записывается следующим образом:

$$I_k = \frac{U_{\text{пот}}}{\sqrt{\left(2U_{\text{пот}}^2 \left(\frac{1}{S_k} + \frac{u_k}{100S_{\text{пот}}}\right) + X_0 l_k\right)^2 + (R_0 l_k)^2}}, \quad (1)$$

где S_k – мощность трехфазного КЗ на вводах подстанции, В·А; u_k – напряжение КЗ трансформатора в процентах; $S_{\text{пот}}$ – номинальная мощность трансформатора, В·А; $(R_0 + jX_0)l_k$ – сопротивление тяговой сети от подстанции до точки короткого замыкания, Ом; l_k – расстояние от тяговой подстанции до места КЗ, км; для сопоставительных расчетов напряжение холостого хода на шинах подстанции $U_{\text{пот}}$ принято равным номинальному 27500 В.

Этот подход в некоторых случаях может приводить к погрешностям определения токов КЗ на фидерах тяговых подстанций, поскольку формула (1) получена методом симметричных составляющих в предположении наличия однократной несимметрии в трехфазной цепи. Короткое замыкание в тяговой сети при двустороннем питании межподстанционной зоны создает двойную несимметрию, поскольку сказывается сразу на двух смежных ТП, и при наличии сильной связи между подстанциями по внешней сети возникает взаимовлияние несимметрий друг на друга.

Точность расчета токов по указанной формуле в значительной степени зависит от мощности КЗ на вводах в подстанцию. При больших величинах мощности S_k эквивалентный реактанс ЭЭС мал и ток КЗ определяется в основном сопротивлениями трансформатора и тяговой сети, поэтому становится актуальной задача определения мощности КЗ, при которой формула (1) обеспечивает приемлемую погрешность расчета, к примеру, порядка 10 %.

Кроме значения мощности S_k погрешности расчетов тока по формуле (1) зависят от жесткости связи смежных тяговых подстанций по внешнему электроснабжению и, следовательно, от схемы их питания. Свод правил СП 224.1326000.2014 [8] предполагает, в частности, следующие разновидности схем внешнего электроснабжения ТП переменного тока:

1) двустороннее питание от двухцепной воздушной линии или двух одноцепных линий;

2) двустороннее питание по одноцепной воздушной линии;

3) на слабозагруженных участках железных дорог допускается одностороннее питание ТП от одной линии электропередачи.

Наибольшая погрешность расчетов тока КЗ должна быть в третьем варианте схемы. Кроме того, жесткая связь по внешнему электроснабжению может быть во втором варианте на участках, примыкающих к отпаечным и транзитным подстанциям. Смежные опорная и транзитная ТП по варианту 1 также могут быть претендентами на возможные погрешности расчетов, однако обычно такие подстанции характеризуются сравнительно большой мощностью КЗ.

Напряжение питания тяговых подстанций играет немаловажную роль. Сети напряжением 220 кВ, как правило, характеризуются более высокой мощностью коротких замыканий по сравнению с сетями 110 кВ, и погрешности расчетов токов КЗ для сети 220 кВ должны быть меньше.

Оценить погрешности формулы (1) для тока короткого замыкания в тяговой сети можно путем расчетов режимов КЗ в соответствующих схемах с помощью программного комплекса Fazopord [9, 10]. Комплекс позволяет проводить расчеты режимов с учетом емкостных и взаимоиндуктивных связей проводов в многопроводных системах, а также корректно учитывать схемы соединений обмоток и конфигурацию магнитной системы силовых трансформаторов. С помощью указанного комплекса можно рассчитать токи трехфазных коротких замыканий на вводах подстанций и эквивалентировать внешнее электроснабжение реактансами КЗ.

Первым шагом в составлении расчетных схем с различными системами внешнего электроснабжения должна быть проверка принятых в моделях трансформаторов и линий положений и параметров. Для этого проведены сопоставительные расчеты токов коротких замыканий в простых схемах, которые содержат только одну несимметрию и для которых вполне справедлива формула (1). На рисунке 1 показаны несколько расчетных схем комплекса Fazopord, использованных для сопоставительных расчетов.

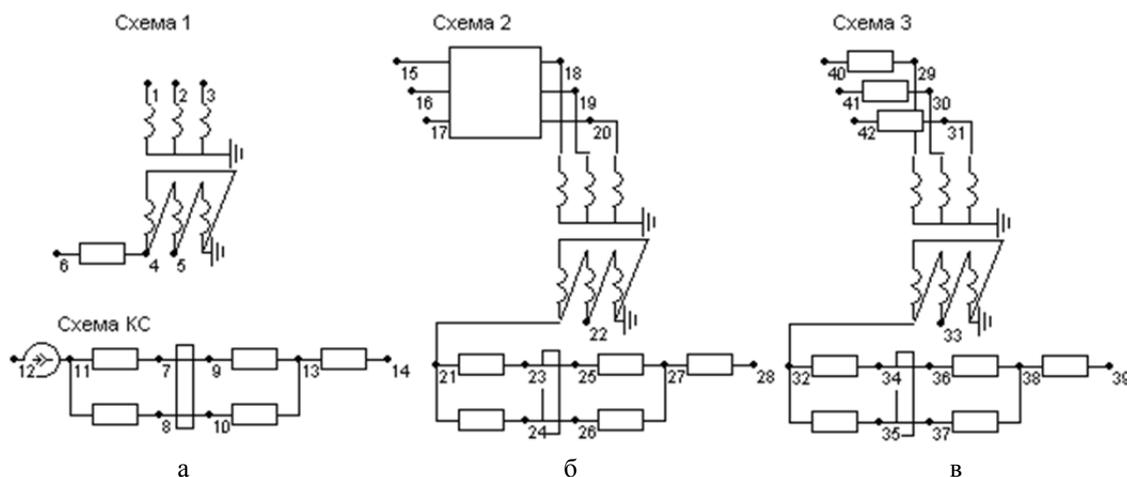


Рисунок 1 – Схемы расчетных моделей для сопоставлений

Трансформатор типа ТДТНЖ-40000/115/27,5 моделируется в двухобмоточном варианте с напряжением короткого замыкания 11 %. Модели контактных сетей (КС) отвечают двухпутному варианту $2 \times (\text{ПБСМ-95} + \text{МФ-100} + 2\text{Р-65})$, длина межподстанционных зон схем 2 и 3 составляет 50 км. Протяженность воздушных линий (ВЛ) с проводами АС-300 схемы 2 равна 50 км; с помощью установки шунтов большой проводимости в узлах 18, 19, 20 определены токи КЗ и величины эквивалентных реактансов внешней сети, которые равны $j22,1$ Ом. Для RL-элементов схемы 3 указаны именно эти значения реактивных сопротивлений. Узлы 1, 2, 3, 15, 16, 17, 40, 41, 42 – балансирующие с симметричными напряжениями 66,4 кВ. В узлах 6, 28 и 39 подключены шунты большой проводимости для моделирования короткого замыкания.

Схема КС использована для расчета сопротивления тяговой сети, источник тока 1000 А подключен к участку КС длиной 1 км с параллельным соединением контактных подвесок путей. Узлы 12 и 14 заземлены шунтами на землю большой проводимости. Значения определенных с помощью этой схемы сопротивлений составили $0,110 + j0,269$ Ом/км.

В таблице 1 представлены расчетные величины токов КЗ фазы А на стороне 27,5 кВ трансформатора, рассчитанные с помощью комплекса Fazonord и по формуле (1).

Таблица 1 – Сопоставительные расчеты токов короткого замыкания

Схема	Ток КЗ, А		Различие, %
	формула «Руководящих указаний...» [7]	расчет Fazonord	
1	6605	6609	-0,06
2	1317	1307	0,77
3	1317	1312	0,38

Данные таблицы 1 показывают небольшое различие расчетов по формуле (1) и с помощью комплекса Fazonord, что позволяет говорить о корректности моделирования программным комплексом.

Анализ погрешностей определения токов КЗ проведен по следующей методике.

1. Рассмотрены следующие типы межподстанционных зон (МПЗ): между подстанциями одинаковых типов по фазировке и между подстанциями разных типов. Схема соединений для первого варианта показана на рисунке 2.

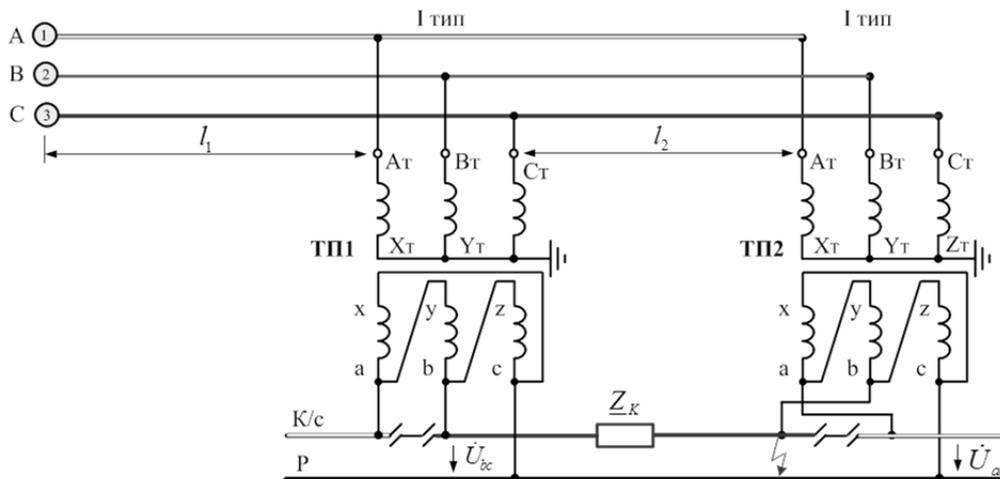


Рисунок 2 – Схема питания смежных подстанций по тупиковой ВЛ

2. Рассчитаны токи коротких замыканий по разным сторонам МПЗ.

3. Расстояние l_2 по рисунку 2 принято постоянным и равным 50 км в соответствии со средней длиной межподстанционных зон переменного тока.

4. Для снижения влияния активного сопротивления на расчеты для ВЛ приняты провода АС-300.

5. Мощность КЗ тяговых подстанций изменялась путем вариации длины ВЛ l_1 с расчетом получающегося реактанса короткого замыкания. Полученные значения реактансов использовались в схеме, представленной на рисунке 3. Узлы 1, 2, 3 на схемах рисунков 2 и 3 – балансирующие. Схема рисунка 3 соответствует формуле (1).

6. Для внешнего электроснабжения принято напряжение 110 кВ.

Схема расчетной модели представлена на рисунке 4, а, она включает в себя модели линий электропередачи, тяговых трансформаторов и тяговой сети двухпутной железной дороги $2 \times (\text{ПБСМ-95} + \text{МФ-100} + \text{2Р-65})$. RL-элементы схемы сопротивлениями 0,01 Ом используются

для удобства получения результатов. RL-элемент с узлами 23, 24 создает короткое замыкание в схеме из-за наличия шунта проводимостью 100 См в узле 24.

Длина линии ЛЭП-1 варьировалась для изменения мощностей короткого замыкания, протяженность ЛЭП-2 взята равной 50 км; обе линии предполагались с полным циклом транспозиции. Длина двух участков тяговой сети взята равной 25 км при общей протяженности МПЗ 50 км. Тяговые трансформаторы ТДТНЖ-40000/115/27,5 с напряжением короткого замыкания 11 % моделируются как двухобмоточные.

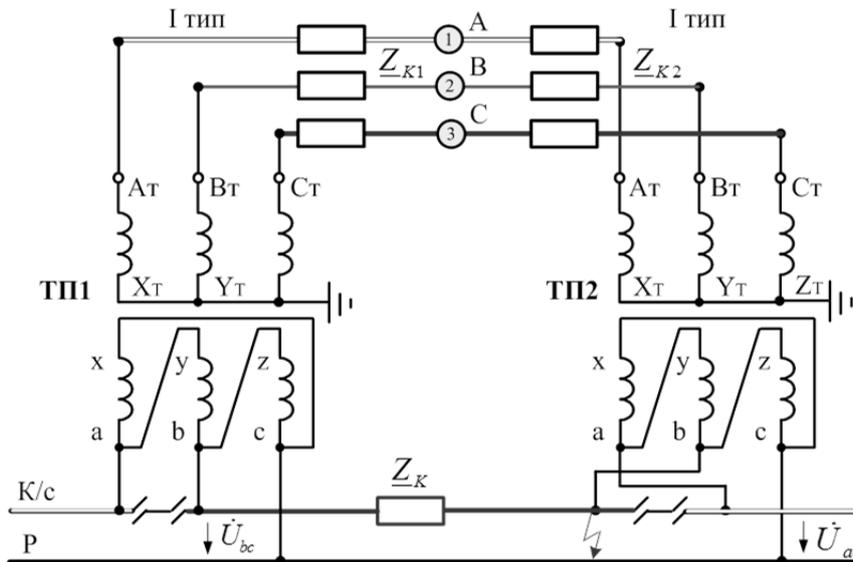


Рисунок 3 – Схема замещения системы электроснабжения с реактансами КЗ

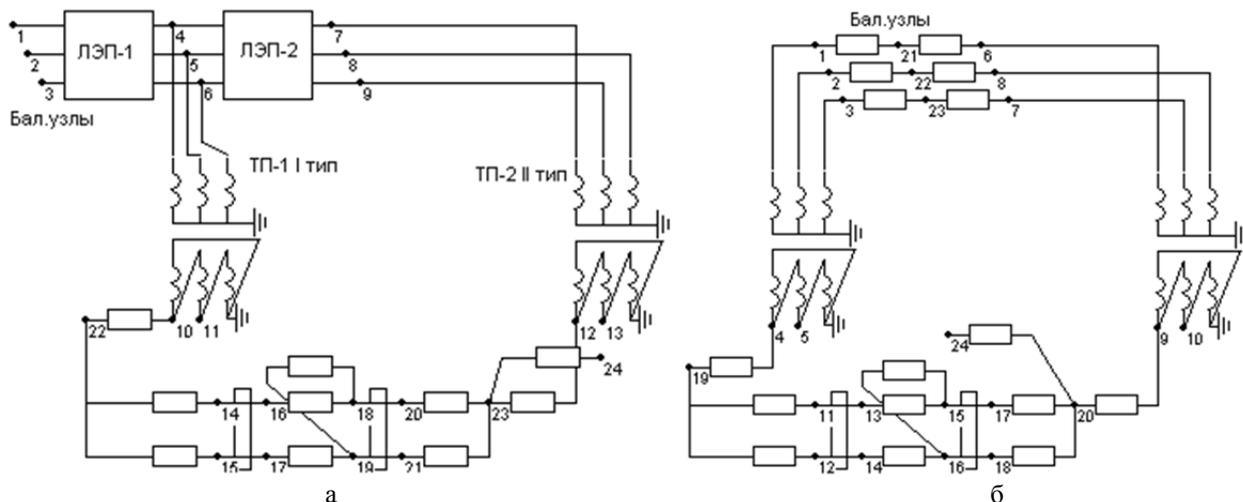


Рисунок 4 – Расчетные схемы питания тупиковой подстанции

По расчетной схеме рисунка 4, а проведены расчеты токов коротких замыканий на стороне 110 кВ путем соединения узлов 4 – 6, а затем 7 – 9 с узлом нулевого потенциала через низкоомные RL-элементы. Связь по контактной сети для ликвидации подпитки отключалась путем удаления RL-элемента между узлами 22 – 10.

Полученные параметры короткого замыкания представлены в таблице 2.

На основе данных таблицы 2 составлена эквивалентная расчетная схема с реактансами КЗ, показанная на рисунке 4, б. Расчеты токораспределения при коротких замыканиях в узле 23 по рисунку 4, а и в узле 20 по рисунку 4, б позволили определить различия токов фидеров контактной сети. Результаты расчетов показаны на рисунке 5, где указано отличие тока КЗ в схеме с эквивалентными реактансами по рисунку 4, б от тока схемы рисунка 4, а. Величины токов КЗ при разных типах фазировки смежных подстанций друг от друга не отличаются.

Расчеты токов КЗ по эквивалентным реактансам системы дают завышенные значения, обеспечивая приемлемую точность для тока фидера контактной сети тяговой подстанции, вблизи которой происходит короткое замыкание. Погрешность расчета тока фидера удаленной подстанции при этом может достигать 100 % и снижается до значения в 10 % при мощности КЗ ТП-1 порядка 2500...3000 МВ·А.

Таблица 2 – Параметры короткого замыкания на вводах подстанций

Длина ЛЭП-1, км	ТП-1			ТП-2		
	$I_{кз}, A$	$X_{кз}, Ом$	$S_{кз}, МВ \cdot А$	$I_{кз}, A$	$X_{кз}, Ом$	$S_{кз}, МВ \cdot А$
100	1503	44,2	299	1004	66,1	200
75	2003	33,2	399	1204	55,1	240
50	3003	22,1	598	1503	44,2	299
25	6003	11,1	1196	2003	33,2	399
10	15000	4,4	2988	2503	26,5	499

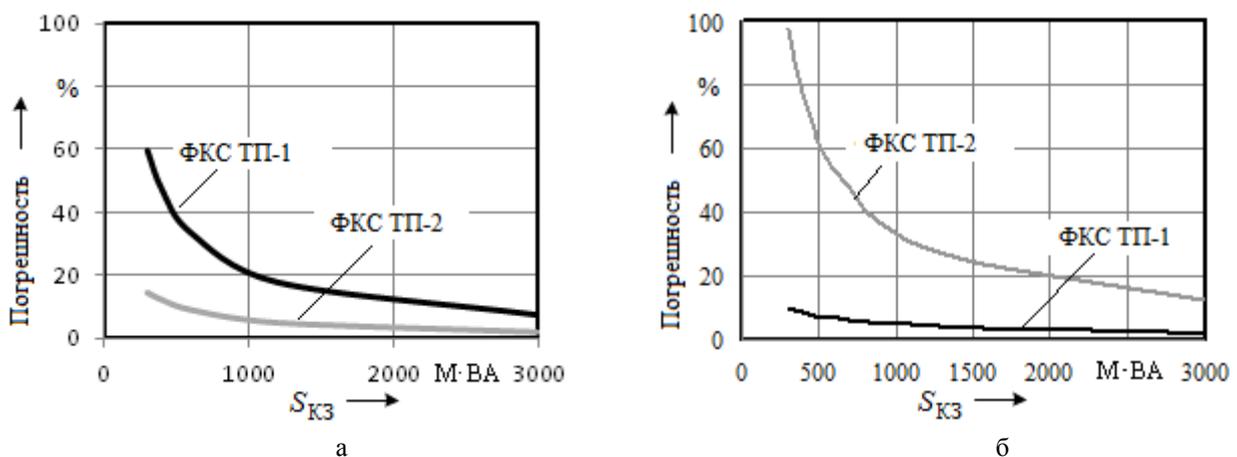


Рисунок 5 – Погрешности расчетов токов КЗ при коротком замыкании у ТП-2 (а) и у ТП-1 (б)

Двустороннее питание по одноцепной ВЛ 110 кВ (рисунок 6). Длина межподстанционных зон и протяженность линий ЛЭП-1, ЛЭП-2, ЛЭП-3, ЛЭП-4 приняты равными 50 км. Левые узлы ЛЭП-1 и правые узлы ЛЭП-4 соединены с узлами бесконечной мощности через эквивалентные реактансы Z_1, Z_2 . Значения реактансов, предполагаемых одинаковыми для ЛЭП-1 и ЛЭП-4, менялись в разных вариантах расчета. Тяговая сеть межподстанционных зон и тяговые трансформаторы такие же, как и в предыдущем разделе.

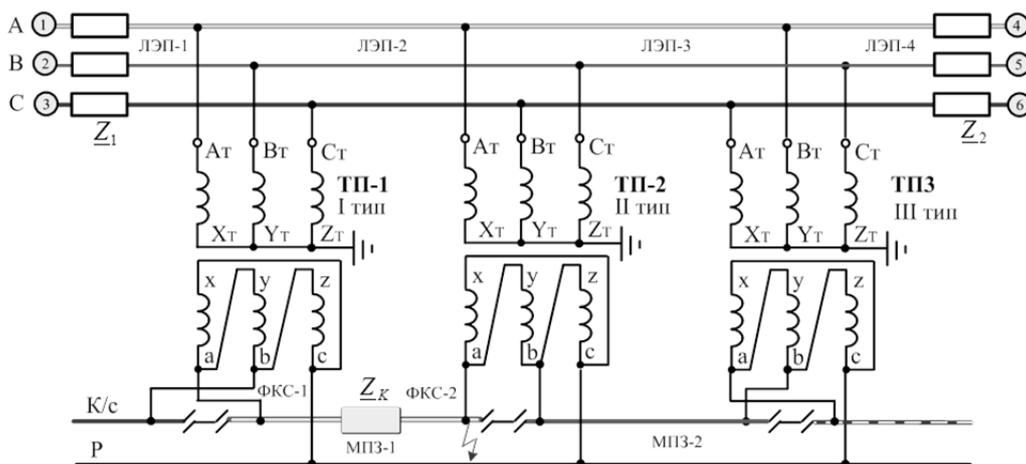


Рисунок 6 – Схема питания смежных подстанций по одноцепной ВЛ

Схема расчетной модели показана на рисунке 7. Расчеты токораспределения выполнены для межподстанционной зоны МПЗ-1. Моделирование короткого замыкания проводилось соединением RL-элемента с узлами 23 – 19 при наличии шунта большой проводимости в узле 23. Еще одна расчетная схема была выполнена путем замены ЛЭП реактансами для каждой подстанции по аналогии с рисунком 4, б. Графики зависимостей погрешностей расчета тока КЗ от мощности короткого замыкания при задании эквивалентов внешнего электропитания показаны на рисунке 8. Как и в предыдущем случае, наблюдается превышение расчетного тока при эквивалентировании внешней сети реактансами по сравнению со схемой с ЛЭП.

Таким образом, при питании подстанций от одноцепной ВЛ наблюдается существенное завышение тока КЗ фидера удаленной подстанции. Значение погрешности при увеличении мощности КЗ на вводах подстанции ТП-1 от 320 до 700 МВ·А снижается от 60 до 28 %.

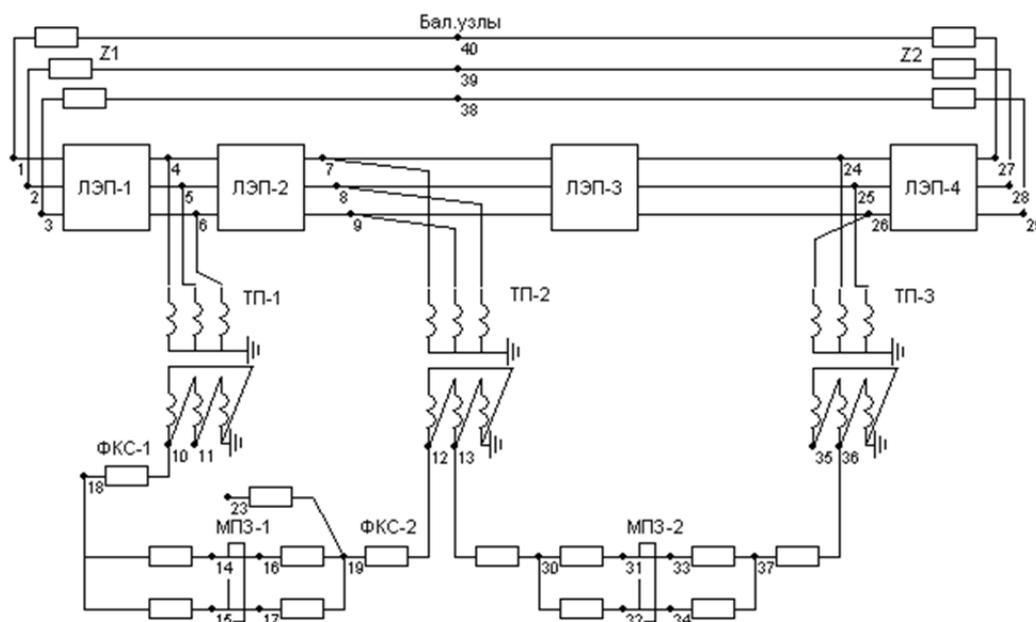


Рисунок 7 – Расчетная схема системы электроснабжения с тремя тяговыми подстанциями

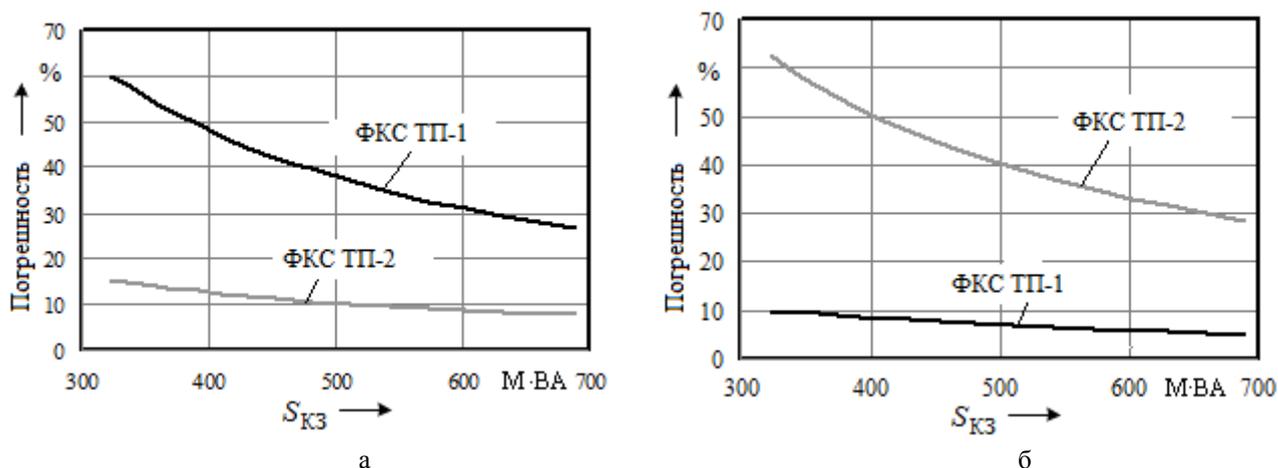


Рисунок 8 – Погрешности расчетов токов КЗ при коротком замыкании у ТП-2 (а) и у ТП-1 (б)

Питание трех тяговых подстанций от двух ВЛ 110 кВ (рисунок 9). Длина участков ЛЭП между подстанциями составляет 50 км при общей длине линии 200 км. Питание опорных подстанций осуществляется от шин бесконечной мощности через реактансы короткого замыкания. Тяговые сети межподстанционных зон такие же, как и в предыдущем случае.

Графики зависимостей погрешностей расчета тока короткого замыкания от мощности КЗ в межподстанционной зоне между подстанциями ТП-1 и ТП-2 при задании эквивалентов внешнего электроснабжения приведены на рисунке 10.



Рисунок 9 – Схема питания трех тяговых подстанций

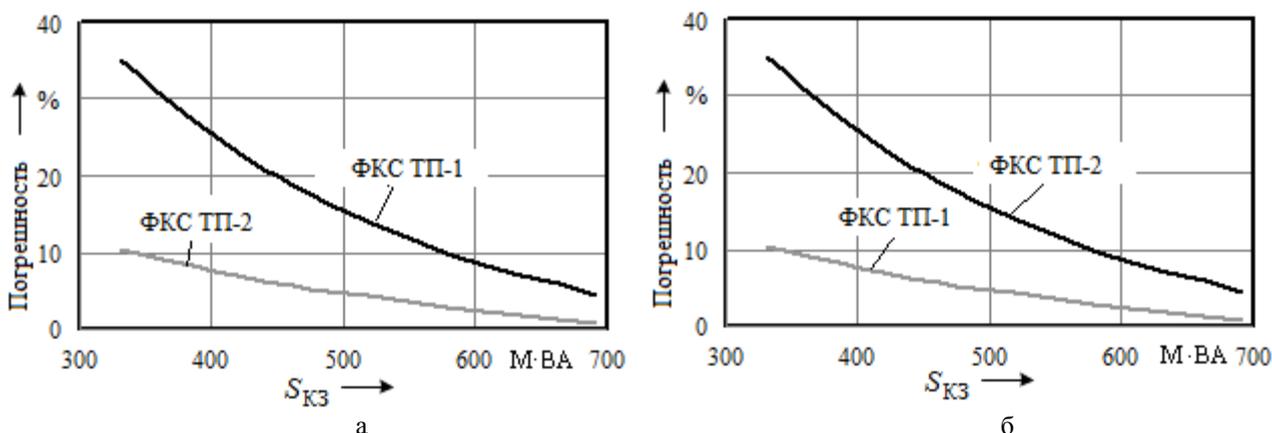


Рисунок 10 – Погрешности расчетов токов КЗ при коротком замыкании у ТП-2 (а) и у ТП-1 (б)

При коротких замыканиях в разных концах межподстанционной зоны токи КЗ почти не различаются. Погрешности расчетов по эквивалентным реактансам значительно меньше, чем в предыдущих случаях, из-за менее жесткой связи смежных подстанций. Как и ранее, преобладает погрешность расчета тока при коротком замыкании в дальнем конце МПЗ; погрешности превышают 10 % при мощностях КЗ на вводах подстанций менее 600 МВ·А.

Питание пяти тяговых подстанций от двух ВЛ 220 кВ (рисунок 11). Расчеты токов КЗ при питании подстанций выполнены для коротких замыканий в тяговой сети межподстанционной зоны между подстанциями ТП-1 и ТП-2. Длина участков ЛЭП между подстанциями равна 50 км, предполагалась полная транспозиция проводов линий. Тяговые сети межподстанционных зон такие же, как и в предыдущем случае.

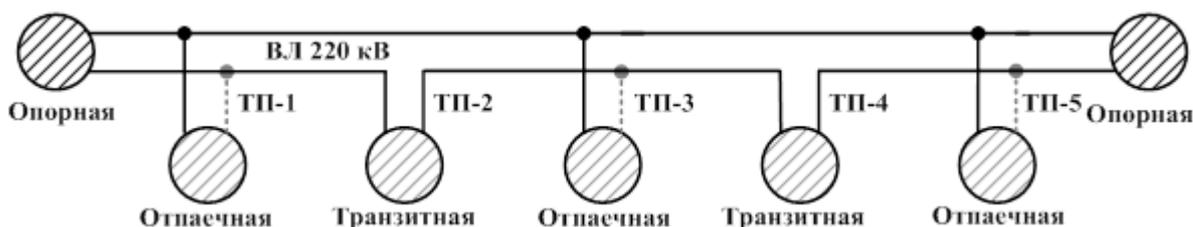


Рисунок 11 – Схема питания пяти тяговых подстанций

Погрешности расчетов токов коротких замыканий в тяговой сети в зависимости от мощности КЗ на вводах опорных подстанций при задании эквивалентов внешнего электроснабжения показаны на рисунке 12.

Вариант питания тяговых подстанций от двух ВЛ 220 кВ отличается небольшими погрешностями расчетов токов КЗ по эквивалентным реактансам внешнего электроснабжения: различия от расчетов по полной схеме не превышают 9 % при мощностях КЗ 1200 МВ·А и более.

Расчеты токов КЗ в тяговой сети межподстанционной зоны ТП2 – ТП3, удаленной от опорных подстанций, дают примерно те же значения токов. В таблице 3 приведены результаты расчетов токов коротких замыканий для схем с моделями ЛЭП и с эквивалентами реактансов КЗ для варианта подключения опорных подстанций к шинам бесконечной мощности по линии длиной 100 км, соответствующей мощности КЗ на шинах ТП-2 1026 МВ·А.

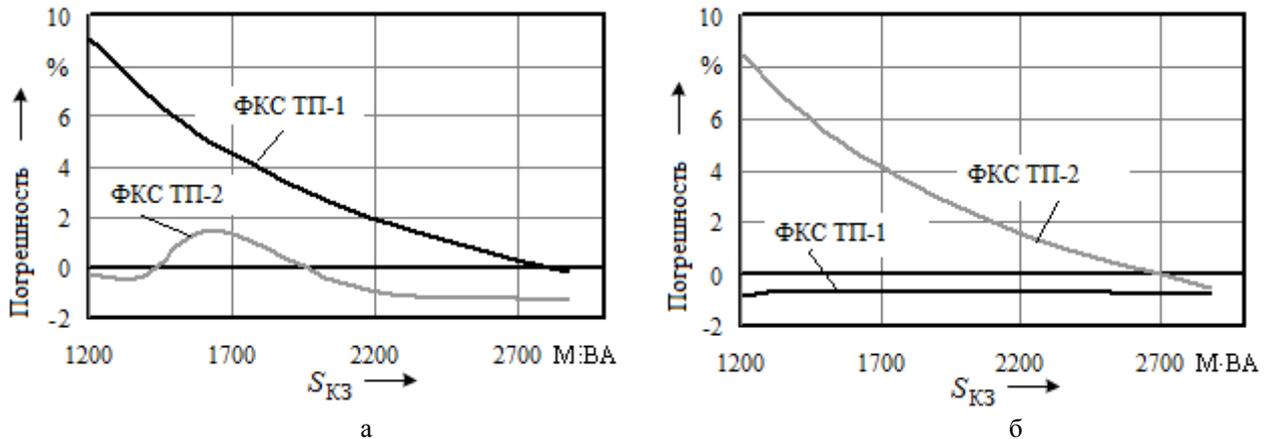


Рисунок 12 – Погрешности расчетов токов КЗ при коротком замыкании у ТП-2 (а) и у ТП-1 (б)

Таблица 3 – Токи короткого замыкания фидеров контактной сети подстанций при КЗ у правой ТП-3

Длина ЛЭП, км	Вариант	Ток в месте КЗ, А	Ток ФКС ТП2, А	Ток ФКС ТП3, А
100	Схема с ЛЭП	5908	1262	4667
100	Схема с $X_{КЗ}$	5991	1364	4655

В этом случае погрешности определения тока удаленного фидера при расчете по реактансам сети 220 кВ не превышают 8 %.

На основе изложенного можно сделать выводы.

1. Расчеты токов КЗ в контактной сети тупиковой подстанции 27,5 кВ по реактансам КЗ на вводах питающего напряжения дают приемлемую точность для тока фидера контактной сети ТП, вблизи которой происходит короткое замыкание. Погрешность расчета тока фидера удаленной подстанции составляет величину порядка 10 % при мощности КЗ на вводах подстанции около 3000 МВ·А, но при снижении мощности КЗ до значения 300 МВ·А погрешность увеличивается до 100 %.

2. Питание смежных тяговых подстанций от одноцепной ВЛ 110 кВ приводит к погрешностям расчета тока КЗ фидера удаленной от места КЗ подстанции по реактансам питающей системы до 60 % при мощности короткого замыкания на вводах ТП порядка 300 МВ·А. При питании группы тяговых подстанций от двух линий 110 кВ погрешности расчетов по эквивалентным реактансам значительно меньше.

3. Вариант питания тяговых подстанций от двух ЛЭП-220 отличается небольшими погрешностями расчетов токов КЗ по эквивалентным реактансам внешнего электроснабжения: отличие от расчетов по полной схеме комплекса Fazonord не превышает 9 % при мощности КЗ 1200 МВ·А и более.

4. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети по формуле «Руководящих указаний по релейной защите систем тягового электроснабжения» дают приемлемую точность расчета при коротких замыканиях вблизи рассматриваемой подстанции. Для расчета тока КЗ, удаленного от тяговой подстанции, необходимо использовать уточненные методики с применением программных средств.

Список литературы

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

2. Фигурнов, Е. П. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Т. Е. Петрова. – М.: Маршрут. – 2006. – 272 с.
3. Василянский, А. М. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц [Текст] / А. М. Василянский, Р. Р. Мамошин, Г. Б. Якимов // Железные дороги мира. – 2002. – № 8. – С. 40 – 46.
4. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: общий курс [Текст] / И. П. Киселев, Л. С. Бражко и др. / УМЦ ЖДТ. – М., 2014. – Т.1. – 308 с.
5. Герман, Л. А. Расчет токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока железных дорог [Текст] / Л. А. Герман, А. В. Шаров // Электричество. – № 3. – 2003. – С. 27 – 34.
6. Расчет токораспределения при коротких замыканиях в тяговых сетях [Текст] / К. Г. Марквардт, Б. И. Косарев и др. // Электричество. – № 3. – 1979. – С. 30 – 34.
7. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. – М.: Трансиздат, 2005. – 216 с.
8. СП 224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Утв. приказом Минтранса № 330 02 декабря 2014 г. – 85 с.
9. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков / Иркутский гос. ун-т путей сообщения – Иркутск, 2005. – 273 с.
10. Крюков, А. В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2011. – 170 с.

References

1. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie `elektroficirovannyh zheleznyh dorog* (Power supply of the electrified railroads). Moscow: Transport, 1982, 528 p.
2. Figurnov E. P., Zharkov Yu. I., Petrova T. E. *Relejnaya zaschita setej tyagovogo `elektrosnabzheniya peremennogo toka* (Relay protection of tractive electrical power supply networks of alternating current). Moscow: Marshrut, 2006, 272 p.
3. Vasilyansky A. M., Mamoshin R. R., Yakimov G. B. Enhancement of tractive electrical power supply system electrified on alternating current of 27,5 kV, 50 Hz [Sovershenstvovanie sistemy tyagovogo `elektrosnabzheniya zheleznyh dorog, `elektroficirovannyh na peremennom toke 27,5 kV, 50 Gc]. *Zheleznye dorogi mira – Railroads of the world*, 2002, no. 8, pp. 40 – 46.
4. Kiselyov I. P., Brazhko L. S., Burkov A.T., etc. *Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj transport: obschij kurs* (High-speed railway transport: general course). Moscow: Educational and methodical center by training on railway transport, T.1, 2014, 308 p.
5. German L. A., Sharov A. V. Calculation of short-circuit currents in tractive alternating current railroads [Raschet tokov korotkogo zamykaniya v tyagovyh setyah peremennogo toka zheleznyh dorog]. *Elektrichestvo – Electricity*, no. 3, 2003, pp. 27 – 34.
6. Markvardt K. G., Kosarev B. I., Kosolapov G. N., Chernov Yu. A. Calculation of current distribution at short circuits in traction networks [Raschet tokoraspredeleniya pri korotkih zamykaniyah v tyagovyh setyah]. *Elektrichestvo – Electricity*, no. 3, 1979, pp. 30 – 34.
7. *Rukovodyaschie ukazaniya po relejnoj zaschite sistem tyagovogo `elektrosnabzheniya* [Guidelines on relay protection of tractive electrical power supply systems]. Moscow: Transizdat, 2005, 216 p.
8. Tyagovoe electrosnabjenie zheleznoy dorogi, SP 224.1326000.2014 (Railway tractive electro supplying, SP 224.1326000.2014). Moscow, 2014, 85 p.
9. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Slozhnonesimmetrichnye rezhimy `elektricheskikh sistem* (Asymmetrical modes of electric systems). Irkutsk, 2005, 273 p.

10. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego `elektrosnabzheniya zheleznih dorog peremennogo toka* (Methods of joint simulation of tractive and external electrical power supply systems of alternating current railroad). Irkutsk, 2011, 170 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Закарюкин Василий Пантелеймонович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Доктор техн. наук, профессор, ИрГУПС.
Тел.: (3952) 63-83-45.
E-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).
64074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
Доктор техн. наук, академик Российской академии транспорта, профессор, ИрГУПС и ИРНИТУ.
Тел.: (3952)63-83-45.
E-mail: and_kryukov@mail.ru

Алексеенко Евгения Алексеевна

Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение Трансэнерго ОАО «РЖД».
664013, г. Иркутск, ул. Образцова, д. 20.
Магистр техники и технологии, энергодиспетчер Иркутской дистанции электроснабжения.
Тел.: 8 (924) 543-31-21,
E-mail: alev_ia@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Закарюкин, В. П. Анализ применимости эквивалентов внешнего электроснабжения для расчетов токов короткого замыкания в тяговой сети 27,5 кВ [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. А. Алексеенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 76 – 87.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zakaryukin Vasiliy Panteleymonovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernishvsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., professor ISTU.
Phone: (3952) 63-83-45.
E-mail: zakar49@mail.ru

Kryukov Andrey Vasilievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernishvsky st., Irkutsk, 664074, Russia.
Irkutsk National Research Technical University (INRTU).
83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russia.
Dr. Sci. Tech., academician of the Russian academy of transport, professor ISTU and INRTU.
Phone: (3952) 63-83-45.
E-mail: and_kryukov@mail.ru

Evgeniya Alekseevna Alekseenko

East Siberian directorate on power supply – structural division Transpower JSC Russian Railway.
20 Obraztsov St., Irkutsk, 664013.
Master of the equipment and technology, power dispatcher of the Irkutsk distance power supply.
Phone: 8 (924) 543-31-21.
E-mail: alev_ia@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Alekseenko E. A. Analysis of applicability of external power supply equivalents for short circuit currents' calculations in 27,5 kV traction network. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 76 – 87. (In Russian).

УДК 681.5

М. Г. Комогорцев, В. Э. Осипова

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ (ИрГУПС)), г. Чита, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖПОЕЗДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается процесс применения оперативного расчета пропускной способности и межпоездных интервалов в рамках концепции координатного управления движением поездов. Пред-

ложенная методика направлена на решение задачи поиска достоверных межпоездных интервалов в реальном времени, расчета послеаварийного установившегося режима и оценивания надежности системы тягового электроснабжения, основанная на использовании аппарата искусственных нейронных сетей и современных средств интервального регулирования движения поездов.

Ключевые слова: координатное управление, пропускная способность, искусственные нейронные сети.

Maksim G. Komogorcev, Valeriya E. Osipova
Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT(ISTU))

DEVELOPMENT OF MODELS OF INTERTRAIN INTERVALS WITH USE OF THE DEVICE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract. In article process of expeditious calculation of capacity and intertrain intervals is considered within the concept of coordinate management of train service. The technique directed to the solution of problems of search of reliable intertrain intervals in real time, calculation of the postemergency set operation and estimation of reliability of traction power supply system, based on use of the device of artificial neural networks and modern means of interval regulation of the movement of railway transport is offered.

Keywords: coordinate management, capacity, artificial neural networks.

В настоящее время на железнодорожном транспорте все больше внимания уделяется внедрению новых, высокоэффективных средств интервального регулирования движения поездов [1]. Все больший интерес вызывает возможность применения спутниковых навигационных систем для определения минимально допустимых межпоездных интервалов на железных дорогах России и стран ближнего зарубежья [2]. Концепция координатного управления движением поездов позволяет отказаться от традиционных блок-участков и более эффективно использовать резервы пропускной способности железной дороги.

Особый интерес представляет перспектива использования координатных определений местоположения поездов для решения задач системы тягового электроснабжения (СТЭ) [3]. На электрифицированных участках железных дорог поездной диспетчер в тесном взаимодействии с энергодиспетчером организует движение поездов на основании минимально допустимых межпоездных интервалов с учетом возможностей СТЭ, чередуя тяжеловесные поезда с более легкими. График исполненного движения поездов представляет собой многопараметрический процесс, отражающий поездную работу на участке и содержащий информацию о характеристиках поездов: их весовой норме, скорости следования, длине состава, характере вагонного состава поезда и данные о местоположении поезда на рассматриваемом участке.

В настоящее время оценка наличной пропускной способности и ее функциональной составляющей – межпоездного интервала – осуществляется либо на основании расчетов по аналитическим зависимостям, либо на основании методов имитационного моделирования с последующей их проверкой по результатам экспериментальных поездок [4]. Однако в связи со стохастическим характером поездной работы результаты экспериментальных поездок по оценке межпоездных интервалов существенно отличаются от результатов аналитических расчетов. Предварительные расчеты производят для предельного режима работы СТЭ, и минимальный межпоездной интервал определяется лишь для одного реализованного графика движения, при котором учитывается, что на межподстанционной зоне находится максимальное количество поездов повышенной массы.

Одним из ограничивающих факторов минимального межпоездного интервала по условиям работы СТЭ является автоматическая блокировка с фиксированными блок-участками, устанавливающая лимитирующее значение интервала в восемь минут. При переходе на координатное определение местоположения поездов возможно уменьшение межпоездного интервала путем оперативного расчета нагрузочной способности СТЭ на основании более точного определения местоположения нагрузки.

В связи с этим возникает необходимость оперативного расчета пропускной способности и межпоездных интервалов, включающего в себя процедуры проверки адекватности расчетов реальным условиям функционирования системы тягового электроснабжения. Перспективным представляется решение этих вопросов на базе технологий искусственного интеллекта, в частности, аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) [5, 6].

Авторами предложена методика, направленная на решение задачи поиска достоверных межпоездных интервалов в реальном времени, а также расчета послеаварийного установившегося режима и оценивания надежности СТЭ, основанная на использовании аппарата искусственных нейронных сетей и современных средств интервального регулирования движения поездов.

На рисунке 1 представлена структурная схема, отражающая суть предлагаемой методики.

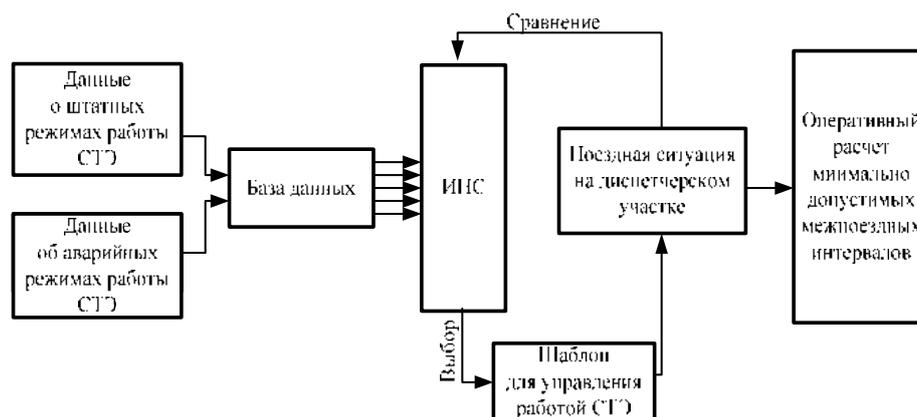


Рисунок 1 – Структурная схема взаимодействия информационных процессов, применяемая в методике оперативного расчета межпоездных интервалов

Предварительно, вне реального времени, определяется множество возможных базисов, соответствующих всем возможным штатным и аварийным режимам работы СТЭ на заданном диспетчерском участке. Таким образом, формируется база данных, необходимая для предварительного «обучения» искусственной нейронной сети. Для каждого из полученных базисов формируется искусственная нейронная сеть (ИНС), в которой содержатся оптимальные алгоритмы действий оперативного персонала, позволяющие в автоматическом режиме рассчитывать и устанавливать минимально допустимую величину межпоездного интервала на основе данных о фактическом местоположении поездов с использованием координатных определений. Формируются также алгоритмы действий ИНС в случае наступления аварийной ситуации в системе тягового электроснабжения.

Поездная ситуация на диспетчерском участке сравнивается со всеми базисами ИНС, хранящимися в базе данных. Программными средствами выбирается базис, адекватно отражающий режим работы СТЭ в настоящий момент времени. Наиболее «подходящая» ИНС становится шаблоном для управления работой системы тягового электроснабжения.

Основной задачей системы автоматического управления (САУ) в штатном режиме функционирования становится оперативный расчет минимально допустимых межпоездных интервалов.

При возникновении внештатных режимов работы система автоматического управления СТЭ на основании «шаблона» искусственной нейронной сети выбирает алгоритм действий, наиболее подходящий для возникшей ситуации.

Быстродействие САУ, построенного на аппарате ИНС, во много раз выше, чем у человека-оператора, а решения не зависят от так называемого «человеческого фактора» [7]. Скорость и адекватность принятия решений при авариях в СТЭ имеют огромное значение. Правильные и своевременные решения энергодиспетчера позволяют минимизировать влияние аварий в СТЭ на график движения поездов, а в некоторых случаях и защитить оборудование СТЭ от необратимых повреждений, вызванных ошибочными действиями человека.

Для реализации методики предлагается использовать одну из наиболее распространенных архитектур – рекуррентную многослойную нейронную сеть [8], строящуюся по иерархическому принципу. В таких сетях сигнал с выходных нейронов или нейронов скрытого слоя частично передается обратно на входы нейронов входного слоя.

Многослойная нейронная сеть представляет собой сеть, состоящую из нескольких последовательно соединенных слоев формальных нейронов МакКаллока и Питтса. [9] Функционирование ИНС происходит следующим образом: входной сигнал, подаваемый на сеть, поступает на нейроны входного слоя, проходит по очереди через все слои и выделяется с выходов нейронов выходного слоя. По мере распространения сигнала по сети он претерпевает ряд преобразований, которые зависят от его начального значения, преобразующей функции и величин весов связей. Данный тип сетей хорошо зарекомендовал себя как эффективное средство для прогнозирования, классификации и анализа.

На низшем уровне иерархии находится входной слой, состоящий из сенсорных элементов, задачей которого является только прием и распространение по сети входной информации. Далее расположены несколько скрытых слоев, каждый из которых анализирует полученные данные в соответствии с требованиями по безопасности, надежности и эффективности работы железнодорожной инфраструктуры в пределах диспетчерского круга. Каждый нейрон на скрытом слое имеет несколько входов, соединенных с выходами нейронов предыдущего слоя или непосредственно со входными сенсорами $X_1..X_n$, и один выход (рисунок 2). Нейрон характеризуется уникальным вектором весовых коэффициентов w . Веса всех нейронов слоя формируют матрицу.

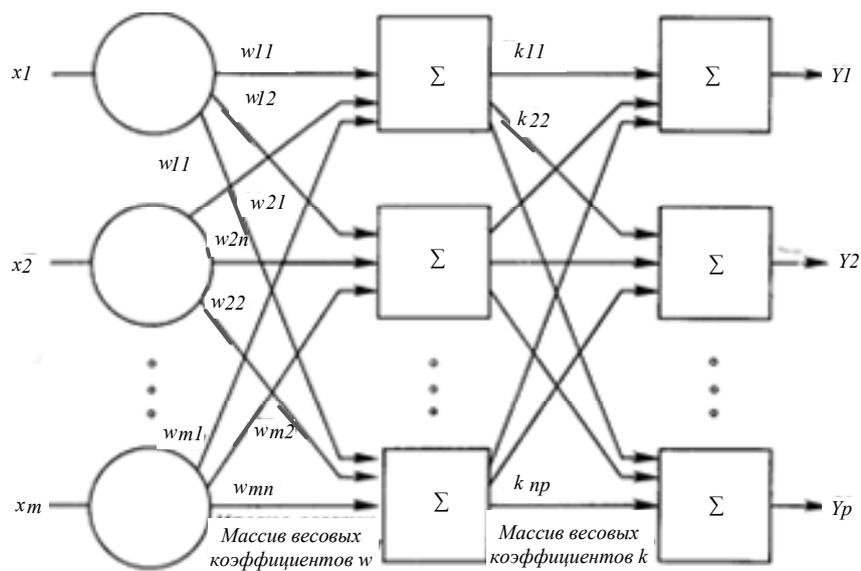


Рисунок 2 – Структура многослойной ИНС

Целесообразность использования рекуррентной многослойной нейронной сети для решения задач оперативного управления режимами СТЭ обусловлена следующими причинами: обратные связи рекуррентной многослойной нейронной сети позволяют своевременно корректировать решения, принимаемые САУ;

многослойные нейронные сети характеризуются способностью к восстановлению высоконелинейных функциональных зависимостей и обнаружению скрытых закономерностей. Процессы, протекающие в СТЭ, имеют явно выраженный нелинейный характер. Доказано [8], что посредством ИНС можно аппроксимировать любую нелинейную зависимость между входными и выходными данными с заданной точностью;

многослойные нейронные сети обладают высоким быстродействием. Основной объем вычислений, связанный с обучением ИНС, выносится за контур реального времени, тогда как в режиме реального времени формируется мгновенный отклик – решение. Это удовле-

творят главному требованию работы в цикле оперативного управления – жестким временным ограничениям [3];

в многослойной нейронной сети вычисление выходных значений сети может осуществляться с высокой степенью параллелизма за число тактов, равное числу слоев [9].

Для оперативных расчетов пропускной способности системы тягового электроснабжения необходимо построение рекуррентной многослойной нейронной сети с реализацией следующих функций:

мониторинга дислокации поездов согласно графику исполненного движения;

расчета режимов системы тягового электроснабжения и электропотребления по тяговым подстанциям расчетного участка;

сбора информации об электропотреблении по тяговым подстанциям из базы данных автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ)

оценки адекватности расчета параметров СТЭ на базе сравнения моделируемых и реальных процессов электроснабжения и настройки параметров модели;

поиска достоверных межпоездных интервалов при вариации размеров движения и количественных показателей поездной работы на участке.

Структурная схема многослойной нейронной сети для предлагаемой модели управления работой СТЭ представлена на рисунке 3.

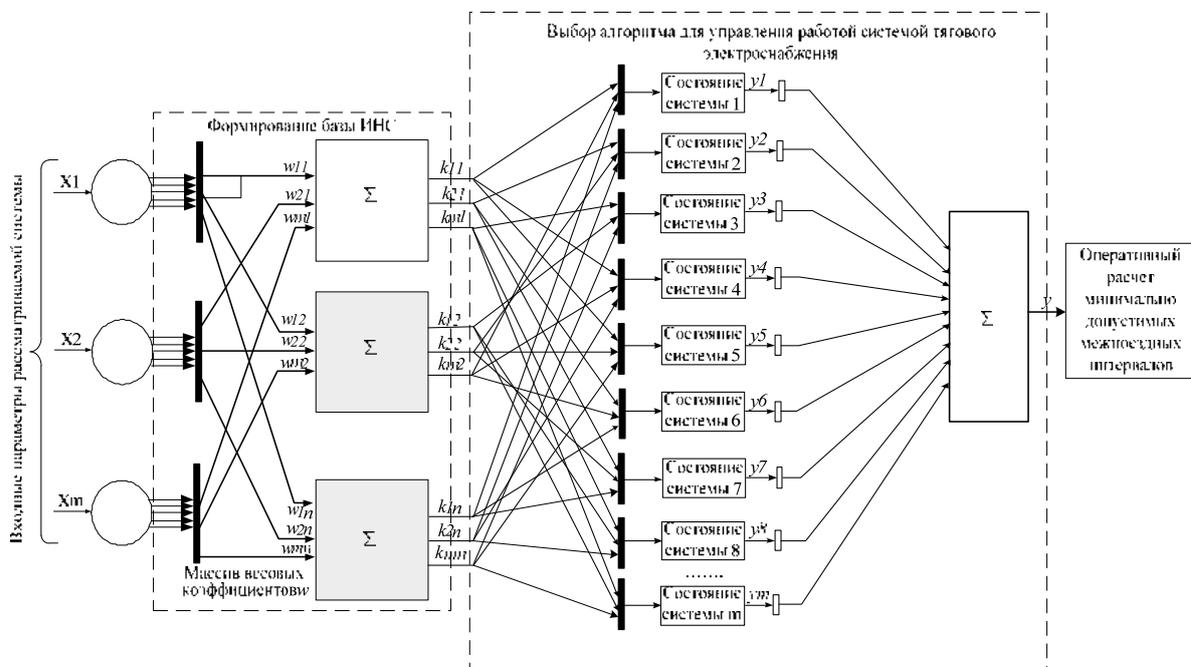


Рисунок 3 – Многослойная нейронная сеть для управления работой системы тягового электроснабжения

Расчет минимального межпоездного интервала для определения потребной пропускной способности при заданных размерах движения необходимо выполнять, учитывая ограничивающие условия системы тягового электроснабжения: минимальное напряжение на токоприемнике подвижного состава, нагрев проводов контактной сети, нагрев элементов обратной тяговой сети, мощность тяговых трансформаторов и условия системы интервального регулирования движения поездов [10].

Структурная схема предлагаемой модели управления представлена на рисунке 4.

Авторами были проведены предварительные теоретические оценки величин возможных межпоездных интервалов при использовании методики оперативного расчета с использованием координатных определений местоположения поездов.

Применение предлагаемой методики с использованием аппарата ИНС позволит существенно повысить эффективность управления движением поездов, что в свою очередь позволит повысить пропускную способность некоторых участков железной дороги.

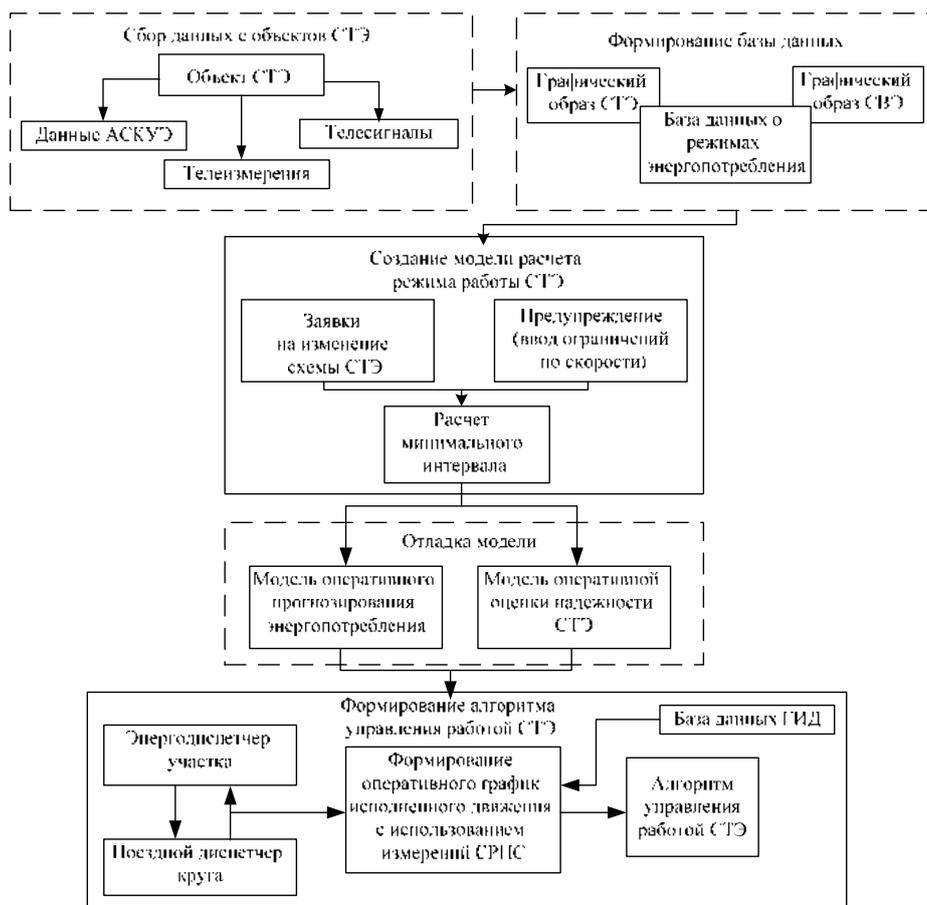


Рисунок 4 – Структурная схема предлагаемой модели управления

Список литературы

1. Гапанович, В. А. Перспективы обновления подвижного состава российских железных дорог [Текст] // Транспорт Российской Федерации. – М.: Машиностроение. – 2006. – № 3 (3). – С. 56 – 61.
2. Розенберг, Е. Н. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов: Дис...доктора техн. наук / Е. Н. Розенберг. – М., 2004. – 317 с.
3. Методы решения задач реального времени в электроэнергетике [Текст] / А. З. Гамм, Ю. Н. Кучеров и др. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991. – 294 с.
4. Крюков, А. В. Управление системами тягового электроснабжения железных дорог [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Н. А. Абрамов // Управление большими системами: сборник трудов / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2010. – № 29. – С. 102 – 115.
5. Пантелеев, В. Н. Методы искусственного интеллекта в управлении режимами систем электроснабжения предприятий [Текст] / В. Н. Пантелеев, А. Н. Туликов // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – Томск. – 2008. – № 1 (17). – С. 93 – 105.
6. Крюков, А. В. Нейросетевое моделирование процессов на железнодорожном транспорте [Текст] / А. В. Крюков, Н. В. Раевский, Д. А. Яковлев // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. Принципы математического моделирования технических, социальных и энергетических систем: Сб. науч. тр. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2006. – Вып. 3. – С. 99 – 107.
7. Марюхненко, В. С. Пути предотвращения критических состояний на транспорте [Текст] / В. С. Марюхненко, М. Г. Комогорцев, Т. В. Трускова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2007. – № 2 (14). – С. 96 – 102.

8. Горбань, А. Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей [Текст] / А. Н. Горбань // Сибирский журнал вычисл. матем. Сиб. отд. РАН. – Новосибирск, 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 11 – 24.
9. Терехов, С. А. Лекции по теории и приложениям искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс] / Лаборатория искусственных нейронных сетей НТО-2 / ВНИИТФ. – Снежинск, 1998. URL: http://alife.narod.ru/lectures/neural/Neu_ch06.htm
10. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. Утв. ОАО «РЖД» 10 ноября 2010 г., № 128. – 305 с.

References

1. Gapanovich V. A. Prospects for the renewal of rolling stock of Russian Railways [Perspektivy obnovleniia podvizhnogo sostava rossiiskikh zheleznykh dorog]. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2006, no. 3 (3), pp. 56 – 61.
2. Rozenberg E. N. *Mnogourovnevaia sistema upravleniia i obespecheniia bezopasnosti dvizheniia poezdov* (Multi-level management system and ensure the safe movement of trains). Doctor's thesis, Moscow, 2004, 317 p.
3. Gamm A. Z. *Metody resheniia zadach real'nogo vremeni v elektroenergetike* (Solution methods for real-time tasks in the power industry). Novosibirsk, 1991, 294 p.
4. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Abramov A. V. Managing the traction power supply of Railways [Upravlenie sistemami tiagovogo elektrosnabzheniia zheleznykh dorog]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov – Managing large systems: collection of papers*, 2010, no. 29, p. 102 – 115.
5. Panteleev V. N., Tulikov A. N. Artificial intelligence methods in control systems of power supply of enterprises [Metody iskusstvennogo intellekta v upravlenii rezhimami sistem elektrosnabzheniia predpriatii]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki – Reports of Tomsk state University of control systems and Radioelectronics*, 2008, no. 1(17), pp. 93 – 105.
6. Kryukov A. V., Raevskii N. V., Yakovlev D. A. Neural network modeling of the processes in railway transport [Neirosetevoie modelirovanie protsessov na zheleznodorozhnom transporte]. *Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniia slozhnykh sistem. Printsipy matematicheskogo modelirovaniia tekhnicheskikh, sotsial'nykh i energeticheskikh sistem – Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems. Principles of mathematical modeling of technical, social and energy systems: collection of scientific papers*, 2006, pp. 99 – 107.
7. Maryuhnenko V. S., Komogorcev M. G., Truskova T. V. Ways to prevent critical States transport [Puti predotvrashcheniia kriticheskikh sostoianii na transporte]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technology. System analysis. Modeling*, 2007, no. 2 (14), pp. 96 – 102.
8. Gorban' A. N. *Obobshchennaia approksimatsionnaia teorema i vychislitel'nye vozmozhnosti neironnykh setei* (A generalized approximation theorem and computational capabilities of neural networks). Novosibirsk: Siberian journal of computational mathematics, 1998, T.1, no. 1, pp. 11 – 24.
9. Terehov S. A. Lectures on the theory and applications of artificial neural networks [electronic resource], Snezhinsk – 1998. URL: http://alife.narod.ru/lectures/neural/Neu_ch06.htm
10. *Instruktsiia po raschetu nalichnoi propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog* (Instruction for calculating the actual capacity of the Railways approved by JSC «Russian Railways» on 10 November 2010 г. no. 128), 305 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Комогорцев Максим Геннадьевич

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ (ИрГУПС)).
672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Komogorcev Maksim Gennad'evich

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT(ISTU)).
Magistral'naya street., Chita, 672040, Russia.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗаБИЖТ.

Тел.: +7914-443-51-77.

E-mail: maximus_mk1984@list.ru

Осипова Валерия Эдуардовна

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗаБИЖТ (ИрГУПС)).

672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11.

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», ЗаБИЖТ.

Тел.: +7964-470-11-83

E-mail: Valeri3307@mail.ru

Cand. Tech. Sci., Associate Professor of the department «Power supply», ZiRT.

Phone: +7964-470-11-83

E-mail: maximus_mk1984@list.ru

Osipova Valeriya Eduardovna

Zabaikalsky Institute of railway transport (ZiRT(ISTU)).

Magistral'naya street., Chita, 672040, Russia.

Chief lecturer of the department «Power supply», ZiRT.

Phone: +7964-470-11-83

E-mail: Valeri3307@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Комогорцев, М. Г. Разработка модели определения межпоездных интервалов с использованием аппарата искусственных нейронных сетей [Текст] / М. Г. Комогорцев, В. Э. Осипова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 87 – 94.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Komogorcev M. G., Osipova V. E. Development of models of intertrain intervals with use of the device of artificial neural networks. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 87 – 94. (In Russian).

УДК 620.9:658.

В. З. Манусов¹, Б. В. Палагушкин², У. Бумцэнд¹

¹ Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск, Российская Федерация.

² Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ), г. Новосибирск, Российская Федерация

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОРИДОРА «АЗИЯ – ЕВРОПА» КАК ПУТЬ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНГОЛИИ

Аннотация. В работе рассматривается проблема устойчивого инновационного развития электроэнергетической системы Монголии с учетом географического положения этой страны на границе транспортного пути между Китаем и Россией. В более широком понимании между азиатским промышленным регионом и Европой, товарооборот между которыми ежегодно возрастает. Основным сдерживающим фактором на пути этого процесса является неэлектрифицированная главная железнодорожная магистраль, проходящая по территории Монголии. Показаны преимущества электрификации железных дорог для решения проблемы электроснабжения промышленности и сельского хозяйства. При этом наиболее важной задачей является электрификация транспортной магистрали Сухэбатор – Уланбатор – Замын Удэ протяженностью 1111 км. Показано, что реализация этой задачи позволит сократить железнодорожный путь из Европы в центральную Азию на 1025 км. Сделан прогноз развития транспортных перевозок в будущем. Наряду с этим выполнен прогноз развития электроэнергетической системы Монголии, в которой тяговая электрическая нагрузка будет составлять примерно 22 %. Приведен соответствующий график требуемого развития генерирующих мощностей в монгольской энергосистеме, чтобы к 2025 г. довести располагаемую мощность до 3500 МВт. Доказаны существенные преимущества электрифицированной железной дороги за счет улучшения электровозной тяги по сравнению с тепловозной тягой. В отличие от значительной доли электрифицированных железных дорог на постоянном токе в России в работе предложен путь развития системы тягового электроснабжения 2 × 25 кВ переменного тока. По примеру других высокоразвитых стран это позволит перейти к использованию скоростных железных дорог. Таким образом, будет достигнуто сбалансированное развитие электроэнергетической системы Монголии с учетом электрификации транспортного коридора «Азия – Европа».

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, электрификация, электроэнергетическая система, транспортный коридор, «Азия – Европа», Монголия.

Vadim Z. Manusov¹, Boris V. Palagushkin², Bumtsend Uyangasaikhan¹

¹Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, , the Russian Federation

²Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, the Russian Federation

THE ELECTRIFICATION OF INTERNATIONAL TRANSPORT RAILWAY CORRIDOR FROM ASIA TO EUROPE AS A WAY OF POWER SYSTEM SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF MONGOLIA

Annotation. The paper deals with the problem of sustainable innovation development of the electric power system of Mongolia, taking into account the geographical position of the country on the border of a transport route between China and Russia. In the broadest sense between the Asian industrial region and Europe, the turnover between them is increasing every year. The main constraining factor on the way of this process is not electrified main railway line, passing through the territory of Mongolia. Shown the advantages of railway electrification to solve the problems of power supply industry and agriculture. The most important objective is the electrification of the transport route Sukhbaatar Ulaanbaatar-Zamyn-Ude, the length of 1111 km. It is shown that the realization of this goal will reduce rail route from Europe to Central Asia of 1,025 km. The forecast of development of transportation in the future. Along with this a forecast of the Mongolia's electric power system, in which the traction electric load would be approximately 22%. Included the corresponding graph required the development of generating capacities in the Mongolian power system in order to adjust the available capacity to 3500MW by the year 2025. Proved significant advantages of electrified railway through improving electric locomotive in comparison with diesel locomotive. In contrast to the significant proportion of electrified railways of Russia on a direct current, proposed the path of traction power supply system 2x25kV. Following the example of other highly developed countries, it will go to the use of high-speed railways. Thus it is achieved balanced development of Mongolia's electric power system based on electrification of the transport corridor from Asia to Europe.

Keywords: railway transport, electrification, power system, transport corridor, Mongolia

В настоящее время экономическое и социальное развитие Монголии в значительной степени зависит от деятельности железнодорожной отрасли, занимающей высокое положение в структуре транспортной системы страны. Так, например, в 2014 г. по железной дороге перевезено 63 % грузовых перевозок и 22 % пассажирских перевозок Монголии.

Огромная территория страны (1,6 млн кв. км) и низкая плотность проживающего населения, а также децентрализация сельского хозяйства и промышленных центров, огромные запасы природных ресурсов, растущий с каждым годом торговый оборот двух соседних стран – России и Китая – требуют от монгольского государства существенного улучшения транспортных перевозок. В том числе иметь современную структуру и виды транспорта, ускоряющую пассажирские и грузовые перевозки, а также современную экологически чистую и конкурентоспособную перевозку грузов с низкой стоимостью транспортировки.

Обоснование необходимости электрификации железной дороги состоит из трех основных условий:

- развитие сотрудничества с соседними странами;
- увеличение рентабельности транспортного коридора, соединяющего Азию и Европу, проходящего по территории Монголии;
- создание экономически эффективной железнодорожной перевозки с современными технико-технологическими решениями.

По сравнению с тепловозом электровоз при тех же весе и габаритах имеет значительно большую мощность, так как он не имеет первичного двигателя, т. е. дизеля. Поэтому электровоз обеспечивает движение с поездами со значительно большими скоростями и весом, что повышает пропускную и провозную способность железных дорог. Более высокие скорости движения обеспечивают ускорение доставки грузов и пассажиров к месту назначения и создают дополнительный экономический эффект для народного хозяйства.

Электрическая тяга имеет более высокий коэффициент полезного действия (КПД) по сравнению с тепловозной тягой. Средний эксплуатационный КПД тепловоза около 21 %, а у электрической – тяги около 24 %. При питании электровоза от старых тепловых электрических станций КПД электрической тяги составляет от 16 – 19 % при КПД самого электровоза порядка 85 %. Такой низкий КПД системы получается вследствие больших

потерь энергии в топках, котлах, и турбинах электрической станции, КПД которых составляет 25 – 26 %. Современные электрические станции с мощными и экономичными агрегатами работают с КПД до 40 %. Тогда КПД электрической тяги при получении питания от них составляет 25 – 30 %. Наиболее экономично работают электровозы при питании от ГЭС, при этом КПД составляет 60 – 65 %.

Нужно отметить, что тепловозы работают на дорогом и высококалорийном дизельном топливе, а тепловые электрические станции могут работать на более низких сортах топлива. Эффективность электрической тяги возрастает также при питании участков от атомных электрических станций.

Электровозы более надежны в эксплуатации, требуют меньших затрат на осмотр и ремонт оборудования. Электровозы позволяют поднять производительность труда на 16 – 17 % по сравнению с тепловозной тягой. Только электрическая тяга обладает свойствами перерабатывать запасенную в поезде механическую энергию в электрическую и отдавать ее при рекуперативном торможении в контактную сеть. Все это дает возможность снизить себестоимость перевозок и сделать процесс перевозки грузов более эффективным. За счет электрификации и технической реконструкции тяги на железнодорожном транспорте можно получить значительную экономию дизельного топлива. Себестоимость перевозок на электрифицированных линиях на 10 – 15 % ниже, чем при тепловозной тяге.

Опыт развитых стран подтверждает преимущества электрифицированных железных дорог по сравнению с тяговыми локомотивами по влиянию на окружающую среду, упрощению человеческого труда, минимальному расходу [1].

Нестабильность инфляции Монгольской экономики и рост цен импортных товаров (дизельное топливо, масло, запасные части) препятствуют развитию экономически эффективного железнодорожного транспорта. Другими словами, увеличение расходов растет с каждым годом, поэтому чтобы достичь экономической эффективности, необходимо осуществить выбор новых методов и технологий.

Таблица 1 – Список стран по протяженности электрифицированных железных дорог

Страна	Длина железных дорог, км	Электрифицировано, км	В процентах
КНР	191 270	65 000	33
Россия	87 157	43 400	49,7
Индия	64 215	26 269	40,9
Германия	46 551	19 973	42,9
Франция	29 901	15 140	50,6
Япония	27 182	16 702	71,2
Италия	24 179	16 683	68,9

Доказано, что электрифицируют железную дорогу главным образом с целью сокращения себестоимости эксплуатационных расходов на транспорт, а также для решения экологических проблем (экожелезная дорога), повышения пропускной способности железной дороги и улучшения комфортабельных условий поездки пассажиров [2, 3].

Электрифицированные железные дороги решают полностью одну из основных проблем энергоснабжения промышленности, сельского хозяйства и населенных пунктов, находящихся вдоль железнодорожных магистралей. Транспортные железнодорожные перевозки в значительной степени связаны также с ресурсами и местоположением месторождений полезных ископаемых.

Для Монголии уголь занимает 40 % от всех общих перевозок грузов, железная руда 29 % (экспорт), строительные товары 16 %, медный концентрат 3,5 %, полевой шпат 2 %, черный металл 1,7 %, нефтепродукты 1 %, древесина и изделия из дерева 0,6 %, цинковый концентрат 0,6 %.

Современное состояние и прогноз развития железнодорожных перевозок в Монголии представляет собой следующую картину. Уланбаторская железная дорога (УБЖД) является

единственной железнодорожной компанией в Монголии. Общая эксплуатационная длина дороги – 1844 км, включая линию Баянтумэн. Крупнейшей линией Монголии является магистраль Сухэ-Батор – Уланбатор – Замын-Удэ, ее протяженность 1111 км. Благодаря постройке этой магистрали железнодорожный путь из Европы в Центральную Азию сократился на 1025 км. От этой дороги в различные направления в настоящее время отходят несколько веток.

На АО «УБЖД» используется только тепловозная тяга. На балансе дороги находятся 135 тепловозов, 80 % всех локомотивов и вагонов эксплуатируются более 25 лет и нуждаются в срочной замене.

В 2014 г. поток грузовых перевозок составил 21,1 т и увеличился по сравнению с 2013 г. на 1,4 %. При этом объем транзитных грузов увеличился на 35,3 %. В 2014 г. через территорию Монголии по АО «УБЖД» перевозимый транзитный груз увеличился на 17 % по сравнению с грузом прошлого года. 84 % от всего транзитного груза направлено из России в Китай. При этом 48 % от направленного груза составил лесоматериал. Электрификация железнодорожного коридора из Китая в Россию необходима, так как экспорт из Китая в Россию непрерывно растет и ежегодный прирост составляет 5,6 %.

В ближайшее время транзит грузов между Россией и Китаем должен увеличиться до 40 млн т. Кроме того, динамичное развитие горнодобывающей отрасли Монголии, значительное число проектов по разработке угольных месторождений создают существенный потенциал для превращения Монголии в одного из крупнейших игроков мирового рынка коксующегося и энергетического угля, что также вызовет рост грузопотока по железнодорожной сети (около 50 млн т) [3].

Монголия располагает огромным запасом высококачественного энергетического угля. Геологические запасы угля Монголии составляет более 150 млрд т, а разведанные – более 10 млрд т. Используя эти богатые запасы угля и относительно благоприятное расположение к крупным рынкам, Монголия может существенно расширить свое производство электроэнергии.

Монгольская электроэнергетическая система (ЭЭС) состоит из систем Западный регион, Алтай-Улиастай, Восточный регион и Центральный регион. В настоящее время установленная мощность энергетической системы составляет около 1150 МВт. По данным Министерства энергетики Монголии в 2014 г. выработано электроэнергии 5392 млн кВт·ч, импортировано 1396,9 млн кВт·ч, располагаемая электроэнергия – 4285,2 млн кВт·ч. Рост потребления электроэнергии в год составляет 7 – 10 %.

Таблица 2 – Структура производства электроэнергии монгольской энергосистемы

Источник электроэнергии	Электроэнергия, млн кВт·ч	Производство электроэнергии от общей потребности в энергии, %
Тепловая электростанция	5191,3	76,47
Дизельная станция	8,32	0,12
Гидроэлектростанция	66,3	0,98
Солнечно-ветровая электростанция	126	1,85
Импорт	1396,9	20,58
Итого	6788,7	100

Страна производит 79,42 % электричества тепловым источником, за счет импорта электроэнергии получает 20,58 % от общей потребности в энергии. Структура производства электроэнергии такова: уголь – 92,33 % (1120,3 МВт), гидроэнергия – 1,89 % (23 МВт), дизельное топливо – 1,64 % (20 МВт), энергия ветра – 0,13 % (50 МВт), энергия солнца – около 0 % (0,065 МВт).

Около 70 % покрытия нагрузки зависит от энергосистемы центрального региона, которая состоит из пяти теплоэлектростанций подстанции и ЛЭП напряжением 220 и 110 кВ находящихся в таких местах: Гусиное озеро России, Уланбатор, Дархан, Эрдэнэт, Сайншанд. Из рисунка 1 видно, что установленная мощность меньше, чем потребляемая мощность, и она покрывается за счет импорта электрической энергии. По аналитическим данным потребление электроэнергии Монголии к 2020 г. должно составить 1400 МВт·ч. После 2020 г. тенденция в балансе электроэнергии энергосистемы изменится и установленная мощность будет соответствовать потребляемой [4].

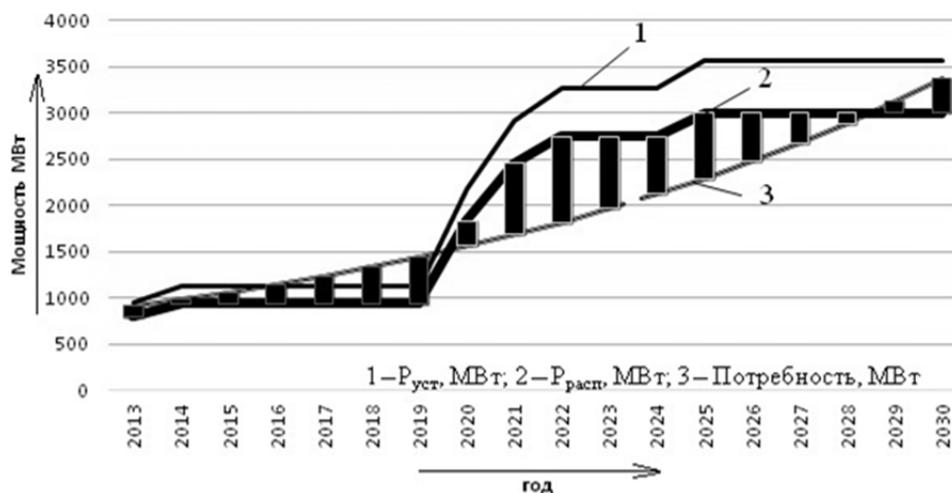


Рисунок 1 – Прогноз роста установленной располагаемой мощности и электропотребления до 2030 г.

Предложена модель баланса активной мощности с учетом электрификации железной дороги. Годовую мощность энергосистемы можно представить четырьмя параметрами; P_{cp} , $P_{сез}$, $P_{нед}$, $P_{сут}$. При этом P_{cp} отражает мощность, необходимую для получения годовой потребности в энергии, а остальные три параметра отражают неравномерность потребления энергии в течение года:

$$P_{cp} + P_{сез} + P_{нед} + P_{сут} + P_{\delta} = P_{нагр} + \Delta P_{\Sigma}$$

где P_{δ} – ошибка прогноза;

ΔP_{Σ} – суммарные потери активной мощности в энергосистеме.

Основной задачей развития и электрификации железной дороги Монголии и реализации «Программы ее технического обновления и развития» является увеличение ее пропускной способности для достижения ожидаемых уровней трафика.

Для этого необходимо осуществить следующие мероприятия:

- повысить скорость движения пассажирских поездов до 120 км/ч;
- установить скорость грузовых поездов 90 км/ч;
- сократить скорость оборота вагонов до 2,8 дня.

Для достижения поставленной цели электрификации железных дорог Монголии необходимо решить следующие задачи.

1. Ввести новые источники генерации активной и реактивной мощности.
2. Обеспечить нормативное требование к электрификации и электроснабжению железной дороги Монголии [5].
3. Обеспечить качество электроэнергии в системе тягового электроснабжения, а именно: обеспечить симметрию в питающих линиях монгольской энергосистемы, так как тяговая нагрузка является несимметричной [6];

подавлять высшие гармоники, возникающие от преобразователей при электровозной тяге [7];

обеспечить надежность питания тяговых подстанции за счет питания от двух независимых источников;

обеспечить энергосбережение [8].

4. Осуществить переход в режим скоростных железных дорог [9, 10].

Резюмируя сказанное, можно утверждать, что главный путь устойчивого развития электроэнергетической системы и инфраструктуры железнодорожного транспорта Монголии состоит в масштабной реконструкции, обусловленной электрификацией центральной магистрали железной дороги Монголии. Это позволит существенно удешевить и ускорить транспортировку грузов и пассажирских перевозок, а также децентрализовать распределение электроэнергии в стране и, таким образом, повысить жизненный уровень населения, особенно в сельскохозяйственных и отдаленных районах. Наряду с этим существенным образом улучшаются транспортные связи между государствами Европейско-Азиатского региона.

Список литературы

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 527 с.
2. Бородулин, Б. М. Системы тягового электроснабжения $2 \times 25\text{kV}$ [Текст] / Б. М. Бородулин. – М.: Транспорт, 1989. – 247 с.
3. Тамир, Д. Разработка многофакторных моделей прогнозирования грузооборота и объема перевезенных грузов [Текст] / Д. Тамир // Материалы науч.-исследоват. конф. «Сеть железных дорог и структура фундамента». – Уланбатор, 2014. С. 94 – 100.
4. Китушин, В. Г. Модель годового планирования работы генерирующих компании на конкурентном рынке электроэнергии [Текст] / В. Г. Китушин, Б. Батзаяа // Экономика и предпринимательство. – 2016. – № 3 (ч. 2). – С. 822 – 825.
5. ГОСТ 53685-2009. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2010. – 29 с.
6. Манусов, В. З. Исследование методов снижения несимметрии нагрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока [Текст] / В. З. Манусов, П. В. Морозов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 2 (10). – С. 87 – 93.
7. Морозов, П. В. Моделирование электромагнитного влияния скоростных железных дорог на системы электроснабжения [Текст] / П. В. Морозов, В. З. Манусов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. – Новосибирск, 2010. – № 3. – С. 323 – 327.
8. Бирюков, В. В. Энергосбережение на электрическом транспорте [Текст] / В. В. Бирюков / Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2009. – 243 с.
9. Скоростные железные дороги [Текст] / Синкансен/ Пер. с япон. Татэмацу Тосихико, Кума Садоси, Исохара Есно. – М. – Транспорт, 1984. – 199 с.
10. Котельников, А. В. Энергетическая стратегия железных дорог России [Текст] / А. В. Котельников // Железные дороги мира. – 2005. – № 2. – С. 3 – 21.

References

1. Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog* (Power supply of electrified railways) – Moscow: Transport, 1982, 527 p.
2. Borodulin B.M. *Sistemy tjagovogo elektrosnabzhenija 2x25 kV* (Traction power supply systems 2x25 kV). Izdatelstvo Transport, 1989, 247 p.
3. Tamir D. Development of multifactor models of forecasting turnover and volume of transported cargo [Razrabotka mnogofaktornyh modelej prognozirovaniya gruzoobrota i obema

perevezennyh gruzov]. *Materialy nauchno-issledovatel'skoj konferencii «Set' zheleznyh dorog i struktura fundamenta»* (Materials research conference "The network of railways and the foundation structure"). –Ulanbator, 2014, pp. 94 – 100.

4. Kitushin V.G., Batzaya B. Model annual planning of generating companies in a competitive electricity market [Model godovogo planirovanija raboty generirujushhih kompanii na konkurentnom rynke elektroenergii] *Ekonomika i predprinimatelstvo – Economy and business*, 2016, no. 3 (2) – pp. 822-825.

5. *Elektrifikacija i elektrosnabzhenie zheleznyh dorog. Terminy i opredelenija GOST 53685-2009* (Electrification of railways and electricity. Terms and Definitions, State Standart 53685-2009). Mosco, Standart inform, 2010, 29 p.

6. Manusov V. Z., Morozov P. V. Research methods of reducing non-symmetrical loading of three-phase circuits on AC traction substations of high-speed railway [Issledovanie metodov snizhenija nesimmetrii nagruzki trehfaznoj seti na tjagovyh podstancijah skorostnyh zheleznyh dorog peremennogo toka]. *Izvestija Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2012, no. 2 (10), pp. 87 – 93.

7. Morozov P.V., Manusov V.Z. Simulation of electromagnetic influence of high-speed railways to the power supply system [Modelirovanie elektromagnitnogo vlijanija skorostnyh zheleznyh dorog na sistemy elektrosnabzhenija]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka – The journal of Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2010, no. 3, pp. 323 – 327.

8. Birjukov V.V. *Energoberezhenie na elektricheskom transporte* (Energy saving in the electric transport). Irkutsk: IrGTU, 2009, 243 p.

9. High-speed railways /Shinkansen/ [Skorostnye zheleznye dorogi /Sinkansen/] translated from japan by Tatjemacu Tosihiko, Kuma Sadosi, Isohara Esno – Moscow: Transport, 1984, 199 p.

10. Kotelnikov A.V. Energy Strategy of Russian Railways [Energeticheskaja strategija zheleznyh dorog Rossii]. *Zheleznye dorogi mira – The journal of Railways of the World*, 2005, no. 2, pp. 3 – 21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Манусов Вадим Зиновьевич

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

К. Маркса пр., 20, г. Новосибирск, 630092, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (383) 346-15-51.

E-mail: manusov36@mail.ru

Палагушкин Борис Владимирович

Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ).

Щетинкина ул., 33, г. Новосибирск, 630099, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика», СГУВТ.

Тел.: +7 (383) 222-03-05.

E-mail: palaga@mail.ru

Бумцэнд Уянгасайхан

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

К. Маркса пр., 20, г. Новосибирск, 630092, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Manusov Vadim Zinoviyeich

Novosibirsk state technical university (NSTU).

20, Karla Marksa av., Novosibirsk, 630092, the Russian Federation

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Industrial power supply systems», NSTU.

Phone: +7 (383) 346-15-51.

E-mail: manusov36@mail.ru

Palagushkin Boris Vladimirovich

Siberian state university of water transport, (SSUWT).

33, Shetinkina st., Novosibirsk, 630099, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor and Head of the department «Electrical Equipment and Automation», SSUWT.

Тел.: +7 (383) 222-03-05.

E-mail: palaga@mail.ru

Bumtsend Uyangasaikhan

Novosibirsk state technical university (NSTU).

20, Karl Marx av., Novosibirsk, 630092, the Russian Federation

Аспирант кафедры «Системы электроснабжения предприятий», НГТУ.

Тел.: +7 (383) 346-15-51.

E-mail: uuya@mail.ru

Post graduate student of the department «Industrial power supply systems», NSTU.

Phone: +7 (383) 346-15-51.

E-mail: uuya@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Манусов, В. З. Электрификация международного транспортного железнодорожного коридора «Азия – Европа» как путь устойчивого развития электроэнергетической системы Монголии [Текст] / В. З. Манусов, Б. В. Палагущкин, У. Бумцэнд // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 94 – 101.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Manusov V. Z. , Palagushkin B. V. , Bumtsend U. The electrification of international transport railway corridor from Asia to Europe as a way of power system sustainable development of Mongolia. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 94 – 101. (In Russian).

УДК 621.31

Ю. В. Москалев

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С НЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ И КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

***Аннотация.** В статье рассмотрен один из способов повышения энергетической эффективности трехфазной системы электроснабжения промышленных и железнодорожных потребителей. Представлена и доказана теорема, которая позволяет определить необходимые проводимости и реактивные токи ветвей компенсирующего устройства с несимметричной структурой, для которых эквивалентная проводимость этих элементов и нагрузки будет симметричной и активной. В трехфазной электрической цепи переменного синусоидального тока реактивные элементы позволяют перераспределить активную и реактивную мощность между фазами. Использование компенсирующего устройства с несимметричной структурой, проводимости ветвей которого рассчитаны с использованием приведенных в статье выражений, позволит снизить потери от протекания реактивных токов, токов обратной и нулевой последовательности в низковольтной трехфазной электрической сети. В качестве примера использования теоремы и расчетных выражений для определения проводимостей ветвей несимметричного компенсирующего устройства рассмотрена тестовая задача, для которой задана несимметричная нагрузка и рассчитаны проводимости ветвей устройства, приведены значения потерь мощности, коэффициентов несимметрии напряжения с использованием устройства и без него. Рассмотрены возможные варианты практической реализации такого технического устройства.*

***Ключевые слова:** трехфазная сеть, реактивная мощность, компенсирующее устройство, потери мощности, качество электроэнергии.*

Yuriy V. Moskalev

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

DETERMINATION OF PARAMETERS OF COMPENSATING DEVICES WITH ASYMMETRIC STRUCTURE FOR REDUCTION OF VOLTAGE UNBALANCE AND REACTIVE POWER COMPENSATION IN THE LOW-VOLTAGE THREE-PHASE ELECTRICAL NETWORK

***Abstract.** The article considers one of the ways of improving the energy efficiency of three-phase power supply system of industrial and railway enterprises. Presented and proved a theorem, which allows to determine the necessary conductivity and the reactive branch currents compensating device with asymmetric structure, for which the equivalent conductivity of these elements and the load will be symmetrical and active. In three-phase electric circuit of an alternating sinusoidal current reactive elements allow to redistribute active and reactive power between the phases. The use of*

a compensating device with asymmetric structure will reduce losses from the occurrence of reactive currents, reverse currents and zero sequence in low-voltage three-phase power system. As an example of the use of the theorem and the calculated expressions for determination of conductance of the branches of the asymmetric compensating devices a special test problem was considered. It shows the values of power losses, the coefficients of voltage unbalance with and without using the device. Considered possible options for the practical implementation of such technical devices.

Keywords: three-phase network, reactive power, a device for compensating reactive power, power losses, power quality

Важным направлением научных исследований является разработка и совершенствование способов экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов. В настоящее время известно большое количество организационных и технических мероприятий, позволяющих снизить расходы топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов и в стационарной железнодорожной энергетике [1].

Одним из известных способов повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока и электрических сетей общего назначения является компенсация реактивной мощности [2].

При проектировании компенсирующего устройства (КУ) стремятся увеличить количество его функций, т. е. использовать КУ для компенсации реактивной мощности и улучшения качества электроэнергии (КЭ) по нескольким показателям. Электрическая нагрузка в большинстве случаев изменяется во времени, это необходимо учитывать при проектировании и использовании КУ.

Рассмотрим подход для определения реактивных токов компенсирующего устройства с несимметричной структурой для уменьшения несимметрии нагрузки и компенсации реактивной мощности в низковольтной трехфазной электрической сети. Ветви КУ создают реактивные токи, которые изменяют токораспределение в электрической сети, поэтому для определения необходимых значений реактивных токов необходимо рассматривать электрическую сеть и КУ как единую систему.

Для расчета реактивных токов КУ с несимметричной структурой для низковольтной трехфазной сети приведем и докажем теорему: для любой несимметричной линейной трехфазной нагрузки, соединенной в схему «звезда с нулем», существуют линейные реактивные элементы, включенные параллельно с нагрузкой в схемы «звезда с нулем» и «открытый треугольник», при которых эквивалентная проводимость этих элементов и нагрузки будет симметричной и активной.

Доказательство. Для доказательства теоремы используем схему замещения (рисунок 1), на которой приведены идеальный трехфазный источник ЭДС (E_A, E_B, E_C), несимметричная линейная трехфазная нагрузка, соединенная в схему «звезда с нулем» ($Y_{A.н}, Y_{B.н}, Y_{C.н}$ – комплексные проводимости нагрузки), а также линейные реактивные элементы, включенные параллельно с нагрузкой в схемы «звезда с нулем» и «открытый треугольник» ($b_A, b_B, b_C, b_{BC}, b_{CA}$), которые являются ветвями несимметричного КУ.

С использованием метода узловых потенциалов составим систему уравнений, которые описывают электрическое состояние цепи (см. рисунок 1):

$$\begin{cases} \dot{I}_A = E_A (g_{A.н} + j(b_{A.н} + b_A)) - (-E_A + aE_A) j b_{CA}; \\ \dot{I}_B = a^2 E_A (g_{B.н} + j(b_{B.н} + b_B)) + (a^2 E_A - aE_A) j b_{BC}; \\ \dot{I}_C = aE_A (g_{C.н} + j(b_{C.н} + b_C)) - (a^2 E_A - aE_A) j b_{BC} + (-E_A + aE_A) j b_{CA}, \end{cases} \quad (1)$$

где I_A, I_B, I_C – комплексные токи фаз трехфазной цепи, А;

E_A – действующее значение ЭДС фаз А и В;

$g_{A.н}, g_{B.н}, g_{C.н}$ – активные составляющие комплексных проводимостей нагрузки фаз трехфазной цепи, См;

$b_{A.н}, b_{B.н}, b_{C.н}$ – реактивные составляющие комплексных проводимостей нагрузки фаз трехфазной цепи, См;

$b_A, b_B, b_C, b_{BC}, b_{CA}$ – реактивные составляющие комплексных проводимостей несимметричного компенсирующего устройства, См;

a – комплексный оператор ($a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$).

На основании системы уравнений (1) определим комплексные проводимости эквивалентной трехфазной нагрузки, в которые входят проводимости несимметричной трехфазной нагрузки и несимметричного КУ (рисунок 2):

$$\underline{Y}_{A.эКВ} = \frac{\dot{I}_A}{E_A} = g_{A.н} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_{CA} + j \left(b_{A.н} + b_A + \frac{3}{2} b_{CA} \right); \quad (2)$$

$$\underline{Y}_{B.эКВ} = \frac{\dot{I}_B}{a^2 E_A} = g_{B.н} - \frac{\sqrt{3}}{2} b_{BC} + j \left(b_{B.н} + b_B + \frac{3}{2} b_{BC} \right); \quad (3)$$

$$\underline{Y}_{C.эКВ} = \frac{\dot{I}_C}{a E_A} = \left(g_{C.н} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_{BC} - \frac{\sqrt{3}}{2} b_{CA} \right) + j \left(b_{C.н} + b_C + \frac{3}{2} b_{BC} + \frac{3}{2} b_{CA} \right). \quad (4)$$

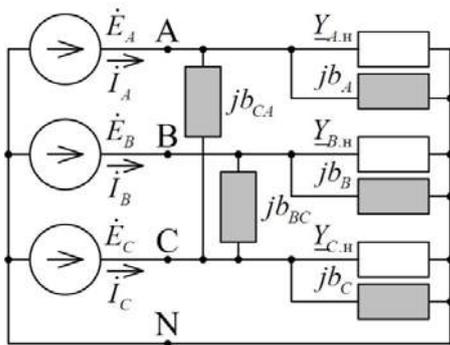


Рисунок 1 – Схема замещения трехфазной цепи с нагрузкой и несимметричным КУ

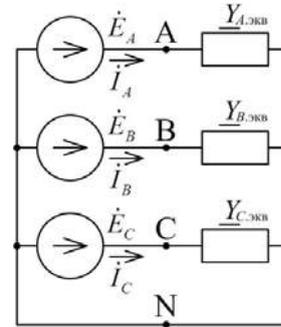


Рисунок 2 – Схема замещения трехфазной цепи с эквивалентной нагрузкой

Для того чтобы эквивалентная нагрузка была активной и симметричной, необходимо чтобы мнимые составляющие комплексных проводимостей эквивалентной нагрузки были равны нулю, а активные проводимости эквивалентной нагрузки фаз были равны среднearифметическому значению активных проводимостей фаз нагрузки. В результате получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} g_{A.н} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_{CA} = \frac{g_{A.н} + g_{B.н} + g_{C.н}}{3}; \\ b_{A.н} + b_A + \frac{3}{2} b_{CA} = 0; \\ g_{B.н} - \frac{\sqrt{3}}{2} b_{BC} = \frac{g_{A.н} + g_{B.н} + g_{C.н}}{3}; \\ b_{B.н} + b_B + \frac{3}{2} b_{BC} = 0; \\ g_{C.н} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_{BC} - \frac{\sqrt{3}}{2} b_{CA} = \frac{g_{A.н} + g_{B.н} + g_{C.н}}{3}; \\ b_{C.н} + b_C + \frac{3}{2} b_{BC} + \frac{3}{2} b_{CA} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Преобразуем СЛАУ и представим ее в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{3}{2} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \\ b_{BC} \\ b_{CA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b_{A.H} \\ -b_{B.H} \\ -b_{C.H} \\ \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} - g_{B.H} \\ \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} - g_{A.H} \\ \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} - g_{C.H} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Для решения СЛАУ необходимо выяснить ее совместность, для этого используем теорему Кронекера – Капелли [3], в соответствии с которой необходимо и достаточно, чтобы ранг основной матрицы системы был равен рангу расширенной матрицы. Для приведенной системы $Rank(A) = Rank(T) = 5$, поэтому система уравнений разрешима, решение единственно [3].

На основании теоремы о ранге матрицы можно исключить из системы все уравнения, которые не образуют выбранный базисный минор, при этом полученная СЛАУ будет эквивалентна исходной, так как убранные уравнения являются линейной комбинацией оставшихся уравнений [3]. После исключения последнего уравнения из СЛАУ (6) получим:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{3}{2} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \\ b_{BC} \\ b_{CA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b_{A.H} \\ -b_{B.H} \\ -b_{C.H} \\ \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} - g_{B.H} \\ \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} - g_{A.H} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

С использованием метода Гаусса определяем значения проводимостей ветвей реактивных элементов, включенных параллельно с нагрузкой в схемы «звезда с нулем» и «открытый треугольник», при которых общая входная проводимость этих элементов и нагрузки будет симметричной и активной:

$$b_{CA} = \frac{2\sqrt{3}}{9}(g_{B.H} + g_{C.H} - 2g_{A.H}); \quad (8)$$

$$b_{BC} = \frac{2\sqrt{3}}{9}(2g_{B.H} - g_{A.H} - g_{C.H}); \quad (9)$$

$$b_A = -b_{A.H} - \frac{\sqrt{3}}{3}(g_{B.H} + g_{C.H} - 2g_{A.H}); \quad (10)$$

$$b_B = -b_{B.H} - \frac{\sqrt{3}}{3}(2g_{B.H} - g_{A.H} - g_{C.H}); \quad (11)$$

$$b_C = -b_{C.H} + \sqrt{3}g_{A.H} - \sqrt{3}g_{B.H}. \quad (12)$$

Подставим полученные выражения (8) – (12) в уравнения, определяющие комплексные проводимости эквивалентной трехфазной нагрузки (2) – (4), в результате получим:

$$\underline{Y}_{A.э\text{кв}} = \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} + j0; \quad (13)$$

$$\underline{Y}_{B.э\text{кв}} = \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} + j0; \quad (14)$$

$$\underline{Y}_{C.э\text{кв}} = \frac{g_{A.H} + g_{B.H} + g_{C.H}}{3} + j0. \quad (15)$$

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что для любой несимметричной линейной трехфазной нагрузки, соединенной в схему «звезда с нулем», существуют линейные реактивные элементы, включенные параллельно с нагрузкой в схемы «звезда с нулем» и «открытый треугольник», при которых эквивалентная проводимость этих элементов и нагрузки будет симметричной и активной, что и требовалось доказать.

Следствие из теоремы: в трехфазной электрической цепи переменного синусоидального тока реактивные элементы позволяют перераспределить активную и реактивную мощность между фазами.

Практическое применение теоремы: для снижения потерь от протекания реактивных токов, токов обратной и нулевой последовательности в трехфазной электрической сети можно реализовать устройство, которое будет обеспечивать протекание необходимых значений реактивных токов между фазами, фазами и нулевым проводом.

В качестве примера использования приведенной теоремы и расчетных выражений (8) – (12) для определения проводимостей ветвей несимметричного КУ рассмотрим тестовую задачу. На рисунке 3 приведена расчетная схема трехфазной цепи, состоящая из распределительного трансформатора (Т), кабельной линии (КЛ), трехфазной несимметричной нагрузки (Нагр.) и КУ. На схеме замещения (рисунок 4) приведены ветви, соответствующие эквивалентной проводимости трансформатора и кабельной линии (Y_C), нагрузки (Y_H) и КУ (b).

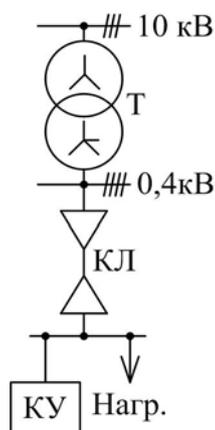


Рисунок 3 – Расчетная схема трехфазной цепи для тестовой задачи

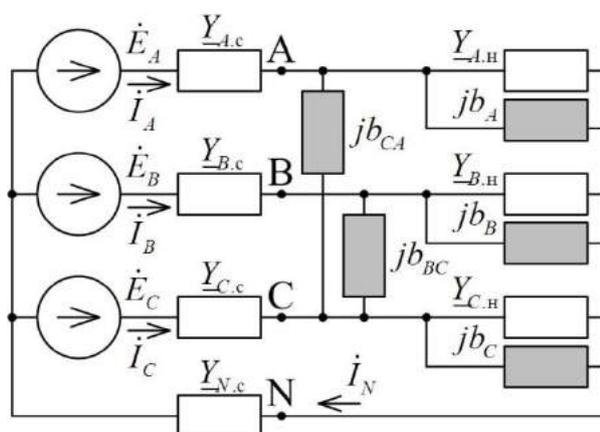


Рисунок 4 – Схема замещения трехфазной цепи для тестовой задачи

Проводимости элементов схемы замещения соответствуют трехфазному распределительному трансформатору ТМ 630/10, кабельной линии длиной 50 м с алюминиевыми жи-

лами сечением 120 кв. мм. Результаты расчетов параметров КУ, токов, напряжений, потерь мощности приведены в таблице.

Исходные и расчетные значения физических величин

Параметр	Фаза			
	A	B	C	N
Исходные значения				
$E, В$	230	-115 - j 199	-115 + j 199	-
$Y_T, См$	17 - j 69	17 - j 69	17 - j 69	6 - j 23
$Y_{кль}, См$	74 - j 17	74 - j 17	74 - j 17	74 - j 17
$Y_{нз}, См$	1 - j 3	3 - j 2	1 - j 1	-
$Y_{ку}, См$	+j 1,845 AB: j 0,0	-j 0,309 BC: +j 1,54	-j 2,464 CA: +j 0,77	-
Расчетные значения без КУ				
$U, В$	205,1 + j 15,3 (205,7)	-132 - j 171,7 (216,6)	-126,7 + j 214,1 (248,8)	-16 + j 17,3 (23,6)
$I, А$	288,8 - j 577,6 (645,8)	-683,6 - j 236,3 (723,3)	92,1 + j 340,8 (353,0)	-302,7 - j 473,1 (561,6)
cos φ	0,38	0,84	0,70	-
$\Delta P_{без\ КУ}, кВт$	6,76	8,48	2,02	7,40
Расчетные значения с КУ				
$U, В$	228,6 - j 5,1 (228,7)	-118,7 - j 195,4 (228,7)	-109,9 + j 200,5 (228,7)	0 + j 0 (0,0)
$I, А$	373 - j 10,1 (373,1)	-195,2 - j 318 (373,1)	-177,8 + j 328 (373,1)	0 + j 0 (0,0)
cos φ	1,00	1,00	1,00	-
$\Delta P_{с\ КУ}, кВт$	2,26	2,26	2,26	0,0
$(\Delta P_{без\ КУ} - \Delta P_{с\ КУ}), кВт$	4,50	6,22	-0,24	7,40

В тестовой задаче задана несимметричная активно-индуктивной нагрузка Y_n (см. таблицу), для которой по выражениям (8) – (12) были рассчитаны проводимости ветвей несимметричного КУ. Для уменьшения несимметрии напряжения и компенсации реактивной мощности необходимо подключить КУ со следующими проводимостями ветвей: 1,845 См (емкостная проводимость между фазой А и нулевым проводом); 0,309 См (индуктивная проводимость между фазой В и нулевым проводом); 2,464 См (индуктивная проводимость между фазой С и нулевым проводом); 1,54 См (емкостная проводимость между фазами В и С); 0,77 См (емкостная проводимость между фазами В и С). Это позволит уменьшить потери мощности в кабельной линии и трансформаторе на 17,8 кВт и уменьшить несимметрию напряжений с $k_{2u} = 0,2\%$ и $k_{0u} = 11,8\%$ до $k_{2u} = 0\%$ и $k_{0u} = 0\%$.

Для обеспечения необходимых значений реактивных токов между фазами, фазами и нулевым проводом необходимо специальное техническое устройство, которое может быть реализовано с использованием реактивных элементов или 4Q-S-преобразователя [4 – 6]. Эти устройства должны регулировать реактивные токи в зависимости от изменения нагрузки электрической сети.

Устройство с использованием реактивных элементов позволяет плавно регулировать величину емкостного или индуктивного тока, например, за счет изменения индуктивности дросселя подмагничиванием его сердечника постоянным магнитным потоком. Такие устройства будут иметь значительный расход электротехнических материалов и большие потери мощности.

4Q-S-преобразователь также позволяет плавно регулировать величину емкостного или индуктивного тока за счет регулирования по величине и по фазе переменного напряжения инвертора напряжения с использованием широтно-импульсной модуляции. Одним из недостатков такого устройства является то, что коммутация силовых ключей приводит к появлению высших гармоник тока.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Представлена и доказана теорема, которая позволяет определить необходимые проводимости и реактивные токи ветвей КУ с несимметричной структурой, для которых эквивалентная проводимость этих элементов и нагрузки будет симметричной и активной.

2. В трехфазной электрической цепи переменного синусоидального тока реактивные элементы позволяют перераспределить активную и реактивную мощность между фазами и обеспечить компенсацию реактивной мощности.

3. Использование КУ с несимметричной структурой, проводимости ветвей которого рассчитаны с использованием приведенных в статье выражений, позволит снизить потери от протекания реактивных токов, токов обратной и нулевой последовательности в низковольтной трехфазной электрической сети.

4. В качестве примера использования приведенной теоремы и расчетных выражений для определения проводимостей ветвей несимметричного КУ была рассмотрена тестовая задача, для которой была задана несимметричная нагрузка и рассчитаны проводимости ветвей КУ, приведены значения потерь мощности, коэффициентов несимметрии напряжения с использованием устройства и без него.

Список литературы

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Справочно-методическое издание / В. А. Гапанович и др. – М.: Интехэнерго-издат, 2014. – 304 с.
2. Железко, Ю. С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю. С. Железко // *Электричество*. – 1992. – № 5. – С. 6 – 12.
3. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
4. Электрические и электронные аппараты. Силовые и электронные аппараты / Ю. К. Розанов, Е. Г. Акимов и др. – М.: Академия, 2010. – Т. 2. – 320 с.
5. Литовченко, В. В. 4q-S – четырехквadrантный преобразователь электровозов переменного тока [Текст] / В. В. Литовченко // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2000. – № 3. – С. 64 – 73.
6. Improving Passive Filter Compensation Performance With Active Techniques//*IEEE Transactions on industrial electronics*. – 2003. – № 1.

Referenses

1. Gapanovich V. A. *Jenergoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* (Energy savings in rail transport). Moscow: Intehjenergo-Izdat, 2014, 304 p.
2. Zhelezko, Yu. S. A strategy to reduce losses and improve power quality in electric networks [Strategiya snizheniya poter' i povysheniya kachestva ehlektroehnergii v ehlektricheskikh setyah]. *Ehlektritchestvo – Electricity*, 1992, no. 5, pp.6 – 12.
3. Bronshtejn I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov* (Handbook of mathematics for engineers and pupils of technical colleges). Moscow: Publishing House «Science», 1980, 976 p.
4. Rozanov Yu. K., Akimov E. G. *Ehlektricheskie i ehlektronnye apparaty. Silovye i ehlektronnye apparaty* (Electric and electronic apparatus. Power and electronic apparatus). Moscow: «Academy», vol. 2, 2010, 320 p.
5. Litovchenko V. V. 4q-S four-quadrant converter of electric locomotives of alternating current [4q-S – chetyrekhkvadrantnyj preobrazovatel' ehlektrovovov peremennogo toka]. *Izvestiya vuzov. Ehlektromekhanika – Proceedings of high schools. Electromechanics*, 2000, no. 3, pp. 64 – 73.
6. Rivas D., Morán L., Dixon J.W., Espinoza J.R. Improving Passive Filter Compensation Performance With Active Techniques. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2003, no. 1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Москалев Юрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Moskalev Yuriy Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand. Tech. Sci., Associate Professor of the department «Electric machines and electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: yuriyvm@mail.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Москалев, Ю. В. Определение параметров компенсирующего устройства с несимметричной структурой для уменьшения несимметрии напряжений и компенсации реактивной мощности в низковольтной трехфазной электрической сети [Текст] / Ю. В. Москалев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 101 – 108

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Moskalev Yr. V. Determination of parameters of compensating devices with asymmetric structure for reduction of voltage unbalance and reactive power compensation in the low-voltage three-phase electrical network. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 101 – 108. (In Russian).

УДК 629.435.2

О. А. Сидоров, А. В. Тарасенко

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОКОПРИЕМНИКОВ МОНОРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены конструктивные особенности системы токосяема Московской монорельсовой дороги и выявлены ее недостатки, ограничивающие возможности повышения скорости движения электроподвижного состава. Рассмотрены особенности перспективной монорельсовой транспортной системы нового поколения с увеличенной скоростью движения (до 150 км/ч) сообщением «город – аэропорт», в которой предлагается использовать контактную систему токосяема с плоскими рабочими поверхностями токоприемника и токопровода.

Цель работы заключалась в разработке мероприятий и технических решений по совершенствованию токоприемников для обеспечения надежной, экономичной и экологичной передачи электрической энергии на борт электроподвижного состава монорельсовых транспортных систем.

Предложенные технические решения позволили увеличить средний срок эксплуатации контактных элементов токоприемников электроподвижного состава на действующих участках Московской монорельсовой дороги с 30 дней до 5 месяцев. Разработан эскизный проект и изготовлен макетный образец токосяемного устройства подвижного состава для монорельсовой транспортной системы нового поколения с увеличенной скоростью движения. Разработана базовая модель токоприемника, позволяющая унифицировать все основные узлы и детали вариантов токоприемников для различных скоростей движения, нагрузочного тока и других условий эксплуатации и выбирать необходимую модель с учетом технической и экономической целесообразности.

Результаты работы могут быть использованы при совершенствовании существующих и разработке новых конструкций токоприемников электроподвижного состава монорельсовых транспортных систем для обеспечения высоких скоростей движения.

Ключевые слова: монорельсовый транспорт, токосяем, токоприемник, токопровод, совершенствование.

Oleg A. Sidorov, Alexandr V. Tarasenko

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

IMPROVEMENT CURRENT COLLECTORS MONORAIL TRANSPORT FOR HIGH SPEEDS

Abstract. The article describes the design features of the current collection system of the Moscow monorail and revealed its shortcomings, limiting the possibility of increasing the speed of electric rolling stock. The features of a promising new generation of monorail transport system with increasing speed (up to 150 km / h), the message "city - the airport," which is proposed to use the contact current collection system with flat working surfaces of the current collector and the current lead.

The aim of the work was to develop measures and technical solutions for improving the current collectors to provide reliable, cost-effective and environmentally-friendly electric power transmission on board the electric rolling monorail transport systems.

The proposed technical solutions have allowed to increase the average life of the contact elements of the current collectors of electric rolling on the active sites of the Moscow monorail from 30 days to 5 months. A preliminary design and manufactured model sample collector rolling device for the new generation of monorail transport system with increased speed. A basic model of the pantograph, which allows to unify all the major components and spare parts for the current collectors of options for different speeds, load current, and other operating conditions and choose the appropriate model, taking into account technical and economic feasibility.

The results can be used for the improvement of existing and development of new designs for current collectors of electric rolling monorail transport systems for the high speeds.

Keywords: monorail transport, current collector, the current collector, conductor, improving.

В ноябре 2004 г. была введена в эксплуатацию Московская монорельсовая дорога (ММД) [1], на электроподвижном составе которой используются токоприемники, аналогичные конструкции швейцарской фирмы Intamin (рисунок 1) и содержащие контактный элемент 1, который шарнирно закреплен на раме, образованной верхним 2 и нижним 3 рычагами. Нажатие на токопровод осуществляется пружиной 4, работающей на растяжение. Этот токоприемник предназначен для скоростей движения до 60 км/ч.

Специалистами ОАО «Московские монорельсовые дороги» (ОАО «ММД») токоприемник Intamin был доработан (рисунок 2, а) в части оснащения подрессоривания контактного

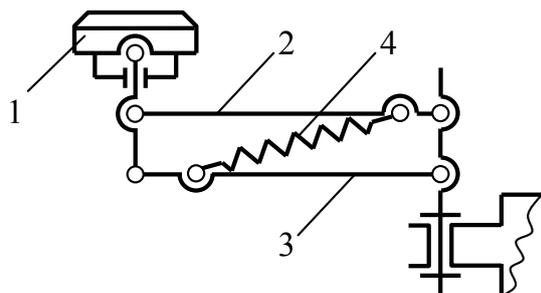


Рисунок 1 – Схема токоприемника Intamin

элемента и использования для создания нажатия на токопровод (рисунок 2, б) пружины, работающей на сжатие. Эти конструктивные изменения позволяют увеличить скорость движения электроподвижного состава и обеспечить более надежный токосъем [2].

За время эксплуатации ММД выявлены некоторые особенности ее системы токосъема, в частности, наличие трех троллеев, расположенных в одной плоскости, позволяет минимизировать геометрические размеры, в которых реализована система токосъема. Од-

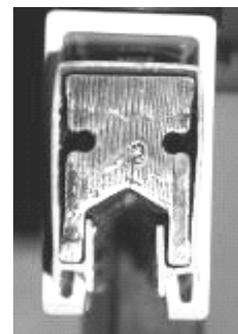
нако специфическая форма токопровода охватывающего типа, по внутренним граням которого перемещается токоприемник, не позволяет развивать скорость выше 60 км/ч. Кроме того, наличие температурных стыковых соединений в секциях токопровода неминуемо приводит к ударам в контактной паре «токоприемник – токопровод» [3] и ведет к ее повышенному износу.

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС) с 2002 г. по 2005 г. принимал участие в отладке и запуске в эксплуатацию системы токосъема ММД. Предложенные специалистами кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» технические решения позволили увеличить средний срок эксплуатации контактных элементов с 30

дней до 5 месяцев [4, 5]. Однако конструктивные особенности охватывающей системы токо-съемы с самоустанавливающимися в ней контактными элементами не позволяют рассматри- вать данную систему в качестве перспективной, рассчитанной на более высокие скорости движения [6].



а



б

Рисунок 2 – Устройства токосъема ММД:
а – токоприемник электроподвижного состава; б – токопровод

В 2004 г. в г. Москве при участии ОАО «ММД» выполнено эскизное проектирование монорельсовой транспортной системы нового поколения с увеличенной скоростью движения (до 150 км/ч) сообщением «город – аэропорт». По рекомендации специалистов ОмГУПС в проекте использована контактная система токо-съемы с плоскими рабочими поверхностями токоприемника и токопровода, которые размещены по разные стороны и симметрично относительно оси эстакады.

Схема расположения подвижного состава указанной монорельсовой системы на эстакаде приведена на рисунке 3.

Согласно техническому заданию «Система токосъема ТМС» и в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к токоприемникам монорельсового транспорта, для проектируемой трассы ОмГУПСом разработан эскизный проект и изготовлен макетный образец токосъемного устройства сило-вого питания подвижного состава для монорельсовой транспортной системы нового поколения с увеличенной скоростью движения [7].

Токоприемник для монорельсовой транспортной системы нового поколения с увеличенной скоростью движения [8] (рисунок 4) содержит корпус 1 с закрепленными в нем направляющими 2, на которых установлено подвижное основание 3. На основании установлен вал 4, с которым сочленена штанга 5 токоприемника. На штанге установлен ролик 6, взаимодействующий с копиром 7. На конце штанги 5 с помощью пружин 8 установлен контактный элемент 9, оснащенный фиксатором 10.

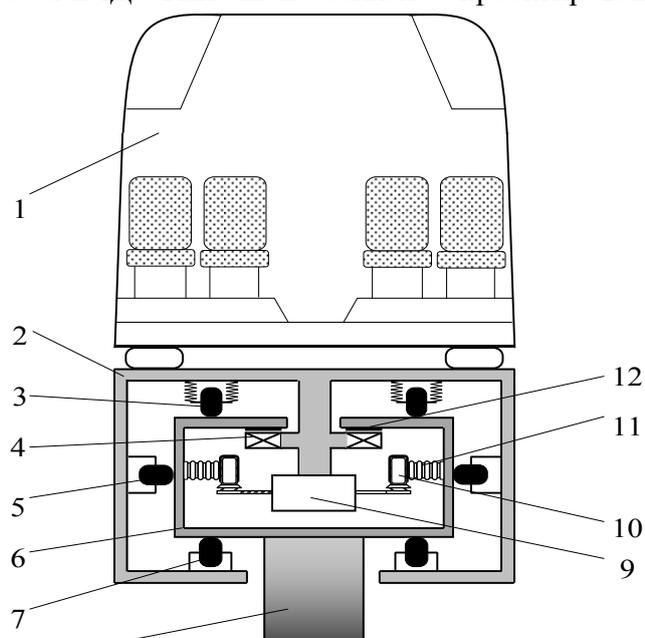


Рисунок 3 – Схема расположения подвижного состава скоростной монорельсовой транспортной системы нового поколения на эстакаде: 1 – кузов; 2 – тележка; 3 – опорные колеса; 4 – индукторы линейного двигателя; 5 – боковые катки; 6 – балка; 7 – стабилизирующие катки; 8 – опора; 9 – токоприемник; 10 – токопровод; 11 – изолятор; 12 – реактивная шина

Для осуществления выдвижения и задвижения токоприемника корпус оборудован проемом 11. Нажатие контактного элемента на токопровод осуществляется с помощью нажимной пружины 12, установленной между штангой и подвижным основанием. Перемещение основания по направляющим обеспечивается с помощью винта 13, двигателя 14 и гайки 15. Передача вращающего момента от двигателя на винт осуществляется с помощью клиноременной (или зубчатой) передачи через шкивы (зубчатые колеса) 16 и 17.

Для герметизации внутреннего объема корпуса токоприемника используется закрепленная на основании заслонка 18, оснащенная гибкими манжетами 19.

Общий вид токоприемника ТМС показан на рисунке 5.

Токоприемник работает следующим образом. При включении двигателя основание перемещается в правое положение до касания заслонки стенок корпуса. Траектория движения контактного элемента задается формой копира, который обеспечивает необходимый уровень высотного положения контактного элемента в каждой точке указанной траектории.

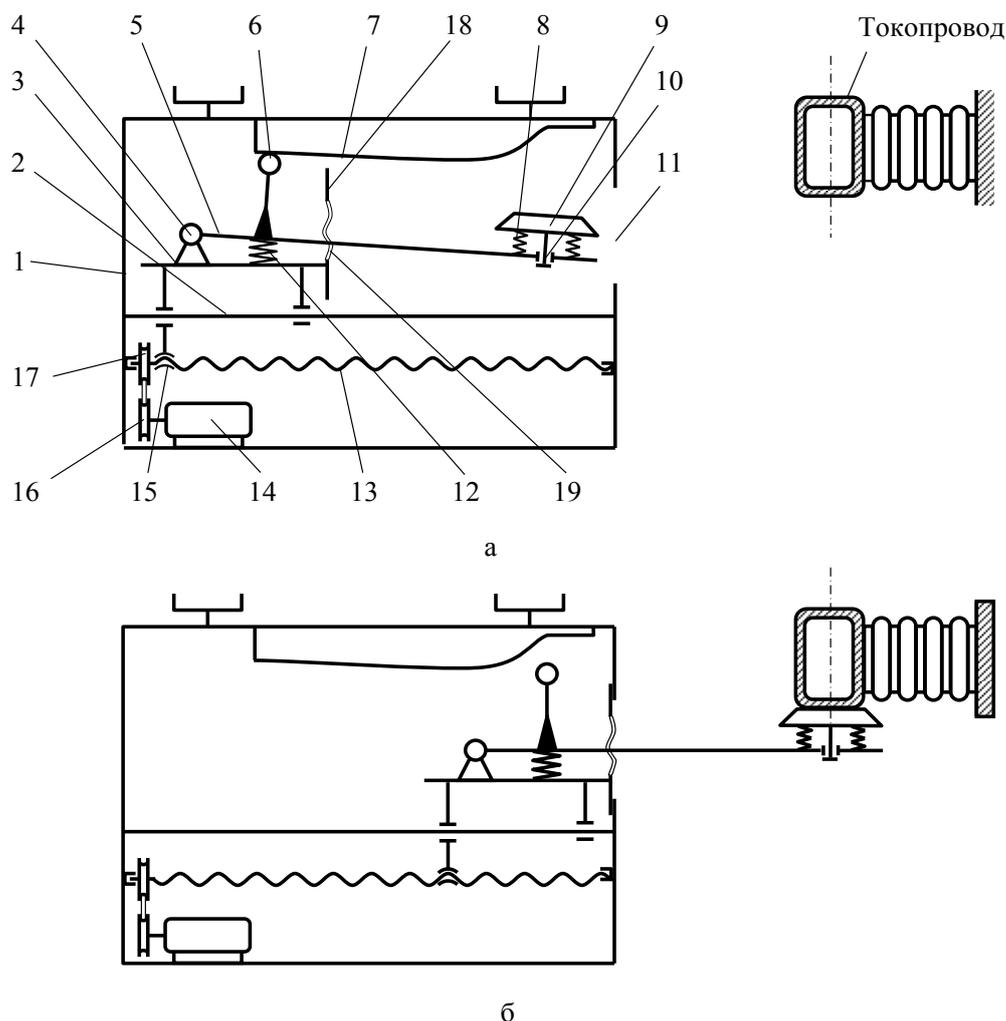


Рисунок 4 – Кинематическая схема токоприемника:
а – нерабочее положение; б – рабочее положение

После касания контактным элементом нижней поверхности токопровода ролик выводится из взаимодействия с копиром, что позволяет реализовать статическую характеристику при изменении высотного положения токоприемника в диапазоне от -40 до $+40$ мм относительно среднего положения штанги. При этом граница поверхности копира выполняет роль ограничителя сверху, а посадочный упор на основании – ограничителя снизу. Заслонка и манжеты обеспечивают герметизацию отсека токоприемника для предотвращения попадания на трущиеся и вращающиеся узлы пыли, влаги, снега, посторонних предметов, которые могут ока-

заться в воздухе в зоне установки токоприемника (листья, фрагменты бумаги и т. п.). После срабатывания концевых выключателей, установленных в соответствии с крайними положениями токоприемника (рабочим и нерабочим), происходит выключение двигателя.



Рисунок 5 – Общий вид токоприемника ТМС

Для оценки работоспособности токоприемника при высоких скоростях движения в конце 2015 г. проведен цикл износных испытаний с использованием дискового стенда лаборатории «Конструкции контактных сетей, линии передачи и токосъема» кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа [9].

Цель испытаний – оценить возможность применения в качестве контактных элементов композитных медно-графитовых пластин (ПМГ), рекомендованных для проверки ГУП «Московский метрополитен» (также эксплуатирует ММД), для дальнейшего использования на перспективных линиях метрополитена и монорельсового транспорта при скорости движения до 300 км/ч. Характеристики пластин ПМГ для токоприемника ТМС в сравнении с применяемыми ранее контактными элементами приведены в таблице.

Характеристики контактных элементов токоприемника ТМС

Материал контактного элемента	Наименование параметра			
	твёрдость, НВ	плотность, г·см ⁻³	удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	удельное электрическое сопротивление, мкОм·м
ПМГ	45,00	6,400	550	12
Сталь (Ст3)	170,00	8,350	460	14
Бронза (БрНХК(ф))	72,47	7,514	385	10

Испытания проводились при максимальной линейной скорости в контакте до 84 м/с (300 км/ч), нагрузочном токе до 2000 А и нажатии в контакте от 20 до 200 Н. Кроме того, для максимальной приближенности к реальным условиям эксплуатации на испытательном стенде была выполнена имитация стрелы провеса (2 мм) стального токопровода.

Величина износа измерялась методом отпечатков [10]. Варьирование нажатия в контакте осуществлялось изменением рабочей длины нажимной пружины токоприемника.

В ходе обработки массива экспериментальных данных получены зависимости удельного износа от нажатия в скользящем контакте (рисунок 6) и скорости движения (рисунок 7).

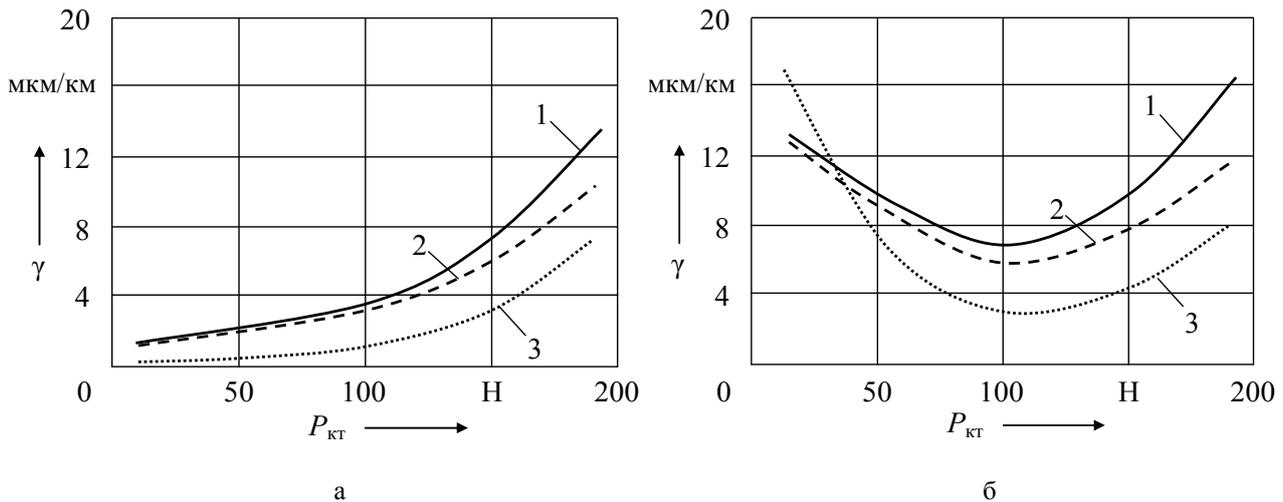


Рисунок 6 – Зависимость удельного износа контактных элементов от нажатия:
а – $I=0$; б – $I=500$ А; 1 – ПМГ; 2 – БрНХК(ф); 3 – сталь

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы.

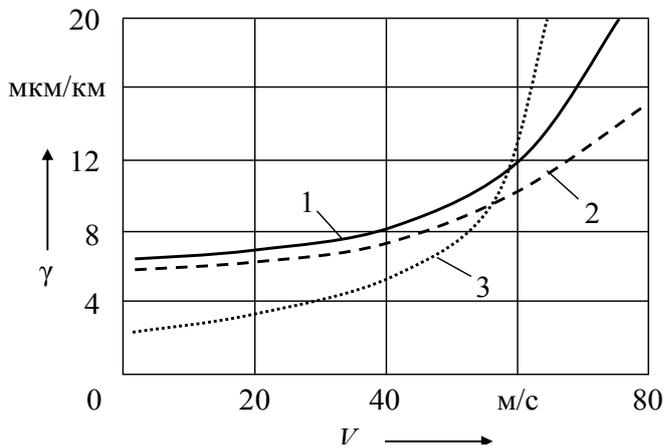


Рисунок 7 – Зависимость удельного износа контактных элементов от скорости:
1 – ПМГ; 2 – БрНХК(ф); 3 – сталь

1. Для систем токосяема с плоскостным контактом и стальным токопроводом при скорости движения до 55 км/ч пластины ПМГ изнашиваются аналогично бронзовым. Несмотря на меньший на 15 – 20 % ожидаемый срок эксплуатации контактные элементы, изготовленные из ПМГ, значительно дешевле, чем из БрНХК(ф), что позволяет рекомендовать их как для метрополитена, так и для монорельсовых транспортных систем.

2. При скорости свыше 55 км/ч наблюдается существенное увеличение изнашивания пластин ПМГ по сравнению с БрНХК(ф), поэтому для высокоскоростных систем с жестким токопроводом целесообразно использовать бронзовые контактные элементы.

3. Контактные элементы из стали при высоких скоростях движения использовать не рекомендуется ввиду значительного изнашивания как самих контактных элементов, так и токопровода.

Список литературы

1. Сидоров, О. А. Системы контактного токосяема с жестким токопроводом: Монография [Текст] / О. А. Сидоров. – М.: Маршрут, 2006. – 119 с.
2. Сидоров, О. А. Разработка и исследование устройств токосяема Московской монорельсовой транспортной системы [Текст] / О. А. Сидоров, А. В. Тарасенко // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. ст. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2007. – С. 154 – 161.
3. Сидоров, О. А. Математическое моделирование ударных процессов при взаимодействии скоростных токоприемников с жестким токопроводом [Текст] / О. А. Сидоров, И. Л. Саля, А. С. Голубков // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Южно-Российский гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, 2005. – Ч. 2. – С. 57 – 59.

4. Сидоров, О. А. Исследование электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта [Текст] / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, С. А. Ступаков // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. – № 5. – С. 511 – 517.
5. Сидоров, О. А. Прогнозирование износа контактных пар устройств токосъема электрического транспорта [Текст] / О. А. Сидоров, И. Л. Саля, А. В. Тарасенко // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Южно-Российский гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, 2005. – Ч. 2. – С. 55 – 57.
6. Сидоров, О. А. Токосъем в монорельсовых системах [Текст] / О. А. Сидоров // Мир транспорта. – 2004. – № 3. – С. 30 – 39.
7. Тарасенко, А. В. Повышение качества токосъема на электрическом монорельсовом транспорте [Текст]: Дис ... канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 23.05.2007: утв. 12.10.2007 / Тарасенко Александр Владимирович. – Омск, 2007. – 125 с.
8. Пат. 58082 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Токоприемник транспортного средства [Текст] / Сидоров О. А., Смердин А. Н., Чертков И. Е., Тарасенко А. В., Томилов В. В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2006116292/22; заявл. 11.05.2006; опубли. 10.11.2006. Бюл. № 31.
9. Тарасенко, А. В. Универсальный дисковый стенд для испытаний токоприемников монорельсового транспорта и метрополитена [Текст] / А. В. Тарасенко // Современная техника и технологии ССТ-2005: Материалы XI междунар. науч.-практ. конф. / Томский политехн. ун-т. Томск, 2005. С. 65 – 67.
10. Сидоров, О. А. Методы исследования износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта: Монография [Текст] / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009. – 154 с.

References

1. Sidorov O. A. *Sistemy kontaktnogo tokos'ema s zhestkim tokoprovodom* (Contact current collection system with a rigid current lead). Moscow, 2006, 119 p.
2. Sidorov O. A., Tarasenko A. V. Development and research of current collection devices Moscow Monorail [Razrabotka i issledovanie ustroystv tokos'ema Moskovskoi monorel'sovoi transportnoi sistemy] *Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: sbornik nauchnykh statei* (Innovative projects and new technologies in railway transport: collection of scientific articles). – Omsk, 2007. pp. 154 – 161.
3. Sidorov O. A., Salya I. L., Golubkov A. S. Mathematical modeling of impact processes in the interaction of high-speed pantographs with tough current lead [Matematicheskoe modelirovanie udarnykh protsessov pri vzaimodeistvii skorostnykh tokopriemnikov s zhestkim tokoprovodom] *Modelirovanie. Teoriia, metody i sredstva: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Modeling. Theory, methods and tools: materials of the international scientific-practical conference). – Novocherkassk, 2005. Part 2. pp. 57 – 59.
4. Sidorov O. A., Filippov V. M., Stupakov S. A. A study of the electromechanical wear contact pairs of current collection devices electric vehicles [Issledovanie elektromekhanicheskogo iznashivaniia kontaktnykh par ustroystv tokos'ema elektricheskogo transporta]. *Trenie i iznos – Friction and wear*, 2015, V. 36, no 5, pp. 511 – 517.
5. Sidorov O. A., Salya I. L., Tarasenko A. V. Prediction wear contact pairs of current collection devices electric vehicles [Prognozirovanie iznosa kontaktnykh par ustroystv tokos'ema elektricheskogo transporta] *Modelirovanie. Teoriia, metody i sredstva: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Modeling. Theory, methods and tools: materials of the international scientific-practical conference). – Novocherkassk, 2005. Part 2. pp. 55 – 57.
6. Sidorov O. A. Current collector in monorail systems [Tokos'em v monorel'sovykh sistemakh]. *Mir transporta – Transport World*, 2004. no 3, pp. 30 – 39.
7. Tarasenko A. V. *Povyshenie kachestva tokos'ema na elektricheskom monorel'sovom transporte* (Improving the quality of current collection on electric monorail transport). Candidate's thesis, Omsk, OSTU, 2007, 125 p.

8. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Chertkov I. E., Tarasenko A. V., Tomilov V. V. *Patent RU 58082*, 10.11.2006.

9. Tarasenko A. V. The universal disc stand for testing power-consuming equipment, monorail transport and metro [Universal'nyj diskovyj stend dlja ispytaniy tokopriemnikov monorel'sovogo transporta i metropolitena] *Sovremennye tehnika i tehnologii SST-2005: materialy XI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Modern equipment and technology SST-2005: materials of the international scientific-practical conference). – Tomsk, 2005. pp. 65 – 67.

10. Sidorov O. A., Stupakov S. A. *Metody issledovaniya iznosa kontaktnyh par ustroystv tokos'ema monorel'sovogo jelektricheskogo transporta* (Research methods wear contact pairs current collection devices monorail electric transport). Omsk, 2009, 154 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, заслуженный изобретатель РФ, академик Академии электротехнических наук РФ, академик Петровской академии наук и искусств, почетный железнодорожник, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@omgups.ru

Тарасенко Александр Владимирович

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) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Совершенствование токоприемников монорельсового транспорта для высоких скоростей движения [Текст] / О. А. Сидоров, А. В. Тарасенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 108 – 115.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sidorov Oleg Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the department «Power supply of railway transport» Omsk State Transport University, Honored Inventor of the Russian Federation, academician of the Academy of Electrical Sciences of Russia, Academician Peter's Academy of Arts and Sciences, Honorary Railwayman., OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: egt@mail.ru

Tarasenko Alexandr Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorov O. A., Tarasenko A. V. Improvement current collectors monorail transport for high speeds. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 101 – 115. (In Russian).

УДК 621.331

В. А. Чернорай

Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению (Зап.-Сиб. НТЭ), г. Омск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЖИМНОЙ АВТОМАТИКИ РЕЗЕРВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ПРИ СУЩЕСТВУЮЩИХ УСТАВКАХ

Аннотация. В статье рассмотрен алгоритм работы существующей режимной автоматики преобразовательных агрегатов. Ранее считалось, что применение автоматики включения-отключения резервных преоб-

разовательных агрегатов является эффективным средством снижения потерь при регулировании мощности подстанции в зависимости от тяговой нагрузки. Определяющими факторами оценки эффективности автоматики являются токовые и временные уставки, а также ограничение количества переключений в сутки. Анализ графиков тяговой нагрузки показал, что существует достаточно большое число временных интервалов, где работа автоматики неэффективна. С одной стороны, это связано с тем, что нагрузка находится выше точки равенства потерь при одном и двух преобразовательных агрегатах довольно непродолжительное время, и автоматика подключает резервный преобразовательный агрегат уже в процессе снижения нагрузки и отключает его по истечении временной уставки, с другой – действующее ограничение количества переключений резервного преобразовательного агрегата в сутки не позволяет получить значительного экономического эффекта.

Решение о применении режимной автоматики с существующими уставками может быть положительным, если при этом оцененный эффект в виде сокращения потерь электроэнергии будет выше совокупного ущерба от коммутаций резервного преобразовательного агрегата.

Режимную автоматику в большинстве случаев следует рассматривать не как средство получения экономического эффекта, а как средство повышения надежности работы полупроводниковых выпрямителей в пиковые моменты нагрузки, что в свою очередь влияет на надежность электроснабжения тяги поездов в целом.

Ключевые слова: преобразовательный агрегат, режимная автоматика, график тяговой нагрузки, токовые и временные уставки, потери мощности, многократные коммутации.

Vitalii A. Chernorai

West Siberian Directorate for energy supply (W-Sib NTE), Omsk, the Russian Federation

EFFICIENCY EVALUATION OF USE OF REGIME AUTOMATIC EQUIPMENT OF RESERVE CONVERTING AGGREGATES ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF LOAD GRAPHS IN CASE OF THE EXISTING SETTINGS

Abstract. In article the algorithm of operation of the existing regime automatic equipment of transforming aggregates is considered. Earlier it was read that use of automatic equipment of switching on switch-off of reserve transforming aggregates is an effective remedy of lowering of losses in case of regulation of power of substation depending on tractive loading. Defining factors of assessment of efficiency of automatic equipment are the current and temporal settings, and also restriction of number of switchings in days. The analysis of diagrams of tractive loading showed that there is rather large number of temporal intervals where operation of automatic equipment is ineffective. On the one hand it is connected to the fact that loading is above a point of equality of losses in case of one and two transforming aggregates quite short time, and automatic equipment connects the reserve transforming aggregate already in the course of lowering of loading and disconnects it after a temporal setting. On the other hand - operating restriction of number of switchings of the reserve transforming aggregate in days doesn't allow to gain the considerable economic effect.

The decision on use of regime automatic equipment with the existing settings can be the positive if at the same time the estimated effect in the form of abbreviation of losses of the electric power is above cumulative damage from switching of the reserve transforming aggregate.

Regime automatic equipment in most cases, it is necessary to consider not as means of obtaining economic effect, and as means of reliability augmentation of operation of semiconductor rectifiers at the peak moments of loading what in turn influences reliability of electrical power supply of pull of trains in general.

Keywords: conversion unit, secure automation, traction load schedule, current and time settings, power loss, multiple switching.

Общепринятым условием экономичной и надежной работы тяговой подстанции постоянного тока является своевременное регулирование ее мощности. В идеальном случае мощность подстанции, определяемая в каждый момент числом включенных преобразовательных агрегатов (ПА), должна быть равна мощности, потребляемой электроподвижным составом.

Тяговая нагрузка характеризуется резкими колебаниями во времени. Это объясняется достаточно большим числом влияющих факторов, таких как профиль пути, напряжение на токоприемнике электровоза, вес и режим ведения поезда, тип эксплуатируемого электровоза, ограничения по скорости, пропускная способность участка, метеорологические условия и др. Таким образом, непостоянство тяговой нагрузки в значительной степени осложняет процесс регулирования мощности подстанции [1].

На большинстве тяговых подстанций установлены два ПА. Каждый из них состоит из преобразовательного трансформатора и выпрямителя. Как правило, один из агрегатов постоянно находится в работе, а второй подключается на время увеличения тяговой нагрузки с последующим отключением после ее снижения. Таким образом, регулирование мощности тяговой подстанции осуществляется ступенчато, и каждой ступени соответствует свой определенный диапазон нагрузки.

Задачами регулирования мощности являются следующие:

1) обеспечить наиболее экономичный режим работы тяговой подстанции, т. е. включать такое количество ПА, которое соответствует тяговой нагрузке и, как следствие, имеет минимальные потери энергии;

2) обеспечить надежную работу выпрямителей – не допускать перегруза, способного вызвать повреждение или ухудшение характеристик силовых полупроводниковых приборов;

3) ограничить число переключений ПА по причинам негативного влияния на срок службы преобразовательных трансформаторов, коммутационный ресурс выключателей и качество электроснабжения нетяговых потребителей.

В соответствии с Энергетической стратегией железнодорожного транспорта одной из целей является снижение энергоемкости перевозочного процесса и удельных затрат на энергопотребление во всех сферах деятельности железнодорожного транспорта (тяга, инфраструктура, эксплуатация, ремонт, производство, социальная сфера) [2]. В связи с устойчивой тенденцией роста размеров движения и масс поездов и одновременной задачей снижения потерь энергии в устройствах тягового электроснабжения возрастает актуальность оценки применения автоматического регулирования мощности ПА тяговых подстанций. Теоретическая оценка эффективности автоматики включения-отключения резервных преобразовательных агрегатов (АВОР) подробно рассмотрена в статьях об оптимизации нагрузочных режимов выпрямителей тяговых подстанций [3, 4]. Однако практических результатов в этих статьях не представлено из-за технической сложности получения аналитического материала и отсутствия средств его обработки.

Оценка фактического эффекта от применения режимной автоматики – это многофакторная задача, включающая в себя анализ графиков тяговой нагрузки подстанций, оценку влияния многократных коммутаций на срок службы преобразовательных трансформаторов, коммутационный ресурс выключателей и качество электроснабжения нетяговых потребителей.

В эксплуатации находятся различные схемные решения АВОР ПА, однако алгоритм их работы аналогичен и приведен на рисунке 1. За нормальное принято состояние, когда в работе находится n ПА (например, один). Оно сохраняется до тех пор, пока не будут выполнены условия по току тяговой нагрузки и ее продолжительности. В случае выполнения условий произойдет подключение резервного ПА ($n+1$). Режимная автоматика ПА имеет две уставки на включение и одну на отключение.

На рисунке 1 обозначено: $I_{\text{вкл } 1}$ и $I_{\text{вкл } 2}$ – токовые уставки включения первой и второй ступеней автоматики соответственно; $I_{\text{откл}}$ – токовая уставка отключения; $t_{\text{вкл } 1}$ и $t_{\text{вкл } 2}$ – временные уставки включения первой и второй ступеней автоматики; $t_{\text{откл}}$ – временная уставка отключения; I_d – ток тяговой нагрузки подстанции; t – время от момента выполнения условия.

В работах Уральского отделения ВНИИЖТа было показано [3, 4], что уставка АВОР должна выбираться не только на основе минимизации потерь энергии в самом преобразовательном агрегате, но и с учетом дополнительных потерь в понизительном трансформаторе подстанции, вызванных потреблением реактивной мощности. Там же было установлено, что учет потерь от реактивной мощности снижает расчетное значение тока равенства потерь мощности при работе одного или двух ПА на 10 – 20 %. В соответствии с методикой [5] для АВОР ПА производится расчет уставок по току и выбор уставок по времени из условия минимума потерь активной мощности, в том числе с учетом потерь в понизительных трансформаторах от потребляемой реактивной мощности.

Для тяговых подстанций с двухступенчатой трансформацией активные потери мощности в понизительных трансформаторах существенно зависят от объема потребления реактивной мощности преобразовательными агрегатами. В этом случае токи включения-отключения режимной автоматики с учетом потерь активной мощности в понизительном трансформаторе определяются по формуле:

$$I_{уст} = I_{dн} \sqrt{\frac{\Delta P_0 + \Delta P_{n-(n+1)} - \Delta P_Q}{\Delta P_{мд} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right)}}, \quad (1)$$

где ΔP_0 – суммарное значение потерь мощности в ПА, не зависящее от нагрузки;

$\Delta P_{n-(n+1)}$ – значение разности потерь мощности при n и $(n+1)$ работающих агрегатах задается в зависимости от определяемой уставки по току автоматики ПА;

ΔP_Q – разность потерь активной мощности в понизительных трансформаторах при n и $(n+1)$ работающих агрегатах, зависящих от объема потребления реактивной мощности;

$\Delta P_{мд}$ – суммарное значение потерь мощности в меди обмоток преобразовательных трансформаторов и силовых диодах, зависящее от квадрата нагрузки;

$I_{dн}$ – номинальный выпрямленный ток.

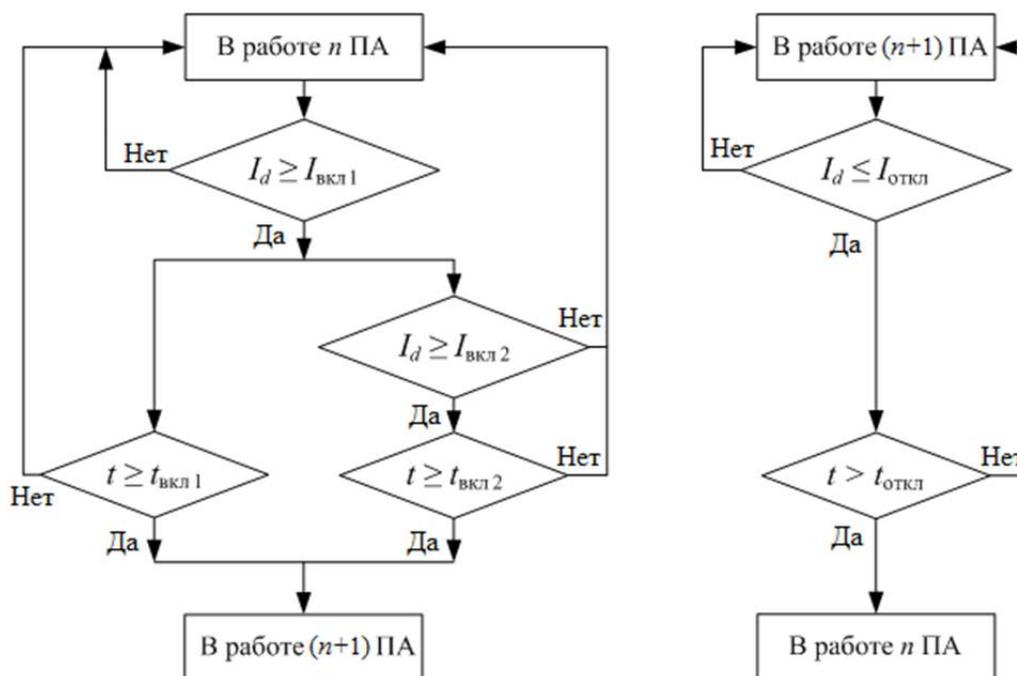


Рисунок 1 – Алгоритм работы режимной автоматики ПА

Независимо от уставок по току число переключений рекомендовано ограничивать с помощью уставок по времени АВОР так, чтобы оно не превышало шести – восьми раз в сутки.

В соответствии с методикой [5] уставки по времени режимной автоматики ПА выбираются в следующих пределах:

- включение преобразователя по току уставки первой ступени – от 2 до 5 мин;
- включение преобразователя по току уставки второй ступени – от 10 до 15 с;
- отключение преобразователя* – от 6 до 10 мин.

(*В случае превышения указанного числа переключений преобразовательных агрегатов выдержка времени на отключение может быть увеличена).

Потери мощности при работе n ПА определяются по формуле:

$$\Delta P_n = n\Delta P_0 + \frac{\Delta P_{мд} I_d^2}{n I_{dн}^2} + \Delta P_{Qn}, \quad (2)$$

где ΔP_{Qn} – потери активной мощности в понизительных трансформаторах, зависящие от потребленной реактивной мощности при n работающих ПА;

n – количество ПА.

В случае подключения резервного ПА имеем $(n+1)$ работающих агрегатов, для которых расчет потерь мощности осуществляется также по формуле (2).

Для примера на рисунке 2 представлена зависимость потерь мощности в ПА и понизительных трансформаторах с учетом реактивной мощности тяговой подстанции от тока нагрузки, где кривая $|\Delta P_1 - \Delta P_2|$ представляет собой разность потерь мощности при работе одного и двух ПА по абсолютной величине. На рисунке 2 точка L представляет собой значение тока равенства потерь мощности при работе одного или двух ПА.

Из графика, представленного на рисунке 2, видно, что чем чаще и длительнее ток нагрузки будет находиться правее точки L , тем значительнее будет эффект от АВОР. Однако реально ток может часто находиться правее точки L , но непродолжительное время.

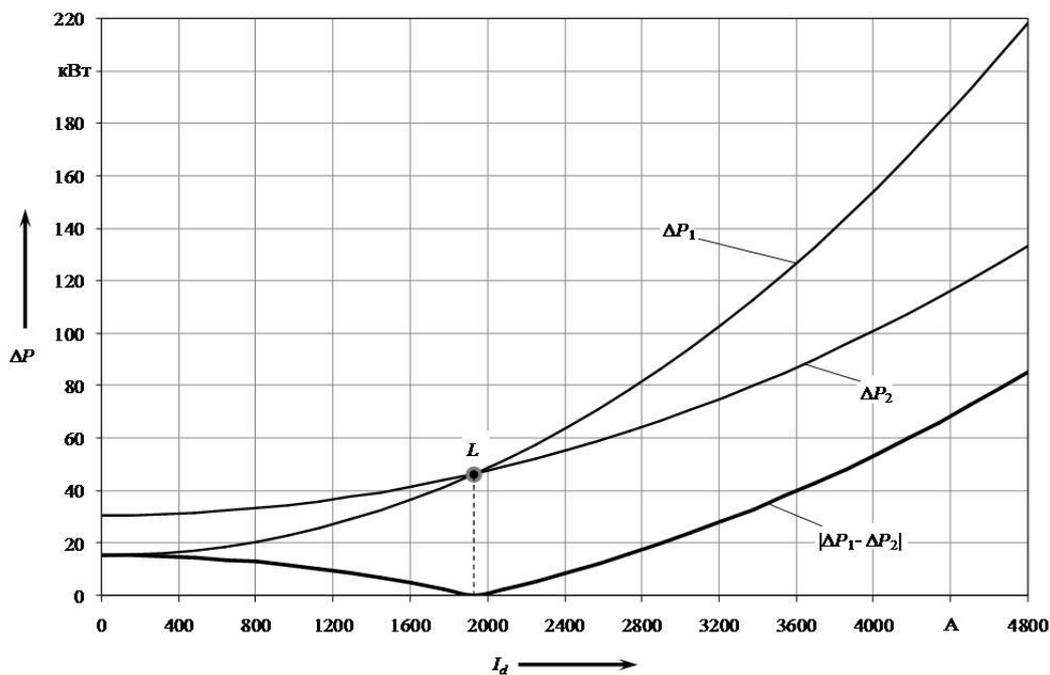


Рисунок 2 – Зависимость потерь мощности в ПА и понизительных трансформаторах с учетом реактивной мощности от тока тяговой нагрузки

Учитывая особенности тяговой нагрузки, в ряде случаев АВОР подключает резервный ПА уже в процессе снижения нагрузки и отключает его по истечении временной уставки $t_{откл.}$. Покажем это на примере. На рисунке 3 приведен фрагмент графика нагрузки с анализом работы АВОР в зависимости от тока подстанции при минимальных временных уставках АВОР: на включение – 2 мин, на отключение – 6 мин.

Ток нагрузки достигает тока уставки первой ступени в точке 2 и продолжает расти, при этом в работе по-прежнему находится только один ПА. Подключение на параллельную работу второго ПА происходит в точке 3. Далее, в точке 5 ток нагрузки становится равным току уставки на отключение резервного ПА, но оно произойдет только через 6 мин в точке 6. Точки 1 и 4 представляют собой значение тока равенства потерь мощности при переходе от работы одного ПА к параллельной работе двух ПА и наоборот соответственно. Таким образом, на интервалах 1 – 3 и 4 – 6 имеем дополнительные потери электроэнергии из-за несоответствия величины нагрузки фактическому режиму работы резервного ПА. Положительный эффект от АВОР на интервале 3 – 4 не компенсирует дополнительных потерь электроэнергии в интервалах 1 – 3 и 4 – 6. Таким образом, практически вместо ожидаемого снижения

имеют место дополнительные потери электрической энергии в совокупности с отрицательным воздействием от избыточной коммутации ПА.

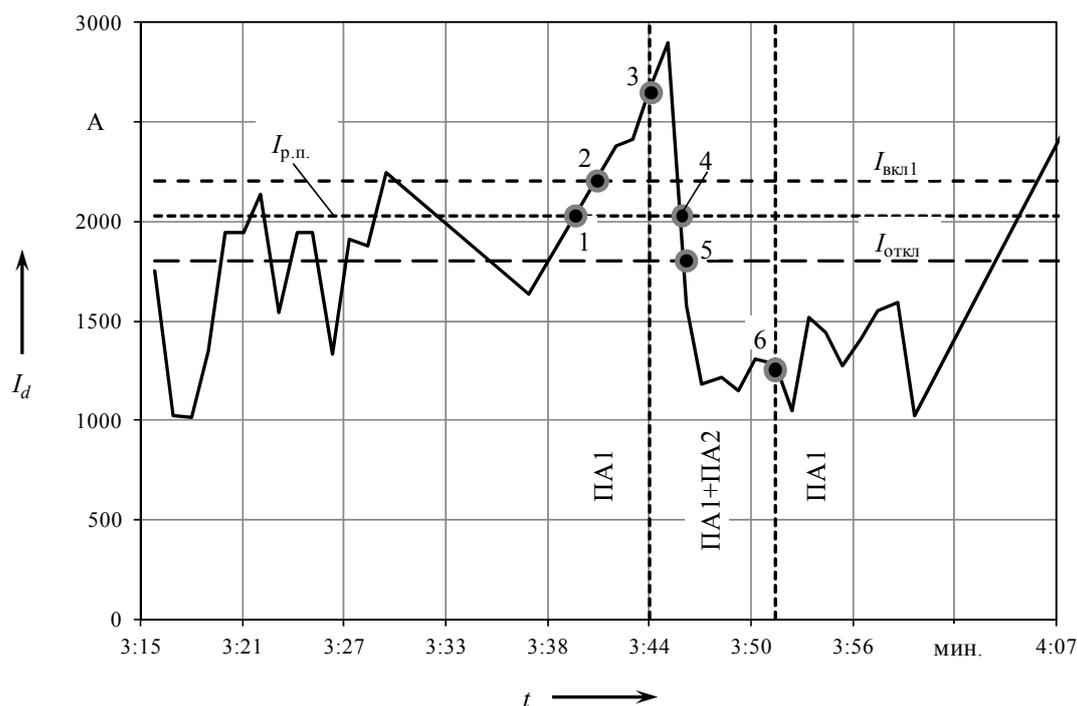


Рисунок 3 – Работа АВОР ПА на примере фрагмента графика тяговой нагрузки подстанции

В соответствии с требованиями технического указания [6] выбор режимов работы ПА следует производить по суточной переработке электроэнергии подстанцией с целью обеспечения их надежной работы и снижения потерь активной энергии и потребления реактивной мощности.

Учитывая предыдущий опыт [7], для анализа графиков нагрузки выбраны тяговые подстанции с большей переработкой электроэнергии: Сокур, Судженка, Тайга, Талапкер и Тальменка Западно-Сибирской железной дороги. В соответствии с техническим указанием [6] при суточной переработке подстанцией электроэнергии до 60 тыс. кВт·ч рекомендуется применять режим работы ПА поочередно без АВОР. Если переработка составила от 60 тыс. кВт·ч до 110 тыс. кВт·ч, то устанавливается режим работы ПА поочередно с АВОР, если более указанного значения, то должен применяться режим параллельной работы ПА. Среднесуточная переработка электроэнергии на тягу поездов, типы преобразовательных трансформаторов и выбранные на их основе в соответствии с действующим техническим указанием рекомендуемые режимы работы для этих подстанций приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры тяговых подстанций и режимы работы ПА

Обозначение тяговой подстанции	Тяговая подстанция	Типы преобразовательных трансформаторов	Среднесуточная переработка электроэнергии, кВт·ч	Режим работы
А	Сокур	ТРДП-12500/10ЖУ1 ТРДП-12500/10ЖУ1	155 625	Параллельно
Б	Судженка	ТДП-12500/10ЖУ1 ТДП-12500/10ЖУ1	105 706	Поочередно с АВОР
В	Тайга	ТРДП-12500/10ЖУ1 ТРДП-12500/10ЖУ1	102 649	Поочередно с АВОР
Г	Талапкер	ТДП-12500/10ЖУ1 ТДП-12500/10ЖУ1	101 327	Поочередно с АВОР
Д	Тальменка	ТРДП-12500/10ЖУ1 ТРДП-12500/10ЖУ1	97 731	Поочередно с АВОР

Для подстанций произведена оценка фактических среднесуточных потерь электроэнергии в ПА и понизительных трансформаторах с учетом реактивной мощности по результатам обработки графиков нагрузки в минутных интервалах за десять суток.

Потери электроэнергии в n ПА за время работы T определяются по формуле:

$$\Delta W_n = \int_0^T \Delta P_n dt. \quad (3)$$

В случае подключения резервного ПА имеем $(n + 1)$ работающих агрегатов, для которых расчет потерь электроэнергии осуществляется также по формуле (3).

Для полноты оценки получаемого эффекта рассмотрены режимы поочередной работы ПА, параллельной, а также с АВОР с различными вариантами уставок первой ступени на включение ПА и его отключение. Результаты расчета среднесуточных потерь электроэнергии и числа циклов включения-отключения (ВО) выключателей ПА сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Среднесуточные потери электроэнергии в ПА

Режим работы преобразовательных агрегатов	Тяговая подстанция									
	А		Б		В		Г		Д	
	потери электроэнергии, кВт·ч	число операций ВО								
Поочередная работа ПА	1163	–	785	–	762	–	765	–	816	–
АВОР без выдержек времени	1049	56	765	21	751	27	754	15	779	33
АВОР: $t_{\text{вкл}1} = 2$ мин, $t_{\text{откл}} = 6$ мин	1094	17	791	12	775	9	771	8	822	17
АВОР: $t_{\text{вкл}1} = 2$ мин, $t_{\text{откл}} = 10$ мин	1109	10	805	11	791	8	780	7	844	14
АВОР: $t_{\text{вкл}1} = 5$ мин, $t_{\text{откл}} = 6$ мин	1101	11	786	6	763	1	767	4	813	8
АВОР: $t_{\text{вкл}1} = 5$ мин, $t_{\text{откл}} = 10$ мин	1110	8	793	5	766	1	772	3	825	7
Параллельная работа ПА	1145	–	1013	–	993	–	1004	–	1028	–

По результатам анализа графиков нагрузки тяговых подстанций (за исключением подстанции А) получены следующие выводы.

1. В режиме работы АВОР ПА без выдержек времени – потери электроэнергии минимальны, однако число операций ВО значительно превышает допустимые значения – более восьми циклов в сутки.

2. Потери электроэнергии в режимах АВОР ПА с выдержками времени отличаются на единицы киловатт-часов как между собой, так и от режима, когда включен только один преобразователь. Со снижением временных уставок на включение и отключение резервного ПА растет число его коммутаций выключателями. С увеличением временной уставки на отключение наблюдается рост потерь электроэнергии. Незначительное снижение потерь энергии в отдельных случаях также сопровождается ростом числа коммутаций и в конечном итоге приводит к ущербу или, как минимум, к неэффективной работе АВОР.

3. Наибольшие потери электроэнергии наблюдаются при непрерывной параллельной работе ПА – более 200 кВт·ч в сутки относительно других режимов работы ПА.

Исключение составляет тяговая подстанция А, для которой в соответствии с требованиями технического условия [6] применяется режим параллельной работы ПА.

Для формирования общего подхода к выбору режимов работы ПА построены функции распределения тяговой нагрузки указанных подстанций (рисунок 4). По результатам анализа функций распределения определены диапазоны нахождения тяговой нагрузки с вероятностью 95 % (таблица 3).

На рисунке 4 точка L соответствует току равенства потерь мощности при работе одного или двух ПА тяговой подстанции А. Для этой подстанции в 36 % случаев будет выгоден режим параллельной работы.

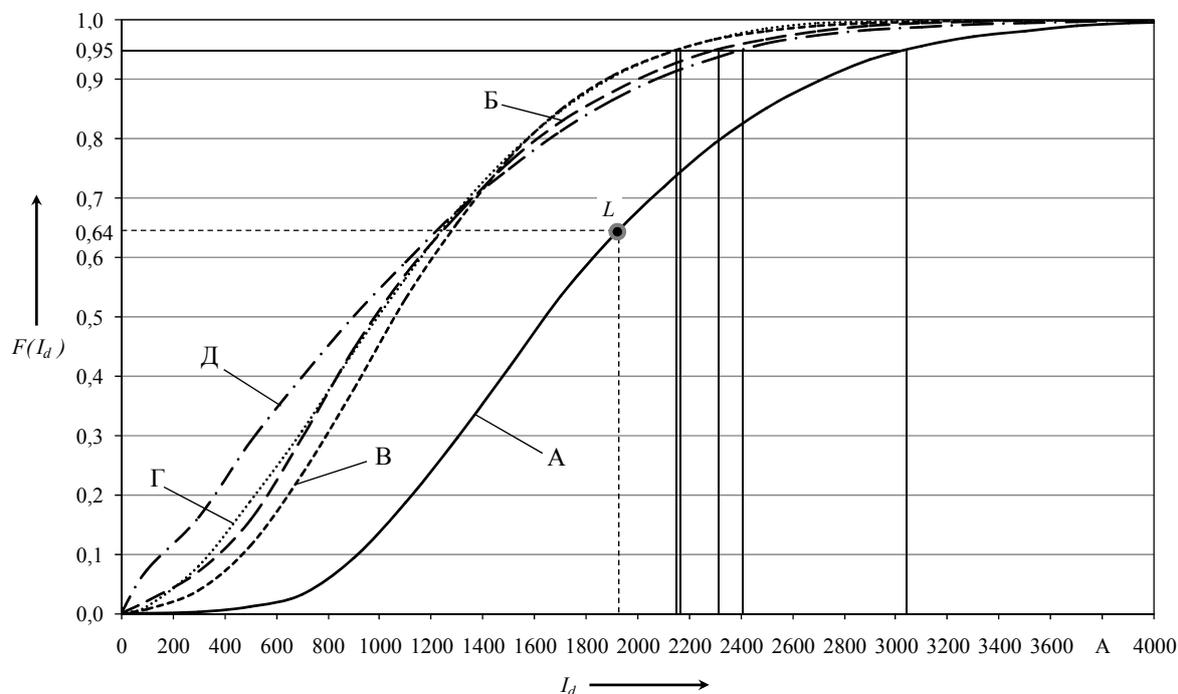


Рисунок 4 – Интегральные функции распределения тяговой нагрузки подстанций А, Б, В, Г, Д

Для остальных подстанций вероятность нахождения тяговой нагрузки выше тока равенства потерь мощности при работе одного или двух ПА приведена в таблице 3.

Анализ данных таблиц 1 – 3 показал, что среднесуточная переработка электроэнергии подстанцией не является единственным информативным параметром, определяющим выбор режимов работы ПА.

Таблица 3 – Анализ распределения тяговой нагрузки

Тяговая подстанция	Диапазон нахождения тяговой нагрузки с вероятностью 95 %, А	Ток равенства потерь мощности при работе одного или двух ПА, А	Вероятность нахождения тяговой нагрузки выше тока равенства потерь мощности
А	0 – 3040	1927	0,36
Б	0 – 2310	2034	0,09
В	0 – 2160	2036	0,07
Г	0 – 2140	2007	0,07
Д	0 – 2400	1933	0,14

В первом приближении решение о применении режима параллельной работы ПА может быть принято по данным среднесуточной переработки электроэнергии подстанцией и вероятности нахождения тяговой нагрузки выше тока равенства потерь мощности при работе n или $(n+1)$ ПА. Так, для подстанции А с переработкой более 155 тыс. кВт·ч и вероятностью нахождения тяговой нагрузки выше тока равенства потерь мощности 36 % наиболее прием-

лем режим параллельной работы ПА. Применение АВОР в этом случае нецелесообразно по причинам значительного числа операций ВО резервного ПА и близких значений потерь электроэнергии в режиме АВОР и параллельной работы ПА.

Для принятия решения о применении режима поочередной работы ПА или с АВОР требуется анализ графиков тяговой нагрузки подстанции с целью определения числа операций ВО и потерь электроэнергии.

В общем случае выбор режимов работы ПА должен основываться на совокупном анализе следующих данных:

- 1) среднесуточной переработки электроэнергии подстанцией;
- 2) интегральной функции распределения тяговой нагрузки подстанции;
- 3) числа и длительности интервалов времени непрерывного нахождения тяговой нагрузки с током выше тока равенства потерь мощности при работе n или $(n+1)$ ПА;
- 4) потерь электроэнергии и числа операций ВО резервного ПА.

Решение о применении АВОР может быть положительным, если при этом оцененный эффект в виде сокращения потерь электроэнергии будет выше совокупного ущерба от коммутаций резервного ПА.

АВОР в большинстве случаев следует рассматривать не как средство получения экономического эффекта, а как средство повышения надежности работы полупроводниковых выпрямителей в пиковые моменты нагрузки, что в свою очередь влияет на надежность электрооборудования тяги поездов в целом. Применение положений действующих технических указаний о порядке применения и выбора уставок АВОР не позволяет получить ожидаемого снижения потерь энергии и сопряжено с отрицательным влиянием на ресурс преобразовательных трансформаторов, коммутационной аппаратуры и качество электрооборудования нетяговых потребителей.

Список литературы

1. Гриньков, Б. Н. Автоматическое переключение ртутновыпрямительных агрегатов тяговой подстанции в зависимости от нагрузки [Текст] / Б. Н. Гриньков // Труды ВНИИЖТа. – 1963. – Вып. № 261. – С. 109–117.
2. Энергетическая стратегия железнодорожного транспорта на период до 2010 года и на перспективу до 2020 года / ОАО «РЖД» / М., 2004. – 14 с.
3. Бобров, Е. Г. Оптимизация нагрузочных режимов полупроводниковых выпрямителей тяговых подстанций [Текст] / Е. Г. Бобров, Ю. В. Соболев // Вестник ВНИИЖТа. – 1982. – № 5. – С. 23–27.
4. Николаев, Г. А. Экономичные режимы работы ртутных выпрямителей [Текст] / Г. А. Николаев // Промышленная энергетика. – 1967. – № 11. – С. 23–26.
5. Методика выбора уставок режимной автоматики преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока / ОАО «РЖД» / М., 2012. – 32 с.
6. Техническое указание ЦЭ №П-151-82 Главного управления электрификации и энергетического хозяйства МПС СССР «Об организации теплового контроля и режимов работы выпрямителей тяговых подстанций». – М., 1982. – 4 с.
7. Чернорай, В. А. Оценка эффективности применения автоматического включения-отключения резервных преобразовательных агрегатов на основе анализа графиков нагрузки [Текст] / В. А. Чернорай // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 264–272.

References

1. Grin'kov B. N. Automatic switching rectifier units containing mercury traction substation depending on the load [Avtomaticheskoe perekliuchenie rtutnovypriamitel'nykh agregatov tiagovoi podstantsii v zavisimosti ot nagruzki]. Proceedings VNIIZhT, 1963, no. 261, pp. 109–117.

2. Energeticheskaia strategiiia zheleznodorozhnogo transporta na period do 2010 goda i na perspektivu do 2020 goda (Energy Strategy of railway transport for the period until 2010 and until 2020), Moscow, 2004, 14 p.

3. Bobrov E. G. Optimizing the load mode semiconductor rectifier traction substations [Optimizatsiia nagruzochnykh rezhimov poluprovodnikovykh vypriamitelei tiagovykh podstantsii]. Bulletin VNIIZhT, 1982, no. 5, pp. 23 – 27.

4. Nikolaev G. A. Economical modes mercury rectifiers [Ekonomichnye rezhimy raboty rtutnykh vypriamitelei]. Industrial power, 1967, no. 11, pp. 23 – 26.

5. Metodika vybora ustavok rezhimnoi avtomatiki preobrazovatel'nykh agregatov tiagovykh podstantsii postoiannogo toka (Methods of selecting the settings secure automation converting units of traction substations DC), Moscow, 2012, 32 p.

6. Tekhnicheskoe ukazanie TsE №P-151-82. Ob organizatsii teplovogo kontrolya i rezhimov raboty vypriamitelei tiagovykh podstantsii (On the organization of the thermal control and the mode rectifier traction substations), Moscow, Glavnoe upravlenie elektrifikatsii i energeticheskogo khoziaistva MPS SSSR, 1982.– 4 p.

7. Chernorai V. A. Evaluating the effectiveness of the automatic on-off reserve conversion units based on the analysis of load curves [Otsenka effektivnosti primeneniia avtomaticheskogo vklucheniia-otkliucheniia rezervnykh preobrazovatel'nykh agregatov na osnove analiza grafikov nagruzki]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi Dniu Rossiiskoi nauki «Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of scientific-practical conference dedicated to the Day of Russian Science «Innovation projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2014, pp. 264 – 272.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чернорай Виталий Анатольевич

Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению (Зап.-Сиб. НТЭ).

Леконта ул., 20, г. Омск, 644121, Российская Федерация.

Ст. электромеханик ДЭЛ Зап.-Сиб. НТЭ.

Тел.: +7 (3812) 44-27-61.

E-mail: Chernorayva@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chernorai Vitaly A.

West Siberian Directorate for energy supply (W-Sib NTE).

20, Lecomte st., Omsk, 644121, the Russian Federation.

Senior Electrician REL W-Sib NTE.

Phone: +7 (3812) 44-27-61.

E-mail: Chernorayva@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Чернорай, В. А. Оценка эффективности применения режимной автоматики резервных преобразовательных агрегатов на основе анализа графиков нагрузки при существующих уставках [Текст] / В. А. Чернорай // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 115 – 124.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Chernorai V. A. Evaluating the effectiveness of secure automation of backup conversion units based on the analysis of load curves with the existing setpoints. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 115 – 124. (In Russian).

УДК 621.317:004.7

А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин, А. С. Окишев, А. Б. Кильдибеков

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

АЛГОРИТМЫ И СТРУКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ФИДЕРАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Аннотация. Рассматривается концепция развития автоматизированной системы, предназначенной для мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети постоянного тока. Система основана на

ранее разработанном прототипе, введенном в эксплуатацию, и отличается от него новыми решениями, позволяющими достаточно просто выполнять развертывание системы, ее масштабирование и при необходимости перенос с одного объекта на другой. Описываются основные проектные решения, связанные с выбором архитектуры и ключевых алгоритмов, а также функции и потенциальные возможности системы.

Ключевые слова: электроснабжение железных дорог, фидер контактной сети, выпрямитель, электроэнергия, измерение, передача данных, точность, алгоритм, автоматизация.

Andrey A. Lavrukhin, Andrey G. Malyutin, Andrey S. Okishev, Askar B. Kildibekov
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

ALGORITHMS AND STRUCTURAL SOLUTIONS FOR CONSTRUCTION THE SYSTEM OF MONITORING AND ELECTRICITY METERING ON THE FEEDERS OF THE CONTACT NETWORK

Abstract. We propose the concept of the new system for monitoring and electricity metering on the feeders of the D.C. contact network. The system is based on previously designed prototype that has been put into operation, and differs from it in new solutions that allow to achieve greater mobility and simple scalability. We describe the basic technical solutions, the system functions as well as its potential.

Keywords: electricity railways, feeder of contact network, rectifier, electric power, measurement, data transfer, accuracy, algorithm, automation.

Автоматизированная система мониторинга и учета электроэнергии (АСМУЭ) на фидерах контактной сети постоянного тока предназначена для оперативного мониторинга следующих информативных параметров с локализацией по времени и месту: напряжение, ток, активная мощность, интегральная величина расхода электроэнергии [1 – 4].

Измерение тока и напряжения осуществляется с частотой дискретизация 16000 Гц, что позволяет не только с высокой точностью определять их действующие значения, мощность, принятую и переданную энергию, но и выполнять гармонический анализ сигналов и анализировать форму сигналов токов и напряжений. Класс точности измерения тока и напряжения 0,5.

В штатном режиме система предоставляет информативные параметры для наблюдения и хранения с периодами 1 с, 3 с, 6 с, 60 с, 30 мин. На основе данной телеметрической информации АСМУЭ может использоваться для решения широкого круга задач, связанных с изучением реальных процессов, происходящих в системе электроснабжения:

определение расхода электрической энергии по межподстанционным зонам с указанием полученного расхода от смежных тяговых подстанций, определение усредненного значения места токораздела и дополнительных технологических потерь в тяговой сети от смещения точки токораздела;

определение значения перетоков энергии по шинам тяговых подстанций постоянного тока с указанием процента энергии перетока от расхода энергии на тягу поездов; оценка ущерба от повышенных перетоков, заключающегося в увеличении технических потерь в смежных межподстанционных зонах;

расчет усредненных значений напряжений на шинах тяговых подстанций, отклонений напряжений смежных подстанций выше установленного уровня;

выявление тяговых подстанций с повышенным и пониженным расходом, находящихся в идентичных условиях;

обнаружение технологических потерь в оборудовании тяговых подстанций (выявление тяговых подстанций с повышенными технологическими потерями);

повышение эффективности работы оборудования тяговых подстанций и выявление устройств, работающих в неэффективных режимах.

Модернизированный вариант АСМУЭ основан на ранее разработанном прототипе, введенном в эксплуатацию, и отличается от него новыми решениями. Далее представим наиболее важные из этих решений, направленные на повышение надежности и гибкости системы,

а также алгоритмы, благодаря которым достигается уменьшение методических погрешностей измерений.

I. Архитектура модернизированной АСМУЭ.

АСМУЭ является иерархической трехуровневой территориально распределенной автоматизированной системой [5 – 7]:

1-й уровень включает в себя информационно-измерительные комплексы (ИИКи), которые выполняют функцию измерения и получения информативных параметров;

2-й уровень – информационно-вычислительные комплексы электроустановки (ИВКЭ) подстанций, каждая из которых состоит из устройств сбора и передачи данных (УСПД) и концентратора данных, предназначенного для получения и временного хранения информативных параметров с ИИКов;

3-й уровень – информационно-вычислительный комплекс (ИВК), который реализует функции централизованного сбора, хранения и представления основных информативных параметров.

В состав АСМУЭ входит также система обеспечения единого времени (СОЕВ), которая реализована на всех уровнях иерархии и обеспечивает единое время на всех компонентах системы. Синхронизация времени системы производится с точностью 5 с относительно мирового времени. Это позволяет осуществлять интеграцию с другими системами учета электроэнергии, установленными, например, на подвижном составе. Точность синхронизации времени внутри системы определяется различными факторами. В нормальном режиме ошибка синхронизации имеет значение порядка 10 мс. При отказах отдельных компонентов системы ошибка синхронизации, как правило, не выходит за пределы 200 мс.

Средства измерения ИИК, устанавливаемые на вводах 3,3 кВ выпрямительно-преобразовательных агрегатов и фидерах контактной сети тяговой подстанции, представляют собой измерительные преобразователи, выполняющие измерение тока и напряжения, вычисление мощности, принятой и переданной энергии, оперативное хранение полученных показаний и их передачу на концентратор данных (рисунок 1). Измерение тока осуществляется посредством токового шунта, установленного штатно на всех устройствах тяговых подстанций, измерение напряжения – посредством резистивного делителя, находящегося внутри корпуса измерительного модуля.

Измерительная часть системы унаследована из ее прототипа и описана в источниках [5 – 7].

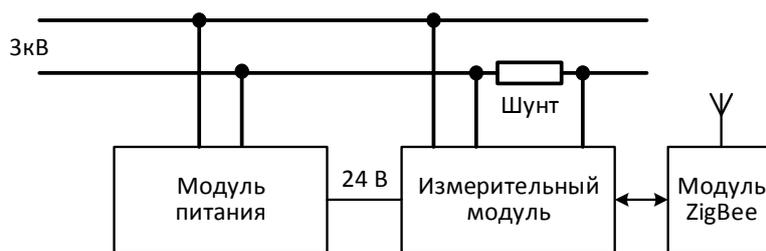


Рисунок 1 – Основные модули ИИКа и схема его подключения

Отличительной особенностью мобильного варианта АСМУЭ является возможность ее быстрого развертывания и монтажа оборудования 1-го уровня на тяговой подстанции, что позволяет с меньшими затратами выполнять масштабирование системы или ее перенос на новые участки системы тягового электроснабжения для выполнения диагностики. Это реализовано за счет применения беспроводных технологий передачи данных (ZigBee) и использования модуля питания, подключаемого непосредственно к шине высокого напряжения, благодаря чему исключается необходимость монтажа проводных соединений.

Концентратор ИВКЭ, выполненный на базе промышленного компьютера, является шлюзом для получения и временного хранения информативных параметров с ИИКа и передачи

полученных данных на ИВК. На рисунке 2 приведена структурная схема концентратора, в которой можно выделить следующие основные элементы:

- промышленный компьютер (с соответствующими интерфейсами);
- сенсорный LCD-монитор для отображения данных измерения и управления;
- USB-модуль ZigBee для взаимодействия с ИИКом;
- USB-модуль GPS/ГЛОНАСС для обеспечения синхронизации времени и определения местоположения.

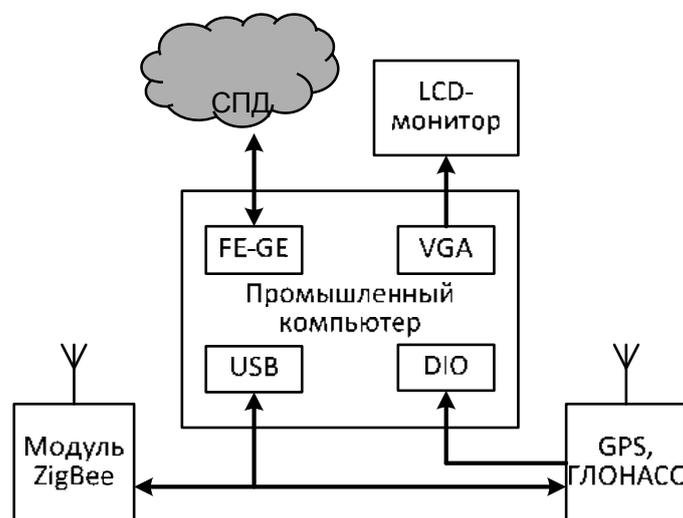


Рисунок 2 – Структурная схема концентратора

Информационно-вычислительный комплекс представляет собой совокупность оборудования, предназначенного для сбора данных с информационно-вычислительных комплексов электроустановки подстанций и информационно-измерительных комплексов. ИВК выполняет накопление данных с ИИКа, ИВКЭ, обработку, архивацию, долговременное хранение и предоставление пользователям и эксплуатационному персоналу регламентированного доступа к результатам мониторинга энергетических показателей.

В состав ИВК может входить автоматизированное рабочее место диспетчера (АРМ), которое укомплектовано программным обеспечением, предназначенным для просмотра информативных параметров в табличном и графическом виде.

Главными элементами ИВК являются

- средство сопряжения устройства сбора и передачи данных и сети передачи данных;
- сервер системы сбора данных телеметрии (ССДТ);
- сервер телеметрических приложений (СТП);
- элементы системы обеспечения единого времени (СОЕВ).

Основным программным средством ИВКа является сервис системы сбора данных телеметрии, который выполнен в виде службы ССДТ и выполняет следующие базовые функции:

- автоматический сбор результатов измерений с ИИКа и ИВКЭ;
- автоматический сбор данных о состоянии ИИКа и ИВКЭ;
- контроль достоверности данных;
- довосстановление данных (после восстановления работы каналов связи, восстановления питания и т. п.);
- автоматическое хранение результатов измерений, журналов событий ИИКа, УСПД и системы (не менее трех лет);
- ведение журналов различных событий и ошибок, произошедших в системе.

Сервер телеметрических приложений обеспечивает доступ пользователей и эксплуатационного персонала к данным телеметрии.

Взаимодействие ИВКЭ и ИВК осуществляется по проводной сети передачи данных (СПД) или при нахождении в зоне покрытия беспроводных сетей с использованием беспроводных технологий передачи данных (GSM, GSM-R, UMTS, LTE).

II. Алгоритм вычисления усредненных электрических параметров.

В системе АСМУЭ выполняются первичные измерения двух параметров – напряжения и тока, пример результатов измерений в виде осциллограмм тока и напряжения приведен на рисунке 3, пример амплитудных спектров – на рисунке 4. Результаты измерений могут предоставляться системой по запросу либо использоваться для детального автоматического анализа, если, например, на базе АСМУЭ будет построена система регистрации событий или диагностики неисправностей в электрических сетях [5 – 7].

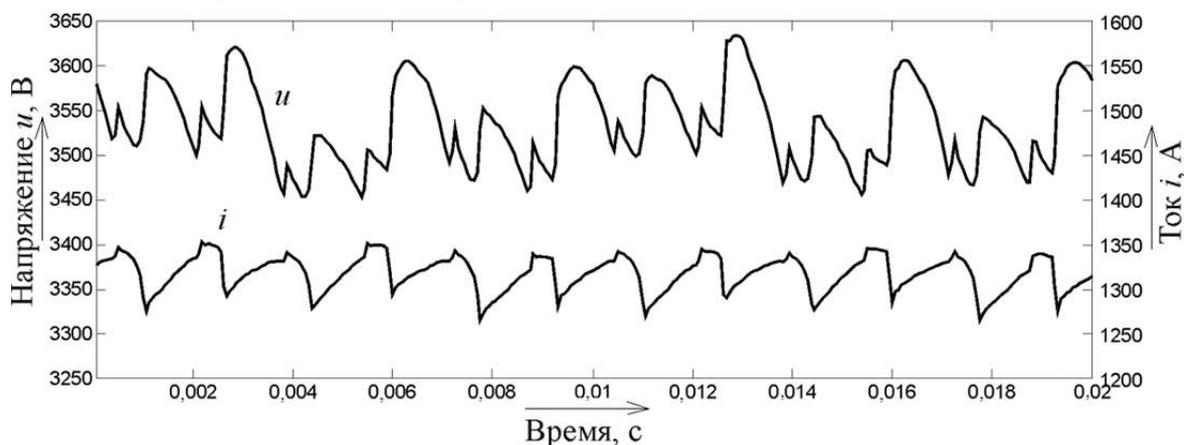


Рисунок 3 – Пример зарегистрированных осциллограмм тока и напряжения на 12-пульсовом выпрямителе

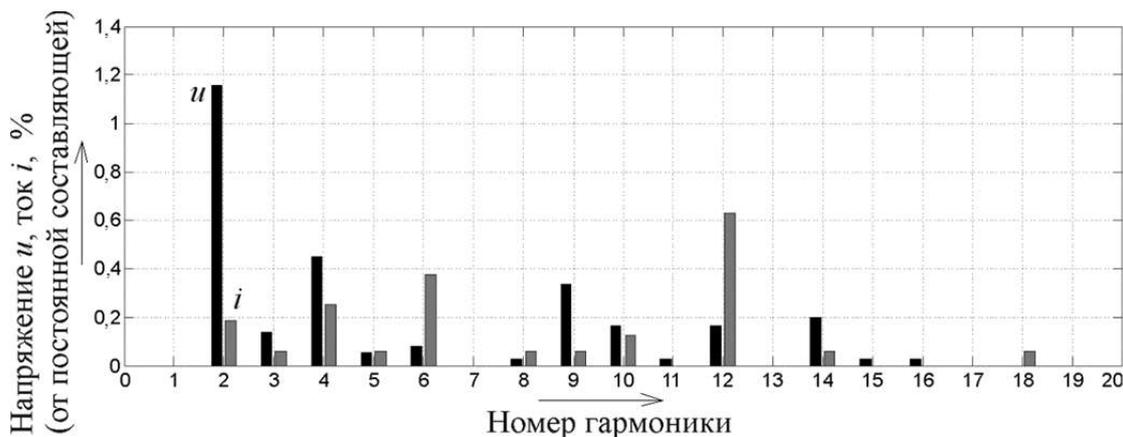


Рисунок 4 – Пример амплитудных спектров тока и напряжения на 12-пульсовом выпрямителе

Результаты измерений и расчетные величины мощности, энергии, принятой в точке учета, и энергии, отданной через точку учета, усредняются на интервалах 1, 3 или 6 с и др. На практике сигналы токов и напряжений имеют пульсирующий характер, их постоянная составляющая может изменяться достаточно быстро, а величина тока может даже менять знак в пределах одного периода усреднения. Поэтому необходимо выбрать формулы расчета усредненных электрических величин с учетом этих особенностей.

1. Мощность за заданный интервал усреднения длительностью T следует вычислять через мгновенные значения тока и напряжения по формуле:

$$P_{\text{ст}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt. \quad (1)$$

Далее будем считать найденную по формуле (1) мощность $P_{\text{ст}}$ как эталонную для оценки точности различных алгоритмов. Наиболее точному алгоритму должны соответствовать такие усредненные на интервале T ток I_T и напряжение U_T , чтобы вычисленная по этим значе-

ниям мощность $P_T = U_T I_T$ была наиболее близка к $P_{эт}$. Вычислительную погрешность каждого алгоритма будем определять по формуле:

$$\delta = |(P_{эт} - P) / P_{эт}| \cdot 100 \% \quad (2)$$

2. Вычисляемые значения тока и напряжения можно считать действующими, поскольку ток в электрических сетях железных дорог используется в первую очередь для совершения работы. Тем не менее поскольку рассматривается постоянный, а не переменный (синусоидальный) ток, не является очевидным то, что требуется применять формулы среднеквадратичного усреднения на периоде 0,02 с.

3. Если выполняются условия баланса мгновенных токов и мощностей (сумма всех токов на выпрямителях равна алгебраической сумме токов, проходящих через фидеры), то эти условия должны соблюдаться и для усредненных значений в пределах интересующих интервалов времени.

Вычисления усредненных значений можно проводить поэтапно: сначала – усреднение на интервалах шириной 0,02 с (соответствующих одному периоду промышленной частоты 50 Гц), затем – на интервалах 1 с, затем – на любых других интервалах, например 3 с. Для обеспечения сохранности данных при различных вероятных сбоях в системе удобнее всего получать усредненные значения на интервалах 1 с, которые краткосрочно хранятся в счетчиках, а далее по этим секундным значениям вычислять значения на более крупных интервалах (3 с или больше).

Рассмотрим два варианта алгоритма: на первом этапе выполняется усреднение на интервале 0,02 с, на втором этапе – на интервале 1 с и сразу выполняется усреднение на интервале 1 с.

Рассмотрим усреднение по двум формулам: среднего арифметического и среднего квадратичного.

Комбинируя эти варианты, можно получить следующее множество двухэтапных алгоритмов вычисления усредненного тока и напряжения на интервале 1 с:

- 1) вычисление средних арифметических на интервале 0,02 с и средних арифметических на интервале 1 с;
- 2) вычисление средних квадратичных на интервале 0,02 с и средних арифметических на интервале 1 с;
- 3) вычисление средних квадратичных на интервале 0,02 с и средних квадратичных на интервале 1 с.

Варианты одноэтапного вычисления на интервале 1 с будут эквивалентны одному из перечисленных выше: вычисление среднего арифметического соответствует варианту 1, а вычисление среднего квадратичного – варианту 3.

Наибольшее различие значений будет в тех случаях, когда измеряемый ток имеет большие изменения за короткий промежуток времени (считаем это первым фактором появления погрешностей). По полученным экспериментальным наблюдениям в системе возможно изменение тока в точке учета на сотни и тысячи ампер в течение 2 – 3 с. Рассмотрим такой вариант, для которого сигналы тока и напряжения на интервале времени длительностью 3 с показаны на рисунке 5.

В соответствии с описанными алгоритмами получены относительные вычислительные погрешности усредненной мощности, они приведены в таблице. Необходимо заметить, что основным неотделимым компонентом полученных вычислительных погрешностей является методическая погрешность в соответствии с различными алгоритмами вычисления.

Наличие в сигналах пульсаций приводит к тому, что при отклонениях частоты от точного значения 50 Гц в рассматриваемые интервалы будет попадать нецелое количество периодов сигнала. Это является вторым фактором появления погрешностей. На примере экспериментальных токов и напряжений были проведены вычислительные эксперименты, которые

показали, что уже при относительных отклонениях частоты, превышающих 0,1 Гц, возникает ошибка вычисления мощности, порядок которой приведен в таблице. Вычисления были проведены при постоянном среднем токе.

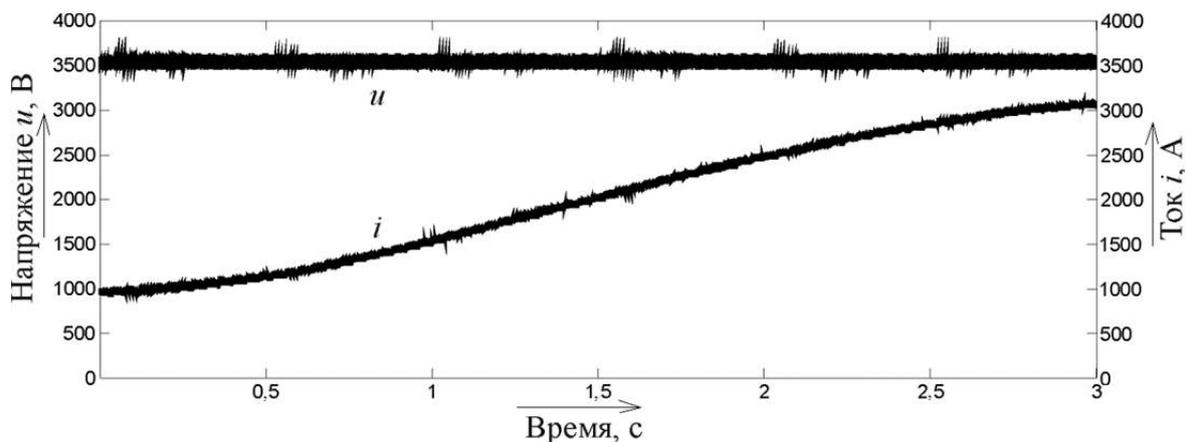


Рисунок 5 – Экспериментальные сигналы тока и напряжения

Относительные вычислительные погрешности усредненной мощности на интервале 3 с

Алгоритм	Погрешность δ при изменяющемся токе, %	Погрешность δ при отклонении частоты, %
Среднеарифметическое усреднение на всех интервалах	0,009	< 0,025
Среднеквадратичное усреднение на интервалах времени 0,02 с, на последующих – среднеарифметическое усреднение	0,035	< 0,065
Среднеквадратичное усреднение на всех интервалах	1,299	< 0,070

Как видно из данных таблицы, наименьшая ошибка получается при использовании среднеарифметического усреднения на любых интервалах времени. Нужно заметить, что это характерно только для сетей постоянного тока. Среднеквадратичное усреднение на интервалах, превышающих 0,02 с, использовать не следует. Допустимо выполнять среднеквадратичное усреднение на интервале 0,02 с, тогда суммарная вычислительная ошибка не должна превышать 0,1 %. Поскольку был рассмотрен экстремальный вариант, при котором ток меняется очень быстро, ошибка чаще будет определяться только второй составляющей и составит 0,025 – 0,065 %.

III. Алгоритмы обмена данными.

Взаимодействие ИИКом, концентраторов и других устройств нижнего уровня с сервисом системы сбора данных телеметрии ИВК (далее – сервис) происходит путем обмена сообщениями [5, 6], которые состоят из заголовка и тела сообщения (блок данных). Заголовок сообщения имеет следующую структуру:

- преамбула;
- длина тела сообщения;
- тип сообщения;
- номер сообщения (используется, если сообщение является частью цепочки связанных по смыслу сообщений).

Тело сообщения в формате CSV (или JSON) содержит либо текстовые строки измеренных величин и спектра, журналы, состояния, либо другие данные в зависимости от типа сообщения. В конце блока данных метка о завершении сообщения не указывается, поскольку в заголовке хранится его длина.

Тела сообщения для всех видов информации содержат временные метки, которые имеют следующую структуру: год_месяц_день (формат уууу_мм_дд).

Рассмотрим основные этапы алгоритма обмена сообщениями между ИИКом и сервисом системы сбора данных телеметрии ИВКом).

ИИК самостоятельно инициирует сеанс связи с сервисом при наличии постоянного соединения по сети передачи данных или при нахождении в зоне покрытия беспроводной сети. После установления соединения ИИК передает сервису сообщения авторизации, местоположения и о временной отметке.

Если данные в сообщении авторизации корректные, то сервис отправляет в ИИК сообщение успешной авторизации. Если ИИК данное сообщение получает, то он начинает передавать информацию в соответствии с алгоритмом обмена сообщениями, специфичным для передаваемой информации.

Получение каждого сообщения сервис подтверждает посылкой сообщения состояния обмена, если не указано иное. ИИК при получении кода состояния обмена, отличного от корректного, повторяет передачу сообщения, которая завершилась неудачно.

Сообщения ИИКа могут поступать на сервис как отдельно, так и в общем потоке данных. Каждое из этих сообщений требует ответа. Может возникнуть ситуация, когда в потоке данных от одного ИИКа встретятся более одного блока, требующего ответа сервиса. Во избежание подобных ситуаций сервис отвечает на сообщение, которое первым встретилось в потоке данных, последующие сообщения ИИКа игнорируются. Забота о том, чтобы в одном потоке данных не встретилось несколько блоков, требующих ответа сервиса, возложена на ИИК.

ИИК в случае отсутствия связи с сервисом хранит регистрируемые параметры в течение месяца. После установления соединения с сервисом ИИК передает сохраненную информацию. Приоритет предоставляется информации, регистрируемой в реальном режиме времени.

При отсутствии сообщений от ИИКа на величину, большую, чем значение установленного таймаута ожидания, сервис закрывает соединение для данного ИИКа. При отсутствии сообщений от сервиса более таймаута ожидания ИИК закрывает соединение и повторяет попытку связи через временной промежуток таймаута повтора запроса.

Учитывая тот факт, что служба сбора данных телеметрии является сетевой и предназначена для удаленного взаимодействия с большим количеством ИИКов и концентраторами, она реализована по многопоточному и асинхронному принципам. Многопоточность позволяет достичь более эффективного использования ресурсов вычислительной машины за счет параллельного или псевдопараллельного исполнения не связанных программных задач. Асинхронность необходима для действий, которые потенциально являются блокирующими, например, когда приложение работает в сети. Например, взаимодействие сервиса и некоторого ИИКа иногда осуществляется медленно или с задержкой. Если такое действие блокируется сервисом в пределах синхронного процесса, все сеансы связи с другими ИИКаами вынужденно переходят в состояние ожидания. В случае асинхронного процесса независимо от завершения блокирующей задачи сервис может перейти к следующей операции, а потом вернуться к исходной задаче.

IV. Методы обеспечения точности синхронизации измерений.

Система АСМУЭ, выполняющая сбор показаний с точек учета, должна обеспечить точную привязку этих показаний к единому времени, т. е. можно говорить о синхронизации времени в рамках распределенной системы учета, и требования к точности такой синхронизации очень высоки: допустимая величина отклонения составляет единицы миллисекунд.

Наиболее точная синхронизация возможна только по эталонному мировому времени с использованием максимально быстрых и стабильных средств связи. Таким средством является GPS/ГЛОНАСС. Тем не менее в системе на разных уровнях применяется принцип резервирования (избыточности) за счет задействования параллельных подсистем, выполняющих какие-либо другие основные функции. Так, в нормальном режиме работы синхронизация времени осуществляется через приемник GPS/ ГЛОНАСС, который подключен к коммутатору концентратора подстанции и выполняет роль NTP-сервера (сервера точного времени, использующего протокол NTP). В случае отказа одного из элементов этой цепочки, предусмотрено переключение на другой источник точного времени. Таким резервным источником

является ИВК, также оснащенный приемником GPS/ГЛОНАСС. Фактически для счетчиков безразлично, что будет являться сервером точного времени.

Проблема протокола NTP состоит в том, что точность значительно зависит от качества связи и в реальных условиях этот протокол может приводить к рассинхронизации в сотни миллисекунд, если источником эталонного времени становится ИВК. Поэтому в системе применяется усовершенствованный протокол NTP. Суть его заключается в том, что величина коррекции времени, полученная по стандартному протоколу, пропускается через фильтр экспоненциального сглаживания. Преимущество такой фильтрации заключается в том, что это фильтр первого порядка, значит, достаточно хранить только одно значение величины коррекции (с предыдущего момента коррекции часов реального времени). Устойчивость алгоритма можно повысить за счет увеличения порядка фильтра и более частых обращений к ИВК.

По данным проведенных экспериментов усовершенствованный протокол синхронизации в условиях плохого качества связи позволяет повышать точность синхронизации более чем на порядок.

Основные выводы и результаты:

1. Разработана структура усовершенствованной автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии, позволяющая осуществлять быстрое развертывание ИИК и ИВКЭ на тяговых подстанциях за счет применения беспроводных технологий и иных доступных средств передачи данных. Сокращаются также временные и иные затраты при перенастройке и перемещении системы с одного обследуемого участка железной дороги на другой.

2. Разработан комплекс алгоритмов и технических решений, направленных на повышение точности синхронного измерения и формирования информативных параметров в системе тягового электроснабжения. Работоспособность и эффективность новых алгоритмов проверена на их прототипе.

3. Установлено, что для сетей постоянного тока при измерении и вычислении усредненных значений выпрямленных напряжений и токов на любых временных интервалах, кратных 0,02 с, следует применять формулу среднего арифметического.

Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – № 3. – С. 108 – 113.

2. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» [Текст] / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 3. – С. 87 – 91.

3. Ожегов, А. Н. Системы АСКУЭ: Учебное пособие [Текст] / А. Н. Ожегов / Вятский гос. ун-т. – Киров, 2006. – 102 с.

4. Измерение. RU – Системы АСКУЭ (АИИС) для рынка электроэнергии. Счетчики электроэнергии, воды и тепла [Электронный ресурс] / Компания «Эльстер Метроника». – М., 2008. – Режим доступа: <http://www.izmerenie.ru/>

5. Принципы построения информационной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 3 (23). – С. 94 – 104.

6. Информационная система оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения [Текст] / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин и др. // Интеллектуальные технологии на транспорте. – Санкт-Петербург, 2015. – № 2. – С. 10 – 19.

7.: Пат. 165423 Российская Федерация МПК В60М3/00, H02J1/00. Блок мониторинга и учета электроэнергии. В. Т. Черемисин, С. Н. Чижма, М. М. Никифоров, А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин, А. С. Окишев, Ю. В. Плотников, А. В. Дегтерева; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2015151245/11; заявл. 30.11.2015; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29. – 4 с.

References

1. Cheremisin V. T. *Edinaya avtomatizirovannaya sistema ucheta elektroenergii na elektropodvizhnom sostave (EASUE EPS) postoyannogo toka* [The uniform automated system of electricity metering in electric rolling stock (EASA EPS) DC] / V. T. Cheremisin, S. U. Ushakov, A. L. Kashtanov // *Izvestia Transsiba* [Proceedings Of The TRANS-Siberian Railway], 2013, № 3, P. 108 – 113.

2. Cheremisin V. T. *Avtomatizirovanny monitoring energeticheskoy effektivnosti raboty elektropodvizhnogo sostava OAO «RZhD»* [Automated monitoring of energy efficiency ehlektropodvizhnogo of the JSC "RZD"] / V. T. Cheremisin, D. V. Pashkov, S. U. Ushakov // *Izvestia Transsiba* [Proceedings Of The TRANS-Siberian Railway], 2014, № 3, P. 87 – 91.

3. Ozhegov, A. N. *Sistemy ASKUE: Uchebnoe posobie* [AMR system: study guide] / A. N. Ozhegov. – Kirov: ViatSU, 2006. 102 p.

4. *Sistemy ASKUE (AIIS) dlia rynka elektroenergii. Shetchiki elektroenergii, vody, tepla* [AMR system (AIIS) for the electricity market. Electricity meters, water and heat] / The Company «Elster Metronica»: Available at <http://www.izmerenie.ru/> (accessed 1 May 2015).

5. Chizhma S. N. *Printsipy postroeniia informatsionnoi sistemy monitoringa i ucheta elektroenergii na fiderakh kontaktnoi seti* / S. N. Chizhma, A. A. Lavrukhin, A. S. Okishev, A. G. Maliutin // *Izvestiia Transsiba*, 2015, № 3 (23), С. 94 – 104.

6. Chizhma S. N. *Informatsionnaia sistema operativnogo kontrolya parametrov elektroenergii v seti tiagovogo elektrosnabzheniia* / S. N. Chizhma, A. A. Lavrukhin, A. G. Maliutin, A. S. Okishev // *Informatsionnye intellektual'nye tekhnologii*, 2015, № 2, S. 10 – 19.

7. Cheremisin V. T., Chizhma S. N., Nikiforov M. M., Lavrukhin A. A., Maliutin A. G., Okishev A. S., Plotnikov Iu. V., Degtereva A. V. *Blok monitoringa i ucheta elektroenergii. Patent na poleznuuiu model' RUS 165423 30.11.2015*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лаврухин Андрей Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: LavruhinAA@omgups.ru

Малютин Андрей Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: MalyutinAG@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lavrukhin Andrey Aleksandrovich

Omsk State Transport Univirsity (OSTU).

35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: LavruhinAA@omgups.ru

Malyutin Andrey Gennadievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, head of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: MalyutinAG@omgups.ru

Окишев Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: OkishevAS@omgups.ru

Okishev Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: OkishevAS@omgups.ru

Кильдибеков Аскар Бакирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: KildibekovAB@omgups.ru

Kildibekov Askar Bakirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer of the department «Automatic and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: KildibekovAB@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Алгоритмы и структурные решения для построения автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети [Текст] / А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 124 – 134.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lavrukhin A. A., Malyutin A. G., Okishev A. S., Kildibekov A. B. Algorithms and structural solutions for construction the system of monitoring and electricity metering on the feeders of the contact network. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 124 – 134. (In Russian).

УДК 656.1.5

А. А. Белов¹, А. Н. Ларин²

¹Военная академия РВСН им. Петра Великого (ВА РВСН), г. Серпухов, Российская Федерация.

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

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Аннотация. В статье рассматривается решение задачи организации эксплуатационного контроля элементов подвижного состава на основе методов статистического определения качества, получивших широкое применение при анализе дефектов текущего производства. Задача решается на примере проведения контрольно-диагностических операций, по результатам выполнения которых делается заключение о техническом состоянии элементов подвижного состава. Предлагаемый в статье подход позволяет учитывать апостериорную информацию и тем самым оптимизировать объем проводимых работ. Полученные результаты могут быть использованы при решении комплекса задач по снижению ресурсоемкости системы ремонта и содержания подвижного состава.

Ключевые слова: эксплуатационный контроль, контрольно-диагностические операции, ремонт и содержание подвижного состава, параметрический контроль, последовательный анализ.

Alexander A. Belov¹, Andrey N. Larin²

¹Military Academy of SMF named after Peter the Great, (MA SMF), Serpukhov, the Russian Federation.

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

ORGANIZATION OF OPERATIONAL CONTROL BY METHOD OF THE CONSECUTIVE ANALYSIS

Abstract. In article the solution of a task of the organization of operational monitoring of elements of the rolling stock on the basis of the methods of statistical definition of quality which were widely used in the analysis of defects of

the current production is considered. The problem is solved on the example of carrying out control and diagnostic operations by results of which realization the conclusion about technical condition of elements of the rolling stock becomes. The approach offered in article allows to consider a posteriori information and by that to optimize the volume of the carried-out works. The received results can be used at the solution of a complex of tasks of decrease in resource intensity of system of repair and the maintenance of the rolling stock.

Keywords: operational monitoring, control and diagnostic operations, repair and maintenance of the rolling stock, parametrical monitoring, sequential analysis.

В калькуляции себестоимости внутренних железнодорожных перевозок одной из наибольших статей расходов является «ремонт и содержание подвижного состава». В частности, на эту статью приходится: по тепловозному парку – до 25 %, по электровозному – до 26, по вагонному – до 45 % от общих затрат на эксплуатацию. Существующая система ремонта и содержания подвижного состава сформирована в условиях плановой экономики и базируется на «статических» принципах, таких как постоянная структура парка подвижного состава, неизменные в течение длительного времени нормативы выполнения контрольно-диагностических работ на элементах подвижного состава, осуществления их ремонтов, наличие неснижаемого запаса оборотных средств, стабильные условия эксплуатации. Функционирование и развитие системы ремонта и содержания подвижного состава, основанной на таких принципах, происходит за счет наращивания мощностей, роста потребляемых ресурсов пропорционально повышению объемов проводимых работ, что в свою очередь приводит к еще большему увеличению расходов. Анализ модели такой системы показывает [1], что в этих условиях развития предприятия начинают нести убытки, снижается конкурентоспособность промышленного железнодорожного транспорта. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы решения задачи поиска и внедрения ресурсо-сберегающих технологий при реализации как контрольно-диагностических работ, проводимых в процессе эксплуатации (эксплуатационного контроля), так и ремонтных работ. Одним из подходов в решении данной задачи является оптимизация объема выполняемых работ.

Рассмотрим в качестве объекта исследования элемент подвижного состава и параметр его функционирования, который в соответствии с эксплуатационно-технической документацией должен периодически контролироваться в процессе эксплуатации. Допустим, в эксплуатации находится N объектов подвижного состава с такими элементами. Практика эксплуатации сложных технических систем различного назначения, например ракетно-космической техники [2], показывает, что необходимая периодичность контрольно-диагностических работ в процессе эксплуатации может значительно варьироваться. Отдельные параметры функционирования могут показывать очень высокую стабильность, и периодичность их контроля может быть значительно увеличена, другие же параметры, наоборот, имеют большую дисперсию и, как следствие, требуют уменьшения периодичности их контроля. В данном случае использование статических принципов определения периодичности контроля неэффективно [2]. В статье предлагается использовать метод последовательного анализа [3] при проведении эксплуатационного контроля. Использование данного метода подразумевает пошаговое принятие решения после выполнения контроля параметра каждого элемента подвижного состава о дальнейшем контроле данного параметра у следующего элемента или отказа от контроля данного параметра. Последовательный анализ строится на принципе накопления информации в ходе проведения работ эксплуатационного контроля. При этом возможные ошибки учитываются в виде значений вероятности совершения ошибки первого рода α (ошибочное отклонение правильной гипотезы) и вероятности совершения ошибки второго рода β (ошибочное принятие неправильной гипотезы).

Пусть по выполнению отдельной контрольно-диагностической операции может быть сделано только два вида заключения – соответствие контролируемого элемента исправному

или неисправному состоянию (контролируемый параметр в пределах или вне предела допуска значений). Постановка задачи в этом случае будет следующей: из группировки последовательно, один за другим выбирается однотипный элемент подвижного состава, у которого контролируется один параметр, и на каждой ступени контроля необходимо с заданной доверительной вероятностью проверить гипотезу – вероятность нахождения в исправном состоянии элементов в группировке по контролируемому параметру находится в допустимом интервале. В случае принятия данной гипотезы после i -го шага выполнение контроля данного параметра прекращается. Применим последовательный критерий отношения вероятностей, так как наблюдаемый признак может принимать только два значения – генеральная совокупность (группировка) распределена по закону Бернулли и параметр распределения P , т. е. доля неисправных элементов в группировке, неизвестна. Сначала примем для упрощения, что P может принимать только значения P_0 и P_1 . Проверяем гипотезы:

$$\begin{aligned} H_0 : P = P_0; \\ H_1 : P = P_1 \end{aligned} \quad (1)$$

при $P_1 > P_0$ и заданных вероятностях ошибок α и β . Если из группировки взять случайную выборку с возвращением объема n (при достаточно большой группировке это практически не имеет значения) $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, то произведение

$$f(x_1|P) \cdot f(x_2|P) \cdot \dots \cdot f(x_n|P) \quad (2)$$

является функцией правдоподобия для выборки. Это обозначение основывается на том, что при дискретной величине X выражение (2) есть не что иное, как вероятность $W(X=x)$ при реализации $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ вектора X выборочных значений. Для проверки гипотез в качестве контрольной величины предлагается взять критерий Неймана – Пирсона в виде отношения вероятностей:

$$\frac{f(x_1|P_1) \cdot f(x_2|P_1) \cdot \dots \cdot f(x_n|P_1)}{f(x_1|P_0) \cdot f(x_2|P_0) \cdot \dots \cdot f(x_n|P_0)} \quad (3)$$

Отношение (3) является мерой правдоподобия для гипотез H_0 и H_1 . Выражение (3), большее единицы, говорит в пользу H_0 , меньшее единицы – в пользу H_1 .

Для случая распределения случайной величины по закону Бернулли функция правдоподобия для выборки имеет вид:

$$L_n(x/P) = P^k \cdot (1 - P)^{n-k} \quad (4)$$

При этом k обозначает число обнаруженных в выборке неисправных элементов по контролируемому параметру функционирования. Тогда отношение вероятностей

$$LQ_n = \frac{P_1^k (1 - P_1)^{n-k}}{P_0^k (1 - P_0)^{n-k}} \quad (5)$$

Последовательный критерий отношения вероятностей работает с двумя граничными значениями – A и B ($A < 1 < B$) и переменным объемом выборки. Основная идея этого критерия очевидна: контроль нужно продолжать до тех пор, пока не выполнится условие

$LQ_n \notin (A, B)$, т. е. до тех пор, пока значение LQ будет близко к единице. И только при наступлении события $LQ_n \leq A$ принимают решение в пользу H_0 , при $LQ_n \geq B$ – в пользу H_1 . На практике обычно определяют верхние границы α и β для вероятностей ошибок и с их помощью вычисляют граничные значения A и B . Можно показать, что при $A \geq \beta/(1-\alpha)$ и $B \leq (1-\beta)/\alpha$ вероятности ошибок 1-го и 2-го рода не могут быть больше, чем α или β . Обычно принимается

$$\begin{aligned} A &= \frac{\beta}{1-\alpha}; \\ B &= \frac{1-\beta}{\alpha}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для практического использования критерия отношения вероятностей целесообразнее исходить не из условия $LQ \in (A, B)$, а из эквивалентного условия $\ln LQ_n \in (\ln A, \ln B)$. Легко можно проверить, что

$$LQ_n = \ln \left(\left(\frac{P_1(1-P_0)}{P_0(1-P_1)} \right)^k \left(\frac{1-P_1}{1-P_0} \right)^n \right) = k \cdot \ln \left(\frac{P_1(1-P_0)}{P_0(1-P_1)} \right) - n \cdot \ln \left(\frac{1-P_0}{1-P_1} \right). \quad (7)$$

Введем обозначения

$$a = \frac{\ln A}{\ln \left(\frac{P_1(1-P_0)}{P_0(1-P_1)} \right)} = \frac{\ln [\beta/(1-\alpha)]}{\ln \left[\frac{P_1(1-P_0)}{P_0(1-P_1)} \right]}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\ln B}{\ln \left(\frac{P_1(1-P_0)}{P_0(1-P_1)} \right)} = \frac{\ln [(1-\beta)/\alpha]}{\ln \left[\frac{P_1(1-P_0)}{P_0(1-P_1)} \right]}, \quad (9)$$

$$c = \frac{\ln \left(\frac{1-P_0}{1-P_1} \right)}{\ln \left(\frac{P_1(1-P_0)}{P_0(1-P_1)} \right)}. \quad (10)$$

Тогда интервал определяется так:

$$I_n = (a + cn, b + cn). \quad (11)$$

Таким образом, получена цепочка эквивалентных отношений:

$$LQ_n \in (A, B) \Leftrightarrow \ln LQ_n \in (\ln A; \ln B) \Leftrightarrow k \in I_n. \quad (12)$$

Для начального объема выборки $n = 1$ при заданных P_0, P_1, α, β вычисляют коэффициенты (8) – (10), а затем – границы интервала I_n . Если число неисправных элементов отвечает условию $k \leq a + cn$, то принимается гипотеза H_0 , при $k \geq b + cn$ принимается конкурирующая

гипотеза H_1 . Если $k \in I_n$, выборку увеличивают на один объект и процедура повторяется с новым значением n . Если графически изобразить границы $a + cn$ и $b + cn$ контрольного интервала I_n для $n = 1, 2, \dots$, то получим последовательности точек, лежащих на параллельных полупрямых с крутизной подъема c (рисунок 1).

Полупрямые образуют границы принятия решений. Можно показать, что полный объем выборки, т. е. количество проконтролированных элементов до момента принятия решений даже в случае $N \rightarrow \infty$ с вероятностью 1 остается конечным, если отдельные элементы выборки отбираются независимо друг от друга. Поясним это графически (рисунок 2). В то время как на рисунке 1 накопленное число k неисправных элементов изображено в функции достигнутого объема выборки n , на рисунке 2 в функции n представлены относительные величины $\zeta = k/n$, т. е. накопленные доли неисправных элементов.

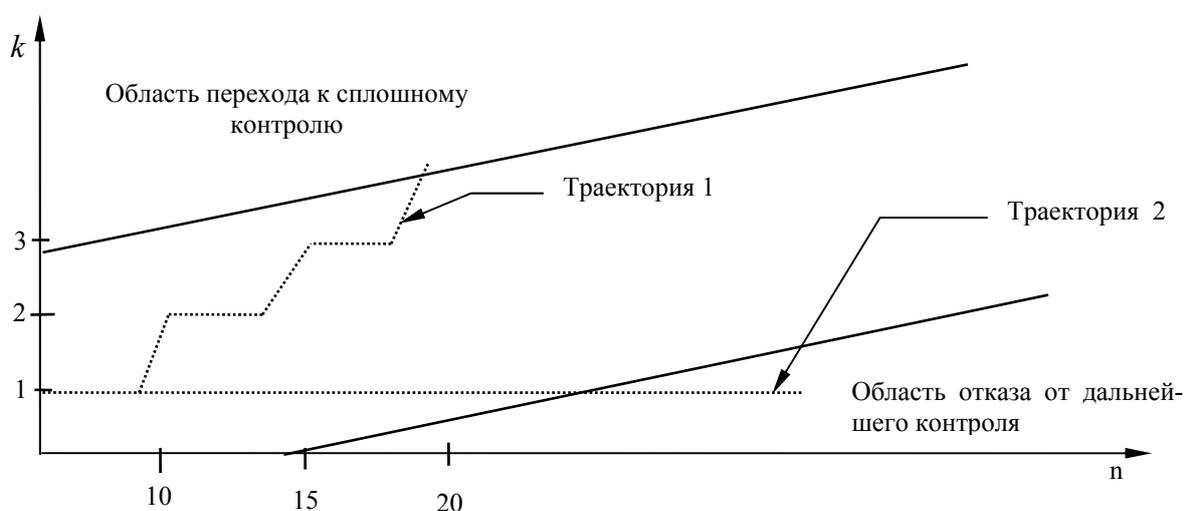


Рисунок 1 – Диаграмма хода контроля при последовательном анализе

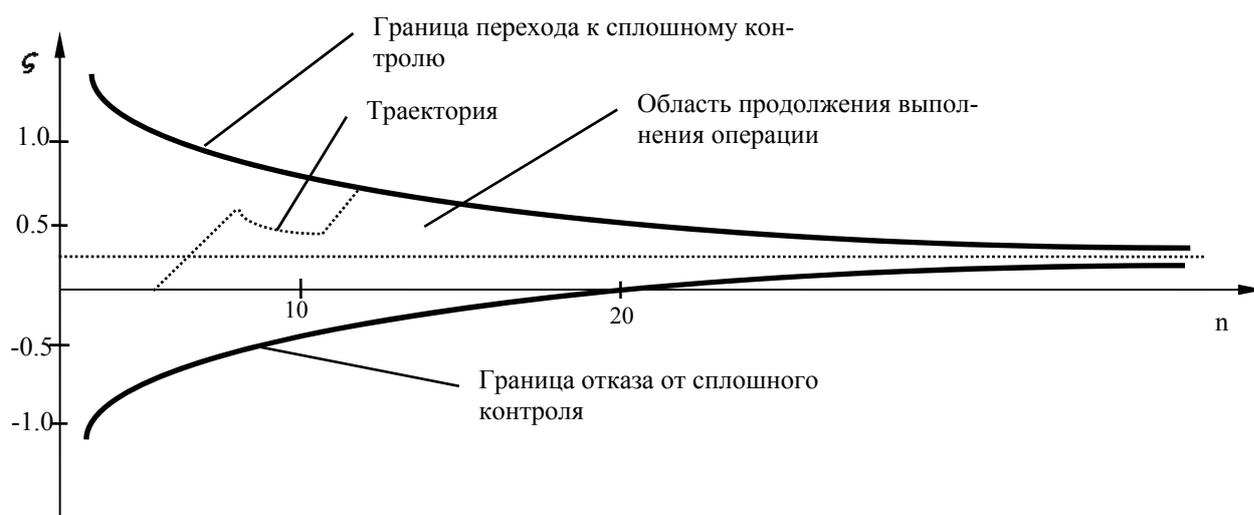


Рисунок 2 – График хода контроля при реализации последовательного анализа

Теперь область продолжения контроля ограничивается уже не прямыми $k = a + cn$ и $k = b + cn$, а гиперболами $\zeta = a/n + c$ и $\zeta = b/n + c$. Гиперболы образуют воронку, ось горловины которой асимптотически (при $n \rightarrow \infty, N \rightarrow \infty$) приближается к прямой $p = c$. Ширина

области продолжения выполнения операции не остается постоянной, а асимптотически все более сужается. При обнаружении неисправного элемента эта линия резко поднимается, а затем медленно опускается до момента обнаружения следующего неисправного элемента. До тех пор, пока линия остается внутри воронки, операция проводится дальше. Если линия касается или пересекает верхнюю или нижнюю границу воронки, то принимается решение о прекращении выполнения операции или ее проведении на элементах группировки. Как следует из графика, представленного на рисунке 2, с растущим числом проконтролированных элементов становится все более вероятным, что линия хода контроля выйдет за пределы становящейся все более узкой воронки, и тем самым будет принято окончательное решение.

Блок-схема реализации данного метода представлена на рисунке 3, при этом Z обозначает поле данных, в котором находится искомое значение. Рассмотрим реализацию данного метода на примере. Допустим имеется группировка объектов подвижного состава в количестве 1000 единиц. У однотипных элементов данной группировки в результате проведения контрольно-диагностической операции контролируется один параметр. В случае, если вероятность нахождения данного параметра в пределах допустимых значений не менее чем 0,9, данный параметр допускается не контролировать. Вероятности ошибок первого и второго рода – не более: $\alpha \leq 0,01$, $\beta \leq 0,01$. Таким образом, в качестве гипотез принимаем

$$\begin{aligned} H_0 : P = P_0 = 0,1; \\ H_1 : P = P_1 = 0,2. \end{aligned} \quad (13)$$

Коэффициенты (8) – (10) будут иметь значения: $a = -5,666$; $b = 5,666$; $c = 0,145$. Последовательно контролируя рассматриваемый параметр у элементов, от дальнейшего контроля отказываемся, если, например, проконтролировано не менее 40 элементов и при этом не выявлено ни одного отклонения параметра от допустимых значений (нижняя граница при этом равна $a + cn = -5,666 + 0,145 \cdot 40 = 0,134$), если в ходе контроля выявлен один случай отклонения

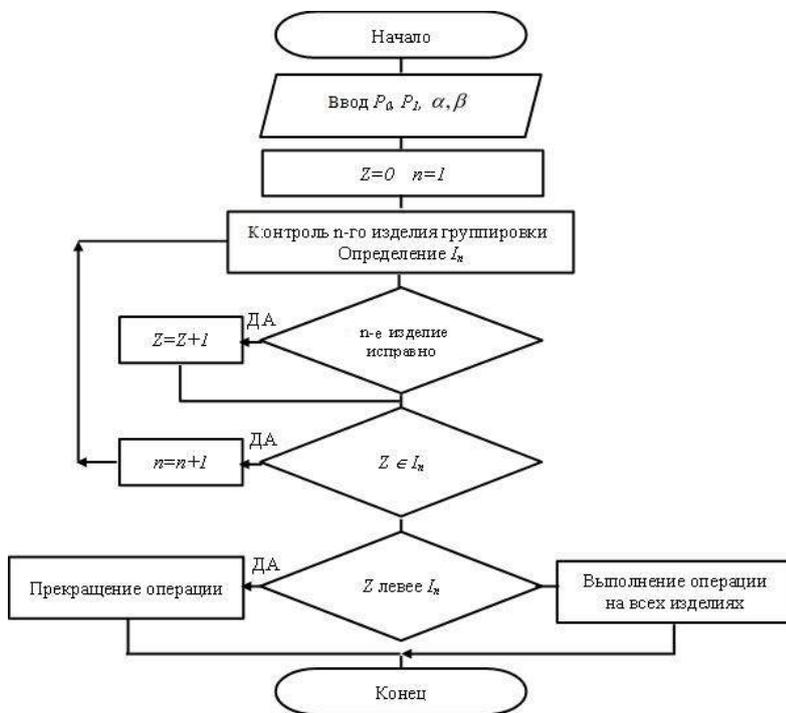


Рисунок 3 – Блок-схема последовательного анализа

параметра от допустимых значений, то от дальнейшего контроля отказываемся, если проконтролировано 46 объектов (нижняя граница при этом равна $a + cn = -5,666 + 0,145 \cdot 46 = 1,004$), выявлено два случая и число проконтролированных объектов 53, три случая и число проконтролированных объектов 60, четыре случая и число проконтролированных объектов 67, пять случаев и число проконтролированных объектов 74 и т. д.

Решение о проведении контроля рассматриваемого параметра на всех элементах группировки принимаем, если проконтролировано, например, 8 элементов и выявлено 7 случаев отклонения, 10 элементов – 8 случаев отклонения, 17 элементов – 9 случаев отклонения и т. д.

Данный подход реализуем и при проведении ремонтных работ на элементах подвижного состава, так как в данном случае также накапливается определенная информация о техническом состоянии. Однородность выборки может быть установлена или исходя из методики проведения конкретных ремонтных работ, или путем проверки статистических гипотез независимости и одинаковой распределенности с помощью соответствующих критериев [3].

Применение последовательного анализа в системе ремонта и содержания подвижного состава закладывает принципы, позволяющие адаптировать систему к состоянию и степени износа, к количественным и качественным характеристикам подвижного состава за счет усиления в ее структуре информационных связей, и, как следствие, дает снижение ресурсоемкости рассматриваемой системы.

Список литературы

1. Барзилович, Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. [Текст] / Е. Ю. Барзилович. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
2. Богданов, Ю. В. Отработка системы эксплуатации РКК [Текст] / Ю. В. Богданов, В. А. Меньшиков. – М.: Космо, 1997. – 384 с.
3. Клячкин, В. Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии [Текст] / В. Н. Клячкин. – М.: Финансы и статистика; Инфра-М, 2009. – 304 с.

References

1. Barzilovich E. Yu. *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh system* (Models of maintenance of the composite systems). Moscow: The higher school, 1982, 231 p.
2. Bogdanov Yu. V., Menshikov V. A., *Otrabotka sistemy ekspluatatsii RKK* (Working off of system of operation of RSC). Moscow: Cosmo, 1997, 384 p.
3. Klyachkin V. N. *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom: komp'iuternye tekhnologii* (Statistical methods in quality management: computer technologies). Moscow: Finance and statistics, INFRA-M, 2009, 304 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белов Александр Анатольевич

Военная академия РВСН им. Петра Великого (ВА РВСН).

ул. Бригадная, д.17, г. Серпухов, Московская область, 142210, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник кафедры «Эксплуатация ракетных комплексов», ВА РВСН.

Тел.: +7 (4967) 72-19-11.

E-mail: belloww@rambler.ru

Ларин Андрей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта, логистики и управления качеством», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: Larinan75@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belov Alexander Anatolyevich

¹Military Academy of SMF named after Peter the Great, (MA SMF).

17, st. Brigadnaya, Serpukhov, Moscow region, 142210, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of the department « Operation of rocket complexes», MA SMF.

Phone: +7 (4967) 72-19-11.

E-mail: belloww@rambler.ru

Larin Andrey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department « Economics of transport, logistics and quality management», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-48.

E-mail: Larinan75@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Белов, А. А. Организация эксплуатационного контроля методом последовательного анализа [Текст] / А. А. Белов, А. Н. Ларин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 4 (28). – С. 134 – 141.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Belov A. A., Larin A. N. Organization of operational control by method of the consecutive analysis. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 134 – 140. (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, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовки *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления 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»

№ 4 (28) 2016

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 28.12.2016.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 28.12.2016.

