

Повышение энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» путем модернизации при заводском ремонте

А. Ш. Мустафин

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

Для цитирования: Мустафин А. Ш. Повышение энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» путем модернизации при заводском ремонте // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 2. — С. 75–91. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-75-91

Аннотация

Цель: Целью настоящего исследования является разработка технических решений по модернизации грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности в режиме тяги. **Методы:** Для решения поставленной задачи применены методы следующих научных дисциплин: теории электрических цепей; динамики твердого тела; статистической обработки больших массивов экспериментальных данных; моделирования теплового режима ТЭД; программно-аппаратного моделирования для исследования работы ТЭД в штатном и энергоэффективном режимах (на основе программного пакета *SimInTech* отечественной разработки). **Результаты:** Разработан комплекс научно обоснованных технических решений по модернизации многодвигательного тягового привода грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности. В результате будет достигнуто сокращение удельного расхода электроэнергии в режиме тяги с обеспечением надежности и работоспособности коллекторных тяговых двигателей. **Практическая значимость** заключается в получении значительно экономического эффекта за счет сокращения потребления электроэнергии на тягу. Установлено, что степень использования установленной мощности грузовых электровозов на линии Лихая — Крымская (профиль I-II и III типа) является неудовлетворительной: в штатном режиме работы тягового электропривода она составляет около 0,22 — для поездов массой 6300 т и 0,12 — для поездов массой 1750 т. За счет применения алгоритма ДАУ расчетным путем доказана возможность существенного повышения энергетической эффективности электровозов. Оценка экономической эффективности составляет 4,78 млн руб. на один электровоз (180 оборотов локомотива в год, при уровне цен 5 руб/кВт · ч).

Ключевые слова: Грузовой электровоз переменного тока, тяговая система, энергетическая эффективность, электромеханические процессы, потери мощности, компьютерное моделирование.

Введение

В «Стратегии развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года» и других нормативных документах сказано, что снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) относится к числу стратегических инициатив в локомотивном комплексе. Отмечено, что доля электроэнергии, затрачиваемой на тягу поездов, составляет около 90 % от всей электрической энергии, потребляемой

холдингом. Поэтому уровень эффективности использования электроэнергии на тягу оказывает ключевое влияние на величину затрат компании на закупку ТЭР, в силу чего предусматривается последовательное снижение удельного расхода электроэнергии на тягу: если уровень 2012 г. принять за 100 %, то к 2030 г. он должен составить 94,1 %.

В ответ на это требование промышленность приступает к производству нового поколения электровозов. Выпущены первые грузовые электровозы 2(3)ЭС5С семейства «Атаман» с асинхронным тяговым приводом, которые позволяют сократить затраты электроэнергии на тягу на 20 % [1]. Это обеспечивается применением новых высокоэффективных алгоритмов управления тяговым приводом (дискретно-адаптивное управление — алгоритм ДАУ [2]), которые в режиме реального времени приводят число работающих ТЭД в соответствие с нагрузкой и тем самым поддерживают оптимальное значение КПД в любых условиях работы электровоза. Необходимо отметить, что алгоритмы ДАУ могут быть применены и на находящихся в эксплуатации двух-, трех- и четырехсекционных грузовых электровозах 2(3,4)ЭС5К семейства «Ермак». В общей сложности на путях ОАО «РЖД» работает около пяти тысяч секций, которые последовательно поступают на средний и капитальный заводской ремонт. В ходе ремонта, кроме восстановления основных эксплуатационных характеристик, представляется целесообразным провести модернизацию, направленную на повышение энергетической эффективности, что обеспечит сокращение удельного расхода электроэнергии в соответствии с показателями, предусмотренными долгосрочными программами ОАО «РЖД».

Грузовые электровозы семейства «Ермак» оснащены коллекторными тяговыми двигателями, что обуславливает ряд дополнительных требований при реализации алгоритма ДАУ. Для выполнения этих требований в ходе модернизации необходимо: 1) внести ряд изменений в программное обеспечение системы управления электровоза; 2) принять меры по обеспечению надежной работы коллекторно-щеточного узла тех ТЭД, которые временно выводятся из тяги; 3) применить регулируемый вспомогательный привод.

В настоящей работе указанные вопросы рассмотрены и решены в комплексе, что позволило получить мультипликативный эффект и сформулировать актуальные, практически значимые предложения. В дальнейшем при получении положительных итогов испытаний модернизированных локомотивов можно будет распространить предлагаемую программу модернизации на весь парк электровозов семейства «Ермак», поступающих на заводской ремонт на предприятиях АО «Желдорремаш», причем с минимальными финансовыми и материальными издержками.

1. Состояние вопроса. Постановка задачи исследования

Проблема недоиспользования доступной мощности локомотивов при легком профиле пути и небольшой скорости движения, для неполновесных и порожних составов, неоднократно поднималась в связи с грузовыми перевозками, поскольку многие участки железных дорог характерны неравномерностью грузопотоков в четном и нечетном направлениях. Анализ публикаций по вопросу повышения энергетической эффективности локомотивов за счет изменения числа работающих тяговых электродвигателей в зависимости от нагрузки [3–8 и др.] показал, что такой подход позволяет значительно сократить удельный расход электроэнергии на тягу.

Вместе с тем для электровозов с коллекторными ТЭД необходимо предусмотреть специальные меры по обеспечению надежной работы коллекторно-щеточного узла. Дополнительная экономия электроэнергии может быть получена при использовании регулируемой принудительной вентиляции.

2. Энергетическая эффективность основных элементов тяговой системы электровоза в различных режимах работы

Был выполнен анализ процессов, протекающих в основных элементах выпрямительной цепи электровоза (трансформатор ОНДЦЭ-4350/25 — преобразователь ВИП-4000М — сглаживающий реактор РС-19-01), и изучено изменение энергетической эффективности этих элементов при работе в различных режимах.

В результате было получено, что общий характер изменения КПД в зависимости от тока нагрузки в целом совпадает с приведенным в [9]. На рис. 1, взятом из [9], показан характер этой зависимости. Как видно, наибольшее значение КПД достигается при значениях тока I_d в пределах $(0,45 \dots 1,0) I_{\text{ном}}$.

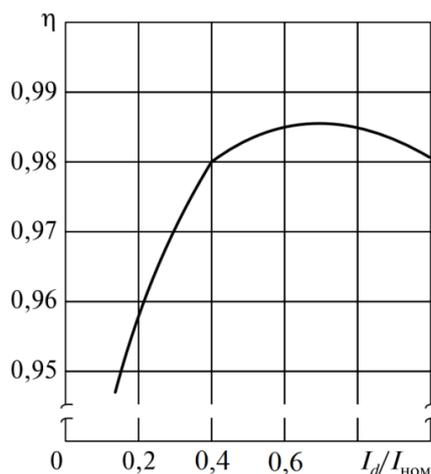


Рис. 1. Изменение КПД выпрямительной цепи [9]:

I_d — среднее значение выпрямленного тока, $I_{\text{ном}}$ — номинальное значение тока

Тяговый двигатель пульсирующего тока серии НБ-514 выполнен для опорно-осевого подвешивания и представляет собой шестиполосную компенсированную электрическую машину, работающую в режиме тяги как двигатель с последовательным возбуждением, а в режиме электрического рекуперативного торможения — как генератор с независимым регулируемым возбуждением и независимой системой вентиляции. Основные технические характеристики ТЭД НБ-514Е, имеющего моторно-осевые подшипники качения, и значения параметров приведены в [10].

Изучению процессов, протекающих в коллекторных тяговых электродвигателях, посвящено значительное количество публикаций [11–13 и др.]. ТЭД является ключевым элементом тягового привода, он представляет собой электромеханический преобразователь, на вход которого поступает электрическая мощность $P_1 = P_{эл}$, тогда как на выходе получаем механическую мощность $P_2 = P_{мех}$, которая затем через редуктор передается на колесную пару. В процессе преобразования часть потребляемой мощности ΔP (потери) расходуется непроизводительно, а именно на нагрев проводников и других элементов конструкции двигателя, преодоление трения в подшипниках и прочее. Баланс мощностей может быть записан в следующем виде:

$$P_1 = P_2 + \Delta P, \quad (1)$$

где $P_1 = P_{эл} = ui_{я}$; $P_2 = P_{мех} = M_{д} \omega$.

Поставим задачу расчетного определения КПД тягового электродвигателя в зависимости не только от значения его полезной мощности P_2 , как это принято в других публикациях, но и в зависимости от значения потребляемой им мощности P_1 . Такая постановка вопроса связана с тем, что при реализации алгоритма дискретно-адаптивного управления [2] в процессе модернизации электровоза при заводском ремонте получение мгновенного значения полезной мощности P_2 вызывает существенные затруднения, так как требует установки дополнительного оборудования (датчика момента) на каждом ТЭД. В то же время определение мгновенного значения потребляемой двигателем электрической мощности P_1 не вызывает затруднений, так как значения тока и напряжения каждого ТЭД поступают в МСУД в штатном варианте комплектации электроники.

Исходя из схемы замещения ТЭД НБ-514Е [10], получаем следующие уравнения процессов в электрических цепях (отметим, что напряжение u является управляющим воздействием):

$$i_{я} = i_{в} + i_{пш}, \quad (2)$$

$$u = C_M \Phi(i_B) \omega + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + R_{\text{в}} i_{\text{в}}, \quad (3)$$

$$L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} = R_{\text{пш}} i_{\text{пш}} - R_{\text{в}} i_{\text{в}}. \quad (4)$$

К ним нужно добавить дифференциальное уравнение вращения якоря:

$$J \frac{d\text{ш}}{dt} = C_M \Phi(i_{\text{в}}) i_{\text{я}} - \Delta M^* - M_{\text{нагр}}. \quad (5)$$

В уравнениях (2)–(5) приняты следующие обозначения: u — питающее напряжение; $i_{\text{я}}$ — ток в якорной цепи; $i_{\text{в}}$ — ток в обмотке возбуждения; $i_{\text{пш}}$ — ток в цепи резистора постоянной шунтировки; $i_{\text{оп}}$ — ток в цепи ослабления поля; $E = C_M \Phi(i_{\text{в}}) \omega$ — противо-ЭДС якоря; $L_{\text{я}}, R_{\text{я}}$ — индуктивность и сопротивление якорной цепи; $L_{\text{в}}, R_{\text{в}}$ — индуктивность и сопротивление обмотки возбуждения; $L_{\text{оп}}, R_{\text{оп}}$ — индуктивность и сопротивление цепи ослабления поля; $R_{\text{пш}}$ — сопротивление постоянной шунтировки; $\omega = 2\pi n/60$ — угловая скорость вращения якоря,

рад/с; J — момент инерции якоря, кг · м²; $C_M = \frac{pN}{2a\rho}$ — машинная постоянная,

Н · м/(Вб · А); $M_{\text{нагр}}$ — момент полезной нагрузки, Нм, вычисляется согласно ПТР как функция скорости, массы и других параметров движения поезда.

«Момент потерь на валу» $\Delta M^* = \Delta P^*/\omega$ представляет собой уменьшение момента двигателя, обусловленное наличием всякого рода потерь мощности.

Уравнения (2)–(5) лежат в основе компьютерной модели динамических электромеханических процессов, протекающих в силовых цепях. Модель построена в среде *SimInTech*, с ее помощью было проведено исследование электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь.

Целью первой серии расчетов являлось подтверждение достоверности результатов, полученных путем компьютерного моделирования, путем сравнения с характеристиками, полученными при квалификационных испытаниях ТЭД. Получено их качественное и количественное совпадение. В частности, значения КПД в часовом режиме различаются на десятые доли процента.

Далее, была получена зависимость КПД двигателя НБ-514Е от потребляемой мощности P_1 (рис. 2) при полном поле возбуждения. Как следует из рис. 2, максимальное значение КПД достигается при $P_1 \geq 350$ кВт, то есть при значениях КИМ, превышающих 0,45 (принимая, что мощность ТЭД в номинальном режиме равна его часовой мощности, то есть 820 кВт). Сопоставляя рис. 1 и 2, видим, что характер зависимостей аналогичен.

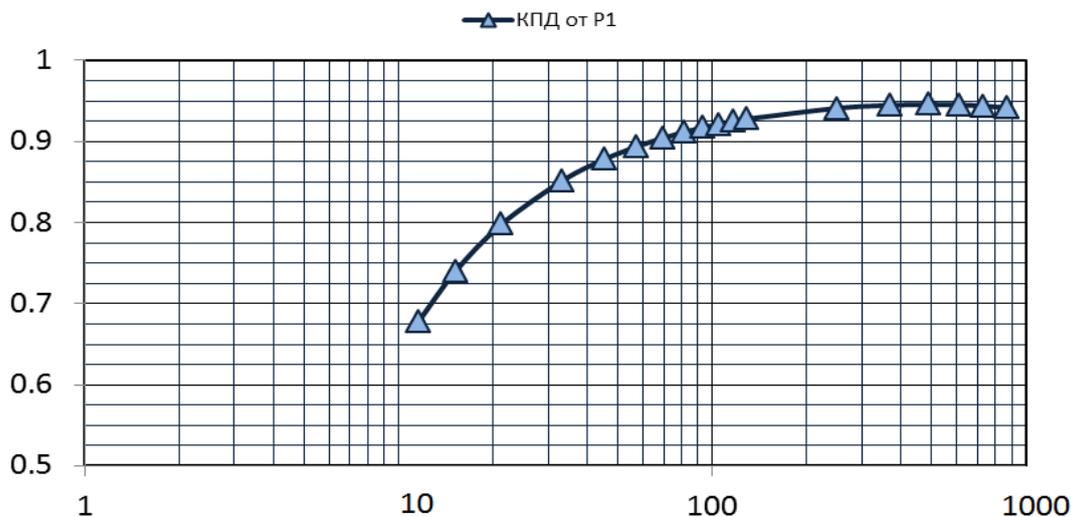


Рис. 2. Зависимость КПД двигателя от потребляемой мощности P_1 , кВт (логарифмическая шкала)

Суммарную мощность, потребляемую тяговым приводом электровоза, обозначим как:

$$P_{1\Sigma} = N_{\text{ТЭД}} \cdot P_1, \quad (6)$$

где $N_{\text{ТЭД}}$ — число работающих ТЭД, P_1 — электрическая мощность, потребляемая одним ТЭД.

В случае, когда электровоз работает с неполной нагрузкой, алгоритм отключает один или несколько ТЭД (то есть уменьшает $N_{\text{ТЭД}}$), при этом P_1 возрастает, поскольку скорость и суммарная потребляемая мощность $P_{1\Sigma}$ должны оставаться постоянными во время переключения ТЭД. Процесс отключения продолжается до тех пор, пока значение КИМ каждого из оставшихся в тяге двигателей не превысит 0,45. Если же нагрузка растет, то отключенные ранее ТЭД возвращаются в тягу.

В результате, независимо от величины нагрузки, тяговый привод электровоза будет работать с максимально возможной энергоэффективностью.

3. Энергопотребление грузовых электровозов и степень использования установленной мощности

Опираясь на [8], представим анализ использования установленной мощности и энергопотребления грузовых электровозов при работе в реальных условиях. Рассмотрим работу грузовых электровозов на маршруте Лихая — Крымская (489 км) и обратно. Профиль от Лихой до Крымской может быть отнесен к I-II и III типам, исключение составляют 30 км в отрогах Восточного Донбасса.

ТАБЛИЦА 1. Оценки основных параметров энергопотребления

	Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/изм	Расход электроэнергии за поездку, кВт · ч	Сокращение расхода электроэнергии за год, кВт · ч
<i>Прямое направление, 6300 т</i>			
Штатный режим	91	28 034	477 540
Энергоэффективный режим	82	25 381	
<i>Обратное направление, 1750 т</i>			
Штатный режим	223	19 083	478 800
Энергоэффективный режим	192	16 423	

В прямом направлении масса состава 6300 т (груженный), в обратном — 1750 т (порожний). Изменение скорости принималось согласно записям тягово-энергетической лаборатории (ТЭЛ) производства РГУПС.

Компьютерная модель движения поезда была создана в программном комплексе «Универсальный Механизм», модуль «Train», воспроизводились как штатный режим работы (все ТЭД постоянно в тяге), так и энергоэффективный. Получено, что степень использования установленной мощности грузовых электровозов на линии Лихая — Крымская — Лихая является неудовлетворительной: в штатном режиме работы тягового электропривода она составляет в среднем 22 % для поездов массой 6300 т и 12 % — для поездов массой 1750 т.

В табл. 1 представлены полученные оценки основных параметров энергопотребления в штатном и энергоэффективном режимах (на один электровоз ЗЭС5К).

Следовательно, при работе на линии Лихая — Крымская — Лихая потребление электрической энергии одним электровозом, при 180 оборотах локомотива за год, сократится суммарно на $477\,540 + 478\,800 = 956\,340$ кВт · ч, то есть на 11,3 %, по сравнению с годовым расходом при работе электровоза в штатном варианте.

Окончательно получаем, что при работе на линии Лихая — Крымская — Лихая и отпускной цене на электроэнергию на уровне 5 руб/кВт · ч годовая экономия составит 4,78 млн руб. на один электровоз.

4. Моделирование теплового режима тягового электрооборудования при наличии регулируемой принудительной вентиляции

Как было отмечено выше, при работе в энергоэффективном режиме часть двигателей временно выводится из режима тяги. Поэтому целесообразно на это время переводить соответствующие мотор-вентиляторы на пониженную частоту питания, что даст дополнительную экономию энергии. Перевод на пониженную частоту должен производиться только после понижения температуры ниже допустимого предела (применяется изоляция класса F). При этом должно

обеспечиваться необходимое давление воздуха в корпусах двигателей во избежание попадания пыли, влаги и т. п.

Построена модель тепловых режимов элементов тяговой цепи электровоза на основе уравнения теплового баланса. Термическая постоянная времени нагрева рассчитана с учетом фактической производительности вентиляторов охлаждения, а установившаяся температура перегрева — с учетом мощности тепловыделения, в функции тока и потерь тепла, зависящих от производительности вентиляторов. Разработана методика определения текущей температуры перегрева силовых элементов тяговой цепи вследствие изменения тока якоря и производительности вентиляторов [14].

Предложена функциональная схема регулируемой системы вентиляции, предусматривающая двухскоростной режим: с номинальной скоростью и с пониженной скоростью вращения мотор-вентиляторов. При этом вентиляция работающих ТЭД осуществляется в полном объеме, а для отключенных — обеспечивается около трети номинальной подачи, чтобы обеспечить необходимое давление воздуха в корпусах двигателей.

В настоящее время изготовлена и прошла испытания опытная установка, обеспечивающая двухскоростную работу мотор-вентиляторов.

5. Обеспечение надежности и работоспособности коллекторно-щеточного узла за счет применения электропроводящей смазки

Применительно к коллекторным ТЭД «слабым звеном» является скользящий контакт щетка — коллектор в силовой электрической цепи, через который проходит ток силой в сотни ампер. Более 30 % отказов локомотивов приходится на тяговые электродвигатели, причем более 15 % из них составляют отказы по скользящему контакту. Щетки требуют периодической замены, соответствующая операция является трудоемкой и социально малопривлекательной для технического персонала.

При работе ТЭД в режиме тяги на поверхности коллектора образуется политура — контактная пленка из окиси меди с примесью частиц щеточного материала, которая имеет высокую электропроводность и низкий коэффициент трения. Если же ТЭД на длительное время выведен из тяги, то есть когда контакт обесточен, то политура разрушается, что приводит к перегреву с последующим выходом двигателя из строя. При работе в энергоэффективном режиме ТЭД периодически отключаются, поэтому должны быть приняты особые меры по защите коллекторно-щеточного узла.

Одним из подходов, существенно улучшающих условия работы скользящего контакта, является применение электропроводящей смазки, которая закладывается в разрез щетки [15, 16]. Имеется положительный опыт массового применения

электропроводящей смазки в КЩУ тяговых двигателей, относящийся к периоду 1986–1990 гг.

Изготовлена опытная партия электропроводящей смазки. Проведены испытания на заводском нагрузочном стенде, по итогам которых можно сделать вывод о том, что предлагаемая смазка обеспечивает нормальные условия для КЩУ как под нагрузкой, так и на холостом ходу в обесточенном состоянии на время до 40 минут. При наличии заинтересованности со стороны предприятий локомотивного хозяйства возможна организация производства и поставка электропроводящей смазки.

6. Применение программно-аппаратного моделирования для исследования работы электровоза в энергоэффективном режиме

Программно-аппаратный симулятор тягового электропривода выполнен на базе персонального компьютера, соединенного с джойстиком (рис. 3) [17]. Его основой являются компьютерная модель электромеханических процессов, описание которой дано выше в п. 2, и алгоритм энергоэффективного управления, представляющего собой элемент искусственного интеллекта в системе управления тяговой единицей. В отдельном корпусе находится плата на базе микроконтроллера STM32F405RGT6.

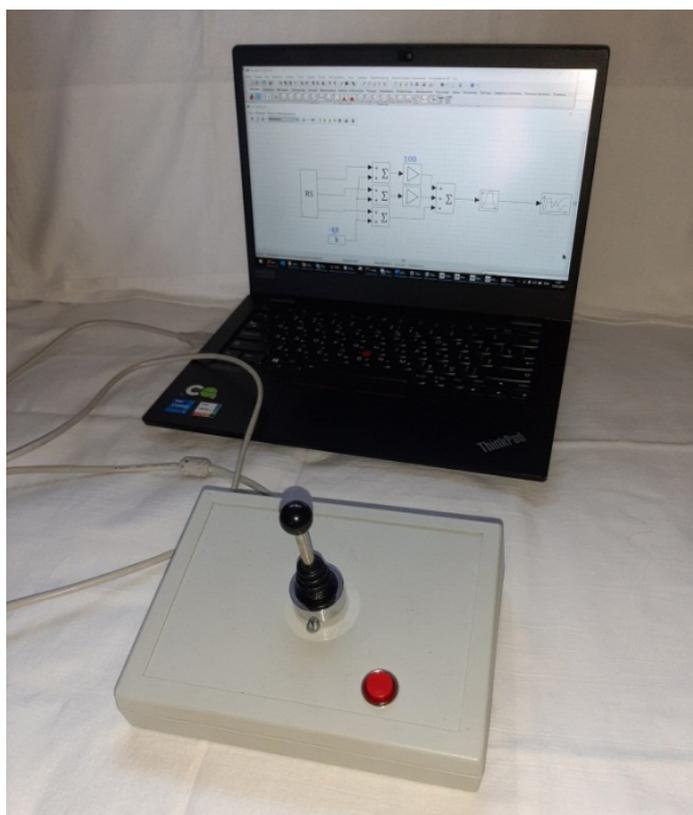


Рис. 3. Программно-аппаратный симулятор

ТАБЛИЦА 2. Управляющие воздействия

t, c	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
U, B	40	783	783	850	850	927	927	1038	1038	1198	1198	1038	1038
$N_{\text{ТЭД}}$	12		10		8		6		4		6		

Изменение числа работающих тяговых двигателей $N_{\text{ТЭД}}$ задается клавишами «+» и «-», управляющее воздействие (изменение напряжения) задается углом наклона рукоятки. Красная кнопка на пульте реализует сброс.

Приведем здесь результаты расчета, целью которого являлась проверка адекватности получаемых результатов (напряжение, ток, частота вращения, моменты, мощности и т. д.), которые получаются при реализации управляющих воздействий машиниста (табл. 2).

На рис. 4 показано изменение: *a)* напряжения, В, *б)* тока, А и *в)* электрической мощности, Вт, потребляемой одним ТЭД, с течением времени.

На рис. 5 показано изменение: *a)* частоты вращения n , об/мин, *б)* момента на валу $M_{\text{д}}$, Нм и *в)* механической мощности, Вт, на валу одного ТЭД, с течением времени.

Обратим внимание на тот факт, что при выбранном варианте управления частота вращения ТЭД остается постоянной (см. рис. 5, *a*), ей соответствует скорость электровоза 70,4 км/ч.

В данном расчете мощность $P_{1\Sigma}$ остается постоянной, равной 2730 кВт. На рис. 6 показано полученное изменение коэффициента использования мощности γ по мере реализации управляющих воздействий.

Таким образом получаем, что:

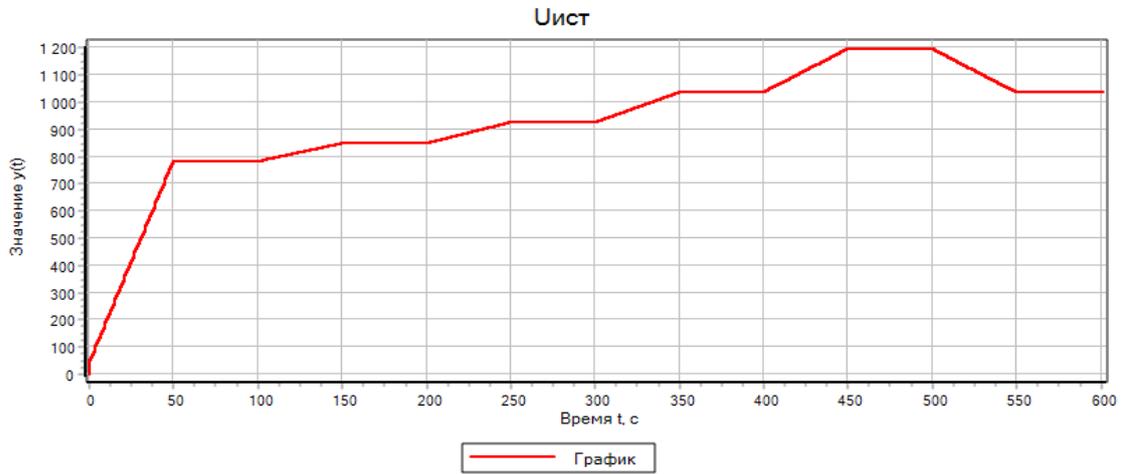
- 1) $\gamma = 0,259$ при $N_{\text{ТЭД}} = 12, U = 783$ В;
- 2) $\gamma = 0,314$ при $N_{\text{ТЭД}} = 10, U = 850$ В;
- 3) $\gamma = 0,392$ при $N_{\text{ТЭД}} = 8, U = 927$ В;
- 4) $\gamma = 0,525$ при $N_{\text{ТЭД}} = 6, U = 1038$ В;
- 5) $\gamma = 0,790$ при $N_{\text{ТЭД}} = 4, U = 1198$ В.

Как видим, энергоэффективный режим ($0,45 \leq \gamma \leq 1,0$) имеет место в последних двух случаях, когда число работающих ТЭД равно 6 или 4.

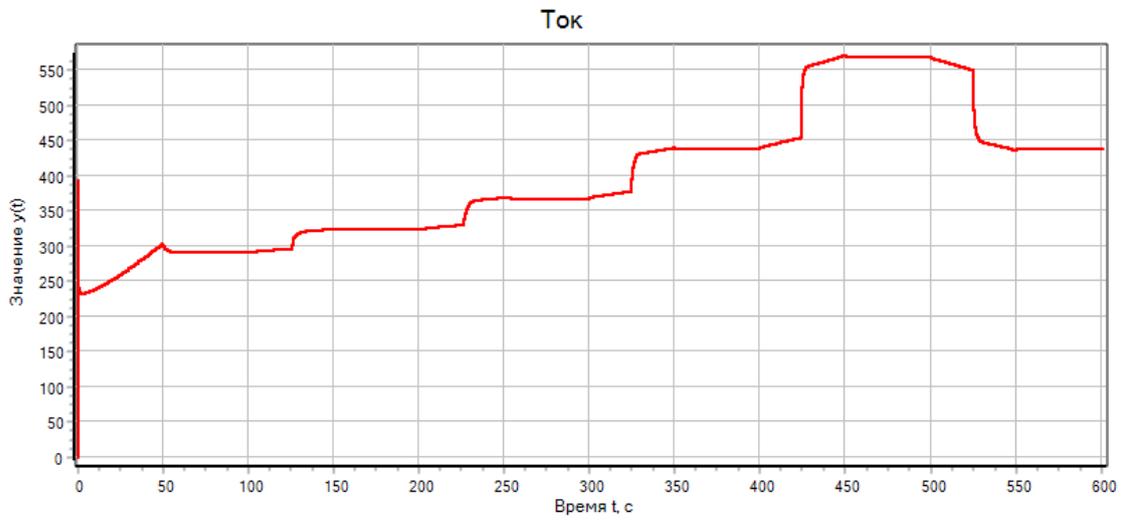
Заключение. Основные выводы

Представлен комплекс научно обоснованных технических решений по модернизации многодвигательного тягового привода грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности. В результате будет достигнуто сокращение удельного расхода электроэнергии в режиме тяги с обеспечением надежности и работоспособности коллекторных тяговых двигателей.

а



б



в

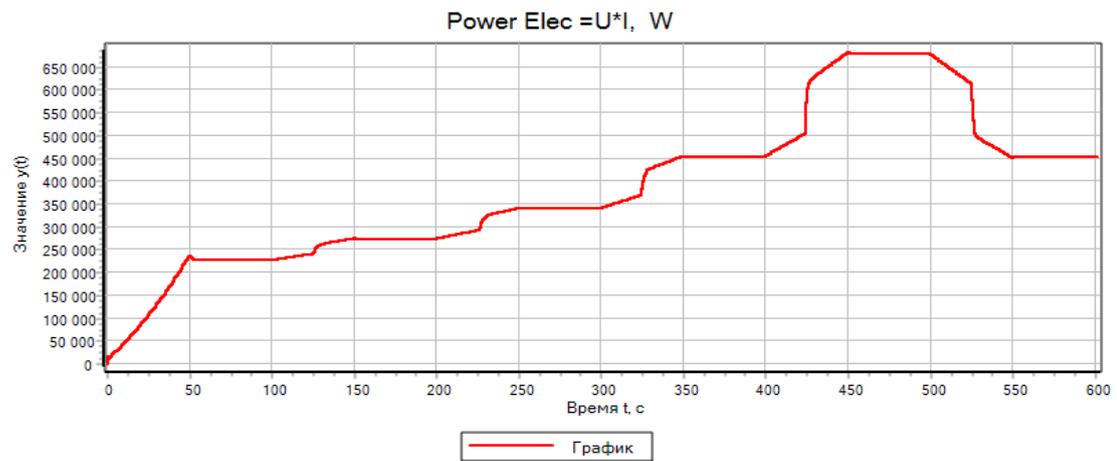


Рис. 4. Изменение:
а — напряжения, В; б — тока, А; в — электрической мощности P_1 , Вт,
потребляемой одним ТЭД

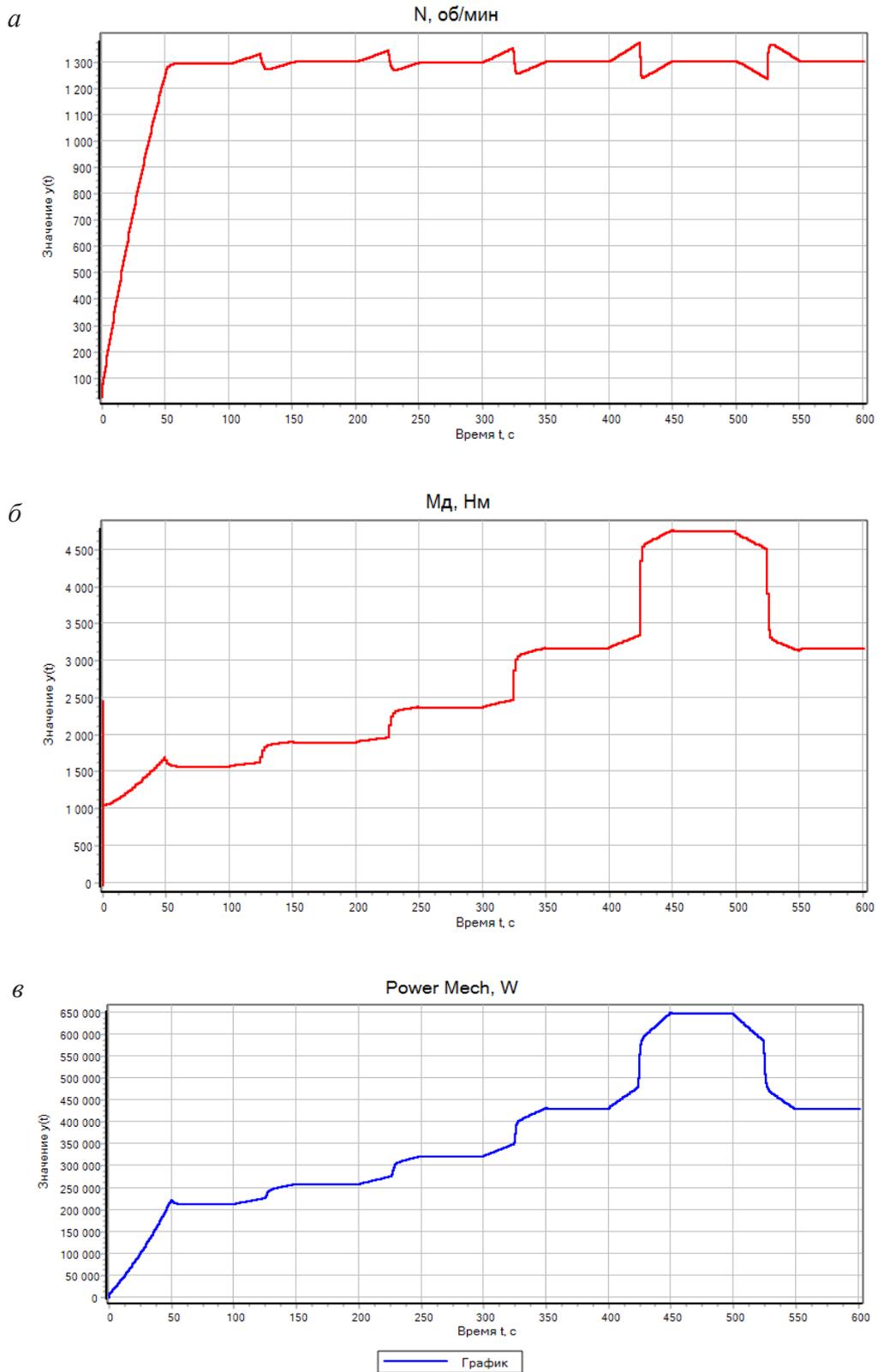


Рис. 5. Изменение:
 а — частоты вращения n , об/мин; б — момента на валу M_d , Нм;
 в — механической мощности, Вт, на валу одного ТЭД, с течением времени

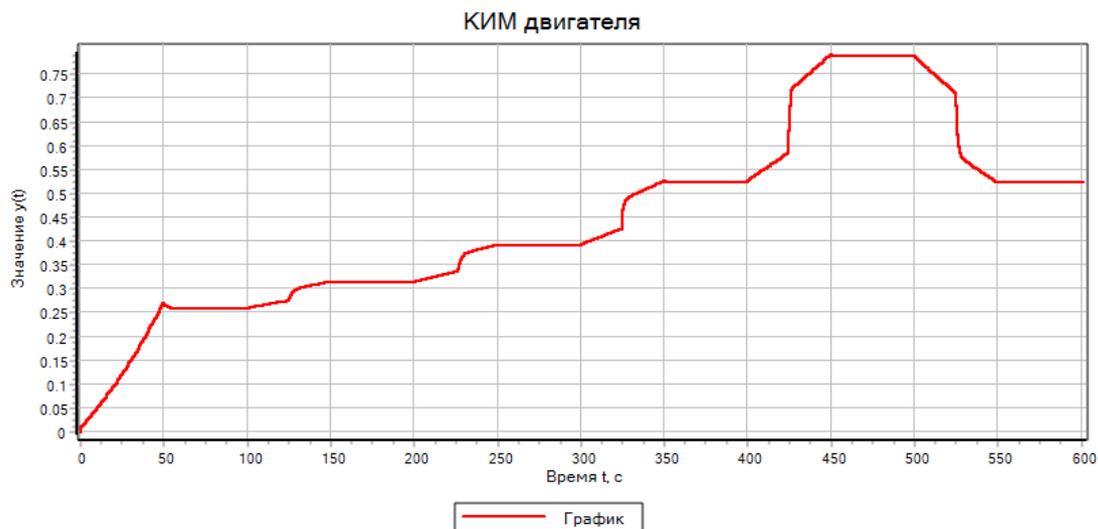


Рис. 6. Изменение коэффициента использования мощности ТЭД

Библиографический список

1. Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // Техника железных дорог. — 2020. — № 1(49). — С. 10–13.
2. Андрющенко А. А. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов, К. П. Солтус // Патент RU 2617857; приоритет от 15.09.2015. — Бюллетень № 13. — Опубликовано 28.04.2017.
3. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: Изд. дом МИСиС, 2012. — 620 с.
4. Пыров А. Е. Современные системы управления электровозами / А. Е. Пыров // Железнодорожный транспорт. — 2005. — № 2. — С. 64–66.
5. Бабич В. М. Повышение энергетической эффективности электровозов / В. М. Бабич. — Омская гос. акад. путей сообщения, 1995. — 112 с.
6. Заручейский А. В. Анализ научных подходов к повышению эффективности использования грузовых электровозов / А. В. Заручейский, Р. В. Мурзин, В. А. Кучумов, Н. Б. Никифорова // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — 2014. — № 1 — С. 37–41.
7. Никончук И. Н. К вопросу повышения эксплуатационной энергетической эффективности работы восьмиосных пассажирских электровозов постоянного тока / И. Н. Никончук // Вестник ВНИИЖТ. — 2020. — Т. 79. — № 6. С. 373–382.
8. Зарифьян А. А. Анализ использования мощности грузовых электровозов и возможность сокращения энергопотребления за счет модернизации при заводском ремонте / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник РГУПС. — 2021. — № 1(81). — С. 20–29. — DOI: 10.46973/0201–727X_2021_1_20.

9. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника / А. Т. Бурков. — Электронная преобразовательная техника. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. — Т. 2. — 307 с.

10. Зарифьян А. А. Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник РГУПС. — № 3. — 2021. — С. 81–89. — DOI: 10.46973/0201-727X 2021 3 81.

11. Алексеев А. Е. Тяговые электродвигатели / А. Е. Алексеев. — М.: Транжелдориздат МПС, 1951. — 484 с.

12. Ягуп В. Г. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. — 2017. — Вип. 170. — С. 20–31.

13. Литовченко В. В. Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя / В. В. Литовченко, Д. В. Кокорин, Д. В. Назаров // Электротехника. — 2014. — № 8. — С. 22–29.

14. Зарифьян А. А. Моделирование теплового режима тягового электрооборудования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции / А. А. Зарифьян, В. В. Михайлов, А. Ш. Мустафин, Н. Р. Тептиков // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2019. — № 3. — С. 17–21.

15. Евдокимов Ю. А. Устройство токосъема для электрической машины / Ю. А. Евдокимов, Н. К. Мышкин, В. Г. Козубенко, В. М. Коротков // А.с. СССР SU 1403150. Приоритет от 24.02.1986. — URL: <https://patents.su/1988/page/846>.

16. Колесников В. И. Устройство токосъема для электрической машины / В. И. Колесников, В. А. Соломин, Н. А. Чернявская // Патент РФ RU 2178225. Приоритет от 20.01.1999. — URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2178225C2_20020110.

17. Зарифьян А. А. Программно-аппаратное моделирование электромеханических процессов в тяговом приводе электровоза при поосном регулировании силы тяги / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин, Т. З. Талахадзе // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 4(53). — С. 48–52.

Дата поступления: 18.04.2022

Решение о публикации: 29.04.2022

Контактная информация:

МУСТАФИН Адель Шамильевич — соискатель ученой степени; MustafinASh@locotech.ru

Energetic Efficiency Rise of “Yermak” Family Freight Electric Locomotives by Modernization Approach During Plant Repairs

A. Sh. Mustafin

Rostov State Transport University, 2, Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sqr., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Mustafin A. Sh. Energetic Efficiency Rise of “Yermak” Family Freight Electric Locomotives by Modernization Approach During Plant Repairs. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 2, pp. 75–91. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-75-91

Summary

Purpose: The present research purpose is the development of technical solutions on freight electric locomotives of “Yermak” family in the course of plant repairs aimed to energetic efficiency rise in a traction mode. **Methods:** To settle the stated task we applied methods of the following scientific disciplines: electric circuit theory, solid body dynamics, statistical processing of experimental data big arrays; thermal mode TED modeling; programming-apparatus modeling for research of TED work in regular and energy-effective modes (in program package *SimInTech* basis of domestic creation). **Results:** We’ve developed scientifically substantiated technical solutions on modernization of multi-motor traction drive of “Yermak” family freight electric locomotives in the course of plant repairs, aimed to energetic effectiveness rise. As a result, there will be achieved the cut of electric energy specific consumption in a traction mode with provision of collector traction motor reliability and working efficiency. **Practical importance:** Obtaining great economical effect at the expense of cut of energy consumption for a traction. It’s been established that the degree of the use of established capacity of freight electric locomotives on Likhaya-Krimskaya line (profile of 1st-2nd and 3rd type) is unsatisfactory: in traction motor regular working mode, it’s about 0.22 — for trains of 6300 tone mass and 0.12 — for ones with 1750 tone mass. At the expense of DAU algorithm use, by calculating, it’s been proved the possibility of electric locomotive energetic efficiency rise. Economic efficiency is 4.78 million Russian rubles per 1 electric locomotive (180 turns of locomotive per year at price level of 5 R rubles/kW·h.).

Keywords: Freight alternating current electric locomotive, traction system, energetic efficiency, electromechanical processes, capacity losses, computer modeling.

References

1. Elektrovozy 2ES5S i 3ES5S: asinkhronnaya tyaga pod flagom Rossii [Electric locomotives 2ES5S and 3ES5S: asynchronous traction under the flag of Russia]. *Tekhnika zheleznikh dorog* [Railway Engineering]. 2020, I. 1(49), pp. 10–13. (In Russian)

2. Andryushchenko A. A., Zarif’yan A. A., Orlov Yu. A., Soltus K. P. Sposob upravleniya energeticheskoy effektivnost’yu lokomotiva pri rabote s nepolnoy nagruzkoy [A way to control the energy efficiency of a locomotive when working with partial load]. *Patent RU 2617857; prioritet ot 15.09.2015 — Byulleten’ № 13 — Opublikovano 28.04.2017* [Patent RU 2617857; priority dated 09/15/2015 — Bulletin No. 13 — Published on 04/28/2017]. (In Russian)

3. Gapanovich V. A. *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow: MISiS Publ., 2012. 620 p. (In Russian)

4. Pyrov A. E. Sovremennyye sistemy upravleniya elektrovozami [Modern control systems for electric locomotives]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2005, I. 2, pp. 64–66. (In Russian)
5. Babich V. M. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektrovozov [Improving the energy efficiency of electric locomotives]. *Omskaya gos. akad. putey soobshcheniya* [Omsk state. acad. ways of communication]. 1995. 112 p. (In Russian)
6. Zarucheykiy A. V. Analiz nauchnykh podkhodov k povysheniyu effektivnosti is-pol'zovaniya gruzovykh elektrovozov [Analysis of scientific approaches to improving the efficiency of the use of freight electric locomotives]. *Byulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways]. 2014, I. 1, pp. 37–41. (In Russian)
7. Nikonchuk I. N. K voprosu povysheniya ekspluatatsionnoy energeticheskoy effektivnosti raboty vos'miosnykh passazhirskikh elektrovozov postoyannogo toka [On the issue of improving the operational energy efficiency of the operation of eight-axle passenger electric locomotives of direct current]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 2020, vol. 79, I. 6, pp. 373–382. (In Russian)
8. Zarif'yan A. A. Analiz ispol'zovaniya moshchnosti gruzovykh elektrovozov i vozmozhnost' sokrashcheniya energopotrebleniya za schet modernizatsii pri zavodskom remonte [Analysis of the use of power of freight electric locomotives and the possibility of reducing energy consumption due to modernization during factory repairs]. *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS]. 2021, I. 1(81), pp. 20–29. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_20. (In Russian)
9. Burkov A. T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and converting technology]. *Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Electronic converter technology]. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2015, vol. 2, 307 p. (In Russian)
10. Zarif'yan A. A. Izuchenie elektromekhanicheskikh protsessov v kollektornom tyagovom dvigatele s uchetom poter' [Study of electromechanical processes in a collector traction motor with losses taken into account]. *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS]. I. 3, 2021, pp. 81–89. DOI 10.46973/0201-727Kh 2021 3 81. (In Russian)
11. Alekseev A. E. *Tyagovye elektrodvigateli* [Traction motors]. Moscow: Transzheldorizdat MPS Publ., 1951. 484 p. (In Russian)
12. Yagup V. G., Krasnov A. A. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivoda elektrovoza 2EL5 v rezhime tyagi [Mathematical modeling of the electric drive of an electric locomotive 2EL5 in traction mode]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain's'kogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transport* [Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport]. 2017, vol. 170, pp. 20–31. (In Russian)
13. Litovchenko V. V., Kokorin D. V., Nazarov D. V. Matematicheskaya model' kollektornogo tyagovogo elektrodvigatelya [Mathematical model of a collector traction motor]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. 2014, I. 8, pp. 22–29. (In Russian)
14. Zarif'yan A. A. Modelirovanie teplovogo rezhima tyagovogo elektrooborudovaniya elektrovozov pri nalichii reguliruemoy prinuditel'noy ventilyatsii [Modeling of the thermal regime of

traction electrical equipment of electric locomotives in the presence of adjustable forced ventilation]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2019, I. 3, pp. 17–21. (In Russian)

15. Evdokimov Yu. A., Myshkin N. K., Kozubenko V. G., Korotkov V. M. Ustroystvo tokos'ema dlya elektricheskoy mashiny [Current collection device for an electric machine]. *A.s. SSSR SU 1403150. Prioritet ot 24.02.1986* [A.S. USSR SU 1403150. Priority dated February 24, 1986]. Available at: <https://patents.su/1988/page/846>. (In Russian)

16. Kolesnikov V. I., Solomin V. A., Chernyavskaya N. A. Ustroystvo tokos'ema dlya elektricheskoy mashiny [Current collection device for an electric machine]. *Patent RF RU 2178225/ Prioritet ot 20.01.1999* [RF patent RU 2178225/ Priority dated 01.20.1999]. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2178225C2_20020110. (In Russian)

17. Zarif'yan A. A. Programmno-apparatnoe modelirovanie elektromekhanicheskikh protsessov v tyagovom privode elektrovoza pri poosnom regulirovanii sily tyagi [Software and hardware modeling of electromechanical processes in the traction drive of an electric locomotive with axial regulation of the traction force]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State University of Communications]. 2020, I. 4(53), pp. 48–52. (In Russian)

Received: April 18, 2022

Accepted: April 29, 2022

Author's information:

Adel S. MUSTAFIN — Postgraduate Student; MustafinASh@locotech.ru