

## ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 629.423.1

### Сокращение расхода электроэнергии грузовыми магистральными электровозами 2(3)ЭС5С при работе в энергоэффективном режиме по итогам эксплуатационных испытаний

А. А. Зарифьян<sup>1</sup>, М. А. Шрайбер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ТМХ Инжиниринг», Российская Федерация, 141009, Московская обл., Мытищи, ул. Колонцова, 4

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Зарифьян А. А., Шрайбер М. А. Сокращение расхода электроэнергии грузовыми магистральными электровозами 2(3)ЭС5С при работе в энергоэффективном режиме по итогам эксплуатационных испытаний // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 7–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-7-23

#### Аннотация

**Цель:** Дать оценку сокращения удельного расхода электрической энергии грузовыми магистральными электровозами 2(3)ЭС5С при работе в энергоэффективном режиме (авторегулирования скорости в сочетании с дискретно-адаптивным отключением/подключением ТЭД в зависимости от мгновенной нагрузки), полученного по итогам эксплуатационных испытаний. **Методы:** Анализ массивов записей бортового регистратора позволил установить характер зависимости КПД электровоза от степени использования его мощности. Разработан и запатентован способ управления КПД многодвигательного тягового электропривода в режиме тяги. Компьютерное моделирование дало возможность получить предварительную оценку повышения энергетической эффективности. Блок автоматического регулятора скорости построен методами теории конечных автоматов. Предложенные изменения, направленные на повышение энергоэффективности локомотива, внесены в систему управления верхнего уровня. Итоговые оценки по энергопотреблению получены в ходе эксплуатационных испытаний. **Результаты:** Представлен анализ результатов, полученных в ходе двух поездок с поездами массой около 7 тыс. тонн по участку с холмистым профилем длиной 108 км. При прочих равных условиях, во второй поездке, при работе электровоза в энергоэффективном режиме (дискретно-адаптивное управление числом работающих тяговых двигателей в сочетании с автоматическим регулированием скорости) достигнуто снижение удельного расхода электроэнергии на тягу на 25 % по сравнению с первой поездкой, когда постоянно работали все 12 тяговых двигателей. **Практическая значимость:** Долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» предусматривает последовательное снижение затрат на электроэнергию, которая является покупаемой (потребляемой) продукцией. В том числе намечена оптимизация по такому направлению, как снижение удельного потребления электроэнергии и топлива на тягу поездов.

**Ключевые слова:** Грузовой магистральный электровоз, эксплуатационные испытания, дискретно-адаптивное управление тягой, автоматический регулятор скорости, сокращение удельного расхода электрической энергии.

## Введение

В Долгосрочной программе развития ОАО «Российские железные дороги» [1] отмечается, что рост грузооборота к 2025 г. потребует увеличения объема потребления электроэнергии по базовому сценарию на 13 % к уровню 2018 г., а по оптимистичному сценарию — на 22 %. Наряду с этим прогнозируется ежегодный рост тарифов на электроэнергию. Из сказанного вытекает насущная необходимость снижения удельного потребления электрической энергии на тягу поездов. Поставлена задача сокращения удельного расхода электроэнергии со 102,2 кВт·ч/изм в 2018 г. до 100,2 кВт·ч/изм к 2025 г.

Вопросы повышения энергетической эффективности пассажирских электровазов ЭП20 с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока были рассмотрены в [2] на основе анализа записей бортового регистратора. Разработанный способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой и соответствующий алгоритм опубликованы в [3]. Методы компьютерного моделирования позволили получить оценку повышения энергетической эффективности электроваза при использовании указанного алгоритма.

Что касается грузовых магистральных электровазов, работа которых характеризуется большим диапазоном изменения веса поезда, соответствующие вопросы изучены в [4, 5].

Вопросы повышения энергетической эффективности локомотивной тяги постоянно находятся в центре внимания ОАО «РЖД» [6]. В настоящей статье представлен анализ показателей энергетической эффективности новых грузовых магистральных электровазов 2(3)ЭС5С, оснащенных новой системой управления асинхронным тяговым приводом. Приводится сопоставление значений удельного расхода электрической энергии на тягу, полученных по итогам эксплуатационных испытаний, при работе электровазов: 1) в штатном режиме, когда все ТЭД постоянно находятся в тяге, и 2) в энергоэффективном режиме (отключение/подключение ТЭД в зависимости от нагрузки в сочетании с авторегулированием скорости).

### 1. Тяговый электропривод и особенности системы управления

Грузовой магистральный электроваз переменного тока 2ЭС5С «Атаман» [7, 8] разработан на базе электровазов 2ЭС5 «Скиф» и 2ЭС5К «Ермак», а электроваз 3ЭС5С представляет собой его трехсекционную модификацию (добавлена бустерная секция). Электровазы оснащены асинхронным тяговым приводом, мощность одного ТЭД в номинальном (продолжительном) режиме равна  $P_{\text{ТЭД}} = 1050$  кВт. Основным отличием от электроваза 2ЭС5 является применение силового и вспомогательного оборудования (трансформатор, тяговый преобразователь, асинхронные тяговые электродвигатели и т. д.) отечественного производства.

Принципиальная схема электрических цепей одной секции электровоза 2(3) ЭС5С приведена в [7]. Механическая часть электровоза 2ЭС5С, а также тормозная система и привод вспомогательных машин в основном унифицированы с электровозами семейства «Ермак».

Электровоз оборудован системой поосного управления тягой и может работать в дискретно-адаптивном режиме [4] (отключение/подключение тяговых двигателей в зависимости от нагрузки) в сочетании с автоматическим регулятором скорости [9], построенным методами теории конечных автоматов. Система управления тягой и все необходимое программное обеспечение являются оригинальными разработками.

## 2. Показатели энергетической эффективности

Энергетическая эффективность электровоза характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) и коэффициентом использования мощности (КИМ), а также удельным расходом электроэнергии.

Мгновенное значение КПД электровоза  $\eta$  равно:

$$\eta = P_{\text{пол}} / P_{\text{потр}} = P_{\text{т}} / (P_{\text{т}} + P_{\text{п}} + P_{\text{сн}}), \quad (1)$$

где  $P_{\text{пол}}$  — полезная мощность, кВт;

$P_{\text{потр}}$  — потребляемая мощность, кВт;

$P_{\text{т}} = P_{\text{пол}}$  — мощность на тягу поезда (касательная мощность), кВт;

$P_{\text{п}}$  — мощность потерь, кВт;

$P_{\text{сн}}$  — мощность, затрачиваемая на собственные нужды, кВт.

Касательная мощность электровоза (мощность на тягу поезда)  $P_{\text{т}}$ , кВт, равна:

$$P_{\text{т}} = F_{\text{т}} \cdot V, \quad (2)$$

где  $F_{\text{т}}$  — касательная сила тяги электровоза, кН;

$V$  — скорость движения, м/с. Если скорость  $V$  взята в км/ч, то мощность на тягу будет вычисляться как  $P_{\text{т}} = F_{\text{т}} \cdot V / 3,6$ .

Необходимо различать КПД локомотива как силовой установки, работающей в стационарном режиме (именно это значение указывается в технической документации), и КПД эксплуатационный, который зависит от времени работы локомотива в различных режимах при движении поезда и от расхода энергии на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок [10].

Коэффициент использования мощности  $\gamma$  (мгновенное значение) представляет собой отношение мощности  $P_{\text{т}}$ , реализуемой локомотивом, к его номинальной мощности  $P_{\text{ном}}$ :

$$\gamma = P_T / P_{\text{ном}}. \quad (3)$$

Отметим, что  $P_{\text{ном}}$  в (3) равна произведению мощности одного ТЭД в продолжительном режиме на число работающих в данный момент ТЭД:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ТЭД}} \cdot N_{\text{ТЭД}}. \quad (4)$$

Энергия, потребленная из КС за время работы в режиме тяги (то есть при  $F_T > 0$ ), кДж (1 кДж = 1/3600 кВт·ч):

$$E_{\text{потр}} = \int P_{\text{потр}} dt. \quad (5)$$

Работа на тягу поезда, кДж:

$$A_T = \int P_T dt = \int F_T \cdot V dt. \quad (6)$$

Среднее значение КПД за время работы в режиме тяги:

$$\eta_{\text{сред}} = A_T / E_{\text{потр}}. \quad (7)$$

Удельный расход электроэнергии на тягу (среднее значение за время работы в режиме тяги), кВт·ч/изм:

$$a_{\text{сред}} = (E_{\text{потр}} / m \cdot S) \cdot 10^4, \quad (8)$$

где  $m$  — масса состава, т;

$S$  — путь, км.

### 3. Зависимость КПД от КИМ и алгоритм дискретно-адаптивного управления

При помощи бортовых регистраторов, установленных на электровозах ЭП20, 2ЭС5 и 2(3)ЭС5С, оснащенных асинхронным тяговым приводом, были получены массивы экспериментальных данных. Анализ показал, что КПД электровоза  $\eta$  в режиме тяги существенно зависит от мощности  $P_T$ .

Статистическая обработка массивов позволила получить зависимость следующего вида [3]:

$$\eta = \eta(P_T) = P_T / (\alpha P_T + \beta). \quad (9)$$

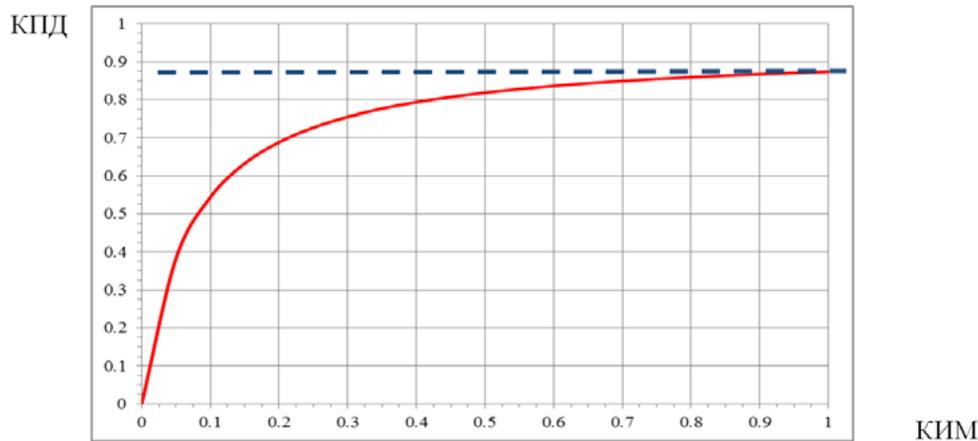


Рис. 1. Зависимость КПД от КИМ (красная линия), номинальное значение КПД (синяя пунктирная линия)

В частности, для электровоза 2ЭС5С коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  равны (с доверительным интервалом 0,95):

$$\alpha = 1,055 (1,054; 1,056); \beta = 564,2 (563,1; 565,3).$$

Зависимость КПД электровоза от КИМ (рис. 1) получаем из (9) делением на  $P_{\text{ном}}$ :

$$\eta = \eta(\gamma) = \gamma / (\alpha\gamma + \delta), \quad (10)$$

где  $\delta = \beta / P_{\text{ном}} = 564,2 / 8400 = 0,0672$ .

Представленные результаты показывают, что характер зависимости  $\eta = \eta(\gamma)$  следующий: с ростом  $\gamma$  происходит нелинейное увеличение  $\eta$ . Другими словами, чем полнее используется мощность локомотива, тем выше будет его КПД. Здесь учитывается функционирование всей системы преобразования энергии с учетом тягового трансформатора, преобразователей и тяговых двигателей, потерь на трение, тепловых и электромагнитных потерь и мощности собственных нужд. Это итоговый результат многократно поставленных экспериментов, условия которых определялись реальными режимами работы.

Качественная закономерность, количественно выраженная формулой (10), позволила построить алгоритм, обеспечивающий стабилизацию мгновенного значения КПД локомотива при частичной нагрузке на его номинальном уровне при полной нагрузке [3].

Алгоритм лежит в основе разработанной системы дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым приводом (ДАУ), которая позволяет повысить энергетическую эффективность локомотива [4]. ДАУ распределяет тяговое усилие между оптимальным количеством тяговых двигателей, причем избыточные двигатели временно отключаются. Для определения оптимального

количества работающих двигателей в качестве критерия выбран коэффициент использования мощности  $\gamma$ .

В результате оставшиеся в тяге двигатели работают практически на полную мощность, а тяговый электропривод в целом имеет высокий КПД. Поскольку для электровозов 2(3)ЭС5С имеется возможность поосного регулирования силы тяги, мы можем управлять индивидуальной мощностью каждого двигателя, вплоть до его полного отключения.

Следовательно, для повышения энергетической эффективности локомотива при работе с частичной нагрузкой представляется целесообразным использовать систему ДАУ, автоматически определяющую в любых конкретных условиях оптимальное количество двигателей, необходимых для тяги.

#### 4. Условия проведения эксплуатационных испытаний

Эксплуатационные испытания электровоза 2ЭС5С были проведены в ноябре 2019 г. на Западно-Сибирской железной дороге, было выполнено тестирование алгоритмов работы системы управления, в том числе проверялся режим энергоэффективного ведения поезда за счет отключения части ТЭД.

Эксплуатационные испытания электровоза 3ЭС5С проводились в декабре 2019 г. на участке Лихая — Батайск — Новороссийск Северо-Кавказской железной дороги. На рис. 2 представлен рабочий момент испытаний: в голове поезда находится электровоз 3ЭС5С, затем тягово-энергетический вагон-лаборатория (ТЭЛ), далее электровоз прикрытия и состав вагонов.



Рис. 2. Испытания электровоза 3ЭС5С-001 на Северо-Кавказской железной дороге

В испытаниях участвовала ТЭЛ, оснащенная ИВК «Магистраль А32», велась запись скорости движения, силы тяги на автосцепке, параметров тормозной системы поезда, параметров электроснабжения и т. д. Для измерения силы тяги применялись автосцепки динамометрические СА-3 с тензометрическими датчиками.

На электровозе 3ЭС5С был установлен штатный модуль управления (МУ), осуществляющий регистрацию основных параметров работы электровоза. С помощью бортовой системы регистрации осуществлялась запись значений тока и напряжения контактной сети, скорости и силы тяги каждой оси, перегрева каждого ТЭД, и др. Шаг дискретизации записи — 100 мс.

Таким образом, регистрация параметров поездки осуществлялась двумя независимыми системами: вагоном-лабораторией и бортовым оборудованием электровоза. Анализ результатов показал соответствие записей этих двух источников.

## **5. Показатели энергетической эффективности электровоза 3ЭС5С, полученные при испытаниях**

Рассмотрим действия машиниста при ведении поезда. Контроллер машиниста (КМ) имеет два режима работы:

1. Задание силы тяги/электрического торможения  $F_{\text{зад}}$  — машинист непосредственно задает силу тяги (управление тягой в ручном режиме). Задание силы тяги  $F_{\text{зад}}$  представляет собой процент от максимальной силы тяги по тяговой характеристике электровоза, учитывая мгновенную скорость, и может изменяться в диапазоне от 0 до 100 %. Затем задание  $F_{\text{зад}}$  передается в главный блок управления электровозом, где обрабатывается и затем поступает на тяговые преобразователи.

2. Задание скорости движения  $V_{\text{зад}}$  — в режиме авторегулирования скорости машинист задает значение скорости  $V_{\text{зад}}$ , которое затем поступает в главный блок управления электровозом в «Регулятор скорости», здесь сила тяги изменяется с целью достижения и поддержания заданной скорости движения [9].

Энергоэффективный режим ДАУ включается нажатием кнопки «ЭЭф» и осуществляет автоматическое отключение/подключение тяговых двигателей в зависимости от мгновенной мощности, реализуемой локомотивом, то есть выполняется перераспределение заданной силы тяги на оптимальное число тяговых осей.

Далее представлен анализ энергопотребления по итогам двух поездок:

- 1) при работе всех ТЭД в штатном режиме, см. далее п. 5.1;
- 2) при дискретно-адаптивном управлении количеством работающих ТЭД в зависимости от нагрузки (энергоэффективный режим), см. далее п. 5.2.

Обе поездки были выполнены на перегоне ст. Тимашевская — Разъезд 9 км, длина которого  $S = 108$  км, спрямленный профиль имеет уклоны в пределах  $\pm 9$  ‰, согласно [11], это холмистый профиль III типа.

### 5.1. Показатели энергетической эффективности электровоза ЗЭС5С при работе всех тяговых двигателей.

**Первая поездка** (при работе всех ТЭД в штатном режиме). 11 декабря 2019 г. был проведен состав массой  $m = 6953$  т. Время движения составило 3,045 ч, техническая скорость — 35,46 км/ч.

На рис. 3, а показаны задаваемая машинистом скорость  $V_{\text{зад}}$  (красная пунктирная линия) и фактическая скорость  $V$  (синяя линия), км/ч, в зависимости от пройденного расстояния  $S$ , км. На рис. 3, б показана сила тяги/электрического торможения  $F_T$ , кН, и на рис. 3, в — мощность на тягу  $P_T$ , кВт. Положительные значения  $F_T$  и  $P_T$  соответствуют тяге, нулевые значения — движению на выбеге, отрицательные значения — электрическому торможению с рекуперацией.

Движение в основном происходило в режиме авторегулирования скорости, однако машинист несколько раз переходил на ручное управление тягой. Для тех случаев, когда управление силой тяги выполнялось вручную, характерно ненулевое значение силы тяги / электрического торможения  $F_T$  (рис. 3, б) при нулевом значении задания скорости  $V_{\text{зад}}$  (красная пунктирная линия на рис. 3, а).

Коэффициент использования мощности определяется согласно (3), причем при работе всех тяговых двигателей для электровоза ЗЭС5С:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ТЭД}} \cdot N_{\text{ТЭД}} = 1050 \cdot 12 = 12\,600 \text{ кВт.}$$

На рис. 4 показано изменение коэффициента использования мощности. Видно, что в ходе первой поездки доступная мощность электровоза использовалась крайне неэффективно: среднее значение  $\gamma$  за время работы в режиме тяги составило около 0,18.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 3 и 4, в реальных условиях эксплуатации тяговая система электровоза работает главным образом в переменных режимах. Это объясняется всякого рода диспетчерскими ограничениями, торможениями на запрещающий сигнал светофора, вынужденными остановками с последующим разгоном и т. п.

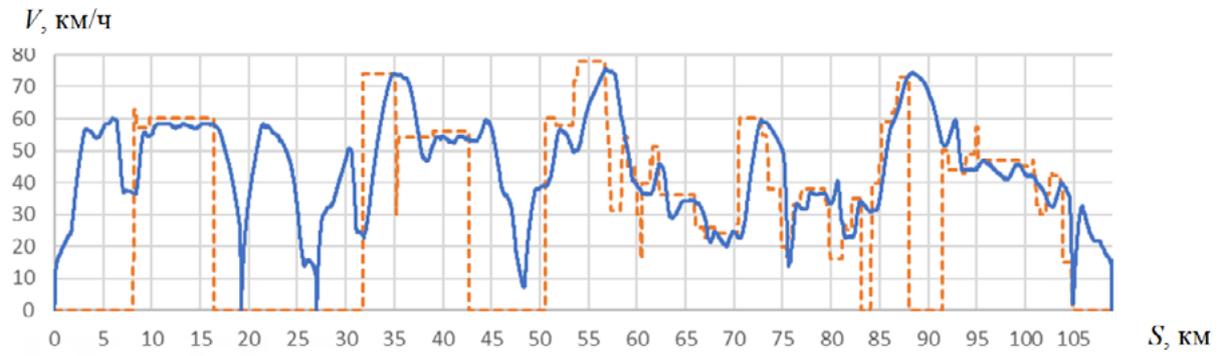
В целом за первую поездку полезная работа на тягу поезда составила  $A_T = 4029$  кВт·ч. Потребление электроэнергии по счетчику составило  $E_{\text{потр}} = 6361$  кВт·ч.

Таким образом, среднее значение КПД за первую поездку равно

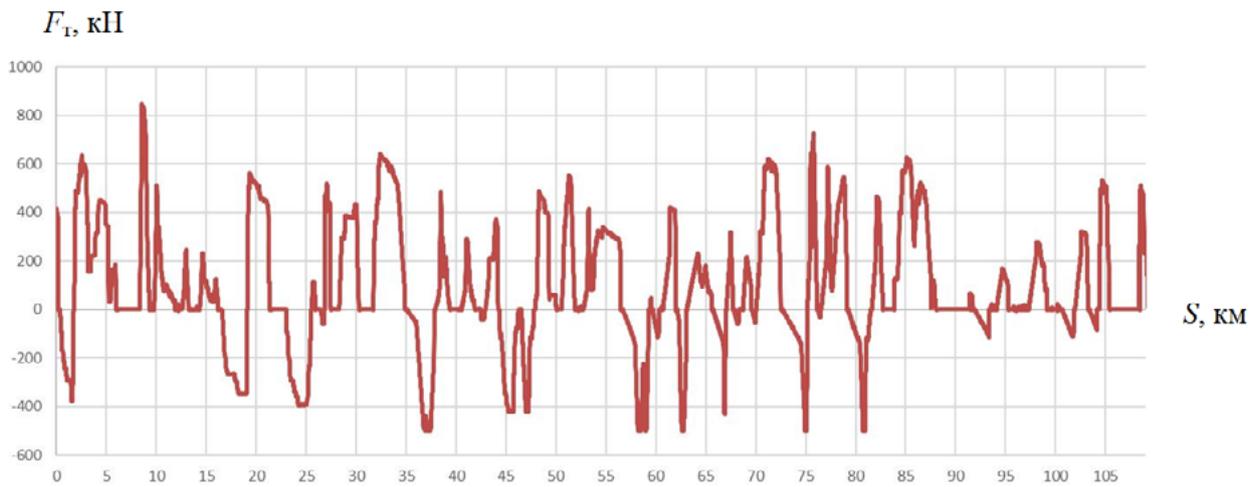
$$\eta = \frac{A_T}{E_{\text{потр}}} = \frac{4029}{6361} = 0,63;$$

а удельный расход электроэнергии на тягу составил:

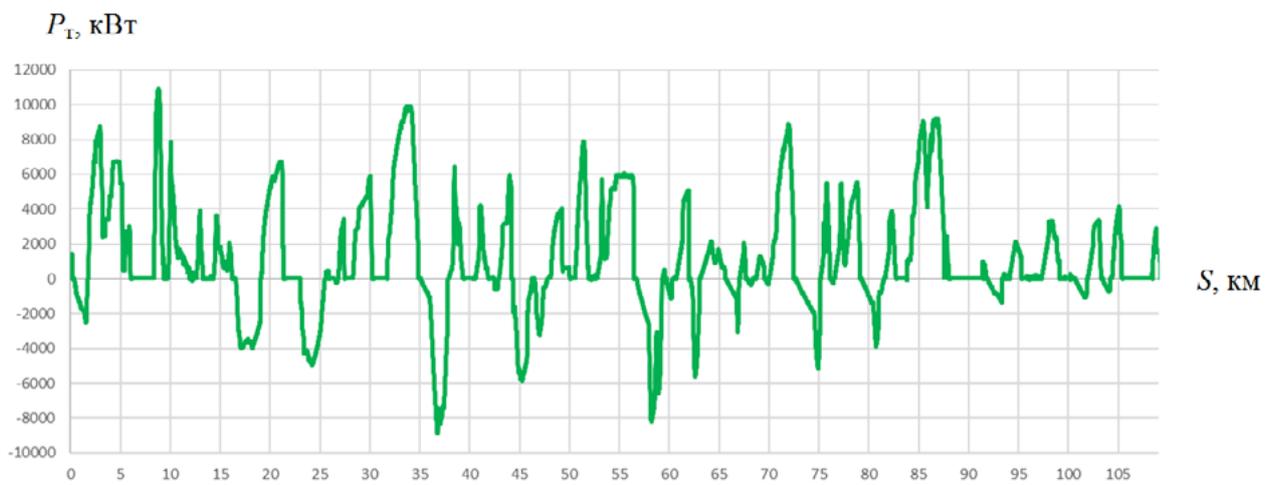
$$a = \frac{E_{\text{потр}}}{m \cdot S} \cdot 10^4 = \frac{6361}{6953 \cdot 108} \cdot 10^4 = 84,7 \text{ кВт·ч/изм.}$$



*a*



*б*



*в*

Рис. 3. Скорость  $V$  (*a*), сила тяги  $F_T$  (*б*) и мощность электровоза на тягу  $P_T$  (*в*) в первой поездке

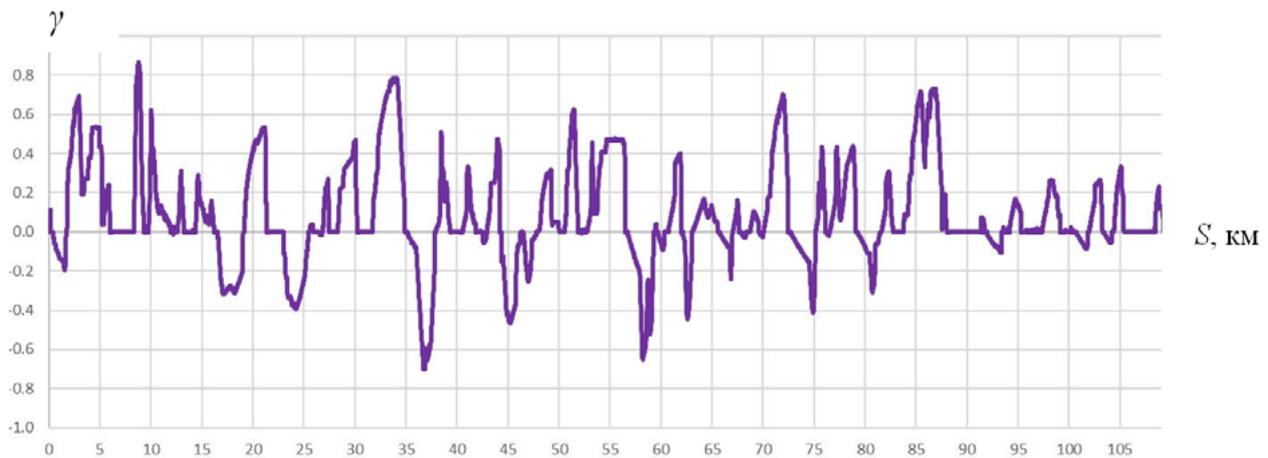


Рис. 4. Изменение коэффициента использования мощности  $\gamma$  в первой поездке

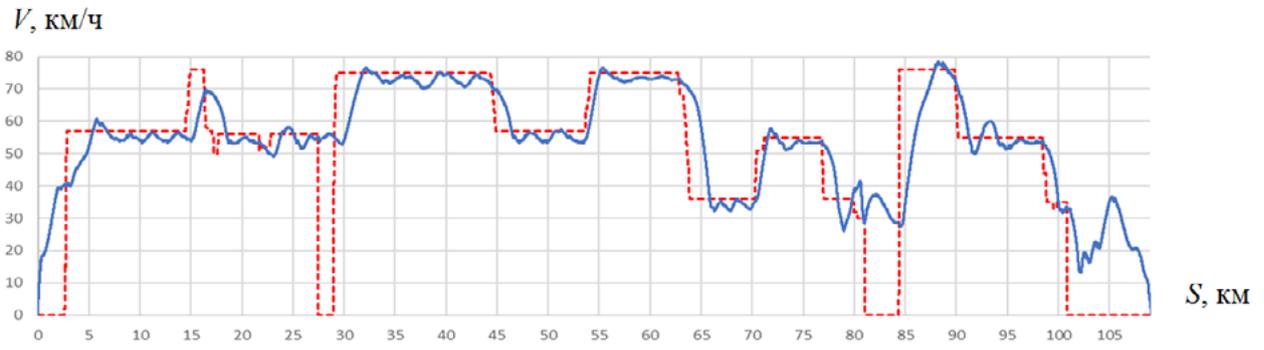
## 5.2. Показатели энергетической эффективности электровоза ЗЭС5С при дискретно-адаптивном управлении

**Вторая поездка (в режиме ДАУ).** 14 декабря 2019 г. в том же направлении, на том же участке был проведен состав массой  $m = 7217$  т, время движения составило 2,38 ч, техническая скорость — 45,37 км/ч. Практически вся вторая поездка проходила в режиме ДАУ в сочетании с авторегулированием скорости.

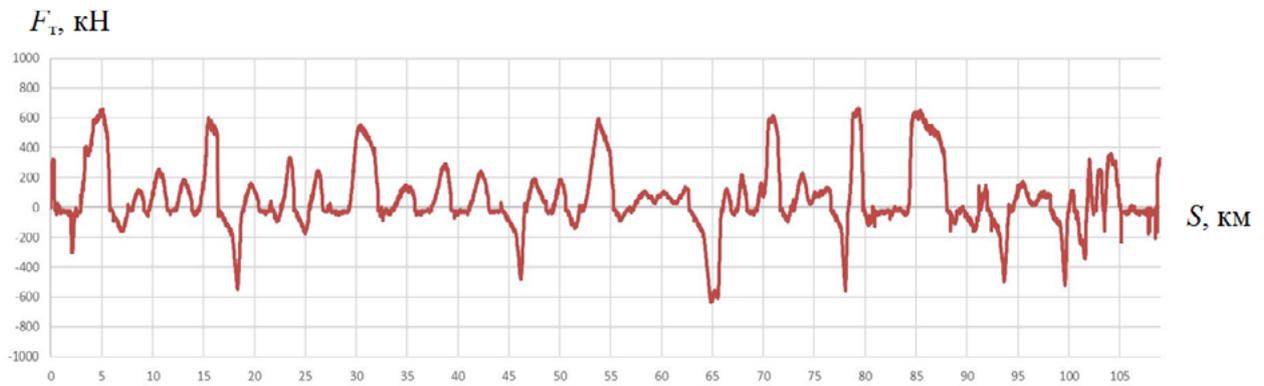
На рис. 5, а показаны задаваемая машинистом скорость  $V_{\text{зад}}$  (красная пунктирная линия) и фактическая скорость  $V$  (синяя линия), км/ч, в зависимости от пройденного расстояния  $S$ , км. На рис. 5, б показана сила тяги  $F_{\text{т}}$ , кН, и на рис. 5, в — мощность на тягу  $P_{\text{т}}$ , кВт.

На рис. 6 показано изменение количества работающих тяговых двигателей  $N_{\text{ТЭД}}$  в ходе второй поездки. При трогании с места и разгоне тяга осуществляется всеми двенадцатью двигателями вплоть до набора скорости 42 км/ч. При дальнейшем возрастании скорости число работающих двигателей автоматически изменяется согласно алгоритму ДАУ в зависимости от нагрузки. В дальнейшем, если скорость движения падает ниже 25 км/ч, снова включаются все двигатели. Заметим, что электрическое торможение всегда осуществляется всеми двигателями, в этом случае на рис. 6 число двигателей показано с отрицательным знаком:  $N_{\text{ТЭД}} = -12$ .

Коэффициент использования мощности (рис. 7) находится согласно (3), но во второй поездке при вычислении  $P_{\text{ном}}$  значение  $N_{\text{ТЭД}}$  является переменным и определяется согласно рис. 6. Среднее значение  $\gamma$  за время работы в режиме тяги в ходе второй поездки составляет около 0,55.



*a*



*б*



*в*

Рис. 5. Скорость  $V$  (а), сила тяги  $F_T$  (б) и мощность электровоза на тягу  $P_T$  (в) во второй поездке

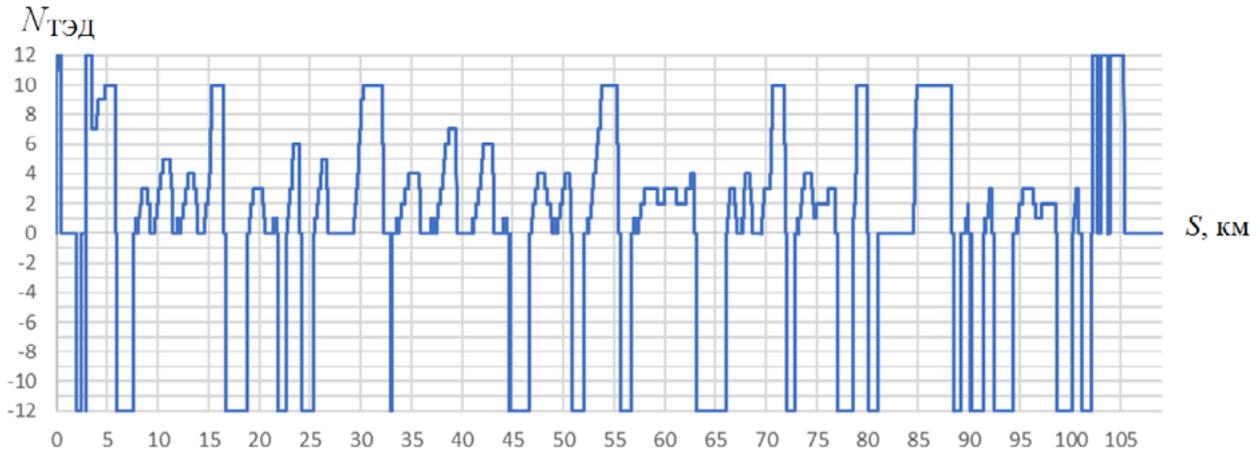


Рис. 6. Изменение количества работающих ТЭД во второй поездке

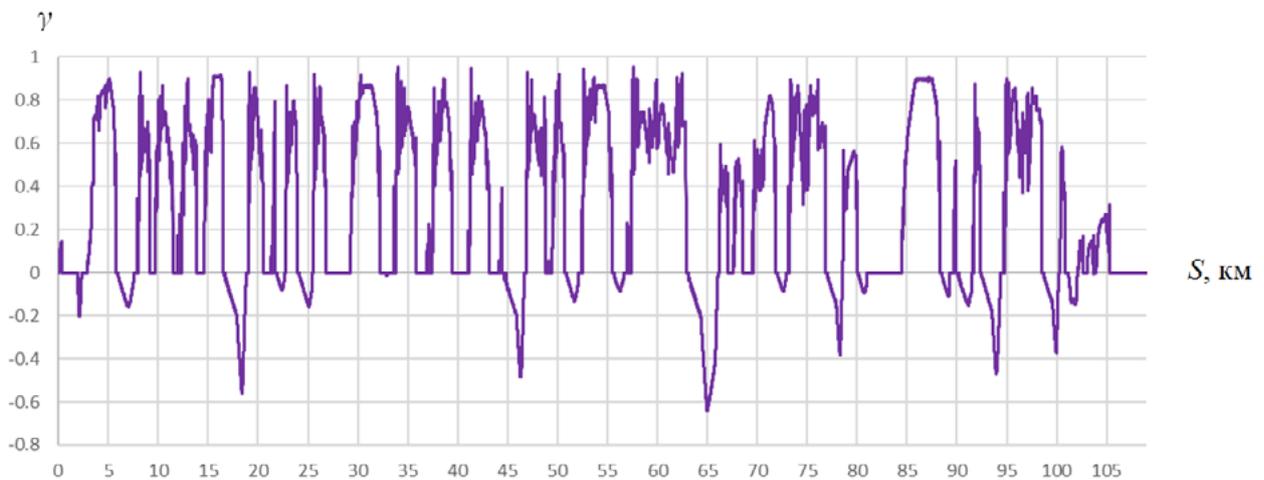


Рис. 7. Изменение коэффициента использования мощности  $\gamma$  во второй поездке

Опираясь на графики рис. 5 (*a* — изменение скорости и *b* — изменение силы тяги), при помощи программного пакета *SimInTech* [12] была построена анимированная картина второй поездки в осях «тяга — скорость». Изображающая точка ( $F_m - V$ ) перемещается в плоскости с течением времени.

На рис. 8 показано итоговое изображение второй поездки (диаграмма  $F_m - V$ ). Правая полуплоскость ( $F_m > 0$ ) соответствует режиму тяги, левая полуплоскость ( $F_m < 0$ ) — режиму электрического торможения. Синяя линия является годографом изображающей точки.

В правой полуплоскости показаны линии постоянной мощности  $P_T = F_T \times V = \text{const}$ , причем отмеченные значения 1–12 соответствуют числу работающих двигателей  $N_{\text{ТЭД}}$ :

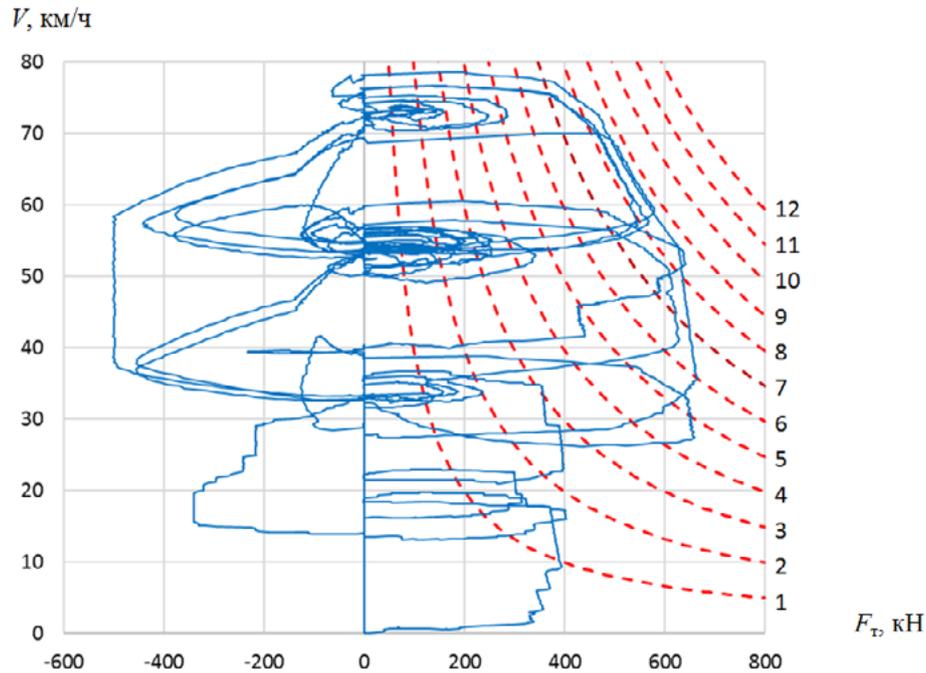


Рис. 8. Диаграмма «тяга  $F_T$  — скорость  $V$ » второй поездки

$$1: P_{\text{ТЭД}} \cdot 1 = 1050 \text{ кВт};$$

$$2: P_{\text{ТЭД}} \cdot 2 = 1050 \cdot 2 = 2100 \text{ кВт};$$

...

$$12: P_{\text{ТЭД}} \cdot 12 = 1050 \cdot 12 = 12\,600 \text{ кВт}.$$

Как было указано выше, при разгоне на скорости до 42 км/ч работают все 12 двигателей. Число двигателей, которые будут находиться в тяге при скоростях более 42 км/ч, наглядно определяется по диаграмме.

Кроме того, на диаграмме видны два установившихся режима тяги: 1) когда машинистом задана скорость  $V_{\text{зад}} \approx 55$  км/ч и 2) когда  $V_{\text{зад}} \approx 75$  км/ч.

В целом по второй поездке полезная работа на тягу поезда составила  $A_T = 3488$  кВт·ч. Потребление электроэнергии по счетчику составило  $E_{\text{потр}} = 4953$  кВт·ч. Таким образом, среднее значение КПД  $\eta$  в этой поездке равно:

$$\eta = \frac{A_T}{E_{\text{потр}}} = \frac{3488}{4953} = 0,70;$$

а удельный расход электроэнергии на тягу составил:

$$a = \frac{E_{\text{потр}}}{m \cdot S} \cdot 10^4 = \frac{4953}{7217 \cdot 108} \cdot 10^4 = 63,5 \text{ кВт·ч/изм.}$$

## 6. Сопоставление показателей энергетической эффективности, полученных в первой и второй поездках

Следовательно, во второй поездке — при работе электровоза в режиме ДАУ в сочетании с авторегулированием скорости — по сравнению с первой поездкой, зафиксировано:

– увеличение среднего значения коэффициента использования мощности на:

$$(|0,18 - 0,55| / 0,18) \cdot 100 \% = 205 \%,$$

то есть более чем в три раза;

– увеличение среднего значения коэффициента полезного действия на:

$$(|0,63 - 0,70| / 0,63) \cdot 100 \% = 11,1 \%;$$

– сокращение удельного расхода электроэнергии на тягу на:

$$(|84,7 - 63,5| / 84,7) \cdot 100 \% = 25 \%.$$

## Заключение

В статье приведены данные по энергопотреблению, полученные по итогам эксплуатационных испытаний новых грузовых магистральных электровозов 2(3) ЭС5С с асинхронным тяговым приводом. Регистрация параметров поездок осуществлялась двумя независимыми измерительными системами: вагоном-лабораторией и бортовым модулем электровоза.

Представлен анализ результатов, полученных в ходе двух поездок с поездами массой около 7 тыс. тонн по участку с холмистым профилем длиной 108 км. При прочих равных условиях, во второй поездке, при работе электровоза в энергоэффективном режиме (дискретно-адаптивное управление числом тяговых двигателей в сочетании с авторегулированием скорости), достигнуто снижение удельного расхода электроэнергии на тягу до 63,5 кВт·ч/изм, или же на 25 % по сравнению с первой поездкой, когда постоянно работали все 12 тяговых двигателей.

## Библиографический список

1. URL: <http://government.ru/docs/36094/>.
2. Андрющенко А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 4. — С. 5–14.

3. Пат. 2617857 Российская Федерация. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов и др.; заявитель и патентообладатель ООО «ТРТранс». № 2015139252; заявл. 15.09.2015; опубл. 28.04.2017, Бюлл. № 13.
4. Зарифьян А. А. Дискретно-адаптивное управление тяговым приводом грузового электровоза при работе с неполной нагрузкой / А. А. Зарифьян // Вестник РГУПС. — 2018. — № 1. — С. 49–59.
5. Зарифьян А. А. Показатели энергетической эффективности грузовых магистральных электровозов в различных условиях эксплуатации / А. А. Зарифьян // Техника железных дорог. — 2019. — № 2(46). — С. 18–25.
6. Валинский О. С. Локомотивная тяга: настоящее и задачи на будущее / О. С. Валинский // Локомотив. — 2017. — № 12. — С. 2–6.
7. Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5С // Локомотив. — 2018. — № 8. — С. 35–37.
8. Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // Техника железных дорог. — 2020. — № 1(49). — С. 10–13.
9. Зарифьян А. А. Синтез регулятора скорости электровоза методами теории конечных автоматов / А. А. Зарифьян // Вестник РГУПС. — 2019. — № 3. — С. 30–37.
10. 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.
11. Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза. Утверждено ОАО «РЖД» 26 декабря 2014 г., № 519. Одобрено Научно-техническим советом ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», протокол № 3 от 11 декабря 2014 г. — 29 с.
12. URL: <https://simintech.ru/>.

Дата поступления: 26.10.2022

Решение о публикации: 29.11.2022

**Контактная информация:**

ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — канд. техн. наук, эксперт; [zarifyan.alexander@gmail.com](mailto:zarifyan.alexander@gmail.com)

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доцент; [goshapti4ka@yandex.ru](mailto:goshapti4ka@yandex.ru)

# Reduction of Electric Power Consumption by Freight Mainline Locomotives 2(3)ES5S According to Operational Trial Results

A. A. Zarifyan<sup>1</sup>, M. A. Schreiber<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC TMH "Engineering", 4, st. Kolontsova, Mytishchi, Moscow region, 141009, Russian Federation

<sup>2</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Zarifyan A. A., Schreiber M. A. Reduction of Electric Power Consumption by Freight Mainline Locomotives 2(3)ES5S According to Operational Trial Results. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 4, pp. 7–23. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-7-23

## Summary

**Purpose:** To evaluate the reduction in power specific consumption by freight mainline locomotives 2(3)ES5S when operating in power-efficient mode (automatic speed control in combination with discrete-adaptive switch on/off of Traction Electric Drive depending on an instantaneous load), obtained from the results of operational tests. **Methods:** Array records analysis of on-board recorder made it possible to establish the nature of the dependence of locomotive efficiency degree from its power consumption. Way for controlling multi-engine traction electric drive efficiency in traction mode has been developed and patented. Computer modeling has allowed to obtain preliminary estimate to increase power efficiency. Speed automatic controller block is built using finite automation theory method. The proposed changes, aimed at locomotive power efficiency improvement, have been introduced into top-level control system. Final ratings of power consumption have been obtained during operational trials. **Results:** The analysis of results obtained during two trips on about 7-thousand-ton mass trains along section with hilly profile of 108 km length is presented. *Ceteris paribus*, during second trip, when electric locomotive was operating in power-efficient mode (discrete-adaptive control of operating traction drive number in combination with speed automatic control), specific consumption reduction of electric power for traction was achieved on 25 % in comparison with the first trip when all 12 traction motors were constantly working. **Practical importance:** Long-term development program of JSC Russian Railways provides for cost consistent reduction for electric power that's a purchased (consumed) product. In particular, optimization is planned in such direction as reducing specific consumption of power and fuel for train traction.

**Keywords:** Freight mainline electric locomotive, operational trials, traction discrete-adaptive control, power-efficient traction mode, speed automatic controller, electric power specific consumption reduction.

## References

1. Available at: <http://government.ru/docs/36094/>. (In Russian)
2. Andryushchenko A. A., Zarifyan A. A., Kolpakhchyan P. G. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti passagirskikh elektrovozov s asinkhronnym tyagovym privodom [Increasing energy efficiency of electric passenger locomotives with asynchronous locomotive driving unit]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg transport university]. 2015, I. 4, pp. 5–14. (In Russian)

3. Andryushchenko A. A., Zarifyan A. A., Orlov Yu. A., Soltus K. P. *Sposob upravleniya energeticheskoy effektivnost'yu lokomotiva pri rabote s nepolnoy nagruzkoy* [Method of locomotive energy efficiency control when working with partial load]. Patent RF no. 2617857, 2017. (In Russian)
4. Zarifyan A. A. Discretno-adaptivnoe upravlenie tyagovym privodom gruzovogo elektrovoza pri rabote s nepolnoy nagruzkoy [Discrete and adaptive control of the traction drive of the cargo electric locomotive during the work with the underload]. *Vestnik RGUPS* [Proceedings of Rostov transport university]. 2018, I. 1, pp. 49–59. (In Russian)
5. Zarifyan A. A. Pokazateli energeticheskoy effektivnosti elektrovozov v razlichnykh usloviyakh ekspluatacii [Energy efficiency Indicators of freight mainline electric locomotives in various operating conditions]. *Tekhnika geleznykh dorog* [Railway engineering]. 2019, I. 2(46), pp. 18–25. (In Russian)
6. Valinskiy O. S. Lokomotivnaya tyaga: nastoyashchee i zadachi na budushchee [Locomotive traction: present and tasks for the future]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2017, I. 12, pp. 2–6. (In Russian)
7. Znakomtes': elektrovoz 2ES5S [Meet the electric locomotive 2ES5S]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2018, I. 8, pp. 35–37. (In Russian)
8. *Elektrovozy 2ES5S i 3ES5S: asynkhronnaya tyaga pod flagom Rossii* [Electric locomotives 2ES5S and 3ES5S: asynchronous traction under the flag of Russia]. *Technika zheleznykh dorog* [Railway Engineering]. 2020, I. 1(49), pp. 10–13. (In Russian)
9. Gapanovich V. A. *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow: MISiS Publ., 2012, 620 p. (In Russian)
10. Zarifyan A. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. Sintez regulatora skorosti elektrovoza metodami teorii konechnykh avtomatov [Synthesis of the electric locomotive speed regulator by the technique of finite-state automata]. *Vestnik RGUPS* [Proceedings of Rostov transport university]. 2019, I. 3, pp. 30–37. (In Russian)
11. *Metodika rascheta indikatora energoeffektivnosti elektrovoza* [Methodology for calculating the energy efficiency indicator of an electric locomotive]. *Utverjdeno OAO "RZhD"* [Approved by Russian Railways] on December 26, 2014, I. 519, 29 p. (In Russian)
12. Available at: <https://simintech.ru/>. (In Russian)

Received: October 26, 2022

Accepted: November 29, 2022

**Author's information:**

Alexander A. ZARIFYAN — PhD in Engineering, Expert; [zarifyan.alexander@gmail.com](mailto:zarifyan.alexander@gmail.com)

Marina A. SCHREIBER — PhD in Engineering, Associate Professor; [goshapti4ka@yandex.ru](mailto:goshapti4ka@yandex.ru)