



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4.016.12

EDN: <https://elibrary.ru/irmexl>



Определение дополнительного сопротивления движению поезда от подвагонных генераторов на основе анализа кривой скорости

И. О. Лобыцин✉, И. А. Панков, В. В. Федин, Н. А. Баранов,
К. И. Шведин, С. О. Литвинцев

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. При выполнении тяговых расчетов учет дополнительного сопротивления движению поезда от действия подвагонных генераторов производится на основе статистических данных, полученных в результате натурных испытаний образцов подвижного состава. Сравнительный анализ расчетных и фактических результатов показал наличие системных отклонений, при которых значения реального расхода топливно-энергетических ресурсов превышают расчетные значения.

Материалы и методы. Для анализа и детализации применялись данные блока памяти микропроцессорной системы управления и диагностики электровоза, данные расшифровки записей комплексного локомотивного устройства безопасности и системы взаимодействия с локомотивом по технической радиосвязи. Применены методы аппроксимации и экстраполяции массивов данных, численного интегрирования, статистической обработки данных, метод энергооптимального тягового расчета.

Результаты. При учете в методике тягового расчета влияния подвагонных генераторов на сопротивление движению, показатели расхода топливно-энергетических ресурсов превысили значения расхода без учета влияния генераторов в среднем на 15%. Установлено, что интенсивность применения электрического оборудования пассажирских вагонов оказывает переменное влияние на работу подвагонных генераторов. Главным достижением исследования стало создание нового способа определения силы сопротивления движению от воздействия подвагонных генераторов.

Обсуждение и заключение. Применение предлагаемого способа по оценке дополнительных сил сопротивления движению поезда от действия подвагонных генераторов можно масштабировать, используя в различных задачах движения поездов, которые можно решить, опираясь на статистические данные с применением математических моделей. Разработанный авторами алгоритм найдет свое применение в системах расчета, анализа и планирования расхода топливно-энергетических ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирский вагон, подвагонные генераторы, силы сопротивления движению, тяговый расчет, локомотив, бортовые системы, статистический анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лобыцин И. О., Панков И. А., Федин В. В., Баранов Н. А., Шведин К. И., Литвинцев С. О. Определение дополнительного сопротивления движению поезда от подвагонных генераторов на основе анализа кривой скорости // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 2. С. 136–147.

✉ Lobysin.igor@vniizht.ru (И. О. Лобыцин)

© Лобыцин И. О., Панков И. А., Федин В. В., Баранов Н. А.,
Шведин К. И., Литвинцев С. О., 2024



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.016.12

EDN: <https://elibrary.ru/irmexl>



Speed curve analysis-based determination of additional resistance to train motion from undercarriage generators

Igor O. Lobytsin✉, Igor A. Pankov, Vladislav V. Fedin, Nikolay A. Baranov,
Konstantin I. Shvedin, Sergey O. Litvintsev

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Traction calculations take into account additional resistance to train motion from the action of undercarriage generators using statistical data from field tests of rolling stock samples. Comparative analysis of calculated and actual results shows system deviations with real fuel and energy consumption exceeding the calculated values.

Materials and methods. The analysis and detailing involved data of the memory block of the electric locomotives microprocessor control and diagnostic system, transcripts of the integrated train safety system and locomotive technical radio communication system. The authors applied methods of data array approximation and extrapolation, numerical integration, statistical data processing, and the method of energy-optimal traction calculation.

Results. Traction calculation of the influence of undercarriage generators on resistance to movement shows that fuel and energy consumption exceeds the consumption without the influence of generators by 15% in average. The researchers found that the intensity of electrical equipment use in passenger cars has a variable effect on the performance of undercarriage generators. Most notably, the research prompted a new way of determining the resistance to motion from undercarriage generators.

Discussion and conclusion. This method of estimating the additional resistance to train motion from undercarriage generators can be scaled to various train movement problems solved with statistical data using mathematical models. The algorithm developed by the authors would find its application in the systems of calculation, analysis and planning of fuel and energy resources consumption.

KEYWORDS: passenger car, undercarriage generators, resistance to motion (drag), traction calculation, locomotive, on-board systems, statistical analysis

FOR CITATION: Lobytsin I. O., Pankov I. A., Fedin V. V., Baranov N. A., Shvedin K. I., Litvintsev S. O. Speed curve analysis-based determination of additional resistance to train motion from undercarriage generators. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(2):136-147. (In Russ.).

✉ Lobytsin.igor@vniizht.ru (I. O. Lobytsin)

Введение. Дополнительное сопротивление движению подвижного состава зависит от ряда сторонних факторов, влияющих на движение поезда и способствующих возникновению дополнительного расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) для поддержания необходимой скорости движения. Одним из факторов являются силы сопротивления движению, дополнительно возникающие в процессе эксплуатации подвижного состава. Данные силы регулировать невозможно, однако необходимо четко представлять себе природу возникновения последних, значение и характер действия для верного их отображения при последующем расчете расхода ТЭР.

Определенные силы дополнительного сопротивления движению имеют как положительное, так и отрицательное влияние на результирующую скорость поезда и в процессе поездки могут изменяться неоднократно, при этом особое внимание стоит уделить учету постоянно воздействующих замедляющих сил. В пассажирском движении такие силы возникают от работы подвагонных генераторов и зависят от текущей скорости движения, номинальной мощности генератора и объема потребляемой электроэнергии на нужды пассажиров.

В послевоенный период советскими инженерами активно проводилась оценка степени влияния подвагонных генераторов на скорость движения и расход ТЭР путем проведения большого числа натурных испытаний. Определение сил сопротивления движению наиболее обширно и систематически проводилось с помощью метода скатывания и динамометрического метода с последующей обязательной опытной поездкой [1]. Так, например, зимой 1955 г. ЦНИИ МПС провел на Октябрьской железной дороге опытные поездки, которые позволили установить эти характеристики. Во время указанных поездок между Москвой и Ленинградом в поездах №28/29 и 31/32, состоящих из 12 цельнометаллических вагонов (масса одного поезда составила 700 т), включалось в среднем 10 подвагонных генераторов со средней минимальной мощностью каждого около 4 кВт. В результате после 348 систематических замеров тока и напряжения стало видно, что средняя за рейс условная мощность генератора, приходящаяся на один вагон, составляет $P' = 1,27$ кВт. Кроме того, во время испытания установлено, что мощность генератора при выключенном освещении вагона составила

87% мощности того же генератора при включенном освещении. Этот факт свидетельствует о том, что большая часть электрической энергии, вырабатываемой подвагонными генераторами, расходуется не на освещение, а на работу электровентиляторов и питание радиоустановки^{1,2}.

Надо заметить, что определение сил сопротивления движению от действия подвагонных генераторов базируется на результатах экспериментальных исследований прошлого века, использующих в качестве математического описания выражения мощности подвагонного генератора и эквивалентной мощности на ободу колеса [1]:

$$\frac{1000 \cdot P}{\eta_r \eta_n} = \omega M \cdot 9,81, \quad (1)$$

где P — мощность на клеммах генератора, кВт; η_r — КПД генератора; η_n — КПД передачи от оси к генератору; ω — угловая скорость колеса, рад/с; M — момент сопротивления колеса, обусловленный работой подвагонного генератора, Н·м; 9,81 — ускорение свободного падения, м/с².

Тема влияния подвагонных генераторов пассажирских вагонов на эксплуатацию подвижного состава неоднократно затрагивалась работниками железнодорожной отрасли, а результаты проводимых исследований легли в основу математических моделей оценки движения пассажирских поездов. Однако стоит отметить, что публикации исследователей имеют ряд недостатков, требующих устранения для последующего применения в настоящих условиях. Так, например, результаты работы П. Н. Астахова [1], опубликованные более шестидесяти лет назад, требуют актуализации в силу значимых изменений научной деятельности и технологических решений, применяемых при изготовлении современных пассажирских вагонов. По этой же причине работа В. А. Петракова [2] также требует повторного исследования. Кроме того, стоит уделить внимание работам, в основе которых лежат совершенно новые способы определения сопротивления движению. В работе А. В. Климович [3] описан интересный подход, который можно применить для оценки влияния подвагонных генераторов на сопротивление движению, однако обязательное условие движения поезда в режиме выбега вынуждает вновь накладывать ограничения, влияющие на итоговый результат.

¹ Об утверждении Правил тяговых расчетов для поездной работы [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=672553#82zSqCUljwSHzng5> (дата обращения: 19.02.2024).

² Патент № 2803206 Российская Федерация, МПК В61К 13/00, G01P 3/00, G01M 17/08. Способ определения сопротивления движению подвижного состава от подвагонных генераторов на основе анализа кривой скорости: № 2023105758: заявл. 13.03.2023; опубл. 11.09.2023 / Лобыцин И. О., Панков И. А., Селезнев Г. Е.; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. EDN: <https://www.elibrary.ru/vieoym>.

На сегодняшний день при расчете дополнительного сопротивления движению пассажирского поезда от воздействия подвагонных генераторов, в соответствии с документом «Правила тяговых расчетов для поездной работы»³, применяется формула (2) или полученные на основании данной формулы номограммы (рис. 1). Характеристика изменения величины сопротивления от подвагонного генератора имеет гиперболический вид; при этом увеличение скорости приводит к снижению сил сопротивления из-за увеличения инерционной величины вращающихся масс. Пороговое значение скорости подключения подвагонного генератора принято в соответствии с Правилами тяговых расчетов⁴ равным 35 км/ч. В связи с этим учитывать действия данных сил при математическом расчете необходимо лишь после превышения пороговой скоростной величины:

$$W_{\text{пр}} = \frac{1300 \cdot P'}{q_o v}, \quad (2)$$

где P' — средняя условная мощность подвагонного генератора, приходящаяся на один вагон поезда, кВт; q_o — нагрузка на ось, т; v — скорость движения поезда, км/ч.

Значение величины P' определяется из выражения

$$P' = \frac{P_{\text{пр}} n_{\text{бк}} + (P_{\text{пр}} + P_{\text{гк}}) n_{\text{кв}} + (P_{\text{пр}} + P_{\text{гк}}) n_{\text{р}} + P_{\text{пгб}} n_{\text{пб}}}{m_{\text{п}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{пр}}$ — фактическая мощность подвагонного генератора, расходуемая на служебные нужды пассажирского вагона, кроме кондиционирования воздуха, кВт. Для среднесетевых условий принимать $P_{\text{пр}} = 6,6$ кВт; $n_{\text{бк}}$ — число пассажирских вагонов без кондиционирования воздуха, не имеющих подвагонных генераторов, ед.; $P_{\text{гк}}$ — фактическая среднесуточная мощность подвагонного генератора, расходуемая на работу климатической установки (кондиционера), кВт. Следует принимать в сентябре — апреле на всей сети $P_{\text{гк}} = 3$ кВт (питание низковольтного отопления), в мае — августе для Приволжской и Северо-Кавказской железных дорог $P_{\text{гк}} = 10$ кВт, для остальной сети $P_{\text{гк}} = 2$ кВт; $n_{\text{кв}}$ — число пассажирских вагонов с кондиционированием воздуха, ед.; $P_{\text{пр}}$ — фактическая мощность подвагонного генератора, расходуемая на служебные нужды вагона-ресторана, кроме кондиционирования воздуха, кВт. Для среднесетевых условий принимать $P_{\text{пр}} = 11,5$ кВт; $n_{\text{р}}$ — число вагонов-ресторанов, ед.; $P_{\text{пгб}}$ — фактическая мощность подвагонного генератора, расходуемая на служебные нужды почтовых и багажных вагонов, кВт. Для среднесетевых условий $P_{\text{пгб}} = 3$ кВт; $n_{\text{пб}}$ — число почтовых и багажных вагонов, ед.; $m_{\text{п}}$ — общее число вагонов в поезде, ед.

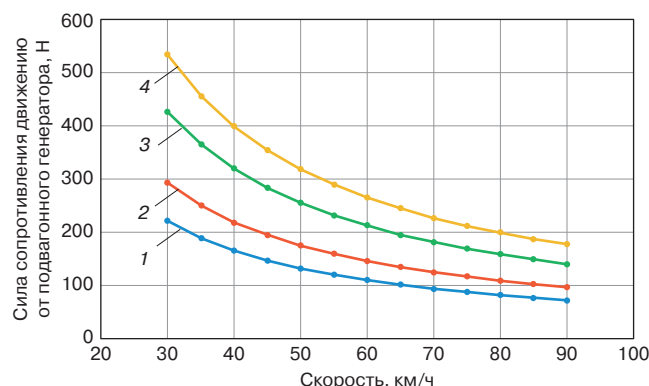


Рис. 1. Величина полного дополнительного сопротивления движению от подвагонного генератора в зависимости от скорости движения поезда при разных значениях средней условной мощности использования генератора P' :

1 — при $P' = 5$ кВт; 2 — при $P' = 6,6$ кВт; 3 — при $P' = 9,6$ кВт; 4 — при $P' = 12$ кВт

Fig. 1. Total additional resistance to motion from the undercarriage generator as a function of train speed at different average rated power utilisations of the generator P' :

1 — at $P' = 5$ kW; 2 — at $P' = 6,6$ kW; 3 — at $P' = 9,6$ kW; 4 — at $P' = 12$ kW

Отметим, что средняя условная мощность в реальных эксплуатационных условиях отличается от расчетного значения, что отражается на итоговых результатах при выполнении тяговых расчетов. Данные отличия связаны прежде всего с такими факторами, как:

- интенсивность применения электрооборудования пассажирского вагона;
- время суток (влияние на потребность подключения осветительных устройств);
- сезонность и температура окружающей среды (использование кондиционеров);
- тип применяемого подвагонного генератора (влияет на номинальную мощность генератора).

Перед инженерами железнодорожной отрасли всегда стояла задача разработки некоего единого метода расчета, который являлся бы менее ресурсозатратным, наиболее точным и имеющим возможность максимального учета влияния сторонних факторов. Поэтому работниками научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» АО «ВНИИЖТ» была поставлена задача по уточнению воздействия подвагонных генераторов на расход ТЭР для последующего применения результатов при проведении тяговых расчетов в пассажирском движении.

Разработанный и предлагаемый авторами метод позволяет при помощи современных цифровых систем контроля и диагностики тягового подвижного

³ Об утверждении Правил тяговых расчетов для поездной работы. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EX&n=672553#82zSqCUljwSHzng5> (дата обращения: 19.02.2024).

⁴ Там же.

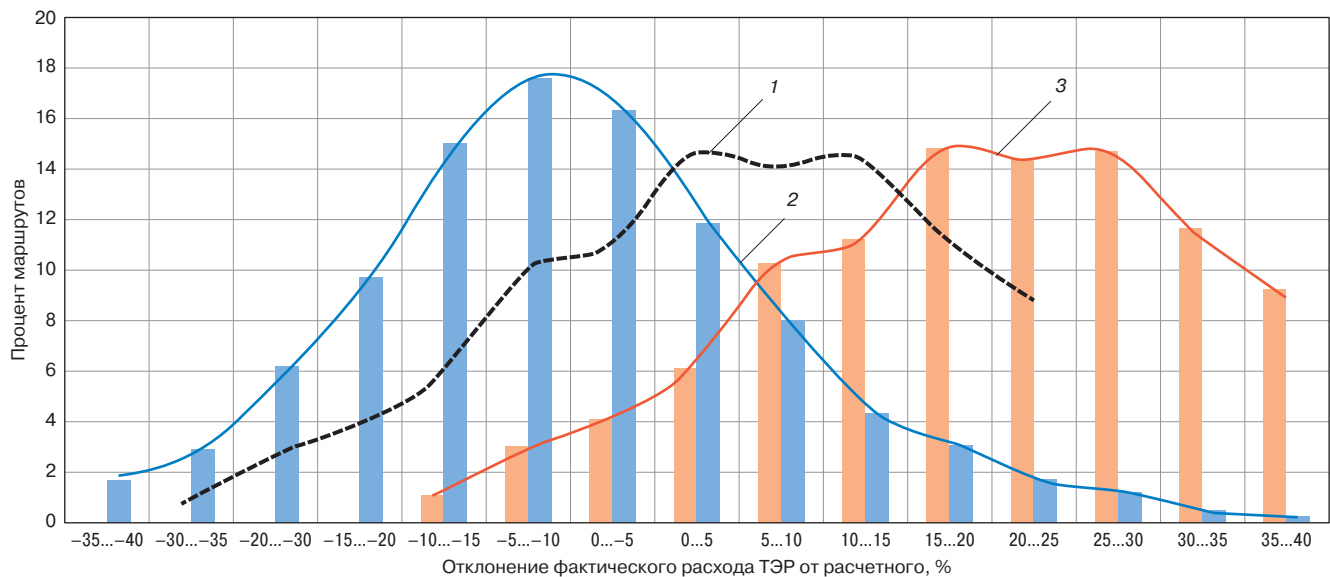


Рис. 2. Распределение поездок по отклонениям расчетных и фактических значений ТЭР для пассажирского и грузового движения: 1 — смещение распределения при учете влияния подвагонных генераторов в расчетах; 2 — грузовое движение; 3 — пассажирское движение

Fig. 2. Distribution of trips by deviations of estimated and actual fuel and energy values for passenger and freight traffic: 1 — distribution bias given the influence of undercarriage generators in calculations; 2 — goods traffic; 3 — passenger traffic

состава эффективно проводить расчеты сопротивления движению на основе регистрируемых данных, тем самым уменьшая расходы на проведение натурных экспериментов и снижая нагрузку на железнодорожную инфраструктуру.

Анализ фактического расхода ТЭР на тягу поездов.

Для выполнения сравнительного анализа данных фактического расхода ТЭР и результатов расчета с применением энергооптимального тягового расчета (ЭТР) используются исходные данные по расходу и рекуперации электроэнергии, полученные из маршрутов машиниста системы централизованной обработки маршрутов машиниста. Рассмотрена выборка из маршрутов машиниста и ЭТР за июль 2020 г. для поездок в границах Южно-Уральской железной дороги.

На рис. 2 представлено процентное распределение поездок по отклонениям расчетных и фактических значений ТЭР для пассажирского и, для сравнения, грузового движения по способу К. М. Попова, С. А. Виноградова⁵. При этом для пассажирского движения производилось распределение из 1155 поездок в составе с головными электровозами ЭП1 или ЭП2К, а для грузового из 7015 поездок в составе с головным двухсекционным электровозом ЭЭС6.

Для оценки степени влияния подвагонного генератора на расход ТЭР было принято произвести

ЭТР без учета сил сопротивления движению вагонов от действия генераторов, а после — с учетом данных сил. Такие расчеты выполняются с применением программного продукта для реализации ЭТР, разработанного в АО «ВНИИЖТ», и отличаются исходными данными⁶. Так, для учета влияния подвагонного генератора в исходных данных ЭТР были учтены результаты, полученные с использованием формулы (2).

По результатам программного расчета для сравнительного анализа изменения расхода ТЭР в пассажирском движении определяются следующие параметры: $WErg$ — расчет расхода ТЭР на основе алгоритмов ЭТР; $WSch$ — расчет расхода ТЭР с остановками по промежуточным станциям на основе алгоритмов ЭТР; $WErgKPD$ — расчет расхода ТЭР с учетом полинома КПД на основе алгоритмов ЭТР.

Каждый из предложенных вариантов расчета расхода ТЭР имеет свою исходную расчетную модель, отличающуюся данными плана и профиля пути, серией тягового подвижного состава, числом вагонов и их массой, общей протяженностью участка, числом остановок, скоростными ограничениями. В связи с этим итоговые расчетные величины расхода ТЭР и отклонения отражены в табл. 1 по каждой моделируемой поездке.

Расчет расхода ТЭР с применением ЭТР показывает, что при учете дополнительного сопротивления

⁵ Патент № 2788656 Российская Федерация, МПК B60L 3/12, G01R 21/133. Способ определения нормативного расхода энергоресурса на поездку пригородного моторвагонного поезда: № 2022117143; заявл. 24.06.2022; опубл. 24.01.2023 / Попов К. М., Виноградов С. А.; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. EDN: <https://www.elibrary.ru/dugngs>.

⁶ Ябло И. А. Метод расчета энергооптимальных траекторий движения поезда: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2007. 24 с.

Таблица 1

Отклонения показателей расхода ТЭР на основании ЭТР с учетом влияния сопротивления движению поезда от подвагонного генератора

Table 1

Deviations of fuel and energy consumption indicators based on energy-optimal traction calculation given the resistance to train motion from the undercarriage generator

Номер расчета	Расход ТЭР без влияния подвагонного генератора, Вт·ч			Расход ТЭР с учетом влияния подвагонного генератора, Вт·ч			Отклонение расхода ТЭР с учетом влияния подвагонного генератора, %		
	$WErg$	$WErgKPD$	$WSch$	$WErg$	$WErgKPD$	$WSch$	$\Delta WErg$	$\Delta WErgKPD$	$\Delta WSch$
1	2 010 473	2 426 449	2 211 564	2 353 896	2 820 553	2 656 783	14,59	13,97	16,76
2	6 651 330	7 873 229	7 108 867	7 971 298	9 418 645	8 341 642	16,56	16,41	14,78
3	3 778 422	4 260 563	4 132 275	4 341 968	4 876 055	4 664 926	12,98	12,62	11,42
4	5 257 760	6 612 861	5 516 808	6 190 005	7 746 350	6 485 000	15,06	14,63	14,93
5	8 057 267	9 488 224	8 040 775	9 588 581	11 328 615	9 556 189	15,97	16,25	15,86
Среднее отклонение по расчетным участкам, %							15,03	14,78	14,75

Таблица 2

Результаты изменения величины токов тяговых электродвигателей для реализации необходимой силы тяги, компенсирующей замедление от включения подвагонных генераторов*

Table 2

Changes in electric tractive motor currents for the required traction to compensate for deceleration caused by running undercarriage generators*

Номер тягового электродвигателя ЭП1 № 037	Ток тягового электродвигателя, А				Отклонения по участкам Δ , %			
	при $\Delta t = 0$ с	при $\Delta t = 3$ с	при $\Delta t = 15$ с	при $\Delta t = 19$ с	0–3	3–15	15–19	0–19
	при $v = 32$ км/ч	при $v = 33$ км/ч	при $v = 34$ км/ч	при $v = 35$ км/ч				
1	124	140	138	150	11,43	1,45	8,00	17,33
2	126	138	140	150	8,70	1,43	6,67	16,00
3	126	144	142	154	12,50	1,41	7,79	18,18
4	136	150	150	164	9,33	0,00	8,54	17,07
5	130	148	146	162	12,16	1,37	9,88	19,75
6	132	150	150	158	12,00	0,00	5,06	16,46
Средняя величина отклонения, %					11,02	0,94	7,66	17,47

* Расчет выполнен применительно к генераторам ЭГВ08, DCG4435.

движению от подвагонного генератора увеличиваются расчетные показатели расхода в среднем на 15%, на основании чего происходит снижение общего отклонения расчетного расхода от фактического для пассажирского движения, т. е. график распределения отклонений по пассажирскому движению (рис. 2) принимает смещение влево относительно первоначального положения, что отмечено кривой 1. Эти вполне обоснованные корректировки позволяют повысить точность ЭТР, тем самым изменить отклонения по поездкам для грузовых и пассажирских поездов, распределив их в максимально близких интервалах [4].

Для поддержания плавности хода и компенсации постоянно возникающих как замедляющих, так и ускоряющих сил на тяговом подвижном составе,

участвующем в пассажирском движении, применяется специализированная микропроцессорная система управления и диагностики (МСУД). Информация, полученная с устройств хранения информации МСУД, позволяет оценить влияние подвагонного генератора на работу тягового привода локомотива и рассмотреть процесс компенсации мощности при возникновении замедляющих сил от подвагонного генератора [5].

Для количественной оценки изменения величины токов тяговых электродвигателей электроваза ЭП1 № 037 в составе пассажирского поезда на основании расшифровки данных программы просмотра и анализа «МСУ Анализатор» была составлена табл. 2, в которой отображено изменение контролируемых параметров в соответствующий промежуток времени.

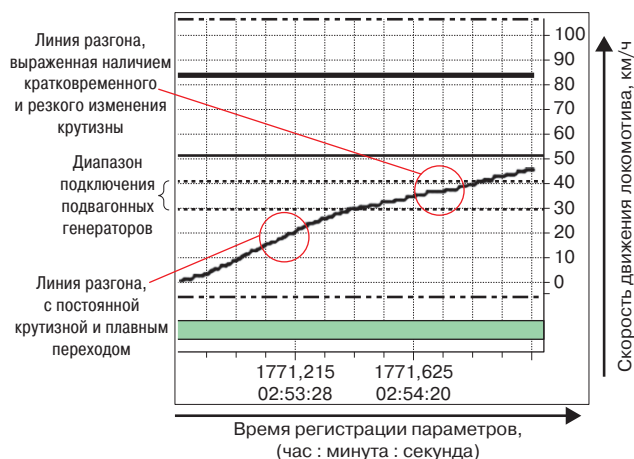


Рис. 3. Фрагмент расшифровки кассеты регистрации КЛУБ электровоза ЭП2К

Fig. 3. Transcript fragment of the recording tape of the EP2K electric locomotive integrated train safety system

По результатам анализа выявлено, что подключение подвагонных генераторов способствовало ступенчатому повышению токов тяговых электродвигателей на 17,47 % для поддержания плавного процесса набора скорости поезда, а само подключение происходило в два этапа с отклонениями в 11,02 и 7,66 % и периодами между бросками 12 с.

Такая особенность наблюдается как по данным блока памяти МСУД электровоза, так и по данным расшифровки кассеты регистрации комплекса локомотивных устройств безопасности (КЛУБ). На рис. 3 представлен фрагмент расшифровки кассеты регистрации КЛУБ электровоза ЭП2К, следовавшего в составе поезда № 78 Москва — Абакан.

При масштабировании этого фрагмента в диапазоне 30–40 км/ч и дальнейшем исследовании процесса изменения характера наклона скоростной кривой по данному диапазону наблюдается явное изменение темпа набора скорости (при скорости 36 км/ч угол наклона скоростной кривой уменьшается на протяжении 10 с, после чего происходит его значительное увеличение); подобного рода изменения присутствуют на других анализируемых расшифровках.

В процессе разгона и подключения подвагонных генераторов отчетливо заметно их влияние на изменение ускоряющей силы поезда, что подтверждается данными МСУД и КЛУБ, однако при отключении систем автономного питания пассажирского вагона, а также в процессе торможения каких-либо изменений кривой скорости выявлено не было. Это связано с тем, что угловые скорости колесных пар пассажирского вагона остаются неизменными [6].

В работе Н. В. Гребенникова, А. А. Зарифьяна [7] выполнялось математическое моделирование процесса торможения пассажирского вагона, оснащенного подвагонным генератором. По результатам

расчета авторами было выявлено, что продольные силы в контакте «колесо — рельс» первой (свободной) оси полностью определяются действием тормозного момента величиной 3400 Н, а продольные силы второй колесной пары включают в себя суммарный тормозной и электромагнитный момент от подвагонного генератора, равный 7000 Н. Несмотря на разницу продольных замедляющих сил в контакте первой и второй осей колесных пар, отключение генератора не сопровождается увеличением общего ускорения поезда по причине малой начальной скорости движения, относительно высокой инерционной составляющей и наличием основного сопротивления движению поезда.

В ходе углубленного анализа регистрационных параметров систем МСУД и КЛУБ пассажирских электровозов было установлено, что влияние электромагнитного момента, создаваемого подвагонным генератором, возможно определить с использованием скоростной кривой, оценивая диапазон трогания электровоза и его последующий разгон до скорости автоматического подключения генератора.

Стоит также отметить, что, помимо расшифровки данных с бортовых систем электровоза, кривую скорости можно также получить благодаря системе взаимодействия с локомотивом посредством технологической радиосвязи (далее — СВЛТР), а это позволяет облегчить оценку влияния подвагонного генератора в плане получения исходных данных с бортов пассажирских электровозов.

Предлагаемый способ. Так как момент включения подвагонного генератора влияет на результирующие ускоряющие силы поезда, возникла идея учета дополнительного сопротивления на основе анализа скоростной кривой путем оценки зоны изменения интенсивности разгона в диапазоне скоростей 30–40 км/ч, при котором в системе продольных сил подвижного состава появляются дополнительные силы от работы подвагонных генераторов. На рис. 4 схематично представлено графическое определение силы сопротивления движению подвагонного генератора на основе анализа кривой скорости, полученной с бортовых систем локомотивов.

Согласно рис. 4 влияние подвагонного генератора на характер движения тягового подвижного состава оценивается в интервале временного разгона от t_0 до t_i при достижении скоростей 30–40 км/ч. Определение изменения скорости Δv_p между фактической скоростной кривой 1, полученной по данным бортовых систем учета параметров локомотива, и расчетной кривой 2, построенной путем аппроксимации фактического массива данных ниже скорости 30 км/ч с последующей экстраполяцией до 40 км/ч, позволяет найти численное изменение ускорения при создании дополнительного сопротивления движению в момент времени t_i . При последующем переносе Δv_p на тяговую характеристику

локомотива (рис. 5) определяется величина расчетной силы тяги ΔF_p , которая была необходима для компенсации тормозных сил поезда, вызванных включением подвагонного генератора. На основании того, что расчетная сила тяги ΔF_p была затрачена на поддержание скорости поезда, справедливо равенство $\Delta F_p = W_{\text{пр}}$, которое является решением задачи по наиболее точному определению сил сопротивления движению поезда от тормозного момента подвагонного генератора для каждого пассажирского поезда в частности.

Для оценки влияния подвагонных генераторов на итоговый расход ТЭР локомотивом необходимо и достаточно из найденного расчетного сопротивления движению $\Delta F_p = W_{\text{пр}}$ выделить величину средней условной мощности подвагонного генератора P' , которая является неизменной основополагающей расчетной величиной (согласно Правилам тяговых расчетов для поездной работы⁷), характеризующей долю влияния подвагонных генераторов на суммарное сопротивление движению пассажирского поезда.

Для получения наиболее точного значения данной величины предполагаются повторные исследования интервалов разгона поезда (0–40 км/ч) с выявлением фактической мощности $P_{\text{ми}}$ по каждому расчетному интервалу и дальнейшее определение среднего арифметического значения фактической мощности генератора по текущей поездке. Выполнение подобного рода анализа позволяет в дальнейшем осуществить четкое разделение потерь ТЭР, связанных с преодолением сил сопротивления движению, возникающих исключительно в пассажирском движении.

Предлагаемый способ определения средней условной мощности подвагонного генератора на основе анализа кривой скорости⁸ разделяется на несколько последовательно выполняемых этапов, отображенных на рис. 6 [8].

Осуществим расчет средней условной мощности генератора с применением предлагаемого способа. В качестве примера используются данные по скорости и времени ее регистрации из СВЛТР для пассажирского поезда, следовавшего с электровозом ЭП20, и 16 пассажирскими вагонами при средней нагрузке на ось 15,25 т.

Согласно этапу 1 определяется массив исходных данных $[v_i; t_i]$, полученных с бортовых систем записи информации локомотива, где v_i — скорость движения локомотива на i -м участке пути, t_i — время фиксации показаний на i -м участке пути. В базе данных СВЛТР данная информация хранится в виде таблицы и включает данные о серии тягового подвижного состава, его номере, информацию о секции, с которой

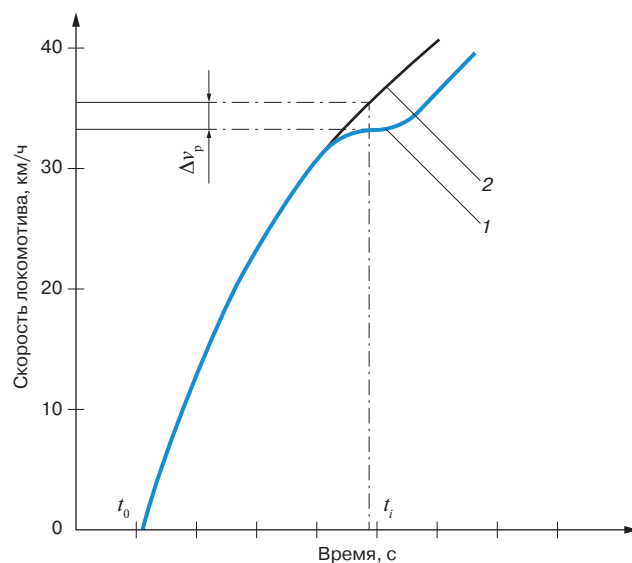


Рис. 4. Определение силы сопротивления движению на основе кривой скорости:
1 — фактическая скоростная кривая; 2 — расчетная скоростная кривая

Fig. 4. Determination of resistance to motion from a speed curve:
1 — actual speed curve; 2 — estimated speed curve

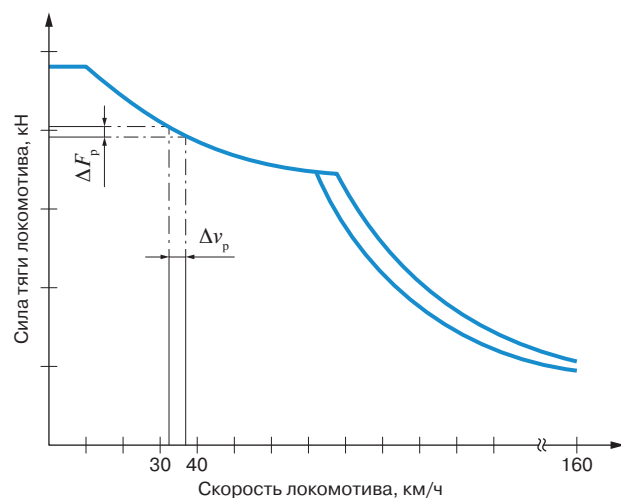


Рис. 5. Условное отображение тяговой характеристики локомотива ЭП20 с конструкционной скоростью 160 км/ч

Fig. 5. Conventional representation of EP20 locomotive traction with design speed of 160 km/h

осуществляется регистрация параметров, а также непрерывную запись фактической скорости и географических координат с постоянной фиксацией времени.

На этапе 2 происходит определение значений v_{pi} , t_{pi} , где v_{pi} — скорость движения локомотива при разгоне на

⁷ Об утверждении Правил тяговых расчетов для поездной работы. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXR&n=672553#82zSqCUljwSHzng5> (дата обращения: 19.02.2024).

⁸ Павловский А. И. Исследование и оценка сопротивлений движению вагонов на сортировочных горках: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 24 с.

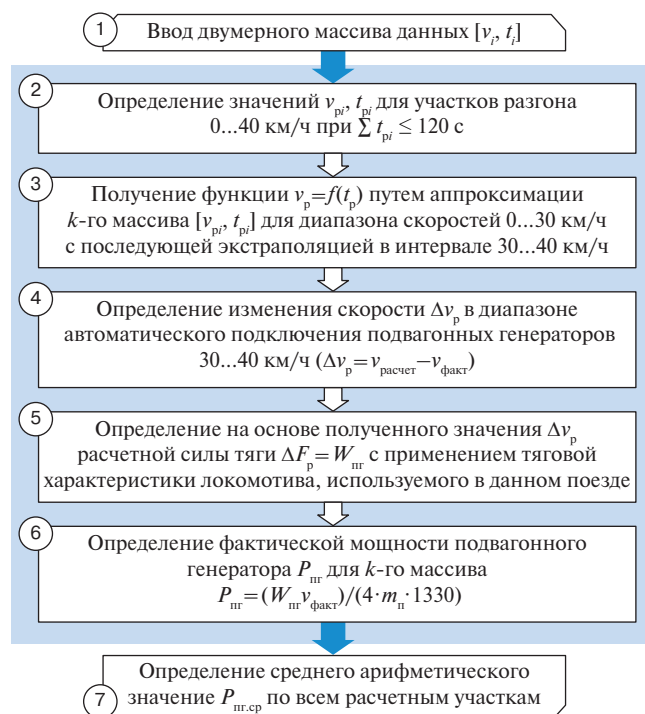


Рис. 6. Этапы реализации способа определения средней условной мощности подвагонных генераторов на основе анализа кривой скорости

Fig. 6. Implementation stages of the method for determining the average rated power of undercarriage generators based on speed curve analysis

loc_type	loc_num	sec_num	speed	lat	lon	dt	record_dt	Δ
273	44	0	15	44,10	39,08	26.10.2020 8:00	26.10.2020 8:00	0
273	44	0	20	44,10	39,08	26.10.2020 8:00	26.10.2020 8:00	10
273	44	0	26	44,09	39,08	26.10.2020 8:00	26.10.2020 8:00	25
273	44	0	30	44,09	39,08	26.10.2020 8:01	26.10.2020 8:01	38
273	44	0	32	44,09	39,08	26.10.2020 8:01	26.10.2020 8:01	50
273	44	0	33	44,09	39,08	26.10.2020 8:01	26.10.2020 8:01	62
273	44	0	35	44,09	39,08	26.10.2020 8:01	26.10.2020 8:01	72
273	44	0	37	44,09	39,08	26.10.2020 8:01	26.10.2020 8:01	83

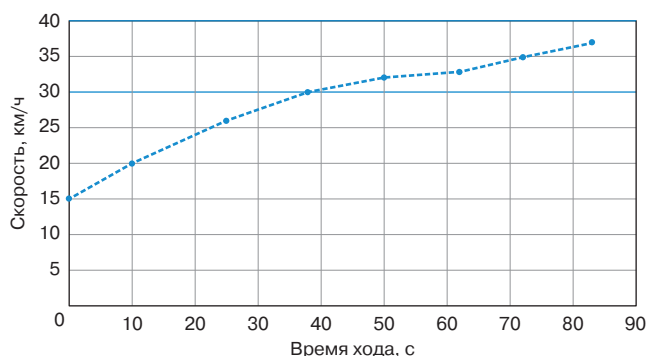


Рис. 7. Определение участков разгона по данным СВЛТР

Fig. 7. Determination of acceleration sections from the locomotive technical radio communication system data

i -м участке пути, t_{pi} — время фиксации показаний при разгоне на i -м участке пути для участков разгона поезда 0...40 км/ч с выполнением условия $\sum t_{pi} \leq 120$ с. Соблюдение данного условия свидетельствует о том, что разгон поезда осуществляется в данном участке непрерывно. Согласно выбранному примеру, на рис. 7 представлен участок разгона поезда, в котором насчитывается 8 зарегистрированных параметров скорости с общим временем разгона (Δ), составившим 83 с. На данном рисунке можно наблюдать снижение ускорения поезда по причине подключения подвагонного генератора на интервале 30–35 км/ч.

Этап 3 характеризуется преобразованием полученного массива в полиномиальную функцию для последующего определения расчетного значения скорости — $v_{расчет}$ в зоне подключения генераторов. На рис. 8 отображена расчетная кривая, полученная вследствие аппроксимации кубическим полиномом массива данных при скорости менее 30 км/ч с дальнейшим экстраполированием по интервалу 30...40 км/ч. При совместном рассмотрении фактической и расчетной кривой скорости можно выделить три явно выраженных зоны⁹ [9]:

I зона (начальная зона) — в данной зоне наблюдается равномерный набор скорости, характеризующийся действием ускоряющих сил.

II зона (зона перехода) — в ней осуществляется возникновение тормозного эффекта от подключения подвагонного генератора, при этом фактическая кривая будет иметь так называемую просадку в процессе повышения скорости. Между тем расчетная кривая показывает движение поезда без возникновения сторонних тормозных сил.

III зона (зона восстановления) — в данной зоне происходит восстановление ускоряющих сил системами автоматического управления тяговым подвижным составом для поддержания заданного темпа увеличения скорости (об этом свидетельствует подобие расчетной кривой во II зоне и фактической кривой в III зоне).

На этапе 4 осуществляется определение изменения скорости $\Delta v_p = v_{расчет} - v_{факт}$ в месте перехода II и III зоны, так как данный промежуток является местом полного подключения подвагонного генератора, после чего происходит компенсация тормозящих сил системами тягового подвижного состава.

Для данного примера $v_{расчет} = 35,31$ км/ч, $v_{факт} = 33$ км/ч, $\Delta v_p = 2,31$ км/ч.

На этапе 5 определяется расчетная сила тяги $\Delta F_p = W_{пг}$ с использованием тяговой характеристики локомотива. На рис. 9 представлена тяговая характеристика пассажирского электровазона ЭП20. Для удобства

⁹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662629 Российская Федерация. Моделирование движения с учетом переменного сопротивления среды: № 2021661630: заявл. 23.07.2021; опубл. 02.08.2021 / Бородин К. И., Конев С. Ф., Конев А. С.; заявитель Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина. EDN: <https://www.elibrary.ru/ytetlz>.

и более точного определения силы тяги предполагается представить характеристику в виде математической функции в интервале 12...60 км/ч, и для данного интервала квадратичная регрессия с коэффициентом корреляции равна 0,998 [10].

Согласно выполненному расчету $F_{\text{расчет}} = 392\,733$ Н при скорости 35,31 км/ч, $F_{\text{факт}} = 396\,919$ Н при скорости 33 км/ч. Величина расчетной силы тяги $\Delta F_p = W_{\text{пр}} = 4186$ Н. Это свидетельствует о том, что 1,06 % силы было дополнительно потрачено на компенсацию сопротивления тормозного электромагнитного момента подвагонного генератора при фактической скорости движения.

На этапе 6 необходимо выявить величину фактической мощности генератора $P_{\text{пр}}$, определенную для данного участка:

$$P_{\text{пр}} = \frac{v_{\text{пр}} W_{\text{пр}}}{4 \cdot m_{\text{п}} \cdot 1330} = \frac{33 \cdot 4186}{4 \cdot 16 \cdot 1330} = 1,63 \text{ кВт}. \quad (4)$$

Для более точного определения средней мощности подвагонного генератора на этапе 7 происходит повторная процедура расчетов согласно 2–6 этапам, позволяющая определить нужное значение фактической мощности по каждому участку разгона в отдельности.

Для данного примера был выполнен повторный расчет на отдельных участках разгона после остановок по станциям, в ходе которого было выявлено среднее арифметическое значение фактической мощности подвагонного генератора по текущей поездке, численно равное 1,71 кВт. Стоит отметить, что также был произведен ряд других расчетов средней мощности подвагонных генераторов пассажирских поездов с электровозами ЭП2К, ЭП1П и тепловозом ТЭП70. В ходе этих расчетов среднее значение мощности подвагонного генератора распределялось в диапазоне 1,2...5,4 кВт, притом что расчеты были выполнены в холодные времена года.

Необходимо отметить, что для получения качественных результатов расчета мощности подвагонных генераторов предлагаемым способом, а следовательно, и определения действующих сил сопротивления движению необходимо обязательно ввести ряд условий и допущений.

Во-первых, для обработки данных принимается массив $[v_i; t_i]$ с бортовых систем тех локомотивов, которые имеют переменную тяговую характеристику в зоне ограничения силы тяги при скоростях 0...40 км/ч. Так, например, данные, полученные с электровозов серии ЭП20 с конструкционной скоростью 200 км/ч, не будут подходящими для анализа, так как ограничение силы тяги имеет постоянное значение в необходимом скоростном диапазоне.

Во-вторых, определение участков разгона при 0...40 км/ч и соответствующих значений v_{pi} , t_{pi} выполняется на станциях, имеющих площадку крутизной не

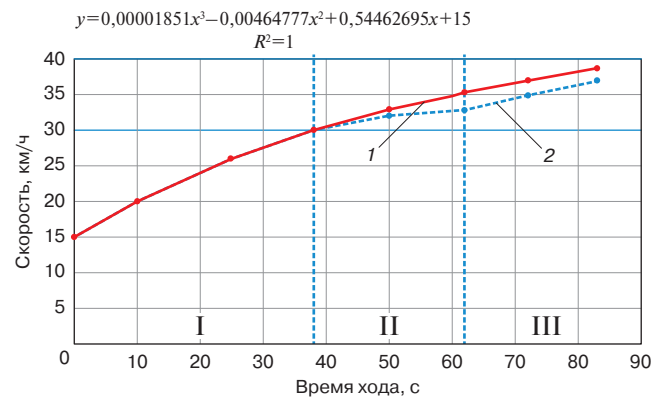


Рис. 8. Построение расчетной кривой скорости с применением кубического полинома: I — начальная зона; II — зона перехода; III — зона восстановления; 1 — расчетная кривая; 2 — фактическая кривая

Fig. 8. Estimated speed curve plotting using a cubic polynomial: I — starting section; II — transition section; III — recovery section; 1 — estimation curve; 2 — actual curve

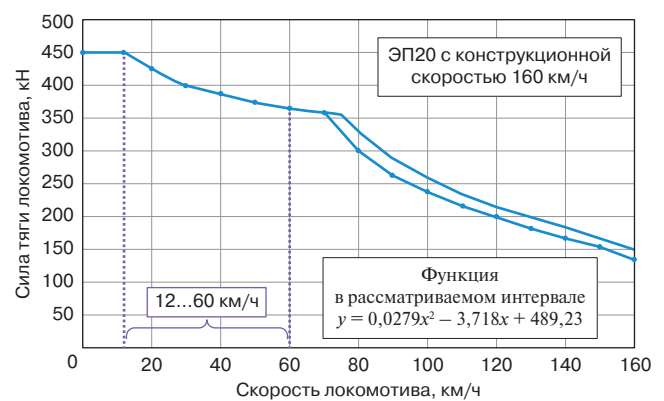


Рис. 9. Тяговая характеристика электровоза ЭП20 с полиномиальной функцией для интервала 22...50 км/ч

Fig. 9. Electric locomotive EP20 traction with polynomial function for 22...50 km/h interval

более 2 ‰, после полной остановки. При этом оценка наличия станции в пути следования выполняется на основании данных маршрутов машиниста.

В-третьих, для оценки предлагаемым способом не принимаются пассажирские поезда, состоящие из вагонов, имеющих энергоснабжение от сети локомотива (например, двухэтажные вагоны модели 61-4465).

Обсуждение и заключение. Применение предлагаемого способа расчета средней условной мощности позволяет выявить наиболее точную долю сил сопротивления от подвагонного генератора и провести последующую оценку расхода ТЭР на преодоление этих сил [11]. Кроме того, данный способ позволит оценить влияние подвагонных генераторов на расход ТЭР при определенных условиях (например, для ночного режима работы, работы при высокой или низкой температурах, эксплуатации пассажирского состава,

состоящего из одного типа вагонов и т. д). Для этого необходимо лишь осуществить выборку нужных данных, подлежащих дальнейшей обработке. Результаты исследований частных случаев эксплуатации пассажирских поездов с подвагонными генераторами могут быть адаптированы для последующего применения при выполнении сравнительной оценки генераторных установок [2].

В ходе углубленного исследования влияния электромагнитного тормозного момента подвагонных генераторов на расход ТЭР в пассажирском движении был разработан способ определения средней условной мощности подвагонных генераторов на основе анализа кривой скорости, полученной с бортовых систем тягового подвижного состава.

Комплексное применение результатов исследования позволяет производить учет влияния дополнительного сопротивления движению от подвагонных генераторов на расход ТЭР в пассажирском движении с наибольшей степенью достоверности по отношению к фактическим результатам.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Астахов П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава. М.: Транспорт, 1966. 178 с. (Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта; вып. 311).
2. Astakhov P. N. *Resistance to railway rolling stock motion*. Moscow: Transport Publ.; 1966. 178 p. (Proceedings of the Railway Research Institute; Issue 311). (In Russ.).
3. Коэффициент полезного действия генераторной установки пассажирского вагона без кондиционирования воздуха / В. А. Петраков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1989. № 1. С. 41–43.
4. Petrakov A. V., Samoshkin S. L., Grigoriev E. N., Mironov S. S. Performance coefficient of passenger car generator without air conditioning. *Russian Railway Science Journal*. 1989;(1):41–43. (In Russ.).
5. Климович А. В., Кообар А. А., Лендясав А. С. Методика определения сопротивления движению поезда по данным электронного регистратора параметров движения // Известия Транссиба. 2010. № 3. С. 16–25.
6. Klimovich A. V., Koobar A. A., Lendyasov A. S. Methodology for determining the resistance to train motion from the data of the electronic motion parameter recorder. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2010;(3):16–25. (In Russ.).
7. Лобыцин И. О. Моделирование работы наклонной тяги грузового магистрального электровагона серии ВЛ85 // Теоретический

и практический потенциал современной науки: сб. науч. ст. М.: Перо, 2023. Т. XIV. С. 9–12. EDN: <https://elibrary.ru/kgjwvb>.

Lobytsin I. O. Simulation of inclined traction operation of the VL85 series freight mainline electric locomotive. In: *The Theoretical and Practical Potential of Modern Science: collection of scientific articles*. Moscow: Pero Publ.; 2023. T. XIV. C. 9–12. EDN: <https://elibrary.ru/kgjwvb>.

5. Комплексный анализ эффективности использования современного подвижного состава при перевозках массовых грузов / С. П. Вакуленко [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 170–178. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178>.

Vakulenko S. P., Romenskaya M. V., Kalinin K. A., Shvedin K. I. Comprehensive analysis of the modern rolling stock efficiency in bulk cargo transportation. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):170–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178>.

6. Методические положения по определению основных параметров организации перевозочного процесса при внедрении вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой / М. И. Мехедов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 359–369. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-359-369>.

Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S., Kapyrin A. A., Kornienko N. V. Methodological provisions for determining the main parameters of the organisation of the transportation process during the introduction of cars with increased axial and linear load. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):359–369. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-359-369>.

7. Гребенников Н. В., Зарифьян А. А. Динамика и энергоэффективность пассажирского вагона, оснащенного вентильно-индукторным генератором // Вестник РГУПС. 2012. № 4 (48). С. 15–21. EDN: <https://elibrary.ru/pjtabz>.

Grebennikov N. V., Zarifyan A. A. Performance and efficiency of passenger cars fitted with valve-inductor generators. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2012;(4):15–21. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/pjtabz>.

8. Rozhkov A., Suyunbaev Sh., Salfetnikov V., Balabaev O., Nartov M. Determination of additional resistance to train movement from profile elements of railway sidings of industrial facilities // Труды университета. 2022. № 2 (87). С. 211–216. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_2_211.

Rozhkov A., Suyunbaev Sh., Salfetnikov V., Balabaev O., Nartov M. Determination of additional resistance to train movement from profile elements of railway sidings of industrial facilities. *Trudy universiteta*. 2022;(2):211–216. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_2_211.

9. Огнева Т. Д. Исследование сопротивления движению подвижного состава рельсового транспорта // Электротехнические комплексы и системы: материалы 54-й Междунар. науч. студенч. конф. МНСК–2016, Новосибирск, 16–20 апреля 2016 г. Новосибирск: Новосибирский нац. исслед. гос. ун-т, 2016. С. 28. EDN: <https://elibrary.ru/uqycho>.

Ogneva T. D. Research in resistance to motion of rail rolling stock. In: *Electrotechnical complexes and systems: Proceedings of the 54th international students scientific conference, 16–20 April 2016, Novosibirsk*. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2016. p. 28. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/uqycho>.

10. Ablyalimov O., Yakubov Ja., Kosimov Kh., Avdeyeva A., Safarov U. To the operation of undercar generators in passenger trains. *Univsum: Technical sciences*. 2023;(2-5):49–52. EDN: <https://elibrary.ru/mymlsp>.

11. Панченко А. В. Анализ существующих методов разработки оптимальных режимов движения поездов // Евразийский научный журнал. 2017. № 4. С. 206–208. EDN: <https://elibrary.ru/ytstil>.

Panchenko A. V. Analysis of existing methods for developing optimal train operation modes. *Eurasian Science Journal*. 2017;(4):206–208. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ytstil>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Игорь Олегович ЛОБЫЦИН,

ведущий инженер, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10)

Игорь Александрович ПАНКОВ,

заместитель директора, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), pankov.igor@vniizht.ru

Владислав Викторович ФЕДИН,

заместитель начальника отдела, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), fedin.vladislav@vniizht.ru

Николай Алексеевич БАРАНОВ,

стажер-исследователь, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), baranov.nikolai@vniizht.ru

Константин Иванович ШВЕДИН,

заместитель директора, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), shvedin.konstantin@vniizht.ru

Сергей Олегович ЛИТВИНЦЕВ,

технический эксперт, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), litvintsev.sergey@vniizht.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor O. LOBYTSIN,

Leading Engineer, Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.)

Igor A. PANKOV,

Deputy Director, Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), pankov.Igor@vniizht.ru

Vladislav V. FEDIN,

Deputy Head of Department, Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), fedin.vladislav@vniizht.ru

Nikolay A. BARANOV,

Trainee Researcher, Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), baranov.nikolai@vniizht.ru

Konstantin I. SHVEDIN,

Deputy Director, Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), shvedin.konstantin@vniizht.ru

Sergey O. LITVINTSEV,

Technical Expert, Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), litvintsev.sergey@vniizht.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Игорь Олегович ЛОБЫЦИН. Сбор и структурирование материала, проведение расчетов, написание и редактирование текста статьи (40%).

Игорь Александрович ПАНКОВ. Обзор основных направлений исследований, проведение расчетов, оценка результатов (15%).

Владислав Викторович ФЕДИН. Научно-техническое сопровождение, анализ результатов и выводы (10%).

Николай Алексеевич БАРАНОВ. Написание и редактирование текста статьи, проведение расчетов (15%).

Константин Иванович ШВЕДИН. Проведение испытаний и обработка результатов, расчетно-графическое описание (10%).

Сергей Олегович ЛИТВИНЦЕВ. Методические вопросы стендовых испытаний, разработка методики испытаний (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Igor O. LOBYTSIN. Compilation and structuring the materials, calculations, article writing and editing (40%).

Igor A. PANKOV. Overview of the main areas of research, calculations, evaluation of results (15%).

Vladislav V. FEDIN. Scientific and technical support, result analysis and conclusions (10%).

Nikolay A. BARANOV. Article writing and editing, calculations (15%).

Konstantin I. SHVEDIN. Testing and result processing, calculation graphics (10%).

Sergey O. LITVINTSEV. Methodological issues of bench testing, development of research methods (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024, рецензия от первого рецензента получена 11.03.2024, рецензия от второго рецензента получена 13.03.2024, рецензия от третьего рецензента получена 20.03.2024, принята к публикации 02.05.2024.

The article was submitted 27.02.2024, first review received 11.03.2024, second review received 13.03.2024, third review received 20.03.2024, accepted for publication 02.05.2024.