

УДК 629.4

Имитационная модель поезда для учета влияния ветровых нагрузок

И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Гребнев И. А., Пудовиков О. Е. Имитационная модель поезда для учета влияния ветровых нагрузок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 30–40. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-30-40

Аннотация

Цель: данная статья посвящена актуальным вопросам учета и нормирования топливных ресурсов на тягу поездов при наличии переменных факторов, влияющих на расход. Рассматривался метеозависимый участок Приволжской железной дороги Паласовка — Верхний Баскунчак с целью доказать опытным путем при помощи имитационного моделирования наличие влияния переменных факторов на расход топлива, которые зачастую бывают нормообразующими. Предложить методику их практического учета в локомотивных депо. **Методы:** в статье предложена имитационная модель поезда для учета влияния ветровых нагрузок. С этой целью тяговый электропривод тепловоза с передачей постоянно-переменного тока был представлен как задатчик скорости, который поддерживает движение поезда с постоянной скоростью, равной средней технической. Для определения расхода топлива с целью определения достоверности полученных результатов и возможности сравнения с опытными статистическими величинами были использованы электромеханические характеристики тягового электродвигателя ЭД133, генератора ГС501 и эксплуатационные характеристики дизеля Д49. **Результаты:** в результате моделирования работы энергетической установки тепловоза получены значения абсолютного и удельного расхода топлива. Полученные результаты обладают высокой степенью достоверности, о чем свидетельствуют полученные ранее статистические данные. **Практическая значимость:** полученные результаты еще раз продемонстрировали влияние ветра на тягу поездов, причем на ветрозависимых участках железных дорог они являются нормообразующими. Рассмотренная модель может быть применена для целей нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов при наличии переменных факторов, влияющих на расход.

Ключевые слова: имитационная модель поезда, ветровые нагрузки, тяга поездов, тяговая электрическая передача тепловоза, энергоэффективность.

Введение

Повседневный опыт эксплуатации локомотивных ресурсов дает многочисленные примеры существенного влияния ветра на движение поездов. Известно, что на многих дорогах, таких как Северо-Кавказская, Приволжская, Западно-Сибирская, сильные ветры вызывают задержки поездов и повышенный расход энергии [1–3].

В данной статье будет предложена имитационная модель поезда для учета расхода топлива тепловозом при наличии ветровых нагрузок применитель-

но к участку Верхний Баскунчак — Палласовка Приволжской железной дороги. Данный участок характеризуется равнинным профилем, движение поездов на нем осуществляется примерно с постоянной скоростью [4]. Расход топлива при этом будет определен в результате выполнения тягового расчета с использованием моделей поезда и элементов, его составляющих, которые будут рассмотрены далее [5].

Обзор и построение модели поезда

В работе использована многомассовая модель поезда, в которой каждая единица подвижного состава (вагоны или локомотив) представлены как сосредоточенные массы, объединенные в единую систему через межвагонные связи. Применение данной модели (рис. 1) позволило задать индивидуальные параметры и характеристики для каждого экипажа.

Движение каждого экипажа описывается следующей системой:

$$\begin{cases} \frac{dv_i}{dt} = \frac{\sum F_i}{(1 + \gamma_i)m_i}, \\ \frac{dS_i}{dt} = v_i \end{cases}, \quad (1)$$

где v_i — скорость i -го экипажа; m_i — масса i -го экипажа; γ_i — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей i -го экипажа; $\sum F_i$ — суммарная внешняя сила, действующая на i -й экипаж.

В свою очередь, суммарная внешняя сила, действующая на i -й экипаж, вычисляется по формуле :

$$F_i = F_{\kappa i} - B_i \pm W_i, \quad (2)$$

где $F_{\kappa i}$ — сила тяги, реализуемая i -м экипажем; B_i — сила торможения i -го экипажа; W_i — сила сопротивления движению, действующая на i -й экипаж.

Основное сопротивление движению локомотива $w_{\text{л0}}$ вычисляется следующим образом [6]:

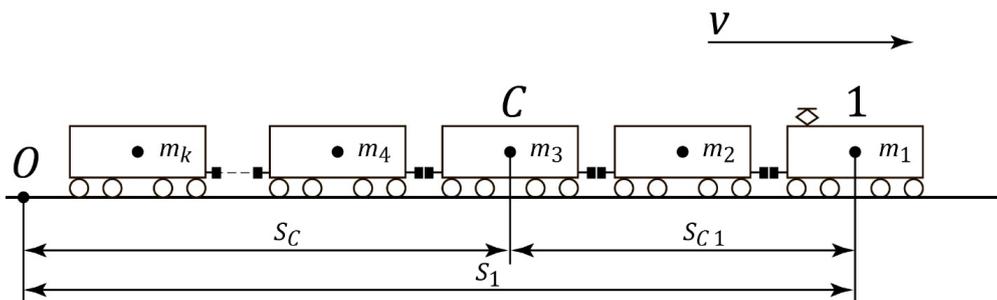


Рис. 1. Модель поезда для исследования

$$w_{л0} = (a_0 + b_0 v + c_0 v^2) \cdot m_0, \quad (3),$$

где a_0, b_0, c_0 — коэффициенты, которые зависят от серии локомотива, типа пути и режима ведения поезда — тяга (электрическое торможение) или выбег.

Величину силы основного сопротивления движению вагона w_0 можно вычислить по следующей формуле:

$$w_{0i} = \left(a_{li} + \frac{b_{li} + c_{li} \cdot v_i + d_{li} \cdot v_i^2}{q_{0i}} \right) \cdot m_i, \quad (4)$$

где $a_{li}, b_{li}, c_{li}, d_{li}$ — коэффициенты, зависящие от типа буксового узла вагона, его загрузки, характеристик пути для i -го экипажа, и принимаются в соответствии с начальными условиями; q_{0i} — осевая нагрузка i -го экипажа.

Известно, что составляющие формул (3) и (4) при v^2 соответствуют аэродинамической составляющей сопротивления движению. При моделировании движения поезда при отсутствии ветровой нагрузки для вычисления сил сопротивления движению экипажей были использованы формулы (3) и (4). При наличии ветровой нагрузки данные формулы были приведены к виду:

$$W_{л0} = (a_0 + b_0 v) \cdot m_0 + W_{вл}, \quad (3')$$

$$W_{0i} = \left(a_{li} + \frac{b_{li} + c_{li} \cdot v_i}{q_{0i}} \right) \cdot m_i + W_{vi}, \quad (4'),$$

$W_{вл}, W_v$ — сопротивление воздушной среды для локомотива и i -го вагона. Данные составляющие определены в результате выполнения аэродинамического расчета в программном пакете Solidworks Flow Simulation [7] для различных скоростей движения поезда, ветра и угла между направлением воздушного ветрового потока и скорости движения поезда [8].

В работе исследован участок, характеризующийся равнинным профилем и примерно постоянной скоростью движения. В этом случае для определения силы тяги, необходимой для движения поезда с заданной постоянной скоростью при действии переменных возмущающих сил, удобно использовать результат работы автоматического регулятора скорости движения поезда [9], работающего в режиме стабилизации скорости (рис. 2).

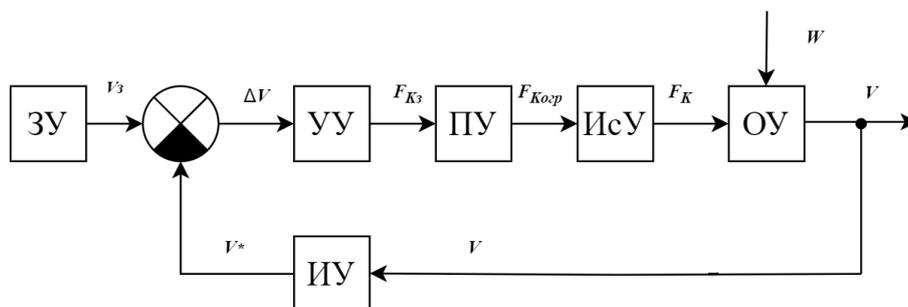


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема САУ регулятора скорости

При этом сделаем допущение, что сила тяги, реализуемая локомотивом, может принимать любое значение, ограниченное тяговыми характеристиками, соответствующими наибольшей мощности ДГУ на 15-й позиции контроллера (рис. 3).

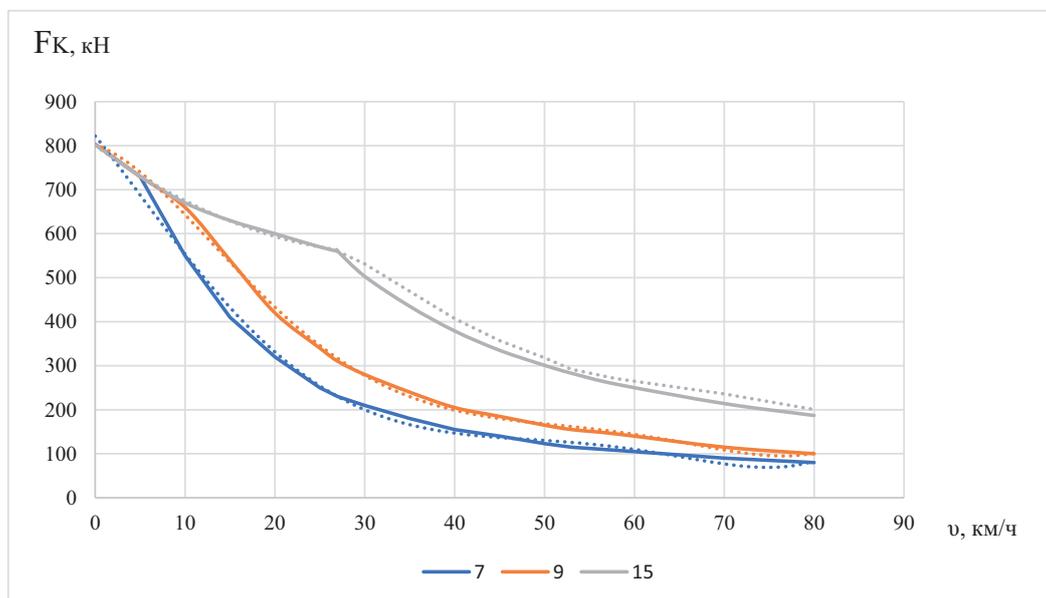


Рис. 3. Тяговые характеристики и аппроксимация их степенным полиномом на 7-й, 9-й, 15-й позициях контроллера

Определение потребной механической мощности дизеля было выполнено путем обратного моделирования энергетической цепи тепловоза с передачей переменного-постоянного тока, функциональная схема которой приведена на рис. 4, 5.

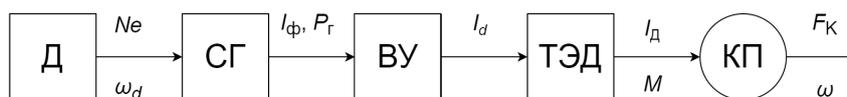


Рис. 4. Схема электрической передачи постоянно-переменного тока тепловоза

На рис. 4 использованы следующие обозначения: Д — дизель, СГ — синхронный генератор, ВУ — выпрямительная установка, ТЭД — тяговые электродвигатели, КП — колесные пары. Крутящий момент ω_d и эффективная мощность дизеля N_e передаются на синхронный генератор, который преобразует механическую энергию дизеля в электрическую I_ϕ, P_g и питает выпрямительную установку. Выпрямительная установка преобразует переменный ток генератора в постоянный I_d для питания тяговых электродвигателей. Тяговые электродвигатели преобразуют электрическую энергию I_d в механическую (крутящий момент M на валу якоря) и передают ее на колесные пары, которые реализуют касательную силу тяги F_k .

Определение расхода топлива на основе имитационной модели

На рис. 5 схематично изображен алгоритм нахождения расхода топлива тепловозом через мощность дизеля. Для определения мощности генератора и, соответственно, эффективной мощности дизеля необходимо смоделировать обратную цепочку. Пользуясь электротяговыми характеристиками ТЭД ЭД133 (рис. 6), можно найти силу тяги F_K и ток тяговых двигателей I_D и, соответственно, их мощность P_K , учитывая КПД тяговой передачи. Зная мощность ТЭД $P_{ТЭД}$, его ток, КПД η_D , можно определить ток $I_{ВУ}$ и мощность $P_{ВУ}$, выпрямительной установки, а затем, зная ток фазы I_ϕ синхронного генератора, — механическую мощность генератора с учетом КПД, которая будет равна эффективной мощности дизеля.

По полученной зависимости $F_K(v)$ (рис. 3) для каждого момента времени определялась касательная мощность тепловоза как:

$$P_K = F_K v. \quad (5)$$

Механическая мощность на валу тягового генератора определяется как отношение касательной мощности к КПД передачи тепловоза с учетом затрат энергии на собственные нужды тепловоза:

$$N_\Gamma = \frac{P_K}{\eta_{КМБ} \cdot \eta_{ТЭД} \cdot \eta_{ТГ} \cdot \eta_{ВУ}} + P_{СН}, \quad (6)$$

где $\eta_{КМБ}$ — КПД колесно-моторного блока тепловоза, при расчетах принят равным 0,98; $\eta_{ВУ}$ — КПД выпрямительной установки тепловоза, при расчетах принято 0,98; $\eta_{ТЭД}$ — КПД тягового электродвигателя, величина которого определяется из электромеханических характеристик двигателя; $\eta_{ТГ}$ — КПД тягового синхронного генератора (рис. 7).

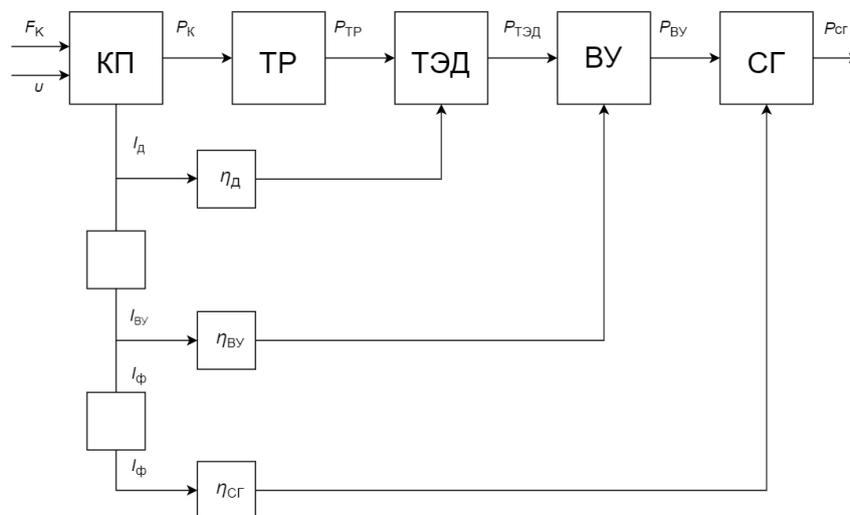


Рис. 5. Алгоритм нахождения расхода топлива

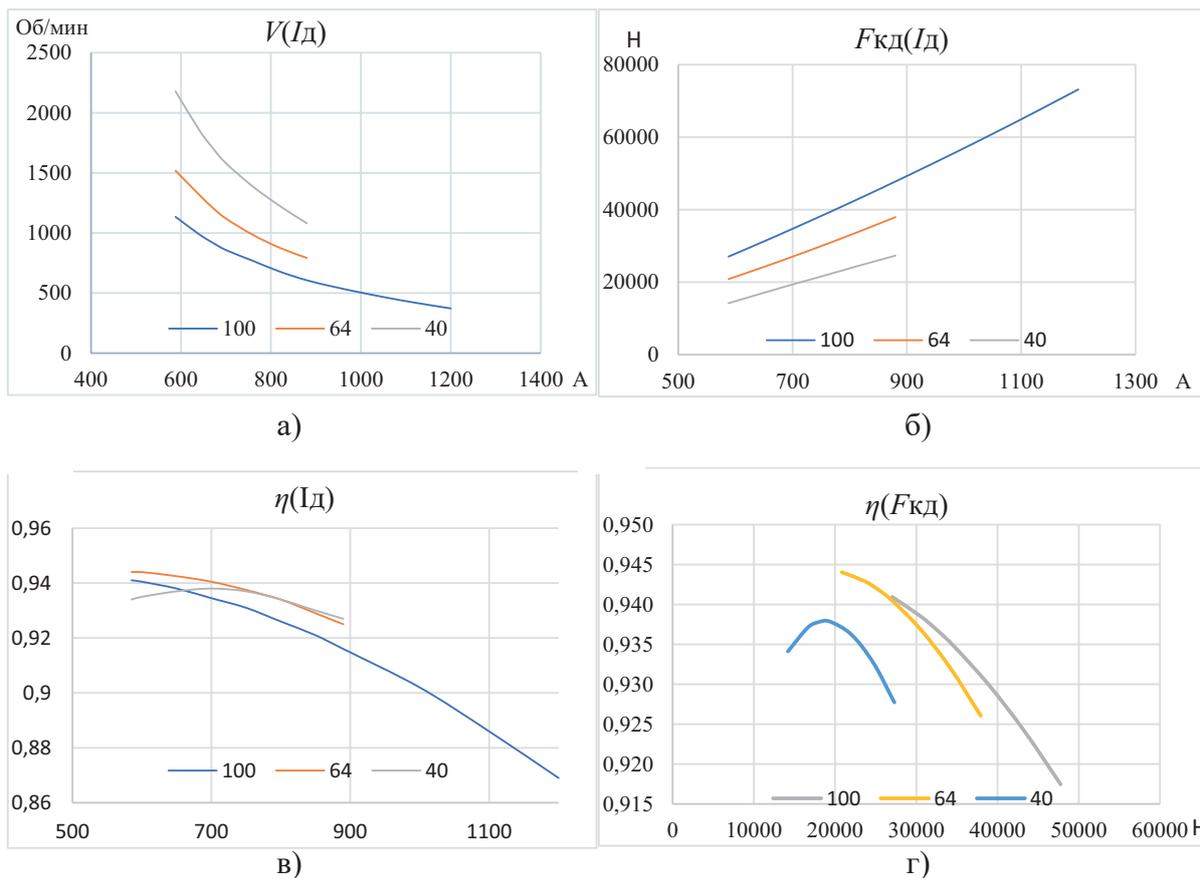


Рис. 6. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя ЭД133[10]

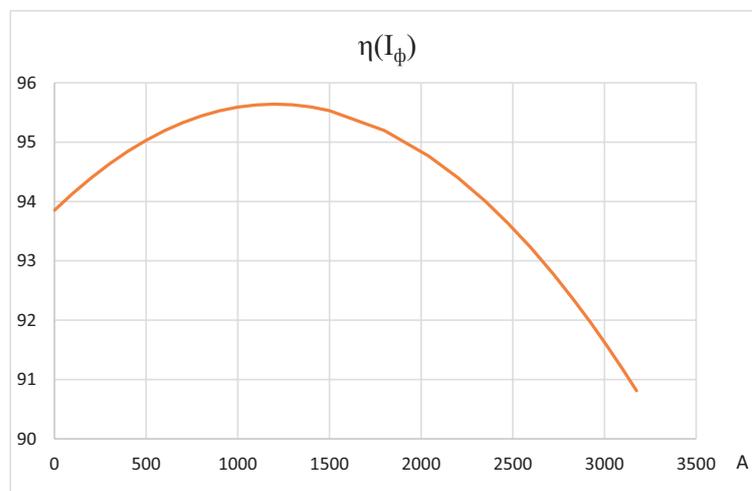


Рис. 7. Зависимость КПД тягового генератора ГС-501 от тока фазы

$$F_{кд} = \frac{F_{к}}{12}, \tag{7}$$

где $F_{к}$ — сила тяги Н, определенная задатчиком скорости для поддержания постоянной скорости движения; $F_{кд}$ — сила тяги одного тягового электродвигателя.

Для выполнения расчетов из электромеханических характеристик двигателя ЭД133 были найдены зависимости $v(I_d)$, $F_{\text{кд}}(I_d)$, $\eta(I_d)$, $\eta(F_{\text{кд}})$ (рис. 6) на всех позициях регулирования возбуждения двигателя. Из этих характеристик, зная силу тяги двигателя $F_{\text{кд}}$, можем найти его КПД $\eta_{\text{ТЭД}}$ и ток I_d .

Ток выпрямительной установки одной секции тепловоза будет равен:

$$I_d = I_d \cdot 6. \quad (8)$$

В свою очередь, ток фазы I_ϕ тягового генератора будет равен:

$$I_\phi = \frac{I_d}{2} \cos \gamma. \quad (9)$$

Зная ток фазы I_ϕ тягового генератора, определяем по характеристике на рис. 6 его КПД.

Мощность на валу тягового электродвигателя будет равна:

$$P'_{\text{ТЭД}} = \frac{P_{\text{к}}}{\eta_{\text{КМБ}} \cdot 12}. \quad (10)$$

Электрическая мощность двигателя:

$$P_{\text{ТЭД}} = \frac{P'_{\text{ТЭД}}}{\eta_{\text{ТЭД}}}. \quad (11)$$

Мощность на входе выпрямительной установки:

$$P_{\text{ВУ}} = \frac{P_{\text{ТЭД}}}{\eta_{\text{ВУ}}}. \quad (12)$$

Механическая мощность на валу генератора равна:

$$N_{\text{Г}} = \frac{P_{\text{ВУ}}}{\eta_{\text{Г}}}. \quad (13)$$

Затраты мощности генератора для обеспечения собственных нужд тепловоза вычисляются так:

$$P_{\text{СН}} = P_{\text{МВ}} + P_{\text{ОхТД}} + P_{\text{ОхВУ}} + P_{\text{Комп}}, \quad (14)$$

где $P_{\text{МВ}}$ — мощность мотор-вентиляторов охлаждения шахты холодильника. В расчетах равна 60 кВт; $P_{\text{ОхТД}}$ — мощность мотор-вентиляторов охлаждения тяговых электродвигателей 1-й и 2-й тележек. В расчетах равна 90 кВт; $P_{\text{ОхВУ}}$ — мощность мотор-вентиляторов охлаждения выпрямительной установки в расчетах равна 7 кВт; $P_{\text{Комп}}$ — мощность электродвигателя компрессора в расчетах 18 кВт.

На основе данных [11] получаем значение мощности генератора, которая отдается на обеспечение собственных нужд одной секции, равной 175 кВт.

Эффективная мощность дизеля будет равна:

$$N_e = N_{\Gamma} + P_{\text{СН}}. \quad (15)$$

В свою очередь, удельный расход топлива тепловозом, затраченный на вождение поезда заданной массы на рассматриваемом участке в любой момент времени и при заданной силе тяги локомотива можно найти из эксплуатационных характеристик тепловозного дизеля типа Д49 рисунок 7[12]

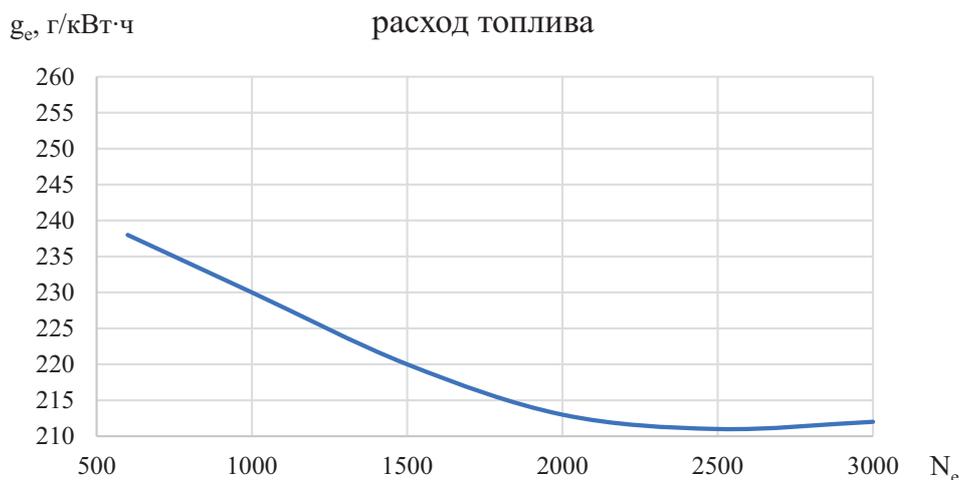


Рис. 8. Параметры расхода топлива дизеля Д49 16ЧН 26/26 в зависимости от мощности

Общий расход топлива тепловозом при выполнении работы на рассматриваемом участке будет равен интегральной сумме расходов по времени при движении с постоянной силой тягой

Результаты расхода топлива тепловозом при движении по участку со скоростями 40 км/ч, 60 км/ч представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Расход топлива тепловозом при движении по участку со скоростями 40 км/ч, 60 км/ч

Скорость ветра	Скорость движения поезда			
	$v = 40$ км/ч		$v = 60$ км/ч	
	Е	е	Е	е
0	1178 кг	27,4	1311 кг	30,5
6	1590 кг	37	1600 кг	37,3
9	1812 кг	42,2	1793 кг	41,8
13	2066 кг	48,1	2045 кг	47,6

Выводы

О достоверности полученных значений удельного расхода топлива с большой вероятностью говорит то, что значения соответствуют статистическим значениям, полученным в результате обработки маршрутов машинистов.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что скорость движения влияет на расход топлива, движение с большей скоростью в отсутствие ветровых нагрузок повышает расход. Ветер также увеличивает расход топлива, при этом его влияние больше при движении с меньшими скоростями. Это подтверждает вывод, что сопротивление движению от ветра (при его наличии) является основой аэродинамического сопротивления, так как из значений таблицы мы видим, что с ростом скорости ветра расход топлива при разных скоростях движения поезда остается примерно одинаковым.

Данная имитационная модель поезда может быть успешна применена для вопросов нормирования расхода топливных ресурсов на тягу поездов, обращающихся на участках со сложными метеорологическими условиями, а также с целью выявления влияния ветровых нагрузок на тягу поездов.

Библиографический список

1. Годовой отчет ОАО «РЖД» 2018 года [Электронный ресурс]. URL: <https://ar2018.rzd.ru/> (дата обращения: 21.03.2018).
2. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов: сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, С. А. Виноградов и др. М.: ВМГ-Принт, 2014. 144 с.
3. Розы ветров России [Электронный ресурс]. URL: <http://lakka-sails.ru/winds/>.
4. ГОСТ 16350-80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. утв. 01.07.1981.
5. Гребнев И. А., Сидорова Н. Н., Пудовиков О. Е. Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка — Верхний Баскунчак с целью выявления ветровых нагрузок // Бюллетень научных исследований. ПГУПС. 2022. № 3. С. 75–87.
6. Гребенюк П. Т. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985, 287 с.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты и SolidWorksSimulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.
8. Гребнев И. А., Пудовиков О. Е. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд // Известия Транссиба. ОМГУПС. Омск. 2022. № 4. С. 13–21.
9. Пудовиков О. Е. Система автоматического управления скоростью движения грузового поезда с эталонной моделью объекта управления / О. Е. Пудовиков, М. Ю. Куликов, Е. В. Сердобинцев и др. // Прорывные технологии электрического транспорта: материалы Девятого Международного симпозиума «Элтранс-2017» (Eltrans-2017), посвященного 130-летию основания Г. К. Мерчингом электротехнической школы в России. 18–20 октября 2017 г., Санкт-Петербург. СПб.: ООО «ИПК «НП-Принт». 2019. С. 334–339.

10. Верещак Д. М. Электродвигатель тяговый постоянного тока ЭД 133 УХЛ1: протокол периодических испытаний. ТХ.218.1277. Харьков, 2015. 19 с.

11. Киржнер Д. Л., Кравченко О. В., Чикиркин О. В. и др. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Ч. 1–4. 2015. 526 с.

12. Никитин Е. А. Тепловозные дизели типа Д49 / В. М. Ширяев, В. Г. Быков, Г. В. Никоннов и др. Л.: Издательство «Транспорт», 1982. 254 с.

Дата поступления: 20.01.2024

Решение о публикации: 22.02.2024

Контактная информация:

ГРЕБНЕВ Иван Алексеевич — аспирант, lokomotiv197309@gmail.com

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ), oleger@mail.ru

Train simulation model to take into account the influence of wind loads

I. A. Grebnev, O. E. Pudovikov

Russian University of Transport, 9b9, Obrazcova St., Moscow, 127994, Russia

For citation: *Grebnev I. A., Pudovikov O. E.* Train simulation model to take into account the influence of wind loads // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 30–40. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-30-40

Abstract

Objective: this article is devoted to the problem of regulation of fuel resources for train traction in the presence of variable factors affecting consumption. As an example, the wind-dependent section of the Privolzhskaya railway Pallasovka–Verkhniy Baskunchak was considered, using simulation modeling, the presence of the influence of variable factors on fuel consumption, which are often standard-setting. To propose a methodology for their practical accounting in locomotive depots. **Methods:** the article proposes a train simulation model to take into account the influence of wind loads. For this purpose, the traction electric drive of a diesel locomotive with direct-alternating current transmission was presented as a speed controller that maintains the movement of the train at a constant speed equal to the technical average. To determine fuel consumption in order to determine the reliability of the results obtained and the possibility of comparison with experimental statistical values, the electromechanical characteristics of the ED133 traction motor, the GS501 generator and the operational characteristics of the D49 diesel engine were used. **Results:** as a result of modeling the operation of the diesel locomotive power plant, the values of absolute and specific fuel consumption were obtained. The results obtained have a high degree of reliability, as evidenced by earlier statistical data. **Practical significance:** the results obtained once again demonstrated the influence of wind on train traction, and on wind-dependent sections of railways they are standard-forming. The considered model can be applied for the purpose of rationing the consumption of fuel and energy resources in the presence of variable factors affecting consumption.

Keywords: train simulation model, wind Loads, train traction, diesel-electric locomotive, energy efficiency.

References

1. Godovoj otchet OAO "RZhD" 2018 goda [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://ar2018.rzd.ru/> (data obrashhenija: 21.03.2018). (In Russian)
2. Sovremennaja metodologija tehničeskogo normirovanija rashoda toplivno-jenergetičeskikh resursov lokomotivami na tjagu poezdov: sb. tr. učenyh OAO "VNIIZhT" / L. A. Muginshtejn, A. I. Molchanov, S. A. Vinogradov i dr. M.: VMG-Print, 2014. 144 s. (In Russian)
3. Rozy vetrov Rossii [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://lakka-sails.ru/winds/>. (In Russian)
4. GOST 16350-80 Klimat SSSR. Rajonirovanie i statističeskie parametry klimatičeskikh faktorov dlja tehničeskikh celej. utv. 01.07.1981. (In Russian)
5. Grebnev I. A., Sidorova N. N., Pudovikov O. E. Statističeskij analiz poezdopotoka na uchastke Pallasovka — Verhnij Baskunchak s cel'ju vyjavlenija vetrovyh nagruzok // Bjulleten' nauchnyh issledovanij. PGUPS. 2022. № 3. S. 75–87. (In Russian)
6. Grebenjuk P. T. Pravila tjagovyh raschetov dlja poezdnoj raboty. M.: Transport, 1985, 287 s. (In Russian)
7. Aljamovskij A. A. Inženernye rasčety i SolidWorksSimulation. M.: DMK Press, 2010. 464 s. (In Russian)
8. Grebnev I. A., Pudovikov O. E. K ocenke vlijanija vetrovoj nagruzki na gruzovoj poezd // Izvestija Transsiba. OMGUPS. Omsk. 2022. № 4. S. 13–21. (In Russian)
9. Pudovikov O. E. Sistema avtomatičeskogo upravlenija skorost'ju dvizhenija gruzovogo poezda s jetalonom model'ju ob#ekta upravlenija / O. E. Pudovikov, M. Ju. Kulikov, E. V. Serdobincev i dr. // Proryvnye tehnologii jelektričeskogo transporta: materialy Devjatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma "Jeltras-2017" (Eltrans-2017), posvjashhennogo 130-letiju osnovanija G. K. Merchingom jelektrotechničeskoi shkoly v Rossii. 18–20 oktjabrja 2017 g., Sankt-Peterburg. SPb.: OOO "IPK "NP-Print". 2019. S. 334–339. (In Russian)
10. Vereshhak D. M. Jelektrodvigatel' tjagovyj postojannogo toka JeD 133 UHL1: protokol periodičeskikh ispytanij. TH.218.1277. Har'kov, 2015. 19 s. (In Russian)
11. Kirzhner D. L., Kravchenko O. V., Chikirkin O. V. i dr. Magistral'nyj gruzovoj dvuhsekcijnyj teplovoz 2TJe25KM. Rukovodstvo po jekspluatacii. Ch. 1–4. 2015. 526 s. (In Russian)
12. Nikitin E. A. Teplovoznye dizeli tipa D49 / V. M. Shirjaev, V. G. Bykov, G. V. Nikonov i dr. L.: Izdatel'stvo "Transport", 1982. 254 s. (In Russian)

Received: 20.01.2024

Accepted: 22.02.2024

Author's information:

Ivan A. GREBNEV — Postgraduate Student, lokomotiv197309@gmail.com

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, olegep@mail.ru