

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 629.4.016.2
doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-31-38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЛОКОМОТИВОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Николай Вячеславович Гребенников✉

Ростовский государственный университет путей сообщения; Ростов-на-Дону, Россия
grebennikovnv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5959-2547>

Аннотация

В статье рассматривается задача определения коэффициента полезного действия тяговых электрических машин локомотивов в условиях эксплуатации. В связи с тем, что большую часть времени локомотивы эксплуатируются с неполной нагрузкой, то для объективной оценки энергоэффективности локомотивов возникает необходимость учитывать недоиспользования мощности тяговых электрических машин в процессе преобразования энергии. На основе методов теории электропривода синтезирована формула определения коэффициента полезного действия для тяговых

электрических машин, работающих в широком диапазоне мощностей, которая учитывает влияние изменения режимов работы на энергоэффективность преобразования энергии. Представлены результаты анализа данных эксплуатации тепловоза 2ТЭ25К^М и определена зависимость коэффициента полезного действия в зависимости от позиции контроллера машиниста.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия, машины, энергоэффективность, мощность.

Ссылка для цитирования:

Гребенников Н.В. Определение коэффициента полезного действия тяговых электрических машин локомотивов в условиях эксплуатации / Н.В. Гребенников // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 04. – С. 31-38. doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-31-38.

Original article
Open Access Article

DEFINITION OF THE EFFICIENCY FACTOR OF TRACTION ELECTRIC MACHINES OF LOCOMOTIVES IN OPERATING CONDITIONS

Nikolay Vyacheslavovich Grebennikov✉

Rostov State Transport University; Rostov-on-Don, Russia
grebennikovnv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5959-2547>

Abstract

The paper deals with the problem of defining the efficiency factor of electric traction machines of locomotives in operating conditions. Due to the fact that most of the time locomotives are operated with underload, for an objective evaluation of the energy efficiency of locomotives, it becomes necessary to take into account the power underutilization of traction electric machines in energy conversion. Based on the methods of electric drive theory, a formula for defining the efficiency factor for traction electric machines op-

erating in a wide range of capacities is developed, which takes into account the influence of changes in operating modes on the efficiency of energy conversion. The analysis results of 2ТЭ25К^М diesel locomotive operation data are presented and the dependence of the efficiency factor in accordance with the position of the driver's controller is determined.

Keywords: efficiency factor, machines, energy efficiency, power.

Reference for citing:

Grebennikov NV. Definition of the efficiency factor of traction electric machines of locomotives in operating conditions. Transport Engineering. 2023; 4:31-38. doi: 10.30987/2782-5957-2023-4-31-38.

Введение

В настоящее время ведутся активные работы по поиску оптимальных технических решений для создания энергоэффективных локомотивов с различными вариантами исполнения тягового оборудования. Опыт эксплуатации маневровых и магистральных локомотивов показал [1, 2], что на сегодняшний день имеется констатация низкой энергетической эффективности маневровых и мощных современных магистральных локомотивов, особенно при работе с легковесными поездами, а повышение энергоэффективности перевозочного процесса не может быть достигнуто только лишь за счет создания новых мощных локомотивов [3]. Внимание стоит уделять режимам работы тягового оборудования локомотивов [4], что позволит привести в соответствие мощностные характеристики к условиям эксплуатации, а так же совершенствовать алгоритмы работы тягового и вспомогательного оборудования. При определении касательной силы тяги локомотива через ток двигателей постоянного тока или через мощность звена постоянного тока для асинхронного привода, в настоящее не учитывается зависимость изменения коэффициента полезного действия (КПД) от реализуемой мощности тяговым приводом, что не позволяет получить объективную оценку энергоэффективности тягового привода. Поэтому актуальным является разработка методов определения энергетической эффективно-

Материалы и методы

Основными потерями в электрических машинах являются [7, 8, 9]:

- электрические потери в обмотках статора и ротора (якоря);
- омические потери;
- потери в магнитопроводе (потери в стали на гистерезис, вихревые токи и т.д.);
- потери вентиляционные (потери на привод системы вентиляции);
- добавочные потери;
- потери в трущихся частях (потери механические).

Коэффициент полезного действия электрических машин зависит от [10]:

- мощности;

сти тяговых электрических машин (ТЭМ) локомотива.

Определение коэффициента полезного действия тяговых электродвигателей (ТЭД) в процессе эксплуатации затруднительно, т.к. фактически можно узнать мощность, подводимую к ТЭД, а мощность, реализуемая на валу ТЭД, как правило, определяется расчетным путем, при этом используется зависимость КПД в функции тока якоря $\eta_n(I) = f(I_a)$, приведенную в электромеханических характеристиках ТЭД [5]. Аналогично и для тягового генератора (ТГ) – в условиях эксплуатации можно измерить только получаемую электрическую мощность.

С учетом того, что электромеханические характеристики ТЭД получены при напряжении, соответствующем внешней характеристике тягового генератора для 15 позиции контроллера машиниста (ПКМ), а управление тяговыми двигателями постоянного тока (и для асинхронных в зоне низких скоростей движения) осуществляется за счет изменения подаваемого напряжения, то необходимо осуществлять перерасчет коэффициента полезного действия, для условий эксплуатации, либо вычислять мощность на валу через разность подводимой мощности и потерь, возникающих в процессе преобразования энергии [6].

- напряжения питания;
- силы тока в обмотке якоря (ротора);
- силы тока в обмотке возбуждения (статора);
- частоты вращения якоря (ротора);
- степени ослабления магнитного потока возбуждения;
- способа (алгоритма) управления.

Суммарные потери мощности в электрической машине [7] состоят из потерь в меди в обмотках возбуждения и якоря $\Delta P_{эл}$ (электрические или омические потери), потерь в переходном сопротивлении контакта щёток и коллектора $\Delta P_{щ}$ (для машин постоянного тока), потерь в стали магнитопро-

вода остова и якоря $\Delta P_{ст}$, добавочных $\Delta P_{д}$

$$\sum \Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{щ} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{д} + \Delta P_{мех}. \quad (1)$$

Определение отдельных составляющих потерь возможно, но сопряжено с рядом трудностей, а также с достаточно большим объемом исходных данных и расчетов, поэтому предлагается метод определения потерь, в основе которого лежит использование электромеханических характеристик с дальнейшим их перерасчетом под условия работы тяговых электрических машин в процесс эксплуатации локомотива.

Рассмотрим метод определения коэффициента полезного действия ТЭМ

$$\eta_{ТЭМ} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (2)$$

$$\eta_{ТЭД}(I, P_1) = \left(1 - \frac{(1 - \eta_n(I)) P_1''}{P_1} \right). \quad (3)$$

При малых частотах вращения якоря ТЭД, основные потери приходятся на омические

и механических потерь $\Delta P_{мех}$,

где P_2 – реализуемая мощность (механическая на валу для ТЭД, электрическая для ТГ); P_1 – подводимая мощность (электрическая для ТЭД, механическая на валу ТГ); ΔP – потери мощности в тяговой электрической машине.

Тогда, на примере двигателей постоянного тока, при использовании электромеханических характеристик, формула для определения коэффициента полезного действия ТЭД в функции тока и мощности примет вид

ческие потери в обмотках ТЭД, которые определяются по формуле

$$\Delta P_{эл} = I^2 r = I_a^2 r_a + (\alpha I_a)^2 \left(\frac{r_B r_{щ}}{r_B + r_{щ}} \right), \quad (4)$$

где I_a – ток якоря ТЭД; r_a – сопротивление якорной обмотки; α – коэффициент ослабления поля; r_B – сопротивление обмотки возбуждения; $r_{щ}$ – сопротивление шунтов ослабления поля.

Величину сопротивления шунта ослабления магнитного поля, можно определить через коэффициент ослабления поля по формуле [7]

$$r_{щ} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} r_B. \quad (5)$$

Сопротивления определяются по паспортным характеристикам ТЭД с учетом увеличения сопротивления при нагреве ТЭД

$$r = r_H [1 + \delta(T_P - T_H)], \quad (6)$$

где r_H – сопротивление обмотки ТЭД, при нормальных условиях окружающей среды и температуре T_H , как правило, в характеристиках ТЭД указывается при температуре 20 °С; δ – коэффициент изменения электрического сопротивления при изменении температуры, Ом/°С; T_P – рабочая температура обмоток ТЭД.

При отсутствии данных о рабочей температуре ТЭД, следует принимать расчетную рабочую температуру в соответствии с ГОСТ 25941-83 в зависимости от класса применяемой изоляции.

Потери в переходном сопротивлении контакта щёток и коллектора определяются на основании данных о падении напряжения для устанавливаемых щеток и тока якоря

$$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} I_a, \quad (7)$$

где $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в переходном сопротивлении контакта щеток и коллектора (принимается равным 1 В при применении графитовых щеток и 0,3 В при применении металлографитовых).

Добавочные и дополнительные потери определяются опытным путем, либо принимаются равными 1...1,5 % от входной мощности, при этом в частичных режимах нагрузки пересчитывают пропорционально квадрату тока [7].

Потери в стали магнитопровода остова и якоря $\Delta P_{ст}$, потери на гистерезис и вихревые токи зависят от частоты вращения

якоря и магнитной индукции в ярме и зубцах магнитопровода якоря [11]

$$\Delta P_{ст} \propto f^{1,5} B^2 \quad (8)$$

где f – частота перемагничивания сердечника ротора; B – магнитная индукция в магнитопроводе.

С учетом того, что магнитная индукция пропорциональна току возбуждения, то потери в магнитопроводе пропорциональны квадрату тока якоря, умноженному на коэффициент ослабления поля

$$\Delta P_{ст} \propto f^{1,5} (\alpha I_a)^2 \quad (9)$$

Механические потери $\Delta P_{мех}$ состоят из потерь в подшипниках, потерь трения щеток о коллектор и вентиляционных потерь (при принудительной вентиляции величина данных потерь в самой машине будет на порядок меньше). С учетом того, что тяговые двигатели тепловозов имеют принудительную вентиляцию, то механические потери можно принять пропорционально

частоте вращения якоря. При самовентиляции принимаются пропорционально квадрату частоты вращения.

$$\Delta P_{мех} \propto n \quad (10)$$

где n – частота вращения ротора.

Если принять допущение, что потери на перемагничивание якоря пропорциональны изменению частоты вращения якоря, то в результате получим, что общие потери в тяговых машинах являются функцией тока якоря и частоты вращения (или скорости тепловоза)

$$\Delta P(I_a, n) = k_1 I_a^2 + k_2 n, \quad (11)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности квадрату тока якоря; k_2 – коэффициент пропорциональности частоте вращения якоря.

Тогда выражение для определения коэффициента полезного действия примет вид

$$\eta_{ТЭД} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{k_1 I_a^2 + k_2 n}{U_d I_a}. \quad (12)$$

Коэффициент k_1 и k_2 можно определить из электромеханических характеристик двигателя, исходя из максимального значения коэффициента полезного действия.

Условие, обеспечивающее максимально значение, можно записать в виде обращения в ноль частной производной коэффициента полезного действия по току якоря

$$\frac{\partial \eta_{ТЭД}}{\partial I_a} = \frac{k_1 I_a^2 - k_2 n}{(I_a)^2} = 0. \quad (13)$$

Известно, что дробь равна нулю тогда и только тогда, когда числитель равен нулю, а знаменатель отличен от нуля. В результате получим, равенство переменных потерь зависящих от квадрата тока и условно постоянных потерь при фиксированной частоте вращения

$$k_1 I_a^2 = k_2 n. \quad (14)$$

Определение коэффициента k_1 осуществляется из рассуждений, что при максимальном значении КПД, потери в равной степени будут разделены на две составляющие, в результате получим формулу для ко-

эффициента k_1 пропорциональности квадрату тока якоря

$$k_1 = \frac{(1 - \eta_{max}) P_1^*}{2 I_{a*}^2}, \quad (15)$$

где η_{max} – максимальное значение коэффициента полезного действия; P_1^* – входящая (электрическая) мощность ТЭД при максимальном значении коэффициента полезного действия; I_{a*} – ток якоря ТЭД при максимальном значении коэффициента полезного действия.

Если известна выходная мощность, например для тягового генератора,

$$k_1 = \left(\frac{1}{\eta_{max}} - 1 \right) \frac{P_2^*}{2 I_{a*}^2}, \quad (16)$$

где P_2^* – исходящая (электрическая) мощность ТГ при максимальном значении коэффициента полезного действия.

Аналогичным образом определяется и коэффициент k_2

$$k_2 = \frac{(1 - \eta_{max}) P_1^*}{2n}, \quad (17)$$

или

$$k_2 = \left(\frac{1}{\eta_{\max}} - 1 \right) \frac{P_2^*}{2 \cdot n}, \quad (18)$$

где n – частота вращения якоря ТЭМ при максимальном значении коэффициента полезного действия, об/с.

Для повышения точности расчета коэффициента k_1 и k_2 следует определять для режима полного поля и каждой ступени ослабления поля.

Известно, что скорость движения локомотива можно определить через частоту вращения якоря ТЭД

$$\eta_{\text{ТЭД}}(I_a, P_{DC}, V, \alpha) = 1 - \frac{k_1(\alpha)I_a^2 + k_2^*(\alpha)V}{P_{DC}}. \quad (21)$$

Практически на всех тепловозах с электрической передачей мощности управление происходит за счет изменения напряжения, что влияет на эффективность процесса электромагнитного преобразования энергии в магнитной системе электрической

$$V = \frac{3,6\pi n D_K}{\mu}, \quad (19)$$

тогда

$$k_2^* = k_2 \frac{3,6\pi n D_K}{\mu}. \quad (20)$$

В результате получаем формулу для определения коэффициента полезного действия, как функцию трех переменных в зависимости от тока якоря, входной мощности и скорости движения локомотива

$$\eta_{\text{ТЭД}}(I_a, U_{DC}, V, \alpha) = 1 - \frac{k_1(\alpha)I_a^2 + k_2^*(\alpha)V k_3(\alpha, U_{DC})}{I_a U_{DC}}, \quad (22)$$

где $k_3(\alpha, U_{DC})$ – коэффициент, учитывающий эффективность преобразования энергии в магнитной системе.

машины. В этом случае необходимо использовать дополнительный коэффициент, учитывающий эффективность процесса преобразования энергии в зависимости от напряжения

$$k_3(\alpha, U_{DC}, V) = 1 + \frac{\left| \left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2 - (U_{DC})^2 \right|}{\left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2}, \quad (23)$$

где $U_{DC}^*(\alpha)$ – напряжение звена постоянного тока при максимальном значении коэффициента полезного действия, для соответствующей ступени ослабления поля; V^* – скорость локомотива, соответствующая

максимальному значению коэффициента полезного действия.

Окончательно получаем аналитическую функцию четырех переменных, позволяющую определить коэффициент полезного действия во всем диапазоне эксплуатационных режимов

$$\eta_{\text{ТЭД}}(I_a, U_{DC}, V, \alpha) = 1 - \frac{1}{I_a \cdot U_{DC}} \left[k_1(\alpha) \cdot I_a^2 + k_2^*(\alpha) \cdot V \cdot \left(1 + \frac{\left| \left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2 - (U_{DC})^2 \right|}{\left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2} \right) \right]. \quad (24)$$

Коэффициент полезного действия ТЭД (аналогично и для тягового генератора) в зависимости от позиции контроллера машиниста, за период эксплуатации, определяется по формуле

$$\eta_{ТЭДj} = \frac{\sum \eta_i(I_a, U_{DC}, V, \alpha) P_i \Delta t_i}{\sum P_i \Delta t_i}, \quad \{i \in N \mid ПКМ_i = j\}. \quad (25)$$

где j – номер позиции контроллера машиниста; i – номер измерения параметров локомотива; Δt_i – временной интервал между измерениями;

ниста, за период эксплуатации, определяется по формуле

Коэффициент полезного действия ТЭД за весь рассматриваемый период

$$\eta_{ТЭД} = \frac{\sum \eta_i(I_a, U_{DC}, V, \alpha) P_i \Delta t_i}{\sum P_i \Delta t_i}. \quad (26)$$

Результаты

Обработка данных эксплуатации тепловоза 2ТЭ25К^М позволила получить поле мгновенных значений коэффициента полезного действия тяговых электродвигателей (рис. 1) в зависимости от мощности дизель-генераторной установки. Вертикальные скопления точек соответствуют работе на

фиксированных позициях контроллера машиниста, кроме этого видно изменение КПД в широком диапазоне, даже для фиксированных позиций, что объясняется гиперболической внешней характеристикой тягового генератора.

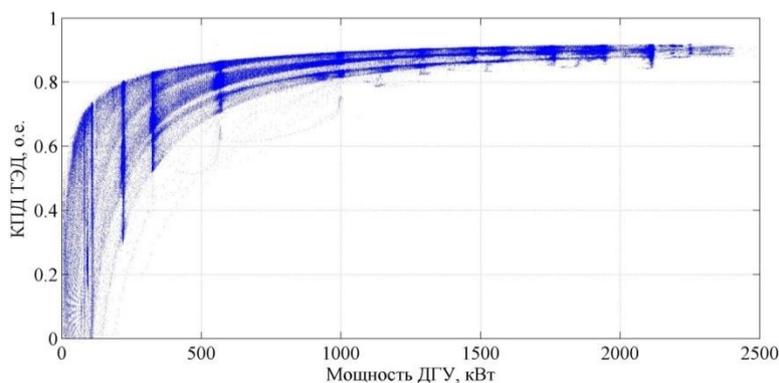


Рис. 1. Поле мгновенных значений коэффициента полезного действия ТЭД в зависимости от мощности дизель-генераторной установки
Fig. 1. Field of quick indicators Efficiency of TED depending on the power of the diesel generator set

Значение коэффициента полезного действия ТЭД в зависимости от позиции контроллера машиниста, определенное по формуле 25, представлено на рис. 2.

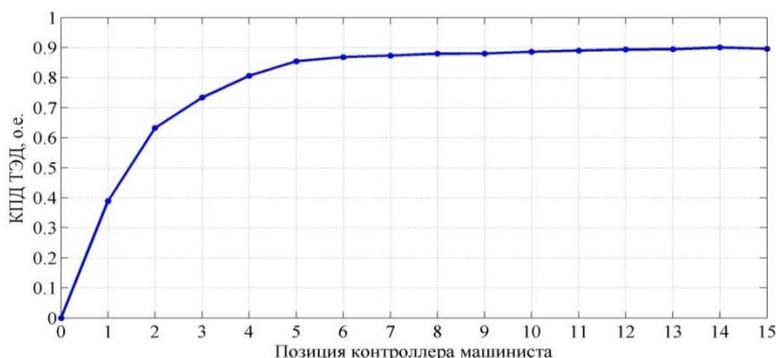


Рис. 2. Значение коэффициента полезного действия ТЭД в зависимости позиции контроллера машиниста
Fig. 2. The value of the efficiency of the TED depending on the position of the driver's controller

Анализ представленных данных на рис. 1 и рис. 2 показывает наличие качественной закономерности увеличения энергетической эффективности тяговых двигателей при увеличении коэффициента использования мощности локомотива, что позволяет для локомотивов, оснащенных

Заключение

Разработанный метод определения энергоэффективности процесса преобразования энергии в тяговых электрических машинах с применением паспортных (технических) характеристик тягового оборудования по данным, получаемым с регистраторов параметров локомотивов позволяет аналитически определить коэффициент полезного действия тяговых элект-

многодвигательным тяговым приводом, построить алгоритм, обеспечивающий стабилизацию мгновенного значения КПД при частичных нагрузках на уровне, близком к значению коэффициента полезного действия номинального режима.

рических машин в зависимости от тока, напряжения звена постоянного тока и частоты вращения якоря (ротора) и определить эффективность использования тяговых электрических машин в зависимости от мощности дизель-генераторной установки или позиции контроллера машины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зарифьян, А. А. Показатели энергетической эффективности грузовых магистральных электровозов в различных условиях эксплуатации / А. А. Зарифьян // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2019. – № 2(46). – С. 28-35. – EDN NIPMTH.
2. Гребенников, Н. В. Анализ энергетической эффективности эксплуатации пассажирского тепловоза ТЭП70БС / Н. В. Гребенников // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 5(95). – С. 17-22. – EDN TITZZW.
3. Особенности проектирования контактно-аккумуляторного маневрового электровоза / П. Г. Колпахчян, А. М. Евстафьев, В. В. Никитин [и др.] // Электротехника. – 2021. – № 10. – С. 15-20. – EDN IWZFD0.
4. Грачев, В. В. О достоверности прямых способов оперативного контроля энергоэффективности тепловозов в эксплуатации / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2018. – № 2(42). – С. 40-48.
5. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, А.Л. Курочка и др.; Под ред. В.И. Бочарова и В.П. Янова. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
6. Владыкин, А. В. Поиск оптимального состояния привода с точки зрения энергоэффективности подвижной единицы / А. В. Владыкин, Н. О.

- Фролов // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3(21). – С. 36-38. – DOI 10.20291/2311-164X-2016-3-36-38.
7. Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. ; перераб. и доп. – Москва : МЭИ, 2003. – 224 с. – ISBN 5-7046-0874-4.
8. Пугачев, А. А. Система управления тяговым асинхронным двигателем с минимизацией мощности потерь / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, А. С. Космодамианский // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2(46). – С. 55.
9. Чуприна, Н. В. Система прямого управления моментом тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами с минимизацией потерь мощности / Н. В. Чуприна, А. А. Пугачев // Интеллектуальная электротехника. – 2022. – № 4(20). – С. 22-37. – DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_22.
10. Пугачев, А.А. Энергетические показатели качества электропривода вспомогательных систем тягового подвижного состава / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, Г.С. Михальченко, А.С. Космодамианский, А.В. Самотканов // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 1(48) – С. 58-66.
11. Мощинский, Ю.А. Обобщенная математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали / Ю.А. Мощинский, Аунг Вин Тут // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 60-66.

REFERENCES

1. Zarifyan AA. Freight electric locomotives power efficiency Indicators in various operating condi-

tions. Institute for Natural Monopolies Research: Railway Equipment. 2019;2(46):28-35.

2. Grebennikov NV. Analysis of the energy efficiency of ТЭП70БС passenger diesel locomotive operation. *Vestnik Transporta Povolzhya*. 2022;5(95):17-22.
3. Kolpakchyan PG, Evstafyev AM, Nikitin VV. Design features of a contact-battery shunting electric locomotive. *Elektrotehnika*. 2021;10:15-20.
4. Grachev VV, Grishchenko AV, Bazilevsky FYu. About the reliability of diesel locomotive energy efficiency operating control indexes. *Institute for Natural Monopolies Reserch: Railway Equipment*. 2018;2(42):40-48.
5. Bocharov VI, Vasilenko GV, Kurochka AL. Main-line electric locomotives. *Traction electric machines*. Moscow: Energoatomizdat; 1992.
6. Vladykin AV, Frolov NO. Search for the optimal state of the drive according to energy efficiency of the moving unit. *Innotrans Journal*. 2016;3(21):36-38. DOI 10.20291/2311-164X-2016-3-36-38 .
7. Ilyinsky NF. *Fundamentals of electric drive: textbook for universities*. 2nd ed. Moscow: MPEI; 2003.
8. Pugachev AA, Vorobyev VI, Kosmodamiansky AS. Control system of tractive induction motor with power loss minimization. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2015;2(46):55-61.
9. Chuprina NV, Pugachev AA. *Traction permanent magnet synchronous motor direct torque control system with power losses minimization*. *Smart Electrical Engineering*. 2022;4(20):22-37. DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_22.
10. Pugachev AA, Vorobyev VI, Mikhilchenko GS, Kosmodamiansky AS, Samotkanov AV. Energy quality indicators of the electric drive of traction rolling stock auxiliary systems. *Transport and Technological Cars*. 2015;1(48):58-66.
11. Moshchinsky YuA, Aung Vin Tut. Generalized mathematical model of a frequency-controlled induction motor taking into account losses in steel. *Elektrichestvo*. 2007;11:60-66.

Информация об авторе:

Гребенников Николай Вячеславович, доцент, к.т.н., доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета

Grebennikov Nikolay Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Traction Rolling Stock at Rostov State

путей сообщения. Scopus-Author ID 56584746500, Research- ID-Web of Science A-2769-2014, Author-ID-РИНЦ 633306.

Transport University. Scopus-Author ID 56584746500, Research- ID-Web of Science A-2769-2014, Author-ID-RSCI 633306.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 13.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 27.03.2023. Рецензент – Космодомианский А.С. доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 13.02.2023; approved after review on 13.02.2023; accepted for publication on 27.03.2023. The reviewer is Kosmodomiansky A.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Traction Rolling Stock at Rostov State Transport University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.