

Удельные затраты энергии поездов с асинхронным электроприводом

И. А. Шлендов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шлендов И. А. Удельные затраты энергии поездов с асинхронным электроприводом // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 1. — С. 118–128. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-118-128

Аннотация

Цель: Оценка энергетической эффективности тяговых приводов на вагонах подвижного состава моделей 81-765/766/767 и 81-556/557/558 («НЕВА») разных производителей и составление технических требований к тяговому электрооборудованию. На составе 81-765/766/767 используется асинхронный двигатель мощностью 170 кВт и номинальной частотой поля 43 Гц, на 81-556/557/558 — 167 кВт с номинальной частотой, равной 70 Гц. **Методы:** Выполнен сравнительный анализ тяговых энергетических показателей поездов с асинхронным электроприводом в соответствии с методикой расчета. Задан мерный участок в соответствии с ГОСТ Р 50850-96. Определены допущения при движении подвижного состава с равным максимальным ускорением в разгоне и максимальным замедлением в торможении и постоянным замедлением в выбеге. Рассчитывалось максимальное ускорение и замедление в соответствии с заданным коэффициентом сцепления, сцепной массой (масса моторных вагонов) и моментом инерции. Проводился расчет методом аналитического интегрирования дифференциального уравнения движения на пяти интервалах разгона. Приняты исходные технические данные поездов с номинальной нагрузкой, а также рассчитанные показатели при движении поездов на мерном участке. Построены диаграммы движения поездов на участке, и произведен сравнительный анализ характеристик составов вагонов моделей 81-765/766/767 и 81-556/557/558 («НЕВА»). **Результаты:** В ходе сравнения установлено, что перегрузка двигателей по моменту на валу одинакова с коэффициентом 1,5 от номинального момента. Составы имеют значительно различающиеся показатели как по удельным затратам, так и по динамике движения. Также установлено, что для минимизации затрат энергии на тягу требуется развивать максимально допустимое замедление при торможении и максимально допустимое ускорение при разгоне. **Практическая значимость:** Обоснована необходимость внесения в Техническое задание на новый подвижной состав требования о проверке составов на возможность разгона с максимальным заданным ускорением.

Ключевые слова: Вагон, поезд метрополитена, асинхронный электропривод, удельные затраты энергии на тягу.

Введение

В настоящее время метрополитены оснащаются новыми вагонами с асинхронным тяговым приводом. На новых вагонах и вагонах, подлежащих капитальному ремонту, устанавливается электронное оборудование для управления

тяговым асинхронным приводом вместо реостатно-контакторной системы управления. С целью оценки энергетической эффективности тяговых приводов вагонов разных производителей и формирования технических требований к тяговому электрооборудованию необходимо провести сравнительный анализ тяговых энергетических показателей поездов с асинхронным электроприводом. С этой целью зададим мерный участок в соответствии с ГОСТ Р 50850-96, равный 1700 м, и время движения 102,5 с без учета стоянки на станции 25 с [1] и проведем расчеты пути, скорости движения, ускорения, производной ускорения, анализ затрат энергии на тягу. Кроме этого, рассчитаем длительный ток, который потребляет один моторный вагон. Силу сопротивления движению во всех случаях примем равной максимальному значению для скорости 75 км/ч. Основным показателем совершенства тяговых приводов являются удельные затраты энергии на тягу [2–4], поэтому проведем их анализ на двух составах 81-765/766/767 и 81-556/557/558 («НЕВА») разных производителей.

Допущения

Принимаем типовую диаграмму скорости при движении на мерном участке, а именно разгон — выбег — торможение с равным максимальным ускорением в разгоне и максимальным замедлением в торможении и постоянным замедлением в выбеге [5, 6]. Статическое и аэродинамическое сопротивление движению поезда в выбеге считаем постоянным и рассчитываем по формуле, приведенной в работе [1] для скорости 75 км/ч при движении в выбеге.

$$F_s = (\delta + a \cdot V + b \cdot V^2) m \cdot g, \quad (1)$$

где $\delta = 2,5$ Н/кН; $a = 0,025$;

$b = \frac{Cb}{m \cdot g}$ — коэффициенты, полученные экспериментальным путем, соответствующие определенному типу подвижного состава метрополитена при движении без тока;

$Cb = 2,474$ — обобщенный коэффициент воздушного сопротивления в рибристом тоннеле для шести вагонов;

$g = 9,82$ м/с² — ускорение свободного падения;

$m_{765} = 291,984$ т — масса поезда 81-765/766/767;

$m_{556} = 270,2$ т — масса поезда «Нева».

Для заданных коэффициентов получаем значения силы и момента сопротивления $\dot{F}_s_{765} = 21103$, $\dot{F}_s_{556} = 20568$:

$$M_{s765} = F_{s765} \cdot \frac{r}{q} = 21103 \cdot \frac{0,43}{5,8} = 1564,5 \text{ Nm}; \quad (2)$$

$$M_{s556} = F_{s556} \cdot \frac{r}{q} = 20568 \cdot \frac{0,425}{5,8} = 1507,1 \text{ Nm}. \quad (3)$$

Коэффициент сцепления принят равным $\psi = 0,2$. Суммарный к. п. д. электропривода и тягового преобразователя принят равным 0,87 для приводов с электронными системами управления. На обоих составах используются только четыре моторных вагона из шести.

Масса и момент инерции для каждого поезда рассчитаны исходя из нагрузки 8 чел/м².

На составе 81-765/766/767 используется асинхронный двигатель мощностью 170 кВт и номинальной частотой поля 43 Гц, на «НЕВЕ» — 167 кВт с номинальной частотой, равной 70 Гц.

Методика расчета

Максимальное ускорение рассчитывалось как отношение разности между суммарным моментом двигателей $M(t)$ и суммарным моментом сопротивления при движении под током $M_s(t)$ к моменту инерции J , приведенного к валам тяговых двигателей на основании второго закона Ньютона:

$$a(t) = \frac{M(t) - M_s(t)}{J} = \frac{3}{2} \cdot (2P) \cdot \frac{I_{sy}(t) \cdot I_{mr}(t) \cdot N_{mot}}{J} - \frac{M_s(t)}{J}, \quad (4)$$

где $I_{sy}(t)$ и $I_{mr}(t)$ — квадратурные составляющие вектора тока;

$2P$ — число пар полюсов;

N_{mot} — количество тяговых двигателей.

Далее проводился расчет методом аналитического интегрирования дифференциального уравнения движения на пяти интервалах разгона. Это следующие участки: линейное нарастание момента (квадратурных составляющих токов) до рассчитанных значений, движение с постоянным моментом, движение в области ослабления поля до достижения предельного скольжения и в режиме его стабилизации, сброс момента с учетом ограничения на производную ускорения. Далее следовало движение в выбеге без тока, торможение с нарастанием магнитного потока, торможение с постоянным моментом и уменьшение момента в конце торможения. При изменениях момента тяги накладывалось ограничение на производную ускорения $\xi(t) \leq 0,6 \text{ м/с}^3$.

Начало и конец интервала определялись из уравнения равенства суммы длин всех участков заданному расстоянию и из уравнения равенства суммы временных интервалов участков заданному времени движения по траектории разгон — выбег — торможение. Время начала торможения определялось из условия равенства нулю скорости при достижении величины пути 1700 м.

Среднее или длительное значение переменной на интервале времени определялось как отношение интеграла данной величины по времени к величине временного интервала [7, 8].

Исходные и рассчитанные показатели

Исходные технические данные поездов с номинальной нагрузкой и рассчитанные показатели при движении поездов на мерном участке 1700 м со скоростью сообщения 48 км/ч сведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Исходные и рассчитанные показатели при движении поездов

№ пп	Модель поезда	Ед. изм.	81-765/766/767	НЕВА 81-556/557/558
Исходные данные				
1	Масса поезда	т	291,984	270,2
2	Сцепная масса	т	208,392	179,96
3	Передаточное отношение редуктора		5,75	5,8
4	Радиус колеса	м	0,43	0,425
5	Момент инерции	кг/м ²	1834,6	1539,8
6	Суммарная мощность двигателей	кВт	2720	2672
Рассчитанные показатели				
7	Максимальное ускорение	м/с ²	1,195	0,8237
8	Среднее ускорение за время разгона	м/с ²	0,812	0,717
9	Кратность момента относительно номинального		1,5	1,5
10	Длительный ток на один вагон с учетом стоянки 25 с и без учета рекуперации	А	206	296
11	Максимальный ток, потребляемый составом из сети	А	5535	5650
12	Длительность максимального тока	с	19,0	14,0
13	Пройденный путь	м	1700	1700
14	Скорость сообщения	км/ч	48,0	48,0
15	Удельные затраты энергии	Вт · ч/(т · км)	54,2	68,44
16	Удельные затраты энергии с учетом рекуперации	Вт · ч/(т · км)	29,4	34,2

Из таблицы следует, что минимальные затраты энергии имеет поезд 81-765/766/767, в котором оптимизированы параметры редуктора и тяговых двигателей. Поезд «НЕВА» имеет высокие затраты энергии на тягу вследствие неправильного проектирования двигателя и редуктора. Точка перехода приводов поезда «НЕВА» в ослабление поля находится на скорости 57 км/ч. На этой скорости двигатель набирает полную мощность, поезд имеет неприемлемо большие удельные затраты на тягу 68,44 Вт · ч/(т · км)

Диаграммы движения поездов

Генерируемая при торможения двигателем энергия регулируется тяговым инвертором и рекуперируется в контактную сеть через тяговые аппараты (разъединитель, автоматический выключатель, предохранитель, контактор, фильтр, дроссель) или гасится в тормозном резисторе. Если вся тормозная энергия рекуперируется, то через тяговые аппараты проходит как ток, потребляемый на тягу, так и ток, рекуперированный в сеть. Если вся энергия гасится в установке тормозных резисторов или аккумулируется в вагонном емкостном накопителе, то через тяговые аппараты (разъединитель, автоматический выключатель, предохранитель, контактор, фильтр, дроссель) ток протекает только во время разгона [9, 10]. На мерном участке задается разгон с максимально допустимой интенсивностью до скорости, обеспечивающей заданный уровень скорости сообщения. В данном расчете средняя скорость сообщения принята равной 48 км/ч с учетом времени стоянки на станции, равном 25 с. Для нахождения значения физической величины необходимо ординату выбранного графика разделить на множитель при переменной. Так, ускорение $a(t)$ имеет множитель 100, тогда максимальное значение 119 делим на 100 и получаем $a(t) = A_{\max} = 1,19 \text{ м/с}^2$. Ниже показаны графики и использованы следующие обозначения:

$a(t)$ — ускорение в м/с^2 , на графиках показано красной линией;

$\xi(t) = \frac{da(t)}{dt} \leq 0,6 \text{ м/с}^3$ — производная ускорения (рывок), кривая показана синей линией;

$V(t) = 3,6 \int a(t) dt$ — скорость движения в км/ч, показана зеленой линией;

$I_{sy}(t)$ — моментная составляющая вектора тока тягового двигателя в A , уставка которого задается контроллером машиниста, график показан черной пунктирной линией;

$I_{mr}(t)$ — составляющая вектора тока — ток намагничивания тягового двигателя, задается управляющей программой в функции скорости и коэффициента заполнения тягового преобразователя, график показан оранжевой пунктирной линией;

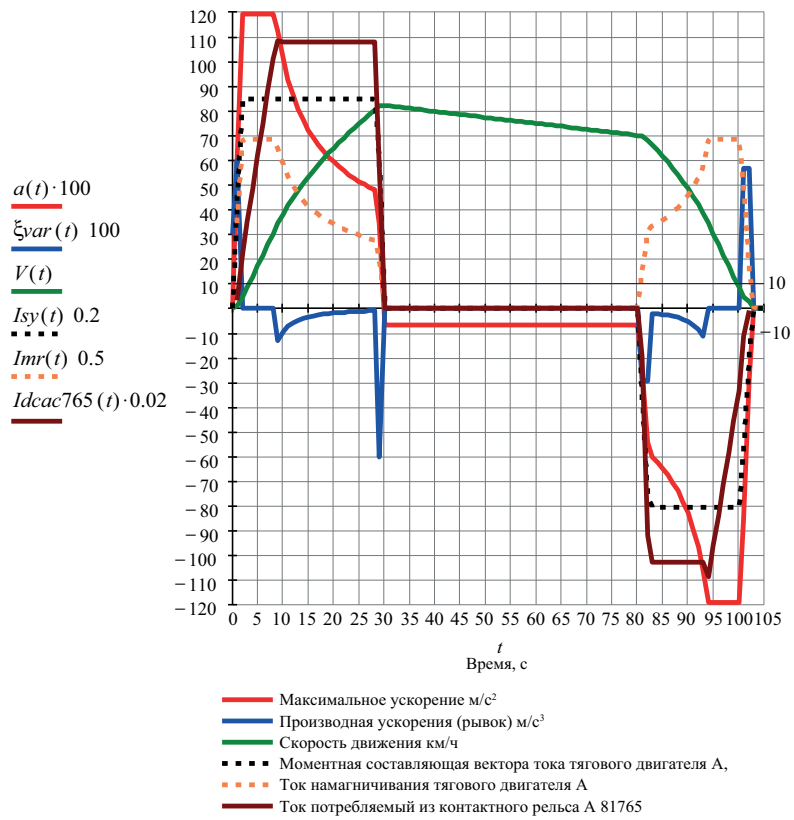


Рис. 1. Диаграмма состава из шести вагонов 81-765/766/767, четыре из которых моторные

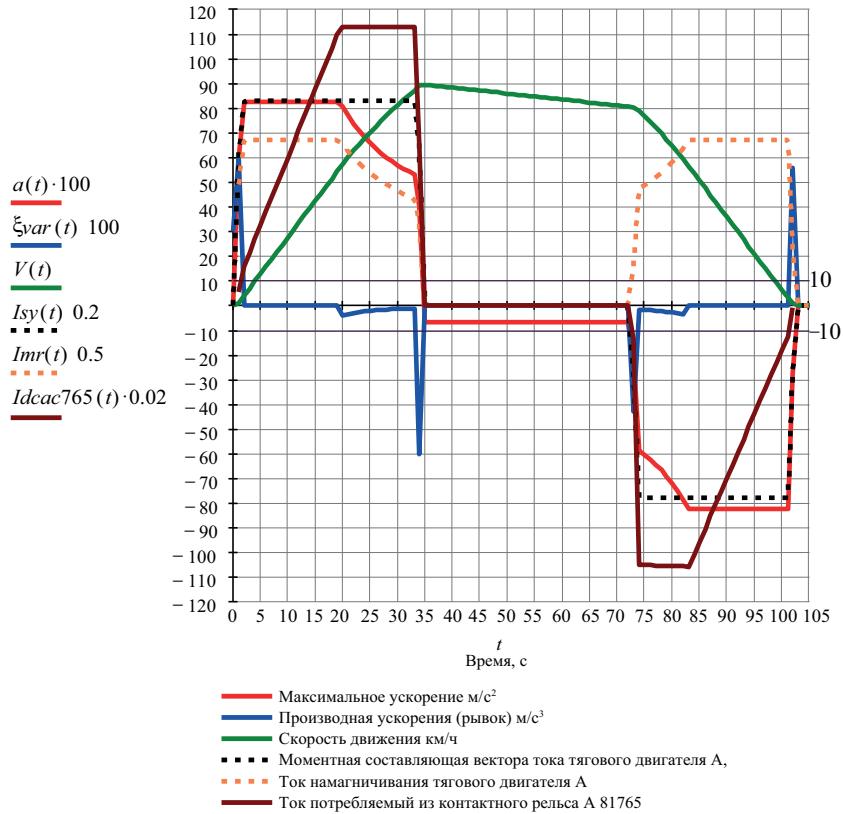


Рис. 2. Диаграмма состава из шести вагонов серии 81-556/557/558 НЕВА, четыре из которых моторные

$I_{dcac765}(t)$ — ток, потребляемый из контактного рельса при разгоне и рекуперированный в контактный рельс при торможении для всего состава, показан коричневой линией.

Для поезда «НЕВА» расчет выполнялся из условия векторного управления, однако на практике асинхронный привод этого поезда имеет частотно-токовый алгоритм управления, что увеличивает абсолютные потери в приводе дополнительно на 10 %.

По виду диаграмм можно отметить, что поезд «НЕВА» развивает высокую максимальную скорость в режиме разгона (почти 90 км/ч) при низком ускорении, имеет маленькую длительность участка выбега.

Перед изложением выводов сделаем следующие комментарии:

1. Для всех поездов рассчитывалось ускорение и замедление в соответствии с заданным коэффициентом сцепления, сцепной массой (масса моторных вагонов) и моментом инерции.

2. Траектории движения и параметры для поездов серии 81-765/766/767 рассчитывались на основе данных и характеристик двигателя, спроектированного для серии 81-765 (ТАДМ-280), для поезда «НЕВА» на основе данных двигателя MLU3839K/4.

Приведем номинальные данные двигателей в табл. 2.

При одинаковых номинальных значениях тока, почти одинаковых мощностях двигатели имеют разные номинальные моменты из-за более низкого потока намагничивания у двигателя MLU3839K/4. Следствием этого и является более существенная по величине и более длительная по времени перегрузка двигателя по моментной составляющей тока (и по фазному току) при пуске и торможении для реализации предельного ускорения (замедления) $1,24 \text{ м/с}^2$. Момент асинхронного двигателя прямо пропорционален произведению потокосцепления на моментную составляющую тока. Таким образом, двигатель ТАДМ-280 является практически оптимальным, так как обеспечивает достаточно большое максимальное ускорение $1,2 \text{ м/с}^2$.

ТАБЛИЦА 2. Номинальные данные двигателей

№	Наименование показателя	ТАДМ-280-4У2	MLU3839K/4
1	Номинальная мощность, кВт	170	167
2	Номинальная частота вращения, об/мин	1265,5	2073
3	Скорость входа в ослабление поля, км/ч	35,8	58
4	Номинальный момент, Нм	1284	760
5	Номинальный ток, А	221	227
6	Номинальное потокосцепление, Вб	4,1	2,524

Заключение

1. Перегрузка двигателей по моменту на валу одинакова с коэффициентом 1,5 от номинального момента.

2. Поезда имеют значительно различающиеся показатели как по удельным затратам, так и по динамике движения. Удельные затраты на тягу у поезда 81-765/766/767 производства АО «МЕТРОВАГОНМАШ» составляют 54,2 Вт·ч/(т·км), у поезда 81-556/557/557 — «НЕВА», производства ООО «ВАГОНМАШ» затраты равны 68,44 Вт·ч/(т·км). Этот результат объясняется очень длительным разгоном поезда «НЕВА». Длительный ток поезда равен 296 А, что на 43,7 % больше, чем у поезда 81-765/766/767.

3. На составах при пуске двигателя перегружены в 1,5 раза по моменту, что является стандартным пусковым режимом. Поезд 81-765/766/767 развивает максимальное ускорение, равное $1,2 \text{ м/с}^2$, а поезд «НЕВА» только $0,82 \text{ м/с}^2$ из-за очень низкого номинального магнитного потока. Использование двигателя с низким потоком является ошибочным.

4. При рекуперации энергии в контактную сеть или в накопитель потребление резко снижается примерно в 1,5 раза по сравнению с вариантом без рекуперации. Резкое снижение энергии, затрачиваемой на тягу при рекуперации, объясняется тем, что к. п. д. каждого из аппаратов имеет достаточно высокое значение.

5. Для минимизации затрат энергии на тягу необходимо развивать максимально допустимое ускорение при разгоне и максимально допустимое замедление в торможении. В Техническом задании на новые поезда необходимо ввести требование о проверке поезда на возможность разгона с максимальным заданным ускорением.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 50850-96. Вагоны метрополитена. Общие технические условия — М: Госстандарт России.

2. Основы электрического транспорта: учебник / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович и др.; под общ. ред. М. А. Слепцова. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 464 с.

3. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Ч. 1 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — Вып. 6(79). — С. 40–44.

4. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Ч. 2 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — Вып. 2 (81). — С. 52–55.

5. Мазнев А. С. Конструкции и динамика электрического подвижного состава: монография / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев. — М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. — 248 с.
6. Евстафьев А. М. Выбор топологии схем тягового привода электрического подвижного состава / Евстафьев А. М. // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС. — 2010. — Вып. 3(24). — С. 89–98.
7. Владыкин А. В. Выбор оптимальных конструктивных параметров асинхронного привода метрополитена с учетом жизненного цикла инвертора / А. В. Владыкин // Транспорт Урала. — 2018. — № 1(56). — С. 58–63.
8. Якушев А. Я. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя / А. Я. Якушев, Т. М. Назирхонов, И. П. Викулов, К. В. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС. — 2019. — Т. 16. — Вып. 4. — С. 592–601.
9. Зарифьян А. А. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электропоездов: монография / Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян, П. Ю. Петров и др. — М.: Маршрут, 2006. — 380 с.
10. Якушев А. Я., Викулов И. П. Петербургский университет путей сообщения: учебное пособие // Исследование системы автоматического управления тяговыми электродвигателями электропоезда переменного тока. — СПб., 2011. — Ч. 2. — 43 с.

Дата поступления: 11.01.2022

Решение о публикации: 11.02.2022

Контактная информация:

ШЛЕНДОВ Игорь Александрович — аспирант; elt@pgups.ru

Energy Unit Expenses of Trains with Asynchronous Electric Drive

I. A. Shlendov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shlendov I. A. Energy Unit Expenses of Trains with Asynchronous Electric Drive. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 1, pp. 117–128. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-117-128

Summary

Objective: The assessment of energy effectiveness of traction drives for carriages of rolling stock models 81-765/766/767 and 81-556/557/558 (“NEVA”) from various producers and drafting technical requirements for drive electric equipment. Stock 81-765/766/767 uses asynchronous engine of 170 kW wattage and 43 Hz field rated frequency, 81-556/557/558 — 167 kW with 70 Hz rated frequency. **Methods:** The comparative analysis of drive energy indicators of trains with asynchronous electric drives has been accomplished in accordance with the calculation methodology. Measuring section was set in accordance with GOST P 50850-96. There are defined the assumptions at motion of rolling stock with equal maximal acceleration in a runaway and maximal deceleration in a braking and constant deceleration in a run-out. Maximal acceleration and deceleration were calculated in compliance with adhesion set coefficient, grip weight (mass of motor cars) and moment of inertia. The calculation by method of analytical integration of motion differential equation was held on runaway five intervals. Initial technical data of trains with rated load as well as calculated indicators at train motion on measuring section were accepted. Diagrams of train motion on section were built and comparative analysis of characteristics of stock carriage models 81-765/766/767 and 81-556/557/558 (“NEVA”) was pursued. **Results:** It was established during the comparison that engine overload by torque on shaft is the same with 1.5 coefficient to rated torque. Stocks have significantly different indicators as by unit expenses as well as by motion dynamics. It’s been also established that for to minimize energy costs for traction it’s required to develop maximally allowable deceleration at braking and maximally allowable acceleration at runaway. **Practical importance:** The necessity of entry into Technical Task for new rolling stock of the requirement on stock check on runaway possibility with maximal set acceleration.

Keywords: Carriage, the underground train, asynchronous electric drive, energy unit expenses on traction.

References

1. GOST R 50850-96 VAGONNY METROPOLITENA. Obshchie tekhnicheskie usloviya [GOST R 50850-96 UNDERGROUND CARS. General specifications]. Moscow: Gosstandart Rossii Publ.
2. Sleptsov M. A. *Osnovy elektricheskogo transporta* [Fundamentals of electric transport]. Moscow: «Akademiya» Publ., 2006. 464 p.
3. Titova T. S. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava [Prospects for the development of traction rolling stock]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2018, I. 6 (79), pp. 40–44.
4. Titova T.S. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava [Prospects for the development of traction rolling stock]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, I. 2 (81), pp. 52–55.

5. Maznev A. S. *Konstruksii i dinamika elektricheskogo podvizhnogo sostava* [Designs and dynamics of electric rolling stock]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte Publ., 2013. 248 p.

6. Evstaf'ev A. M. Vybory topologii skhem tyagovogo privoda elektricheskogo podvizhnogo sostava [The choice of the topology of the schemes of the traction drive of electric rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2010, I. 3 (24), pp. 89–98.

7. Vladykin A. V. Vybory optimal'nykh konstruktivnykh parametrov asinkhronnogo privoda metropolitena s uchetom zhiznennogo tsikla invertora [Choice of optimal design parameters of the subway asynchronous drive taking into account the life cycle of the inverter]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2018, I. 1(56), pp. 58–63.

8. Yakushev A. Ya. Opredelenie osnovnykh parametrov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya [Determination of the main parameters of an asynchronous traction motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ. 2019, V. 16, I. 4, pp. 592–601.

9. Zarif'yan A. A. *Dinamicheskie protsessy v asinkhronnom tyagovom privode magistral'nykh elektrovozov* [Dynamic processes in the asynchronous traction drive of main electric locomotives]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 380 p.

10. Yakushev A. Ya., Vikulov I. P. Peterburgskiy universitet putey soobshcheniya [St. Petersburg University of Railways]. *Issledovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya tyagovymi elektrodvigatelyami elektrovoza peremennogo toka* [Research of the automatic control system for traction electric motors of an alternating current electric locomotive]. St. Petersburg, 2011. 43 p.

Received: January 11, 2022

Accepted: February 11, 2022

Author's information:

Igor A. SHLENDOV — Postgraduate Student; elt@pgups.ru