



УДК 629.4-592

Повышение энергоэффективности электрического торможения на скоростных линиях постоянного тока

О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин

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

Для цитирования: Валинский О. С., Марикин А. Н., Калинин Н. П. Повышение энергоэффективности электрического торможения на скоростных линиях постоянного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 767–774. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-767-774

Аннотация

Цель: анализ энергоэффективности электрического торможения, рассмотрение режимов торможения, реализуемых высокоскоростным подвижным составом. **Методы:** применяется комплексный подход к проблеме энергетической эффективности режимов торможения высокоскоростного подвижного состава, ориентированный на практическую значимость и экономическую обоснованность результатов. **Результаты:** обоснована эффективность электрического торможения высокоскоростного подвижного состава, дана оценка использования электрического торможения при эксплуатации высокоскоростного подвижного состава, рассмотрены виды электрического торможения, произведен анализ энергоэффективности рекуперативного торможения при эксплуатации высокоскоростного поезда, рассмотрен коэффициент возврата электрической энергии. **Практическая значимость:** статья позволит совершенствовать существующую методику оценки энергопотребления высокоскоростных поездов, а также уточнить оценку эффективности использования рекуперативного торможения в единой системе движения высокоскоростных поездов.

Ключевые слова: расход энергии, энергоэффективность, оценка энергоэффективности, электрическое торможение, рекуперативное торможение, возврат энергии при рекуперации, скоростной поезд, высокоскоростной поезд

Введение

В соответствии с Энергетической стратегией холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года энергоэффективность и стремление к устойчивому развитию являются ключевыми задачами для отрасли железнодорожных перевозок [1, 2]. Одним из ключевых аспектов, необходимых для достижения этих амбициозных целей, является эффективное управление рекуперацией энергии. В железнодорожных системах торможение осуществляется двумя способами: механическим и электрическим. В то время как энергия, высвобождаемая в результате механического торможения, не может быть возвра-

щена в энергосистему, энергия, высвобождаемая в результате электрического торможения, может быть повторно использована в качестве рекуперативной энергии торможения. Этот вид энергии торможения изменяется в зависимости от динамики системы, ее можно вернуть в сеть, запасти в накопителях энергии [3] или преобразовать в тепловую энергию на реостатах на подвижном составе или на тяговой подстанции.

В этой статье рассматривается возможность повышения энергоэффективности рекуперативного торможения, а также расчет коэффициента возврата рекуперативной энергии торможения.

Оценка эффективности электрического торможения

Весь современный подвижной состав, находящийся в эксплуатации, начиная с электропоездов постоянного тока серии ЭТ2М и заканчивая высокоскоростными электропоездами «Сапсан», оснащается дополнительно к электропневматическому тормозу системами электрического торможения.

Система электрического торможения на высокоскоростном подвижном составе является приоритетной относительно пневматического тормоза. Управление торможением электропоезда с соответствующей скорости при ручном или автоматическом режиме производится от единого блока управления электрическим или пневматическим фрикционным тормозом.

Рекуперативный тормоз, не изнашиваемый по своей природе, обладает способностью возвращать в контактную сеть генерируемую в процессе торможения электрическую энергию. Он является дополнительным источником электрической энергии, которую можно использовать для собственных нужд или на тяговые нужды для другого подвижного состава. Эффективное использование рекуперативного торможения помогает сэкономить топливно-энергетические ресурсы и уменьшить объем условных потерь. Поэтому в иерархии систем электрическое торможение занимает приоритетное место. Однако рекуперация ограничивается тем, что в тяговой сети не всегда возможен прием электрической энергии.

Поэтому система электрического рекуперативного торможения дополняется реостатным торможением. Электрический тормоз за счет своего высокого быстродействия имеет хорошие регулировочные свойства относительно пневматического тормоза. Кроме того, при его использовании практически отсутствует возможность возникновения юза колесных пар.

Смешанное использование двух режимов электрического торможения — рекуперативного и реостатного — с технической точки зрения является возможным и считается обычным при нормальной эксплуатации. На рис. 1 представлена тормозная характеристика при рекуперативном и реостатном торможении высокоскоростного электропоезда. Характеристика рекуперативного торможения ограничена генерируемой мощностью тяговых электродвигателей, характеристика реостатного — интенсивностью теплоотвода, выделяемого тормозными реостатами [4, 5].

Тормозные характеристики в зоне высоких скоростей подчиняются закону поддержания постоянства мощности, а в зоне низких скоростей — постоянства тормозной силы [6].

Максимальная эффективность рекуперативного торможения достигается на участках с затяжными спусками или же на участках с тяговыми подстанциями, оборудованными инвертирующими агрегатами, которые могут возвращать электроэнергию в промышленную сеть [7].

Даже с учетом того, что высокоскоростные поезда преимущественно обращаются на участках с равнинным профилем пути, эффективность рекуперации является ключевым фактором в системе тягового электроснабжения и напрямую связана с уменьшением потребления топливно-энергетических ресурсов на сети железных дорог. Основные факторы, влияющие на рекуперацию электроэнергии, показаны в виде схемы на рис. 2.

Система торможения высокоскоростного электропоезда может применять электрический тормоз в широком диапазоне изменения скорости движения, что обусловлено системой управления асинхронными тяговыми электродвигателями. Автономный инвертор напряжения, входящий в состав системы управления

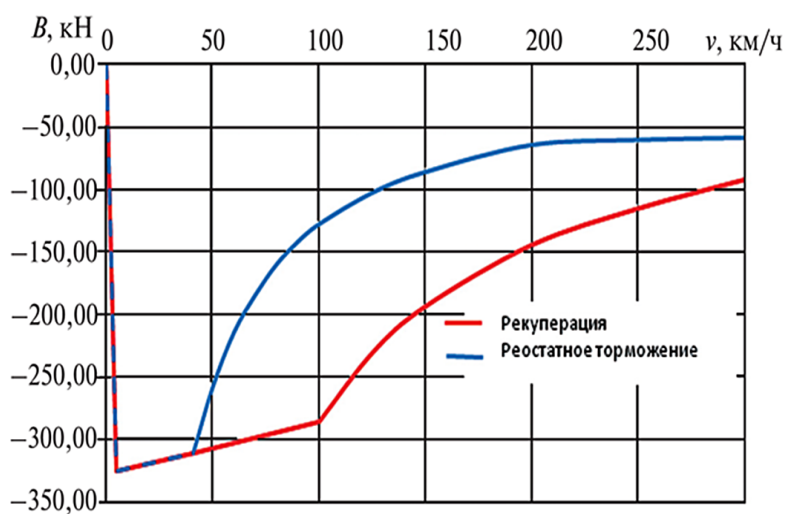


Рис. 1. Тормозные характеристики высокоскоростного поезда



Рис. 2. Основные факторы, влияющие на рекуперацию энергии торможения

асинхронными тяговыми электродвигателями, может обеспечивать реализацию электрического торможения до скорости 5 км/ч, ниже которой для поддержания тормозной силы поезд дотормаживается при помощи пневматического тормоза [6].

На применение рекуперативного торможения существует ограничение по сцеплению колес с рельсами, обусловленное максималь-

ной тормозной силой. Максимальное значение тормозной силы определяется по формуле:

$$B_{сц} = 0,8 \cdot P \cdot \psi_k, \quad (1)$$

где P — масса электропоезда;

ψ_k — расчетный коэффициент сцепления колес с рельсами.

Для поездов, эксплуатирующихся со скоростями движения выше 160 км/ч, применима формула для расчета коэффициента сцепления колес с рельсами:

$$\psi_k = 0,09 + \frac{95}{413 + 3 \cdot V_p} \cdot \quad (2)$$

Существенным недостатком электрического торможения является то, что при интенсивном торможении с использованием рекуперации в условиях ограниченного потребления рекуперированной энергии система управления переключает на режим реостатного торможения или частичного замещения электрического торможения пневматическим фрикционным.

В процессе движения высокоскоростного электропоезда реализуется режим интенсивного торможения до остановки, торможения с понижением скорости до существующих постоянных ограничений скорости движения и регулировочного торможения при прохождении входных стрелочных переводов раздельных пунктов [8].

Для анализа систем торможения с целью повышения энергоэффективности электрического торможения была создана математическая динамическая модель в программном комплексе MATLAB/Simulink [9, 10]. В результате расчетов математической модели установлено, что в режиме остановочного рекуперативного торможения при реально применяемой скорости начала торможения 200 км/ч и реализуемой максимальной тормозной силе возможный возврат электрической энергии составляет 237,3 кВт·ч, при этом длина пути торможения составляет 4712 м, время торможения — 177 с (3 мин). В этом режиме генерируемая мощность тяговых электродвигателей составляет 7100 кВт.

При этом потребителем рекуперированной энергии, находящимся в одной фидерной зоне со скоростным электропоездом, может быть 10-вагонный электропоезд пригородного движения, который при пуске и разгоне потребляет из тяговой сети 5000–5200 кВт. Другим потребителем рекуперированной энергии может

быть электровоз ЭП2к при работе на параллельной группировке тяговых электродвигателей 4300–4500 кВт.

Следовательно, рекуперированная энергия может потребляться только частично, в пределах 60–70 %. Реально система управления торможением переключает режим рекуперации на реостатное торможение. В этом случае длина тормозного пути возрастает до 8750 м, а время торможения — до 284 с (4 мин 44 с). Энергия торможения, выделяемая в тормозных резисторах в этом случае, составляет 214,2 кВт·ч. На рис. 3 представлен пример торможения, смоделированный в имитационной модели.

В результате замеров возвращаемой энергии электрического торможения электропоезда при аналогичных режимах торможения составляют 90–127 кВт·ч. Коэффициент возврата энергии (эффективности), который измеряет среднее использование регенерированной энергии, можно рассчитать как:

$$\eta_{rec\ eff} = \frac{\Delta E_{izm}}{\Delta E_{mod}}, \quad (3)$$

где $\eta_{rec\ eff}$ — коэффициент возврата энергии;

ΔE_{izm} — экономия энергии при реальной поездке, измеренная на счетчиках энергии подвижного состава;

ΔE_{mod} — экономия энергии при моделировании торможения, измеренная на счетчиках энергии подвижного состава.

Таким образом, коэффициент возврата будет варьироваться в пределах от 37 до 54 %.

В случае применения пониженной тормозной силы, например до 80 % от максимальной мощности, генерируемая тяговыми двигателями при торможении энергия составляет 5500–5700 кВт·ч, что соизмеримо с мощностью, потребляемой пригородным электропоездом в процессе пуска и разгона,

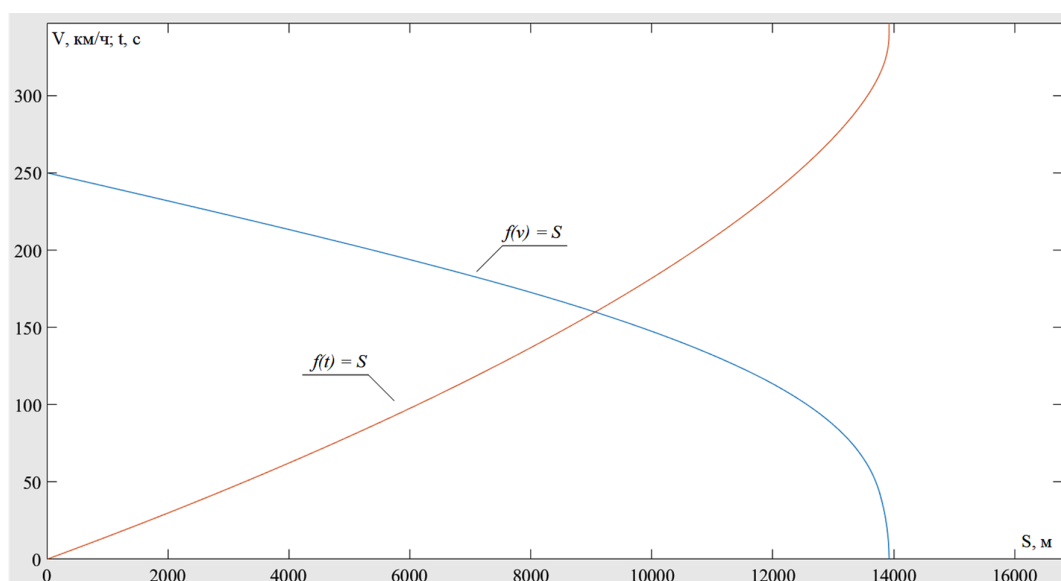


Рис. 3. Остановочное торможение в имитационной модели

и повышает эффективность энерговозврата энергии торможения.

Вместе с тем тормозной путь для режима рекуперативного торможения с заданной интенсивностью 80 % увеличивается до 5733 м, а время — до 217 с (3 мин 37 с).

При интенсивности рекуперативного торможения 70 % длина тормозного пути составляет 6430 м, время торможения — 245 с (4 мин 5 с), генерируемая мощность — 5000 кВт.

Таким образом, энергоэффективность рекуперативного остановочного торможения можно существенно повысить снижением интенсивности торможения до 70–80 % — в этом случае длина тормозного пути и время торможения составляют 55–70 % относительно аналогичных величин реостатного торможения.

В процессе наиболее часто употребляемого регулировочного торможения со скорости 220 км/ч до 200 км/ч в режиме рекуперативного торможения с максимальной интенсивностью длина тормозного пути составляет 1270 м, время торможения — 22 с, возможный возврат энергии рекуперации в этом случае составляет 41,6 кВт·ч. При невозможности полного

потребления возвращаемой энергии в тяговую сеть блок торможения электропоезда переключает управление на реостатное торможение. В этом случае длина тормозного пути возрастает до 2100 м, а время торможения — до 36 с, энергия торможения в реостатах составляет 32,6 кВт·ч.

При снижении интенсивности рекуперативного торможения до 80 % длина тормозного пути составляет 1490 м, а время торможения — 26 с. При этом возврат при наличии потребителя составит 39,2 кВт·ч. При интенсивности торможения 70 % длина тормозного пути составляет 1635 м, время торможения — 28 с, энергия рекуперации — 37,6 кВт·ч.

По сравнению с применяемым реостатным торможением длина тормозного пути и время тормозного замедления рекуперативного торможения с интенсивностью 70–80 % составляет 70–77 % от аналогичных величин реостатного тормоза.

Экспериментальные замеры возврата рекуперированной энергии при регулировочном торможении находятся в пределах 9–21 кВт·ч, при этом коэффициент возврата

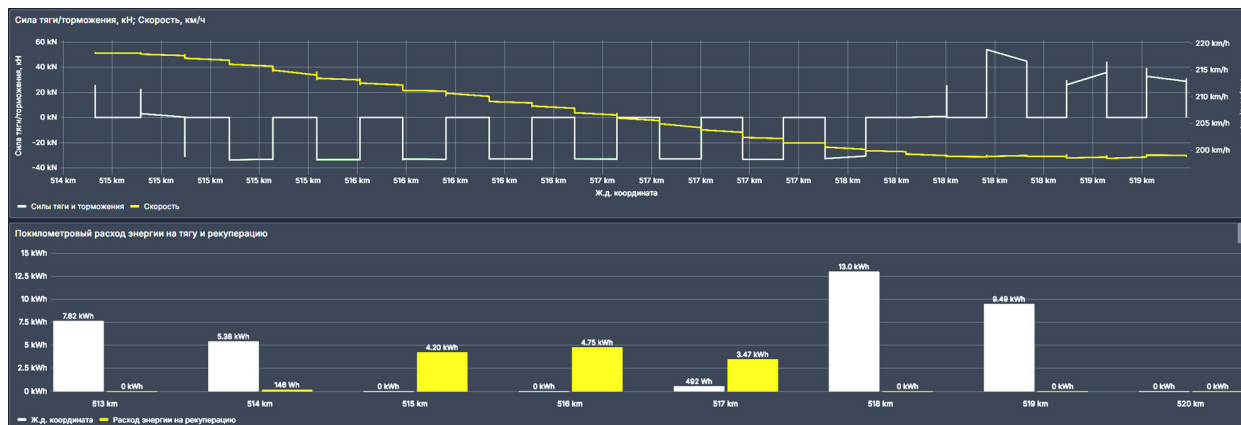


Рис. 4. Покилометровое возвращение электроэнергии высокоскоростным поездом «Сапсан»

находится в пределах от 21 до 50 %. На рис. 4 представлено покилометровое возвращение электроэнергии рекуперативным торможением высокоскоростного поезда «Сапсан» при регулировочном торможении с 220 км/ч до 200 км/ч на примере реального рейса.

Выводы

1. Энергоэффективность электрического торможения зависит от вероятности нахождения потребителя генерируемой энергии в одной фидерной зоне с высокоскоростным электропоездом.

2. При отсутствии или недостаточной мощности потребителя рекуперированной энергии система управления применяет реостатное торможение, при котором длина тормозного пути и время торможения возрастает в 1,6–1,7 раза.

3. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения, может быть достигнуто за счет снижения интенсивности рекуперации до 70–80 %. Таким образом, энергия, возвращенная в сеть, может быть использована смежным подвижным составом, а также длина и время торможения сокращаются на 60–70 % относительно затраченного времени и длины при использовании реостатного торможения.

Библиографический список

- Гапанович В.А. Энергоэффективность — путь к снижению затрат и к экологической безопасности // Железнодорожный транспорт. 2014. № 8. С. 22–25.
- Энергосбережение на железнодорожном транспорте: справ.-метод. изд. / В.А. Гапанович [и др.]; под ред. В.А. Гапановича. М.: Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
- Обухов М.Ю., Калинин Н.П. Повышение энергоэффективности электропоезда за счет установки накопителей электрической энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020. Т. 17. Вып. 4. С. 449–464.
- Тулупов В.Д. Улучшение энергетических показателей электропоездов // Железнодорожный транспорт. 1991. № 9. С. 38–41.
- Тулупов В.Д., Давыдкин А.В., Ворожцов А. В. Снижение потерь и увеличение возврата энергии при рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока // Пути экономичности и повышения эффективности использования электроэнергии в системах электроснабжения промышленности и транспорта: тезисы докладов 2-й Всесоюзной научной конференции (Смоленск, 1–2 декабря). М., 1987. С. 134–135.
- Ширяев А.В. Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2: учебное пособие. М., 2013. 594 с.

7. Инвентирование электроэнергии рекуперации / Е. И. Быков [и др.] // Улучшение энергетических показателей метрополитенов. М., 1987. С. 41–47.

8. Якушев А. Я. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 304 с.

9. Программа моделирования высокоскоростного поезда ЭВС1 в режиме торможения: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Свид. 2024661814 Российская Федерация. № 2024660851 / Валинский О. С., Евстафьев А. М., Калинин Н. П.; заявл. 14.05.2024; опубл. 21.05.2024; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU).

10. Программа моделирования высокоскоростного поезда ЭВС2 в режиме торможения: свиде-

тельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Свид. 2024662240 Российская Федерация. № 2024660850 / Валинский О. С., Евстафьев А. М., Калинин Н. П.; заявл. 15.05.2024; опубл. 24.05.2024; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU).

Дата поступления: 09.10.2024

Решение о публикации: 06.11.2024

Контактная информация:

Олег Сергеевич ВАЛИНСКИЙ — профессор, канд. техн. наук; rector@pgups.ru

Александр Николаевич МАРИКИН — профессор, докт. техн. наук; marikin_s@mail.ru

Николай Павлович КАЛИНИН — аспирант, инженер; nikolaykalinin1997@gmail.com

Improving the energy efficiency of electric braking on high-speed DC lines

O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin

Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering, 9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Valinsky O. S., Marikin A. N., Kalinin N. P. Improving the energy efficiency of electric braking on high-speed DC lines // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 767–774. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-767-774

Abstract

Purpose: analysis of the energy efficiency of electric braking, consideration of braking modes implemented by high-speed rolling stock, analysis of electric braking. **Methods:** an integrated approach to the problem of energy efficiency of braking modes of high-speed rolling stock is used, focused on the practical significance and economic feasibility of the results. **Results:** the efficiency of electric braking of high-speed rolling stock is designated, the use of electric braking in the operation of high-speed rolling stock is assessed, types of electric braking are considered, the energy efficiency of regenerative braking in the operation of a high-speed train is analyzed, the coefficient of return of electrical energy is considered. **Practical significance:** this article will allow to revise the existing assessment of energy consumption of high-speed trains, will allow to assess the efficiency of using regenerative braking in a single system of high-speed train movement.

Keywords: energy consumption, energy efficiency, energy efficiency assessment, electric braking, regenerative braking, energy recovery during regeneration, high-speed train, high-speed train

References

1. Gapanovich V. A. Energoeffektivnost' — put' k snizheniyu zatrat i k ekologicheskoy bezopasnosti // *Zheleznodorozhnyj transport*. 2014. No. 8. S. 22–25. (In Russian)
2. Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: sprav.-metod. izd. / V. A. Gapanovich [i dr.]; pod red. V. A. Gapanovicha. M.: Intekhenergo-Izdat, Teploenergetik, 2014. 304 s. (In Russian)
3. Obuhov M. Yu., Kalinin N. P. Povyshenie energoeffektivnosti elektropoezda za schet ustanovki nakopitelej elektricheskoy energii // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. SPb.: PGUPS, 2020. T. 17. Vyp. 4. S. 449–464. (In Russian)
4. Tulupov V. D. Uluchshenie energeticheskikh pokazatelej elektropoezdov // *Zheleznodorozhnyj transport*. 1991. No. 9. S. 38–41. (In Russian)
5. Tulupov V. D., Davydkin A. V., Vorozhcov A. V. Snizhenie poter' i uvelichenie vozvrata energii pri rekuperacii na elektropodvizhnom sostave postoyannogo toka // *Puti ekonomichnosti i povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya promyshlennosti i transporta: tezisy dokladov 2-y Vsesoyuznoj nauchnoj konferencii (Smolensk, 1–2 dekabrya)*. M., 1987. S. 134–135. (In Russian)
6. Shiryaev A. V. *Vysokoskorostnye poezda "Sapsan" V1 i V2: uchebnoe posobie*. M., 2013. 594 s. (In Russian)
7. Inventirovanie elektroenergii rekuperacii / E. I. Bykov [i dr.] // *Uluchshenie energeticheskikh pokazatelej metropolitenov*. M., 1987. S. 41–47. (In Russian)
8. Yakushev A. Ya. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom*. M.: FGBOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2016. 304 s. (In Russian)
9. Programma modelirovaniya vysokoskorostnogo poezda EVS1 v rezhime tormozheniya: svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlya EVM. Svid. 2024661814 Rossijskaya Federaciya. № 2024660851 / Valinskij O. S., Evstaf'ev A. M., Kalinin N. P.; zayavl. 14.05.2024; opubl. 21.05.2024; zayavitel' i pravoobladatel' FGBOU VO PGUPS (RU). (In Russian)
10. Programma modelirovaniya vysokoskorostnogo poezda EVS2 v rezhime tormozheniya: svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlya EVM. Svid. 2024662240 Rossijskaya Federaciya. № 2024660850 / Valinskij O. S., Evstaf'ev A. M., Kalinin N. P.; zayavl. 15.05.2024; opubl. 24.05.2024; zayavitel' i pravoobladatel' FGBOU VO PGUPS (RU). (In Russian)

Received: 09.10.2024

Accepted: 06.11.2024

Author's information:

Oleg S. VALINSKY — professor, PhD in Engineering; rector@pgups.ru

Alexander N. MARIKIN — professor, Dr. Sci. in Engineering; marikin_s@mail.ru

Nikolay P. KALININ — postgraduate student, engineer; nikolaykalinin1997@gmail.com