

УДК 629.423.24

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕРВАЛА ДВИЖЕНИЯ НА ВЕРОЯТНОСТЬ
МЕЖПОЕЗДНОГО ОБМЕНА ЭНЕРГИЕЙ РЕКУПЕРАЦИИ
В МЕТРОПОЛИТЕНЕ****К.И. Куликов, Е.А. Спиридонов, К.Е. Пономарев, Э.Г. Лангеман**
Новосибирский государственный технический университет

Метрополитен – это высокоорганизованная транспортная система, обладающая рядом отличительных свойств. Основное из них – высокая скорость корреспонденций пассажиров, что обеспечивается отсутствием дорожных заторов и пересечений с транспортно-пересадочными узлами. Тем не менее стоит учитывать, что удовлетворение потребностей населения в качественных перевозках обуславливает существенные энергетические вложения, большая часть которых направляется на тяговые нужды поездов. Одним из вероятных направлений снижения энергопотребления является использование рекуперативного торможения, а в частности – передача энергии рекуперации в межпоездной обмен. Однако условия работы метрополитена не способствуют этому, так как движение составов регламентировано во времени, а вероятность непредвиденного совпадения актов тяги и торможения сведена к минимуму. С другой стороны, это позволяет точно спрогнозировать потенциал межпоездного обмена энергией, что позволит подойти к разработке графика движения поездов не только со стороны комфорта пассажиров, но и со стороны энергоэффективности. Для оценки вероятности этого явления проведено моделирование графика движения поездов на примере МУП «Новосибирский метрополитен». Полученные результаты свидетельствуют о перспективности данного способа энергосбережения, что вкупе с другими методами повышения энергоэффективности позволит качественно оптимизировать работу системы подземного транспорта.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, метрополитен, межпоездной обмен энергией, интервал движения, имитационное моделирование

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-53-60

Введение

Метрополитен является важной составляющей современного мегаполиса, что обусловлено его перевозочной способностью, скоростью корреспонденций и комфортом пассажиров. Не менее важно и отсутствие вредных выбросов, получаемых в процессе горения углеводородного топлива, используемого большинством уличных видов транспорта. Однако наряду с этим метрополитен также является одним из крупнейших потребителей электроэнергии [1]. Оптимизация энергопотребления метropоездов способна снизить экономические издержки, что впоследствии повысит эффективность работы всей системы подземного транспорта.

Анализ существующих исследований показывает, что в большинстве случаев для снижения энергопотребления поездов метрополитена применяется рекуперативное торможение [2, 3]. Одним из вариантов использования энергии рекуперации является межпоездной обмен, возможный при одновременном протекании актов тяги и торможения взаимодействующих поездов. При имита-

ционном моделировании работы Филевской линии Московского метрополитена выявлено, что если весь парк подвижного состава при торможении будет использовать рекуперативный режим, то только за счет межпоездного обмена экономия энергии, потребляемой на тягу поездов, может составить от 15 до 30 % [4].

Принимая во внимание эти данные, актуальным становится вопрос анализа существующего графика движения Новосибирского метрополитена на предмет вероятности межпоездного обмена энергией рекуперации.

Целью работы является разработка программного комплекса по моделированию графика движения. На его основе выведена зависимость вероятности совпадения актов тяги и торможения от интервала движения поезда метрополитена.

1. Формирование графика движения подвижного состава

Для оценки эффективности межпоездного обмена энергией необходимо сформировать график движения подвижного состава при разных интервалах времени. Для этих целей разработан программный комплекс на языке Python [5]. Интерфейс программного комплекса показан ниже (рис. 1).

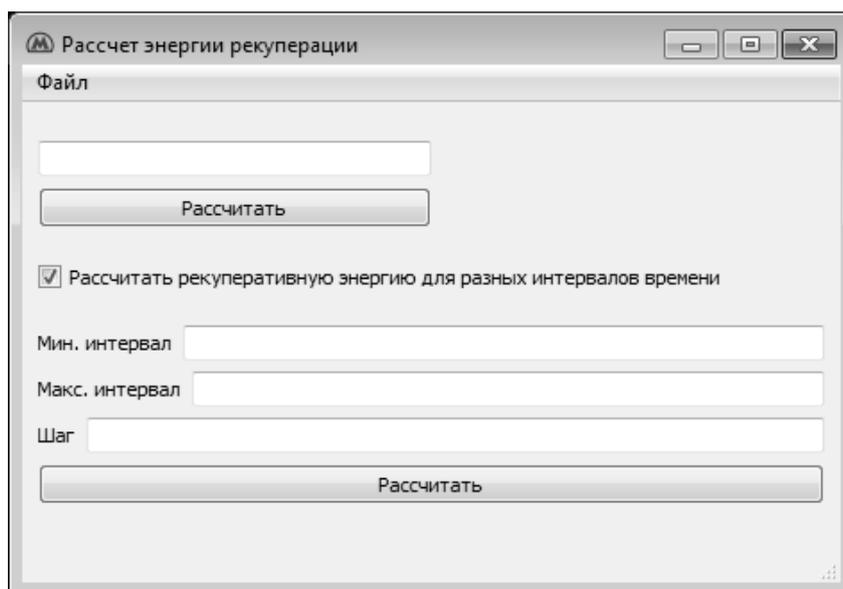


Рис. 1 – Интерфейс программного комплекса

Fig. 1 – Interface of the program complex

За основу программного кода приняты функции мощности тяги и торможения подвижного состава типа 81-717, полученные в ходе соответствующих энергетических расчетов в программе MATHCAD [6], проведенным по методикам [7, 8]. В соответствии с ними, а также с учетом длин перегонов и времени хода по ним формируется график движения поездов по Ленинской линии в прямом и обратном направлениях. Пример графика движения показан на рис. 2.

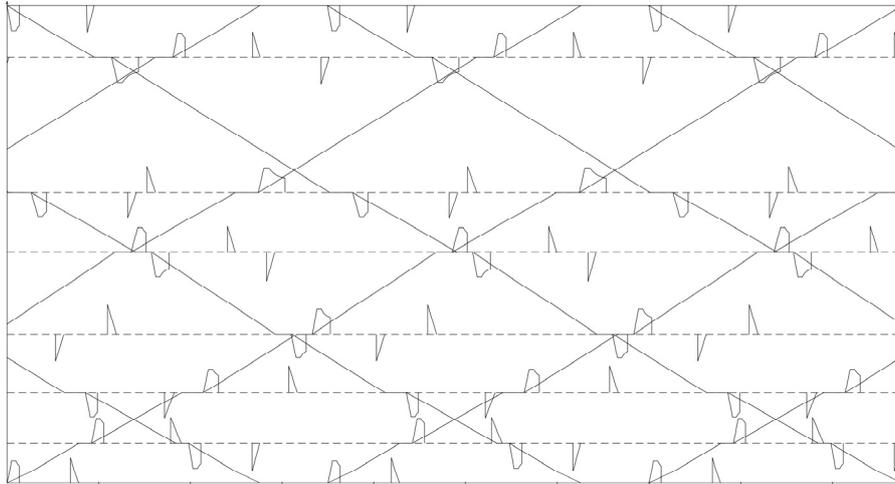


Рис. 2 – График движения состава по Ленинской линии

Fig. 2 – Traffic schedule along the Lenin line

2. Принцип работы программного комплекса

При формировании графика движения поезда принимается время хода по линии, полученное экспериментально [9] и имеющее высокое корреляционное сходство с данными официального сайта МУП «Новосибирский метрополитен» [10].

Алгоритмом программы предусмотрена возможность произвольно задавать интервал движения. Это необходимо, так как интенсивность движения метропоездов зависит от пассажиропотока, который меняется как в течение дня, так и в течение недели.

На начальном этапе имитационного моделирования происходит выбор интервала времени между движением поездов. На основе этих данных рассчитывается количество поездов, движение которых (на любом из перегонов) попадает в интервал времени, соответствующий времени хода. После того как проведен расчет количества поездов, для них определяется время отправления с каждой станции Ленинской линии.

Далее проводится расчет энергии, затраченной тяговыми потребителями за время хода по линии. Аналогично происходит количественный подсчет энергии, выделяемой при торможении подвижного состава.

Завершающий этап вычислений основан на сопоставлении актов тяги и торможения во времени, как показано на рис. 3.

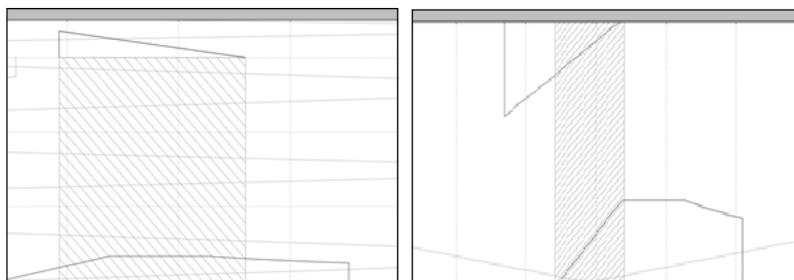


Рис. 3 – Поглощение энергии рекуперации тяговыми потребителями

Fig. 3 – Consumption of recovery energy

3. Функция вероятности совпадения актов тяги и торможения от интервала движения поезда метрополитена

В ходе исследования энергетических потоков с применением описанного программного комплекса получена функция (1) доли энергии рекуперации E , используемой на нужды тяги, от временного интервала движения поездов метрополитена t .

$$E = 7 \cdot 10^{-5} t^2 - 0,0763t + 30,761, \quad (1)$$

где E – доля энергии рекуперации, %; t – интервал движения, с.

Эта зависимость сформирована по методу наименьших квадратов и имеет ниспадающий полиномиальный характер, как показано на рис. 4.

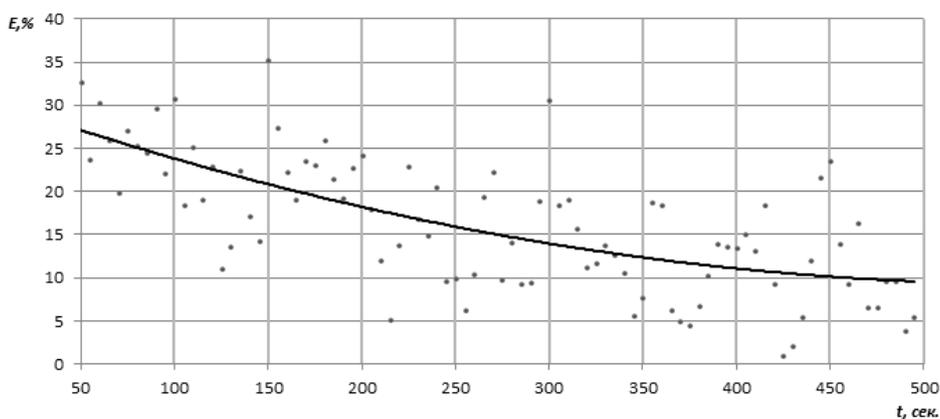


Рис. 4 – Влияние интервала движения на долю энергии рекуперации

Fig. 4 – Traffic interval influence for the share of recovery energy

Фактически, полученная зависимость является функцией вероятности совпадения актов тяги и торможения при текущем интервале движения метропоездов. С учетом того, что наибольшая интенсивность движения подвижного состава наблюдается в утренние и вечерние часы пик [10], потенциальная вероятность межпоездного обмена не превышает 35 %. В этой связи становится очевидным, что для решения задачи по снижению тягового энергопотребления межпоездной обмен необходимо рассматривать вкпе с другими методами повышения энергоэффективности.

Одним из решений этой задачи является переход на систему электроснабжения со стационарным накопителем, размещенным на территории тяговой подстанции. В ходе имитационного моделирования выяснено, что при таком подходе суммарная энергия, потребляемая из сети, сокращается в 2,3 раза. Это обеспечивается за счет того, что через тяговую подстанцию передается только энергия собственных нужд подвижного состава и энергия для движения с номинальной скоростью [11]. Не менее позитивные результаты получены и в ходе опытной эксплуатации. Так, применение накопителя энергии на основе электрохимических конденсаторов на тяговой подстанции Т-23 Московского метрополитена позволило уменьшить потребление мощности на 13,4 % [12].

Однако повсеместная установка накопительных устройств для приема энергии рекуперации сопровождается значительными капитальными вложениями [13]. Это обуславливает необходимость оптимизации расходов на установку накопите-

лей энергии. В этой связи дальнейшее исследование будет посвящено определению месторасположения накопительных устройств, а также их количественных и технических характеристик.

Заключение

На примере Ленинской линии Новосибирского метрополитена проанализирована вероятность актов межпоездного обмена энергией при разных интервалах движения поездов. Для этого разработан программный комплекс, позволяющий смоделировать ситуацию на линии при интервале времени, меняющемся в течение дня по предусмотренному плану. Установлено, что с ростом интенсивности движения метропоездов вероятность передачи энергии рекуперации потребителю через тяговую сеть увеличивается. При этом наибольшая вероятность межпоездного обмена энергией наступает в утренние и вечерние часы пик и достигает 35 %. Это говорит о том, что для комплексного повышения энергоэффективности метрополитена использование только этого метода недостаточно, поэтому межпоездной энергообмен целесообразно рассматривать совместно с другими способами энергосбережения. Изучение мирового опыта показывает, что для существенной экономии энергетических ресурсов на метрополитенах необходимо использовать накопители энергии. Таким образом, определение их типа, характеристик и месторасположения является целью следующего этапа работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратный комплекс для исследования аэродинамических характеристик подвижного состава электрического транспорта / В.В. Бирюков, М.В. Калугин, А.В. Кулекина, Э.Г. Лангеман // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2014. – № 6. – С. 53–55.
2. Сулим А.А. Расчет электроэнергии рекуперации электрифицированного городского транспорта при установке накопителя на тяговой подстанции // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2014. – № 4. – С. 30–41.
3. Сулим А.А., Ломонос А.И. Расчет энергии рекуперации при установке накопителя энергии на электропоезде метрополитена // *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія.: Транспортні системи і технології*. – 2013. – Вип. 23. – С. 22–29.
4. Экспериментальная оценка эффективности рекуперации энергии торможения в СТЭ московского метрополитена / Л.А. Баранов, В.А. Гречишников, И.С. Мелешин, М.В. Шевлюгин // *Безопасность движения поездов: труды X научно-практической конференции*. – М.: МИИТ, 2009. – С. 15–16.
5. Лутц М. Программирование на Python. Т. 2: пер. с англ. – СПб.; М.: Символ-Плюс, 2011. – 992 с.
6. Kulikov K.I. Research of energy recovery modes in traction networks of metropolitain // *Aspire to science: тезисы городской научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 26–27.
7. Байрыева Л.С. Теория электрической тяги. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 40 с.
8. Щуров Н.И. Теория электрической тяги. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 100 с.
9. Куликов К.И., Пономарев К.Е. Разработка программного комплекса для исследования режимов рекуперации энергии в Новосибирском метрополитене // *Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 5–9 декабря 2016 г.* : в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 5. – С. 213–214.

10. Новосибирский метрополитен [Электронный ресурс]: web-сайт. – URL: <http://www.nsk-metro.ru/index.php> (дата обращения: 25.08.2017).
11. **Жемеров Г.Г., Тугай Д.В., Холод О.И.** Энергоэффективность систем электроснабжения подвижного состава метрополитена // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – № 1. – С. 67–74.
12. **Гречишников В.А., Шевлюгин М.В.** Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене // *Мир транспорта*. – 2013. – № 5. – С. 54–58.
13. Анализ вопросов энергосбережения и энергоэффективности при эксплуатации подвижного состава метрополитена / А.В. Донченко, А.А. Сулим, А.С. Сиора, А.А. Мельник, В.В. Федоров // *Наука и прогресс транспорта*. – 2016. – № 3. – С. 108–119.

INFLUENCE OF THE TRAFFIC INTERVAL ON THE PROBABILITY OF INTER-TRAIN RECOVERY ENERGY EXCHANGE IN THE UNDERGROUND

Kulikov K.I., Spiridonov E.A., Ponomarev K.E., Langeman E.G.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The underground is an organized transport system that possesses a set of distinctive properties. The main one is a high speed of passenger correspondence which is ensured by the absence of traffic congestions and intersections with transport and transfer points. Nevertheless it is necessary to have in mind that the satisfaction of the population's requirements for high-quality transportation causes significant energy investments most of which are directed to the train traction needs. One of the possible ways to reduce energy consumption is the use of regenerative braking and in particular the transfer of regeneration energy to the inter-train exchange. However specific characteristics of the underground do not contribute to this process because the train movement is regulated in time and the probability of an unforeseeable coincidence of traction and braking actions is minimized. On the other hand that makes possible to accurately predict the potential of inter-train energy exchange. That will allow us to develop train timetables based not only on passenger comfort but also on energy efficiency. To assess the probability of this event a train timetable was simulated on the example of the Novosibirsk Underground. The results obtained testify the prospects of this energy saving method. But to fully optimize the underground system operation it is advisable to use it together with other methods of increasing energy efficiency.

Keywords: regenerative braking, underground, inter-train energy exchange, traffic interval, simulation modeling.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-53-60

REFERENCES

1. Biriukov V.V., Kalugin M.V., Kulekina A.V., Langeman E.G. Apparadniy kompleks dlya issledovaniya aerodinamicheskikh kharakteristik podvizhnogo sostava elektricheskogo transporta [Complex of equipment for research of aerodynamic properties of the rolling stock of electrical transport]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2014, no. 6, pp. 53–55.
2. Sulim A.A. Raschet elektroenergii rekuperatsii elektrifitsirovannogo gorodskogo transporta pri ustanovke nakopitelya na tyagovoi podstantsii [The calculation of the energy recovery electrified urban transport during the installation drive for traction substation]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2014, no. 4, pp. 30–41.

3. Sulim A.A., Lomonos A.I. Raschet energii rekuperatsii pri ustanovke nakopitelya energii na elektropoezde metropolitena [Calculation of energy recovery during the installation of energy storage on an electric subway train]. *Zbirnik naukovikh prats' Derzhavnogo ekonomiko-tekhnologichnogo universitetu transportu. Seriya.: Transportni sistemi i tekhnologii – Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport. Series: Transport systems and technology*, 2013, iss. 23, pp. 22–29.
4. Baranov L.A., Grechishnikov V.A., Meleshin I.S., Shevliugin M.V. [Experimental evaluation of the efficiency of regeneration of the braking energy in the STS of the Moscow metro]. *Bezopasnost' dvizheniya poezdov: trudy X nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Safety of train traffic. Proceedings of X scientific-practical conferences]. Moscow, MIIT Publ., 2009, pp. 15–16.
5. Lutz M. *Programming Python*. 4th ed. Beijing [et al.], O'Reilly, 2011 (Russ. ed.: Lutts M. *Programirovanie na Python*. T. 2. Translated from English. St. Petersburg, Moscow, Simvol-Plyus Publ., 2011. 992 c.).
6. Kulikov K.I. Research of energy recovery modes in traction networks of metropoliten. *Aspire to science: tezisy gorodskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, magistrantov i aspirantov* [Aspire to science: abstracts city scientific and practical conference for school and university students and postgraduates]. Novosibirsk, 2016, pp. 26–27.
7. Bairyeva L.S. *Teoriya elektricheskoi tyagi* [Electric traction theory]. Moscow, MPEI Publ., 2004. 40 p.
8. Shchurov N.I. *Teoriya elektricheskoi tyagi* [Electric traction theory]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 100 p.
9. Kulikov K.I., Ponomarev K.E. [Development of a software package for the investigation of energy recovery regimes in the Novosibirsk metro]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov* [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers]. Novosibirsk, 5–9 December 2016, pt. 5, pp. 213–214.
10. *Novosibirskii metropoliten* [Novosibirsk Metropolitan]: website. Available at: <http://www.nsk-metro.ru/index.php> (accessed 25.08.2017).
11. Zhemerov G.G., Tugai D.V., Kholod O.I. Energoeffektivnost' sistem elektrosnabzheniya podvizhnogo sostava metropolitena [Energy efficiency of power supply systems for a subway]. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical Electrodynamics*, 2014, no. 1, pp. 67–74.
12. Grechishnikov V.A., Shevliugin M.V. Eksploatatsiya nakopitelya energii na metropolitene [Operation of the energy store on the subway]. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2013, no. 5, pp. 54–58.
13. Donchenko A.V., Sulim A.A., Siora A.S., Mel'nik A.A., Fedorov V.V. Analiz voprosov energosberezheniya i energoeffektivnosti pri eksploatatsii podvizhnogo sostava metropolitena [Analysis of energy saving and energy efficiency issues during operation of the metro rolling stock]. *Nauka i progress transporta – Science and Transport Progress*, 2016, no. 3, pp. 108–119.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Куликов Кирилл Игоревич – родился в 1993 году, магистрант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрический транспорт, гибридный транспорт, комбинированные силовые энергоустановки. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: kirill_kulikov_1993@mail.ru).

Kulikov Kirill (b. 1993) – graduate student of electrotechnical complexes department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electric transport, hybrid transport, combined power installations. He is author of 6 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kirill_kulikov_1993@mail.ru).



Спиридонов Егор Александрович – родился в 1982 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электротехнические и электротранспортные комплексы. Опубликовано 45 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: spiridonov@corp.nstu.ru).

Spiridonov Egor (b. 1982) – Candidate of Sciences (Eng.), docent of electrotechnical complexes department of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electrotechnical and electrotransport systems. He is author of 45 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: spiridonov@corp.nstu.ru).



Пonomarev Константин Евгеньевич – родился в 1992 году, аспирант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: микропроцессорные системы, беспроводные сенсорные сети, электрические системы, программирование. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: pke92@yandex.ru).

Ponomarev Konstantin (b. 1992) – post graduate student of department of microelectronics and semiconductor devices of the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on microprocessor systems, wireless sensor networks, electrical systems, programming. He is author of 5 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: pke92@yandex.ru).



Лангеман Эвелина Гарриевна – родилась в 1991 году, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: повышение энергоэффективности электрического транспорта - Опубликовано 25 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: langeman@corp.nstu.ru).

Langeman Evelina (b. 1991) – post graduate student of electrotechnical complexes department of the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on increasing of energy efficiency of electric transport. She is author of 25 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: langeman@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 06 апреля 2017 г.
Received April 06, 2017*

To Reference:

Kulikov K.I., Spiridonov E.A., Ponomarev K.E., Langeman E.G. Vliyanie intervala dvizheniya na veroyatnost' mezhpoezdnogo obmena energiei rekuperatsii v metropolitane [Traffic interval influence for the probability of inter-train recovery energy exchange in metropolitan]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 2 (35), pp. 53–60. doi: 10.17212/1727-2769-2017-2-53-60