

EDN: WZRVJT

УДК 621.311, 621.331

Energy Efficiency and Electric Power Quality in 220 kV Networks Supplying Traction Substations in Regenerative Braking Modes

**Andrey V. Kryukov^{*a, b}, Konstantin V. Suslov^{b, c},
Aleksandr V. Cherepanov^a and Aleksandr E. Kryukov^b**

*^aIrkutsk State Transport University
Irkutsk, Russian Federation*

*^bIrkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation*

*^cNational Research University "MPEI"
Moscow, Russian Federation*

Received 08.05.2024, received in revised form 24.10.2024, accepted 24.10.2024

Abstract. The use of regenerative braking allows for a significant reduction in energy costs for the processes of transporting goods and passengers; At the same time, the negative impact on the environment is reduced by reducing carbon dioxide emissions. However, recuperation modes are characterized by increased consumption of reactive power by electric locomotives, which leads to a number of negative effects: voltage asymmetry in the networks feeding traction substations increases; active power losses in power lines and transformers increase. To quantify the positive and negative effects of recovery, digital models of the traction power supply system for a double-track section of the railway with 25 kV traction networks have been developed and their operating modes during train movement have been determined. Calculations were performed using the Fazonord software package, version 5.3.4.1–2024 for two regime situations. In the first, regenerative braking was not used, but in the second, it was. The following indicators were analyzed: active and reactive power consumption; voltages on pantographs of electric locomotives; asymmetry on busbars of 220 kV traction substations; losses of active power at the head section of the supply power line and transformers. The results obtained allowed us to draw the following conclusions: in recuperation modes, the total active energy consumption for train movement is reduced by 24...27 %, reactive power consumption increases by 1.6 times; the average voltage values on the current collectors of electric locomotives decrease by 4.4 %. In addition, there is a deterioration in the quality of electricity due to asymmetry and an increase in active power losses in transformers and power lines. The proposed technique is universal and can be used to analyze the modes of power supply systems of various structures and designs.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: smart_grid@mail.ru; and_kryukov@mail.ru; dr.souslov@yandex.ru

Keywords: railway power supply systems, regenerative braking modes, power quality and energy efficiency.

Citation: Kryukov A. V., Suslov K. V., Cherepanov A. V., Kryukov A. E. Energy efficiency and electric power quality in 220 kV networks supplying traction substations in regenerative braking modes. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(7), 828–840. EDN: WZRVTJ



Энергоэффективность и качество электроэнергии в сетях 220 кВ, питающих тяговые подстанции, в режимах рекуперативного торможения

А. В. Крюков^{а, б}, К. В. Суслов^{б, в},
А. В. Черепанов^а, А. Е. Крюков^б

^аИркутский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Иркутск

^бИркутский национальный исследовательский
технический университет

Российская Федерация, Иркутск

^вНациональный исследовательский университет “МЭИ”
Российская Федерация, Москва

Аннотация. Использование рекуперативного торможения позволяет получить значительное сокращение энергозатрат на осуществление процессов перевозок грузов и пассажиров; при этом снижается негативное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения выбросов диоксида углерода. Однако режимы рекуперации характеризуются повышенным потреблением реактивной мощности электровозами, что приводит к ряду негативных эффектов: увеличивается несимметрия напряжений в сетях, питающих тяговые подстанции; возрастают потери активной мощности в линиях электропередачи и трансформаторах. Для количественной оценки положительных и отрицательных эффектов рекуперации разработаны цифровые модели системы тягового электроснабжения двухпутного участка железной дороги с тяговыми сетями 25 кВ и определены режимы их работы при движении поездов. Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса Fazonord, версия 5.3.4.1–2024 для двух режимных ситуаций. В первой – рекуперативное торможение не использовалось, а во второй – осуществлялось. Анализировались следующие показатели: активное и реактивное электропотребление; напряжения на пантографах электровозов; несимметрия на шинах 220 кВ тяговых подстанций (ТП); потери активной мощности на головном участке питающей ЛЭП и трансформаторах ТП. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: в режимах с рекуперацией суммарные расходы активной энергии на движение поездов снижаются на 24...27 %, реактивное электропотребление увеличивается в 1,6 раза; средние величины напряжений на токоприемниках электровозов уменьшаются на 4,4 %. Кроме того, наблюдается ухудшение качества электроэнергии по несимметрии и рост потерь активной мощности в трансформаторах и ЛЭП. Предложенная методика является универсальной и может использоваться для анализа режимов систем электроснабжения различной структуры и конструктивного исполнения.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, режимы рекуперативного торможения, качество электроэнергии и энергетическая эффективность.

Цитирование: Крюков А. В. Энергоэффективность и качество электроэнергии в сетях 220 кВ, питающих тяговые подстанции, в режимах рекуперативного торможения / А. В. Крюков, К. В. Суслов, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(7). С. 828–840. EDN: WZRVJT

Введение

За счет рекуперативного торможения поездов (РТП) можно существенно сократить расходы электроэнергии (ЭЭ) на тягу. Наряду с экономией финансовых средств это позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения выбросов диоксида углерода. Однако режимы РТП характеризуются повышенным потреблением реактивной мощности электровозами, что приводит к ряду негативных эффектов: увеличивается несимметрия напряжений в сетях, питающих тяговые подстанции; возрастают потери активной мощности в линиях электропередачи и трансформаторах.

Задачам анализа процессов рекуперации посвящен целый ряд работ, часть из которых представлена в библиографическом списке к данной статье. Так, например, оценка диапазонов применения рекуперации, полученная на базе анализа статистики по расходам электроэнергии, приведена в [1]. Вопросы энергетической эффективности рекуперативного торможения грузовых электровозов рассмотрены в [2]. Подходы к оптимизации процессов рекуперации на электрическом транспорте предложены в [3, 4]. Задача управления рекуперативным торможением при наличии ограничений по возврату ЭЭ в тяговую сеть (ТС) решена в [5]. Метод моделирования электровоза в режиме рекуперативного торможения предложен в [6]. Влияние параметров системы тягового электроснабжения (СТЭ) на процессы рекуперации проанализировано в [7]. Результаты определения эффективности РТП на дорогах постоянного и переменного тока приведены в [8]. Вопрос о влиянии РТП на уровень потерь в ТС рассмотрен в [9]. Основные положения методики анализа процессов РТП представлены в [10]. Особенности эксплуатации электровозов в режимах РТП описаны в [11]. Повышению эффективности рекуперации посвящены работы [12, 13]. Анализ влияния масс составов и размеров движения поездов на РТП в СТЭ переменного тока представлен в [14]. Методика определения потенциала повышения энергетической эффективности СТЭ изложена в [15, 16]. Результаты расчета параметров накопителей ЭЭ и на участках с РТП электроподвижного состава представлены в [17]. Стратегия энергосбережения в СТЭ с учетом РТП описана в [18]. Задача использования энергии РТП при взаимодействии нескольких поездов решена в [19]. Методика моделирования и расчета энергопотребления с учетом РТП представлена в [20]. Анализ процессов рекуперации посвящена статья [21]. Новая стратегия управления для оптимального использования энергии РТП предложена в [22]. Результаты исследования режимов РТП в СТЭ приведены в [23, 24]. Задача совместной оптимизации СТЭ на основе использования РТП решена в [25]. Энергоэффективный подход к эксплуатации, основанный на применении РТП, предложен в [26]. Разработке алгоритма оптимизации РТП высокоскоростных поездов посвящена статья [27]. Вопросы моделирования энергии РТП в СТЭ постоянного тока рассмотрены в [28].

Представленный выше анализ дает возможность сформулировать вывод о том, что многие аспекты РТП детально изучены. Однако методика, позволяющая комплексно определять все параметры режимов РТП в СТЭ, в рассмотренных публикациях не представлена. Она может быть реализована на основе подходов, предложенных в [29, 30].

Результаты моделирования

Для количественной оценки положительных и отрицательных эффектов рекуперации разработаны цифровые модели системы электроснабжения двухпутного участка железной дороги с тяговыми сетями 25 кВ (рис. 1) и определены режимы их работы при движении поездов. Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса Fazonord, версия 5.3.4.1–2024 для двух режимных ситуаций. В первой – рекуперативное торможение не использовалось, а во второй – осуществлялось. Анализировались следующие показатели: активное и реактивное электропотребление; напряжения на пантографах электропоездов; несимметрия на шинах 220 кВ тяговых подстанций; потери активной мощности в ЛЭП и трансформаторах ТП. Часть расчетной схемы, отвечающая питающей сети 220 кВ, показана на рис. 2. График движения составов приведен на рис. 3. Зависимости потребляемых электропоездами токов от пространственной координаты отражены на рис. 4.

Результаты моделирования представлены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 5–15. На рис. 5 и 6 показаны зависимости активной и реактивной мощностей (РМ), потребляемых

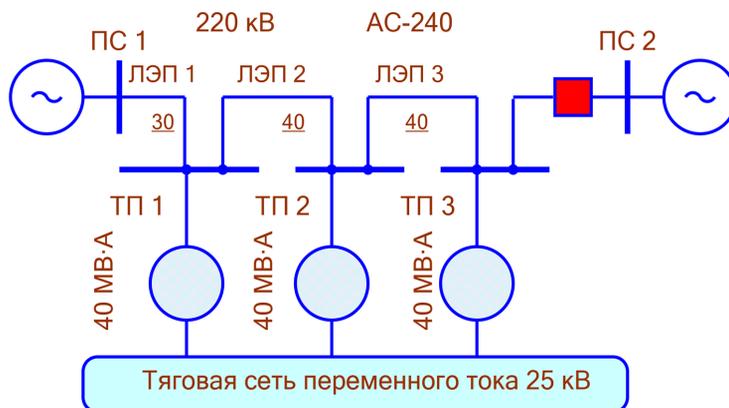


Рис. 1. Схема сети, питающей тяговые подстанции

Fig. 1. Diagram of the network supplying traction substations

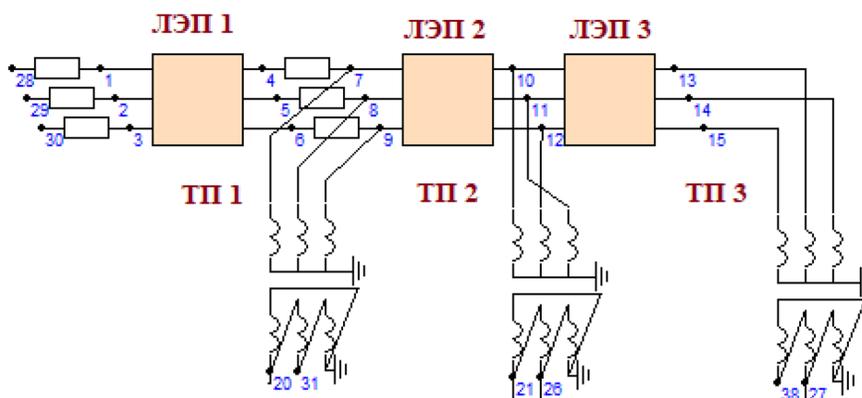


Рис. 2. Часть расчетной схемы, отвечающая питающей сети 220 кВ

Fig. 2. The part of the design scheme corresponding to the 220 kV supply network

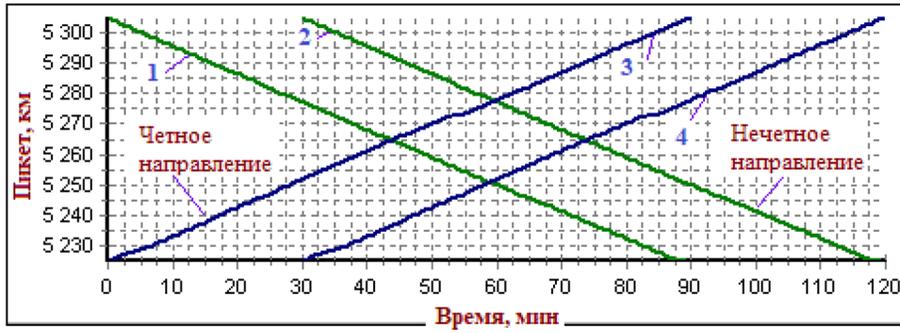
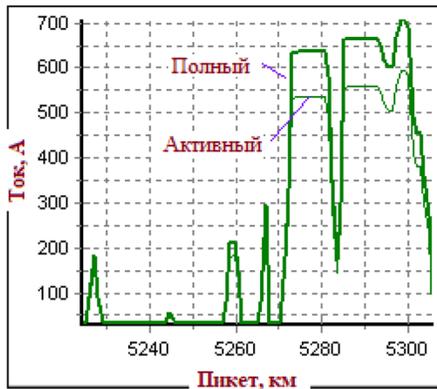
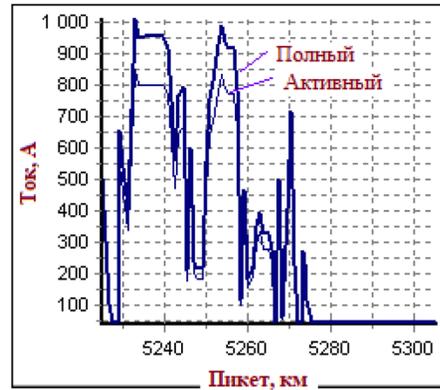


Рис. 3. График движения: цифрами обозначены номера поездов

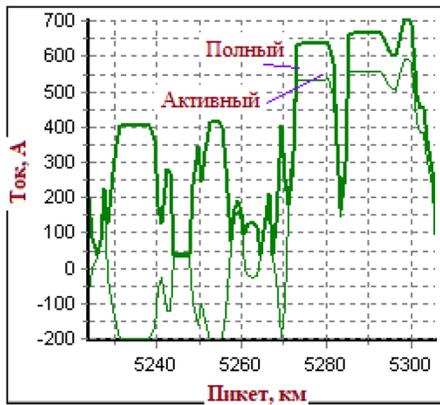
Fig. 3. Timetable: numbers indicate train numbers



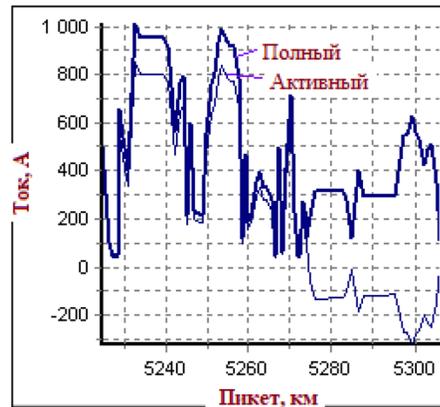
а



б



в



г

Рис. 4. Зависимости потребляемых электровозами токов от пространственной координаты: а, в – поезда нечетного направления; б, г – то же для четного; а, б – рекуперативное торможение не используется; в, г – рекуперативное торможение выполняется

Fig. 4. Dependences of the currents consumed by electric locomotives on the spatial coordinate: а, в – trains of an odd direction; б, г – the same for an even direction; а, б – regenerative braking is not used; в, г – regenerative braking is performed

Таблица 1. Сводные данные по напряжениям на токоприемниках и энергопотреблению

Table 1. Summary data on current collector voltages and energy consumption

Режим торможения	Параметр	Номер поезда			
		1	2	3	4
Рекуперативное торможение не используется	U_{\min} , кВ	21,9	21,1	21,60	21,7
	W_t , МВт·ч	8,4	8,4	10,6	10,6
	W_p , МВт·ч	0	0	0	0
Рекуперативное торможение выполняется	U_{\min} , кВ	21,9	21,1	21,2	21,2
	W_t , МВт·ч	6,1	6,1	8,02	8,02
	W_p , МВт·ч	1,77	1,77	2,09	2,09

Примечания: U_{\min} – минимальное напряжение на пантографах; W_t – расход электроэнергии на тягу; W_p – энергия рекуперации

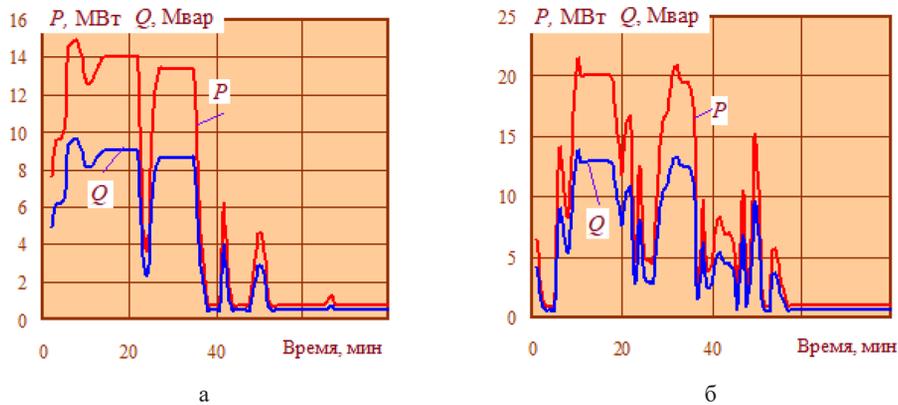


Рис. 5. Зависимости активной и реактивной мощностей, потребляемых электровозами, от времени при отсутствии рекуперации: а – поезд 1; б – поезд 3

Fig. 5. Dependences of the active and reactive capacities consumed by electric locomotives on time in the absence of recovery: а – train 1; б – train 3

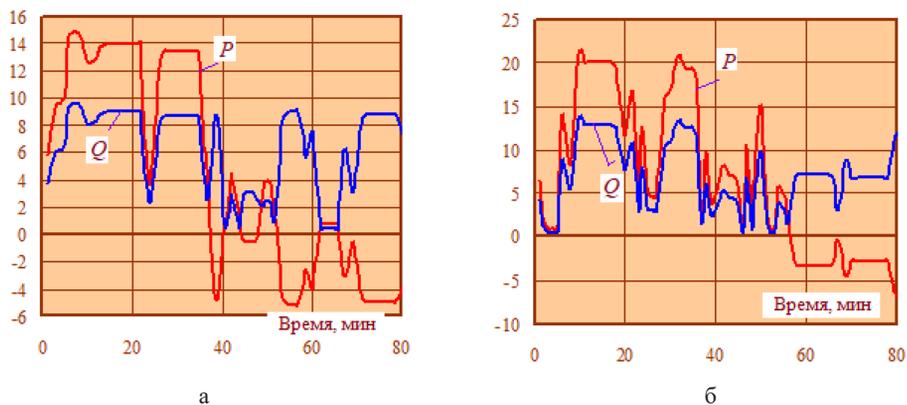


Рис. 6. Зависимости активной и реактивной мощности, потребляемой (генерируемой) электровозами, от времени при использовании рекуперативного торможения: а – поезд 1; б – поезд 3

Fig. 6. Dependences of active and reactive power consumed (generated) by electric locomotives on time when using regenerative braking: а – train 1; б – train 3

электровозами, от времени при отсутствии и наличии рекуперации. Анализ этих графиков дает возможность сделать вывод о том, что в процессе РТП электровозы становятся генераторами ЭЭ, перемещающимися в пространстве. Расход ЭЭ на движение отдельных поездов уменьшается на 24...27 %, табл. 1. При переходе в режим РТП потребление реактивной мощности повышается в 1,6 раза.

На рис. 7 представлены графики, характеризующие динамику изменений напряжений U на токоприемниках электровозов. Из них видно, что средние величины этих параметров в режиме РТП уменьшаются на 4,4 %. Однако минимальные уровни U_{\min} при наличии и отсутствии РТП не изменяются (табл. 1).

На рис. 8, 9 представлены временные зависимости для коэффициентов несимметрии по обратной последовательности, а на рис. 10 график средних значений k_{2U} на вводах 220 кВ

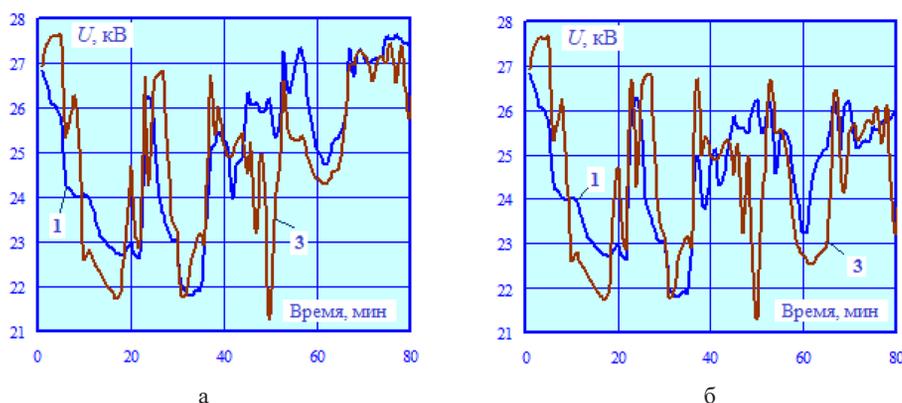


Рис. 7. Зависимости на токоприемниках электровозов от времени: а – рекуперативное торможение не используется; б – рекуперативное торможение выполняется; цифрами обозначены номера поездов

Fig. 7. Time dependences on electric locomotive current collectors: а – regenerative braking is not used; б – regenerative braking is performed; train numbers are indicated by numbers

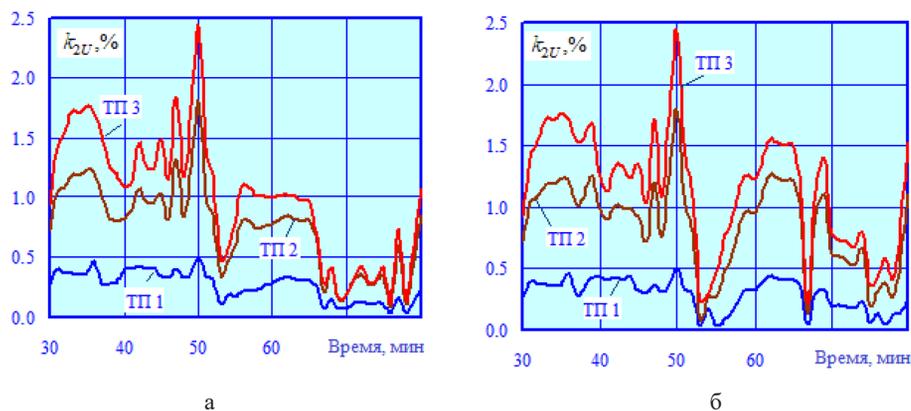


Рис. 8. Зависимости коэффициента несимметрии по обратной последовательности на вводах 220 кВ от времени: а – рекуперативное торможение не используется; б – рекуперативное торможение выполняется

Fig. 8. The dependence of the coefficient of asymmetry in the reverse sequence at the 220 kV inputs on time: а – regenerative braking is not used; б – regenerative braking is performed

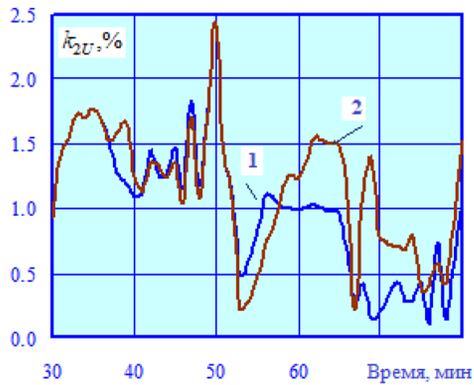


Рис. 9. Сравнительные кривые $k_{2U} = k_{2U}(t)$ для ТП 3: 1 – рекуперативное торможение не используется; 2 – рекуперативное торможение выполняется

Fig. 9. Comparative curves $k_{2U} = k_{2U}(t)$ for TP 3: 1 – regenerative braking is not used; 2 – regenerative braking is performed

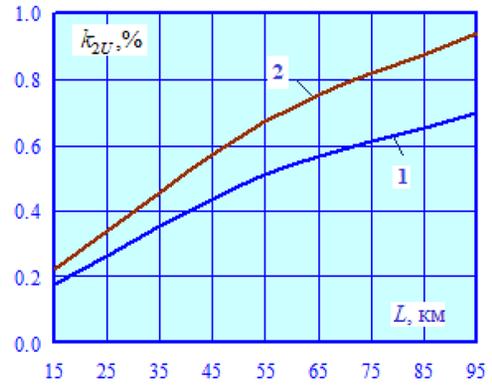


Рис. 10. Зависимости средних значений k_{2U} на вводах 220 кВ от ТП расстояния до ПС 1; цифровые обозначения аналогичны рис. 9

Fig. 10. Dependences of the average values of k_{2U} at 220 kV inputs on the TP of the distance to PS 1; the numerical designations are similar to Fig. 9

ТП от расстояния до ПС 1 (рис. 1). Данные, приведенные на рис. 8–10, позволяют сделать вывод о том, что величины k_{2U} не превышают допустимых значений в обеих рассматриваемых ситуациях. В режиме РТП имеет место их повышение на 25...35 %.

На рис. 11, 12 представлены результаты, характеризующие энергоэффективность РТП. Из рис. 11а видно, что в этом режиме наблюдается реверс потока мощности по головной ЛЭП 1, т.е. вместо потребления ЭЭ происходит ее генерация. Однако за счет увеличения потоков РМ (рис. 12) наблюдается рост потерь активной мощности в этой ЛЭП (рис. 11б).

На рис. 13–15 приведены графики, характеризующие процессы преобразования энергии в тяговых трансформаторах (ТТ). В режимах РТП средние величины суммарных потерь в ТТ возрастают на 3,3...7,1 %. Потери в меди повышаются на 12...34 %. Из рис. 15 видно, что наибольшие потери энергии имеют место в ТТ подстанции номер 2 (рис. 1).



а

б

Рис. 11. Зависимости перетоков активной мощности по головной ЛЭП (а) и потерь в ней (б) от времени: цифровые обозначения аналогичны рис. 9

Fig. 11. Dependences of active power flows through the main transmission line (а) and losses in it (б) on time: the numerical designations are similar to Fig. 9

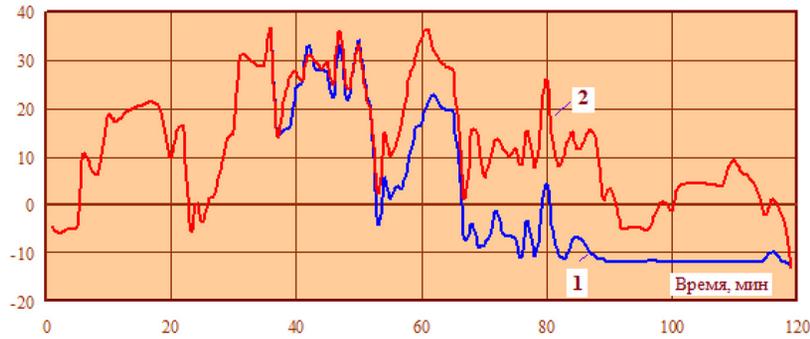


Рис. 12. Зависимости перетоков реактивной мощности по головной ЛЭП (а) и потерь в ней (б) от времени: цифровые обозначения аналогичны рис. 9

Fig. 12. Dependences of reactive power flows along the main transmission line (a) and losses in it (б) on time: the numerical designations are similar to Fig. 9

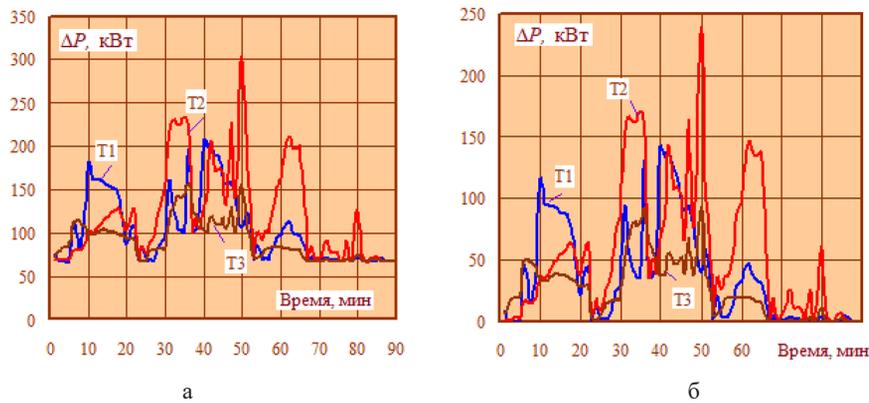


Рис. 13. Зависимости потерь в тяговых трансформаторах от времени при отсутствии рекуперативного торможения: а – суммарные потери ΔP_{Σ} ; б – потери в меди ΔP_k

Fig. 13. Dependence of losses in traction transformers on time in the absence of regenerative braking: a – total losses ΔP_{Σ} ; б – losses in copper ΔP_k

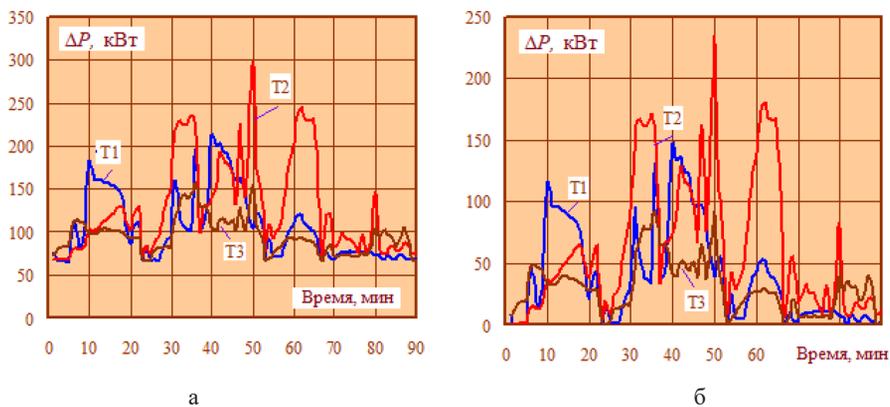


Рис. 14. Зависимости потерь в тяговых трансформаторах от времени при использовании рекуперативного торможения: а – суммарные потери; б – потери в меди

Fig. 14. Dependence of losses in traction transformers on time when using regenerative braking: a – total losses; б – losses in copper

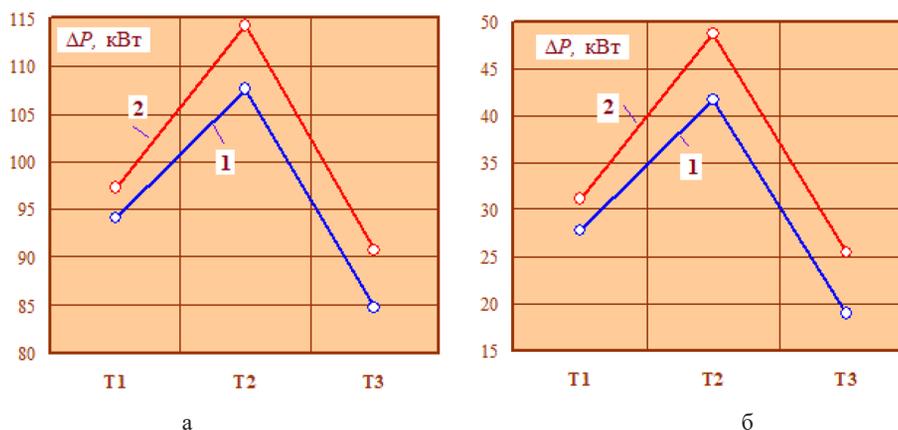


Рис. 15. Средние значения ΔP_{Σ} (а) и ΔP_k (б): цифровые обозначения аналогичны рис. 9

Fig. 15. Average values ΔP_{Σ} (a) and ΔP_k (б): the numerical designations are similar to Fig. 9

Таким образом, описанные цифровые модели дают возможность детально анализировать процессы в системах электроснабжения железных дорог в режимах рекуперативного торможения поездов.

Заключение

Представленные результаты, полученные в рамках программы государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока», дают возможность сделать вывод о том, что режимы РТП позволяют получить заметное сокращение затрат ЭЭ на тягу поездов. Однако из-за роста потоков реактивной мощности наблюдается увеличение потерь в ЛЭП и трансформаторах и ухудшение показателей качества электроэнергии.

Предложенная методика является универсальной и может использоваться для анализа режимов систем электроснабжения различной структуры и конструктивного исполнения, включая СТЭ постоянного тока [31].

Список литературы / References

[1] Макашева С. И., Мамаев А. Р. К вопросу повышения энергоэффективности рекуперации электрической энергии в тяговой сети переменного тока. *Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта*. Омск, 2020. 117–124 [Makasheva S. I., Mamaev A. R. On the issue of improving the energy efficiency of electric energy recovery in an alternating current traction network. *Development and operation of electrical complexes and systems of energy and ground transport*. Omsk, 2020. 117–124 (In Rus.).]

[2] Бакланов А. А., Шилияков А. П. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения грузовых электровозов. *Известия Транссиба*. 4(48). 2021. 11–22. [Baklanov A. A., Shilyakov A. P. Energy efficiency of regenerative braking of electric freight locomotives. *News of the Transsib*. 4(48). 2021. 11–22 (In Rus.).]

[3] Черепенькин И.В., Хуснутдинов А.Н. Повышение эффективности рекуперативного торможения на электрическом транспорте. *Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве*. Казань, 2019. 369–374. [Cherepenkin I. V., Khusnutdinov A. N. Improving the efficiency of regenerative braking in electric transport. *Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services*. Kazan, 2019. 369–374 (In Rus.).]

[4] Способ повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения. Е.В. Буняева, В.Г. Скорик, С.В. Власьевский [и др.]. *Электротехника*. 2016. 2. 17–20 [A method for increasing the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking. E. V. Bunyaeva, V.G. Skorik, S. V. Vlasyevsky [et al.]. *Electrical engineering*. 2016. 2. 17–20 (In Rus.).]

[5] Иньков Ю. М., Феоктистов В.П., Третинников О.В. Управление рекуперативным торможением электровоза при ограничении на возврат энергии в контактную сеть. *Электротехника*. 2015. 9. 9–14 [Inkov Yu. M., Feoktistov V.P., Tretinnikov O. V. Control of regenerative braking of an electric locomotive with a restriction on the return of energy to the contact network. *Electrical engineering*. 2015. 9. 9–14 (In Rus.).]

[6] Томилов В. С. Моделирование работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2021. 2(50). 106–114. [Tomilov V. S. Simulation of the operation of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking. *Bulletin of the Ural State University of Railway Engineering*. 2021. 2(50). 106–114 (In Rus.).]

[7] Никифоров М. М., Вильгельм А.С., Гутников В.И. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации. *Известия Транссиба*. 2017. 1(29). 74–83 [Nikiforov M.M., Wilhelm A.S., Gutnikov V.I. Influence of parameters and modes of operation of the traction power supply system on the efficiency of energy recovery. *News of the Transsib*. 2017. 1(29). 74–83 (In Rus.).]

[8] Никифоров М. М., Вильгельм А.С. Расчет эффективности использования энергии рекуперации на однопутных и двухпутных участках железных дорог постоянного и переменного тока. *Вестник транспорта Поволжья*. 2018. 2(68). 28–37 [Nikiforov M.M., Wilhelm A.S. Calculation of the efficiency of using recovery energy on single-track and double-track sections of direct and alternating current railways. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2018. 2(68). 28–37 (In Rus.).]

[9] Никифоров М. М., Вильгельм А.С. Влияние энергии рекуперации на уровень потерь в системе тягового электроснабжения. *Транспорт Урала*. 2017. 2(53). 55–60 [Nikiforov M.M., Wilhelm A.S. The effect of recovery energy on the level of losses in the traction power supply system. *Transport of the Urals*. 2017. 2(53). 55–60 (In Rus.).]

[10] Черемисин В. Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2017. 1(65). 114–120. [Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Wilhelm A.S. The main provisions of the methodology for evaluating the efficiency of energy recovery. *Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering*. 2017. 1(65). 114–120 (In Rus.)]

[11] Шрамко С.Г. Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. 4(111). 192–199 [Shramko S.G. Improving the efficiency of operation of AC electric locomotives in the mode of regenerative braking. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2016. 4(111). 192–199 (In Rus.)].

[12] Фролова Е. А., Хлуднев Е. А. Использование рекуперации на железной дороге в целях повышения эффективности. *Междисциплинарные исследования*. Новосибирск, 2019. 271–277 [Frolova E. A., Khludnev E. A. The use of recuperation on the railway in order to increase efficiency. *Interdisciplinary research*. Novosibirsk, 2019. 271–277 (In Rus.)].

[13] Кейно М. Ю. Эффективность рекуперативного торможения как критерий выбора вида тяги для новых железных дорог. *Известия Транссиба*. 2022. 1(49). 32–43. [Keino M. Y. Efficiency of regenerative braking as a criterion for choosing the type of traction for new railways. *News of the Transsib*. 2022. 1(49). 32–43. (In Rus.)]

[14] Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Влияние массы составов и размеров движения поездов на эффективность использования энергии рекуперации на участках железных дорог переменного тока. *Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов*. Омск, 2018. 129–139 [Nikiforov M. M., Wilhelm A. S. The influence of the mass of trains and the size of train traffic on the efficiency of energy recovery on sections of alternating current railways. *Operational reliability of the locomotive fleet and increased efficiency of train traction*. Omsk, 2018. 129–139 (In Rus.)].

[15] Черемисин В.Т., Никифоров М.М. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения. *Известия Транссиба*. 2013. 2(14). 75–84 [Cheremisin V. T., Nikiforov M. M. Assessment of the potential to increase the energy efficiency of the traction power supply system. *News of the Transsib*. 2013. 2(14). 75–84 (In Rus.)].

[16] Никифоров М. М., Каштанов А. Л., Кандаев В. А. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения. *Известия Транссиба*. 2012. 1(9). 72–77. [Nikiforov M. M., Kashtanov A. L., Kandaev V. A. Methodology for assessing the energy efficiency potential of regenerative braking. *News of the Transsib*. 2012. 1(9). 72–77. (In Rus.)]

[17] Незевак В.Л. Расчет параметров и показателей работы системы накопления электроэнергии на участках с рекуперативным торможением электроподвижного состава. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021. 1(81). 149–160 [Nezevak V. L. Calculation of parameters and performance indicators of the electric power storage system in areas with regenerative braking of electric rolling stock. *Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering*. 2021. 1(81). 149–160 (In Rus.)].

[18] Youxing Guo, Tong He, Mo Chen, Qingyuan Wang, Pengfei Sun. Energy-Saving Operation Strategy for Subway Trains Considering Regenerative Brake Energy. *2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*. 2021 Publisher: IEEE.

[19] Xubin Sun, Hu Cai, Xiaowei Hou, Mengyang Zhang, Hairong Dong. Regenerative braking energy utilization by multi train cooperation. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2014 Publisher: IEEE.

[20] Shaobo Song, Qingyuan Wang, Jie Wu. Simulation of multi-train operation and energy consumption calculation considering regenerative braking. *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*. 2014 Publisher: IEEE.

[21] Su-Gil Lee, Byeong-Song Lee, Jun-Ho Lee, Chan-Bae Park, Jae-hee Kim, Shin-Myung Jung. A study on regenerative braking energy on electric multiple unit train. *2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*. 2013 Publisher: IEEE.

[22] Salman Hajiaghahi, Zahra Rafiee, Ahmad Salemnia, Mansour Rafiee, Mohammad Reza Aghamohammadi, Mostafa Khazae. New Control Strategy for Optimum use of Regenerative Braking Energy in Electric Train based on Energy Storage Systems. *2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*. 2019 Publisher: IEEE.

[23] Dick Sang Hoo, Kein Huat Chua, Lee Cheun Hau, Kah Yun Chong, Yun Seng Lim, Xin Rong Chua, Li Wang. An Investigation on Recuperation of Regenerative Braking Energy in DC Railway Electrification System. *2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*. 2022 Publisher: IEEE.

[24] Wei Liu, Jiaxuan Xu, Jingkun Tang. Study on control strategy of urban rail train with on-board regenerative braking energy storage system. *IECON 2017–43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017 Publisher: IEEE.

[25] Meiyu Song, Xiangwen Shi, Xiaobo Wu, Donglei Sha, Fei Lin, Zhongping Yang. Collaborative Optimization Strategy of Urban Rail Train Operation Curve Based on Regenerative Braking Energy Utilization. *2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*. Publisher: IEEE.

[26] Erchao Chen, Bing Bu, Wenzhe Sun. An Energy-Efficient Operation Approach Based on the Utilization of Regenerative Braking Energy Among Trains. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Publisher: IEEE.

[27] Luca Pugi, Amedeo Frilli, Daniele Nocciolini, Enrico Meli, Andrea Rindi. Development and validation of a model for the optimization of regenerative braking of high speed trains. *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. Publisher: IEEE.

[28] Mahdiyeh Khodaparastan, Ahmed Mohamed. Modeling and Simulation of Regenerative Braking Energy in DC Electric Rail Systems. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. Publisher: IEEE.

[29] Закарюкин В.П., Крюков А.В. *Сложнонесимметричные режимы электрических систем*. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 [Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Complex symmetric modes of electrical systems*. Irkutsk: Publishing house of Irkut. un-ta. 2005. 273 (In Rus.)]

[30] Влияние рекуперативного торможения на энергоэффективность и качество электроэнергии в системах тягового электроснабжения. Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.В. Черепанов, А.Е. Крюков. *Системы. Методы. Технологии*. 2023. 2(58). 69–79. [The effect of regenerative braking on energy efficiency and quality of electricity in traction power supply systems. Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov, A. V. Cherepanov, A. E. Kryukov. *The system. Methods. Technologies*. 2023. 2(58). 69–79 (In Rus.)]

[31] Закарюкин В. П., Крюков А.В. *Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат*. Москва: Директ-Медиа, 2023. 156. [Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates*. Moscow: Direct Media, 2023. 156 (In Rus.)]