

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2023-2-69-79

## Влияние рекуперативного торможения на энергоэффективность и качество электроэнергии в системах тягового электроснабжения

Ю.Н. Булатов<sup>1a</sup>, А.В. Крюков<sup>2, 3b</sup>, А.В. Черепанов<sup>2c</sup>, А.Е. Крюков<sup>3d</sup>

<sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 14.02.2023, принята 13.04.2023

*С помощью применения рекуперативного торможения поездов можно получить значительную экономию электроэнергии. Для характеристики эффективности рекуперации можно использовать показатель эффективности, равный произведению ускорения свободного падения на долю используемой при рекуперации потенциальной энергии. Этот показатель мало зависит от скорости движения и массы поезда. Его зависимость от уклона хорошо аппроксимируется многочленом 3-й степени. Проведено моделирование режимов системы тягового электроснабжения горно-перевального участка одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: рекуперативное торможение сопровождается возникновением уравнительных токов в смежных межподстанционных зонах и приводит к абсолютному и относительному росту потерь электрической энергии в тяговой сети; доля потерь активной энергии возрастает в несколько раз; наличие рекуперации приводит к изменению направления потоков активной энергии на тяговых подстанциях с режимом (до двукратного) увеличением реактивного электропотребления поездами; рекуперация приводит к значительному снижению напряжения на токоприемниках электропоездов; на рассматриваемом участке при трех поездах массой 6 тыс. т получено снижение напряжения до 23 кВ, происходящее из-за большого реактивного потребления; протекание тяговых токов в контактной сети приводит к появлению наведенных напряжений на рельсах, потенциал которых на участках с тягой составляет 200 В и более; при этом возникает несимметрия напряжения рельсовых нитей, которая достигает 9 В; рекуперативное торможение приводит к существенно меньшим потенциалам рельсов и их несимметрии; в режимах рекуперации наблюдается заметное снижение напряжения питания автоблокировки и возникновение несимметрии.*

**Ключевые слова:** системы тягового электроснабжения 25 кВ; режимы рекуперативного торможения; энергоэффективность; моделирование.

## Influence of regenerative braking on energy efficiency and power quality in traction power supply systems

Yu.N. Bulatov<sup>1a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2, 3b</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2c</sup>, A.E. Kryukov<sup>3d</sup>

<sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontova St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 14.02.2023, accepted 13.04.2023

*With the use of regenerative braking of trains, significant energy savings can be obtained. To characterize the efficiency of recuperation, one can use an efficiency indicator equal to the product of the free fall acceleration and the fraction of potential energy used in the recuperation. This figure depends little on the speed and mass of the train. The dependence of the efficiency indicator on the slope is well approximated by a polynomial of the third degree. Modeling of the regimes of the traction power supply system of the mountain-pass section of one of the main railways of Eastern Siberia has been carried out. The results obtained allowed us to draw the following conclusions: regenerative braking is accompanied by the occurrence of circulating currents in adjacent inter-substation zones and leads to an absolute and relative increase in electrical energy losses in the traction network; the share of active energy losses increases several times; the presence of recuperation leads to a change in the direction of active energy flows at traction substations with a sharp - up to twofold - increase in reactive power consumption by trains; recuperation leads to a significant decrease in voltage on the current*

*collectors of electric locomotives; on the section under consideration, with three trains weighing 6000 tons, a decrease in voltage to 23 kV was obtained, which occurs due to the large reactive consumption; the flow of traction currents in the contact network leads to the appearance of induced voltages on the rails, the potential of which in sections with traction is 200 V or more; in this case, there is a voltage asymmetry of the rail threads, which reaches 9 V; regenerative braking leads to significantly lower rail potentials and their asymmetry; in recuperation modes, there is a noticeable decrease in the auto-lock supply voltage and the appearance of asymmetry.*

**Keywords:** 25 kV traction power supply systems; regenerative braking modes; energy efficiency; modeling.

**Введение.** Применение рекуперативного торможения поездов на железных дорогах переменного тока позволяет получить значительную экономию электроэнергии. Этот положительный фактор усиливается при использовании новых электропоездов, у которых переход в режим рекуперации происходит автоматически, с поддержанием требуемой скорости, обеспечивая безусловное выполнение графика движения с минимизацией затрат электроэнергии на ведение поезда.

Вопросам повышения эффективности рекуперативного торможения посвящено большое количество публикаций. Так, например, в статье [1] на основании статистических данных по расходу электроэнергии произведена оценка реальных и потенциальных диапазонов применения рекуперации на Дальневосточной железной дороге. В работе [2] предложен новый способ повышения коэффициента мощности электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения. Он базируется на совершенствовании алгоритма управления силовым преобразователем. В статье [3] предложен новый принцип управления рекуперативным и реостатным тормозами, согласно которому сначала включают рекуперативное торможение и увеличивают ток до предельного значения, а оставшуюся энергию гасят в тормозных реостатах; при этом обеспечивается экономия энергозатрат до 12...15 %. В работе [4] приведены результаты математического моделирования электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения при использовании штатного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) и блоков балластных резисторов. Показано, что это позволяет увеличить объемы отдаваемой в контактную сеть электроэнергии, а также расширить области тормозных характеристик. В статье [5] выполнен анализ влияния режимов работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) на величину полезного использования энергии рекуперации. Показано, что эти режимы оказывают влияние на потери в контактной сети, ВИП и трансформаторах тяговых подстанций (ТП). В работе [6] проанализированы факторы, влияющие на эффективность рекуперации и приведены примеры ее расчетов для однопутного и двухпутного участков тяговой сети (ТС). В статье [7] представлены результаты расчетов, показывающие возможность полного энергообеспечения собственных нужд электроподвижного состава путем рекуперации энергии торможения. В работе [8] введено понятие коэффициента разности потерь электроэнергии в СТЭ для случаев работы с применением рекуперативного торможения и без него. Получено уравнение для определения этого коэффициента. Проанализирован характер влияния рекуперации на величину потерь электроэнергии в СТЭ. В статье [9] рассмотрена эффективность использования энергии рекуперации и предложены способы ее определения. Представлен алгоритм оценки эффективности использования

этой энергии. В работе [10] рассмотрены вопросы повышения энергетических показателей электропоездов переменного тока в режиме рекуперативного торможения. Предложены способы увеличения коэффициента мощности. Представлены результаты математического моделирования предлагаемых способов улучшения энергетических показателей. Статья [11] посвящена решению задач эффективного использования рекуперации на железной дороге. В работе [12] показано, что использование электропоездов с асинхронным приводом и четырехквadrантными преобразователями может обеспечить повышение уровня использования рекуперативной энергии. В статье [13] описан подход к оценке эффективности использования энергии рекуперации. Приведены результаты оценки баланса этой энергии. В работе [14] проведен анализ возможности внедрения мероприятий по рекуперации электроэнергии на конкретном участке железнодорожного сообщения. В статье [15] предложено использовать новые энергетические характеристики, математическое моделирование и спектральный анализ несинусоидального напряжения и тока на выходе рекуператоров электрической энергии. Приведены примеры регулирования активной мощности рекуператора с повышением эффективного напряжения в контактной сети за счет изменения тока в обмотках возбуждения тяговых электродвигателей и переключения секций вторичных обмоток трансформатора на электроподвижном составе. В работе [16] изложен порядок составления программ энергосбережения в хозяйстве электроснабжения. Приведен перечень основных мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии в ТС и оборудовании тяговых подстанций. Представлены результаты исследований по оценке потенциала повышения энергоэффективности СТЭ. В статье [17] показано, что рекуперативное торможение является одним из эффективных способов обеспечения безопасности движения поездов и снижения удельного расхода электроэнергии на их тягу. Предложена методика оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения. В работе [18] сравниваются две технологии, предназначенные для систем рекуперации энергии: гибридная, в которой диодный выпрямитель сочетается с IGBT-инвертором, и четырехквadrантный преобразователь.

Анализ описанных публикаций позволяет сделать вывод о том, что многие аспекты проблемы повышения эффективности рекуперации рассмотрены достаточно подробно. Однако комплексная методика, позволяющая анализировать режимы рекуперативного торможения в системах электроснабжения железных дорог, в рассмотренных публикациях не представлена. Такая методика может быть реализована на основе методов моделирования СТЭ, предложенных в работах [19; 20].

**Постановка задачи.** Применение рекуперативного торможения на железных дорогах переменного тока

позволяет получить значительную экономию электроэнергии. При движении поезда под уклон освобождается потенциальная энергия, которая преобразуется в электрическую энергию рекуперации:

$$W_{\Pi} = (N + M)g\Delta h,$$

запасенная поездом массой  $N+M$ , где  $N$  — масса электровозов,  $M$  — масса состава;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\Delta h$  — перепад высот.

Эффективность рекуперации определяется долей участков с отрицательными уклонами более 5...6 тысячных. Этот показатель снижается при наличии участков с положительными уклонами или отрицательными, с уклонами менее указанных выше. Для количественной оценки эффективности рекуперации можно использовать величину энергии  $W_p$ , полученной на данном участке, и показатель ее эффективности:

$$a = \frac{gW_p}{W_{\Pi}} = \frac{W_p}{(N + M)\Delta h},$$

представляющий собой ускорение, полезно используемое в процессе рекуперации и измеряемое в кВт·ч/(т·м) или м/с<sup>2</sup>. Отношение:

$$k_p = \frac{a}{g}$$

является коэффициентом полезного действия рекуперации. Этот коэффициент зависит от уклона, массы состава и скорости его движения.

При известной зависимости  $a(i)$ , где  $i$  — уклон в тысячных, можно найти энергию рекуперации по следующей формуле:

$$W_p = (N + M) \sum_{k=1}^n a_k i_k \Delta l_k, \quad (1)$$

где  $a_k$  — показатель рекуперации, м/с<sup>2</sup>, на элементе пути с уклоном  $i_k$  в тысячных;  $\Delta l_k$  — длина элемента пути, км;  $n$  — количество элементов участка.

Для решения вопроса о необходимости использования рекуперативного торможения необходимо принять во внимание все положительные и отрицательные эффекты. К положительным относятся следующие эффекты:

- экономия электроэнергии, которая при большой интенсивности движения используется другими поездами, однако при малой интенсивности возникают сложности взаиморасчетов с энергоснабжающими организациями;

- снижение износа тормозных колодок;
- повышение безопасности движения поездов из-за появления дополнительного электрического тормоза и стабилизации скорости движения под уклон.

Рекуперативное торможение приводит к отрицательным результатам:

- увеличение износа рельсов из-за сосредоточения тормозных усилий на локомотиве;

- повышенное реактивное электропотребление, которое может потребовать прямой оплаты и приводит к дополнительным активным потерям в СТЭ;

- увеличение уровней высших гармоник и несимметрии питающего напряжения;

- дополнительные затраты на фильтрокомпенсирующие устройства;

- возможное влияние на режимы автоблокировки через питающие сети и рельсовые цепи с возможным снижением уровня безопасности движения поездов.

Большая часть указанных эффектов относится к хозяйству электроснабжения и может быть проанализирована на основе программного продукта *Fazonord* [19], основанного на методах и алгоритмах моделирования СТЭ в фазных координатах.

Комплекс *Fazonord-Качество* обеспечивает выполнение следующих задач:

- формирование моделей многопроводных систем типа линий электропередачи или тяговых сетей с помощью редактора элементов, ведение базы данных моделей;

- составление расчетной схемы моделируемой электрической системы на экране монитора в форме, приближенной к стандартному изображению электрических схем;

- учет распределенности параметров линий электропередачи и участков тяговой сети;

- составление маршрута движения поездов с привязкой к узлам контактной сети;

- подготовка решетчатых схем замещения элементов и объединение их в расчетную схему;

- формирование по графику движения поездов мгновенных схем и расчеты режимов на основной частоте и на высших гармониках;

- выборка режимных показателей мгновенных схем и формирование интегральной информации на основной частоте и высших гармониках вплоть до 41-й включительно;

- экспорт таблиц данных в пакет *Microsoft Excel*;

- ведение базы данных по расчетным схемам;

- представление напряжений и токов на векторной диаграмме;

- учет графиков стационарных нагрузок.

При анализе, результаты которого представлены ниже, предполагалось, что питание автоблокировки осуществляется на напряжении 6 кВ повышающим трансформатором от шин собственных нужд ТП. Анализ процессов проводился на двухпутном участке с расчетами потенциалов рельсов. Расчеты выполнялись для реального участка одной из железных дорог Восточной Сибири с перевальным профилем пути и протяженными уклонами 15...17 тысячных, а также для идеализированного участка длиной 50 км с постоянным уклоном. Первый из выбранных участков удобен для анализа режимов рекуперации, поскольку его профиль представляет собой классический перевал с мало изменяющимися уклонами на подъеме и спуске. Для анализа принята ситуация пропуска одного поезда и пропуска пакета из трех поездов массой 6 тыс. т с интервалом 10 мин в нечетном и четном направлениях.

**Характеристика моделируемых СТЭ.** Выбранный участок характеризуется сложным профилем, показанным на рис. 1, а. Перепад высот составляет 379 м для нечетного поезда и 428 м для четного. Такой профиль приводит к большому электропотреблению при движении на подъем и существенной рекуперации при движении под уклон. График движения приведен на рис. 1, б. Токвые профили поездов при наличии рекуперации

представлены на рис. 2, а при ее отсутствии — на рис. 3. Тяговые расчеты проведены для звеньев пути и электроваз ВЛ-80р.

Система электроснабжения участка питается от внешней сети 110 кВ со сравнительно большими тока-

ми короткого замыкания. Параллельно линии 110 кВ проходит ЛЭП 220 кВ, которая связана с сетью 110 кВ на районных подстанциях через автотрансформаторы (рис. 4 и 5). Сеть 220 кВ характеризуется близостью больших генерирующих мощностей.

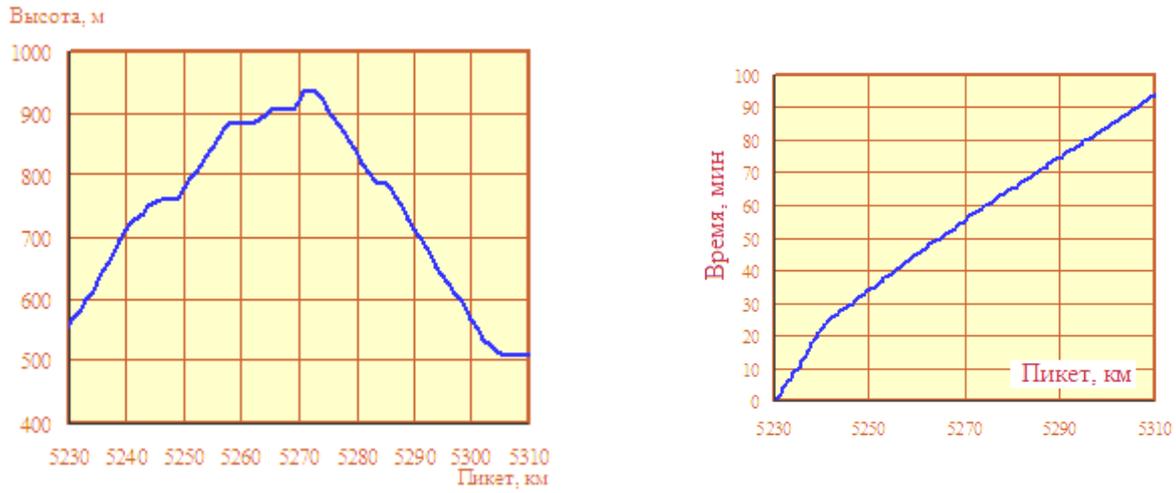


Рис. 1. Продольный профиль участка (а) и график движения (б) четного поезда массой 6 тыс. т

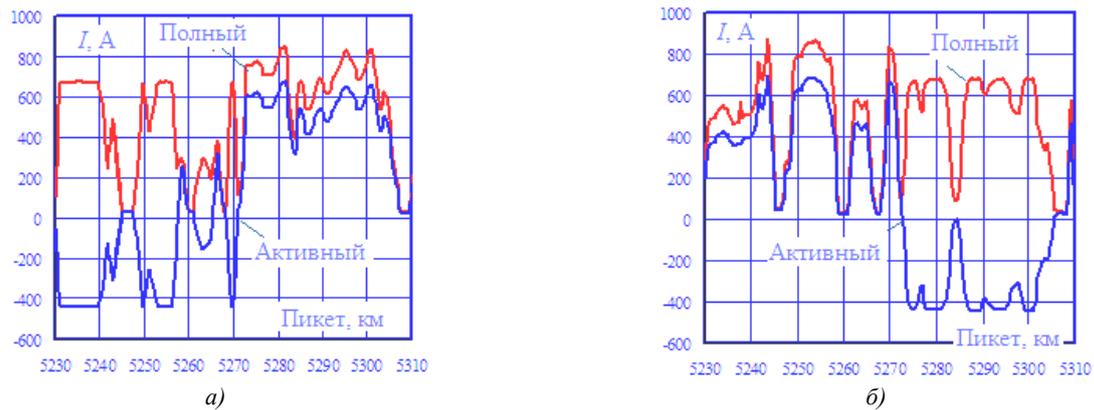


Рис. 2. Токковые профили нечетного (а) и четного (б) поездов при наличии рекуперации

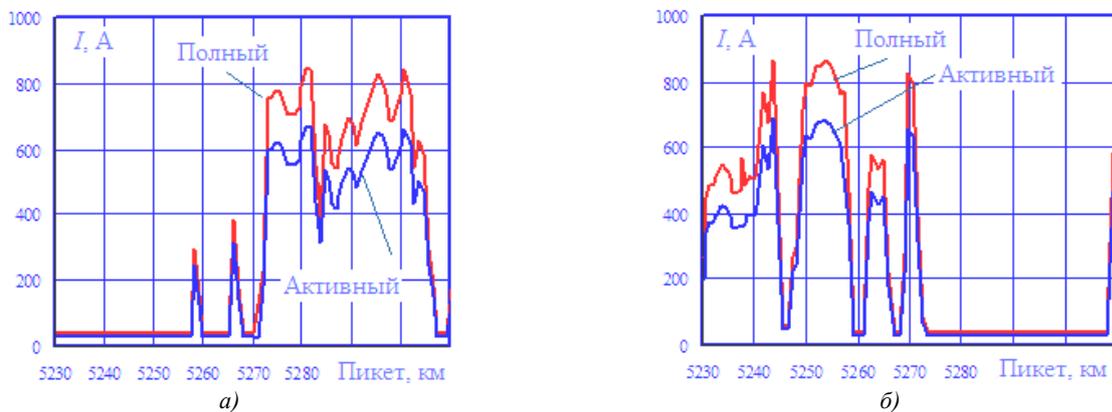


Рис. 3. Токковые профили нечетного (а) и четного (б) поездов при отсутствии рекуперации

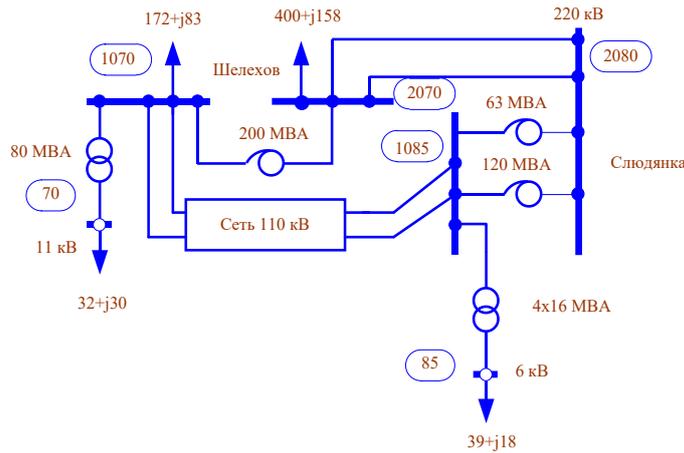


Рис. 4. Однолинейная схема сети 220-110 кВ

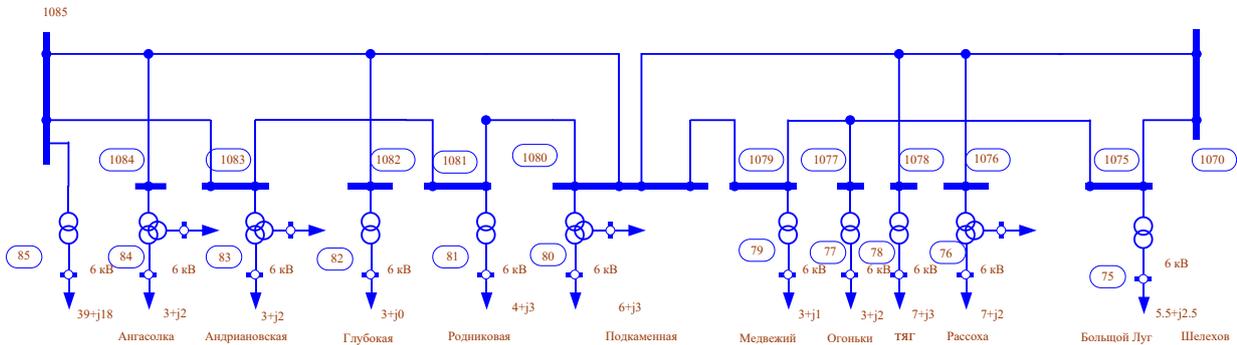


Рис. 5. Однолинейная схема сети 110 кВ

Для ЛЭП 110 кВ и 220 кВ использована модель двухцепной линии с шестью проводами и грозозащитным тросом, размещенными на одной опоре. В такой семипроводной системе учитываются все взаимные электромагнитные влияния проводов. Тяговую сеть образуют провода контактной подвески М120+2МФ100, рельсы Р65 и провода АС-35 линии 6 кВ. Каждая рельсовая нить с проводимостью на землю 0,5 См/км выделена отдельными узлами.

**Анализ эффективности рекуперации.** Для получения зависимости эффективности рекуперации от массы поезда и уклона были проведены расчеты энергии рекуперации для описанного горно-перевального участка. Результаты расчетов приведены на рис. 6. На рис. 6, а приведено поле точек зависимости показателя эффективности от массы поезда для скоростей 58 и 35 км/ч; на рис. 6, б показаны усредненные зависимости для двух технических скоростей движения.

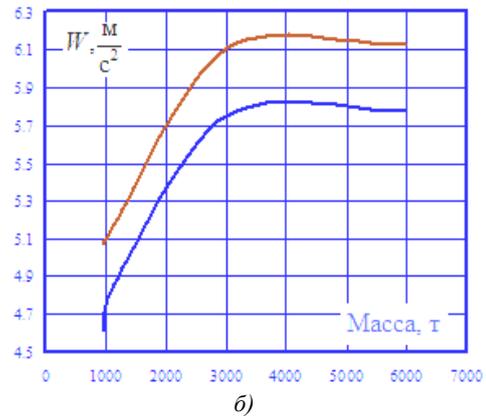
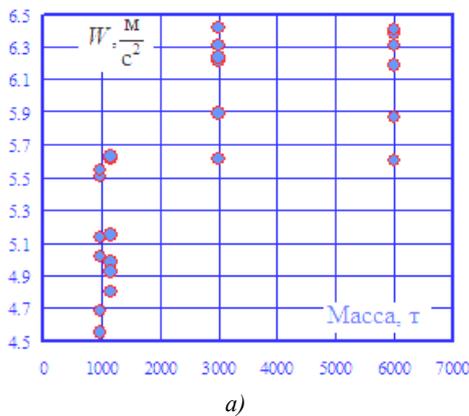


Рис. 6. Поле точек (а) зависимости показателя эффективности от массы поезда и усреднение зависимости (б) показателя эффективности от массы поезда

Эти данные показывают, что при массе поезда более 2 500 т показатель эффективности практически стабилизируется, составляя величину 6,1...6,2 м/с<sup>2</sup> для скорости порядка 60 км/ч и примерно 5,8 м/с<sup>2</sup> для скорости 35 км/ч. Можно считать, что в среднем показате

ль эффективности рекуперации равняется 6 м/с<sup>2</sup> и почти не зависит от массы поезда.

Зависимость величины *a* от уклона получена для пятидесятикилометрового идеализированного участка с постоянным уклоном; результаты расчетов показаны на рис. 7. На этом рисунке видно, что величина *a* суще-

ственно зависит от уклона пути. При его величине менее 10 тысячных эффективность рекуперации снижается. Зависимость показателя  $a$  от уклона хорошо аппроксимируется степенной зависимостью вида:

$$a(i) = \begin{cases} 0,001542 i^3 - 0,0856 i^2 + 1,61 i - 3,94, & i > 3 \\ 0, & i \leq 3 \end{cases}, \text{ м/с}^2, \quad (2)$$

где уклон  $i$  подставляется в тысячных.

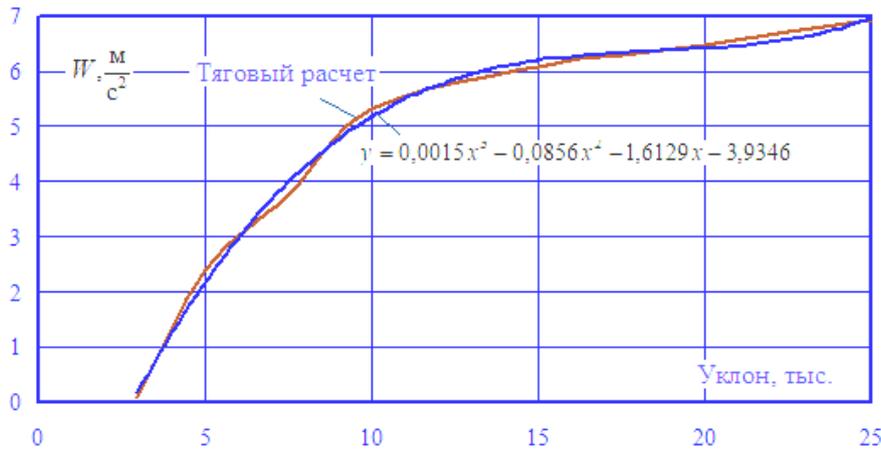


Рис. 7. Зависимость показателя эффективности от уклона

Таким образом, для оценки эффективности рекуперации можно использовать показатель, равный произведению ускорения свободного падения на долю используемой потенциальной энергии. Этот показатель мало зависит от скорости движения и массы поезда и может быть оценен по выражению (2), а энергию рекуперации можно определить по формуле (1). Приближенно энергию рекуперации при уклонах более 10 тысячных можно оценить по следующему выражению:

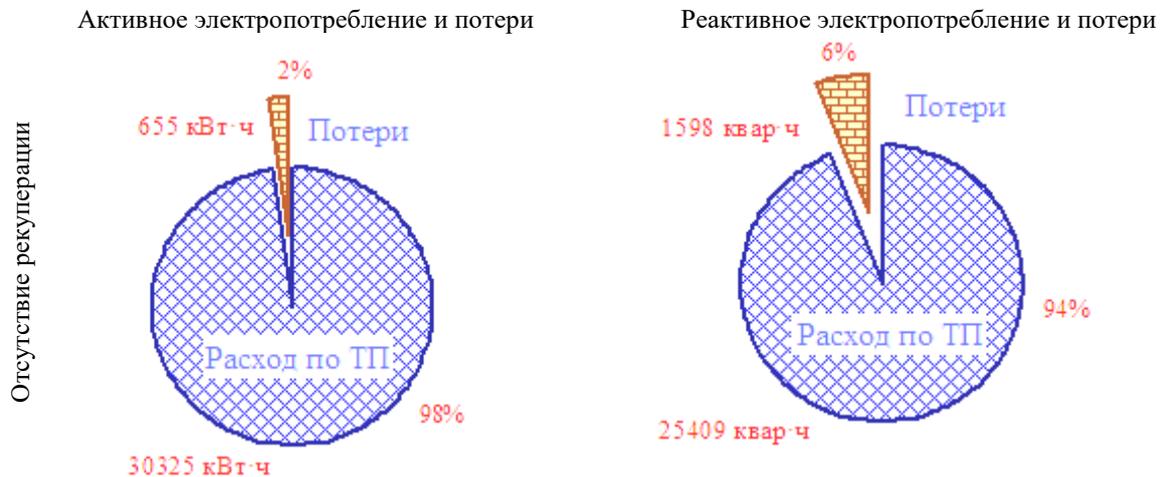
$$W_p = 0,0017(N + M)\Delta h, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3)$$

если масса поезда выражена в тоннах, а перепад высот — в метрах.

**Результаты моделирования.** Приведенные выше оценки эффективности рекуперации касаются активного энергопотребления. Потокораспределение по фидерам и подстанциям, а также реактивное энергопотребление могут быть получены только на основе моделирования режимов, выполненного по методике, изложенной в работе [19]. Основные результаты расчета электропотребления пакета из трех поездов четного направления с интервалами 10 мин при отключенных

установках параллельной компенсации представлены на рис. 8, 9. Рекуперативное торможение приводит к абсолютному и относительному росту потерь электрической энергии в тяговой сети. Низкий процент потерь (2,2 % для подвески М120+2МФ100) с малым активным сопротивлением увеличивается при рекуперации в 2,6 раза.

Наличие рекуперации приводит к изменению направления потоков активной энергии на тяговых подстанциях с резким увеличением реактивного электропотребления. Кроме того, рекуперация приводит к значительному снижению напряжения на токоприемниках электропоездов. На рис. 10 показана зависимость напряжения на токоприемнике среднего поезда от пикета его расположения, где видно снижение напряжения почти до 23 кВ, происходящее из-за большого реактивного потребления. Это снижение напряжения сопоставимо со снижением на участке с тягой. На рис. 11 показаны временные зависимости токов фидеров левого плеча подстанции ТП 4. Отсчет времени идет с момента въезда на участок первого поезда пакета.



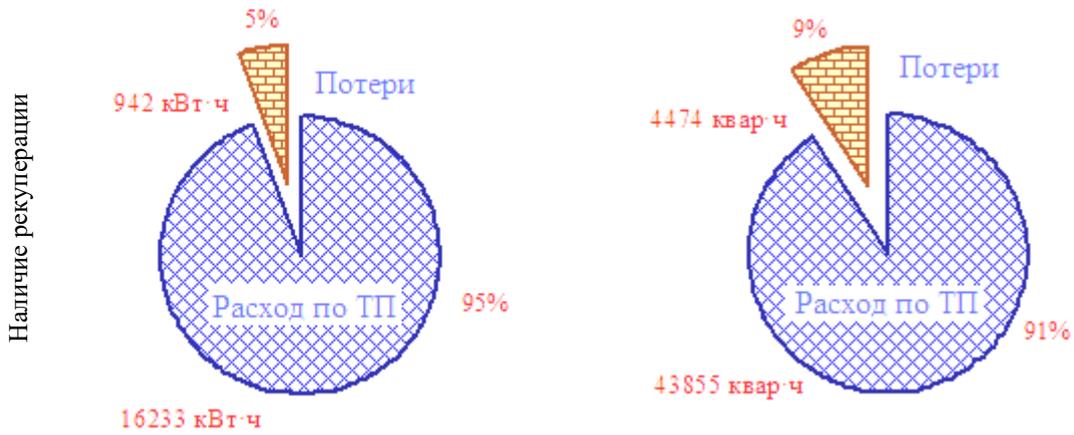


Рис. 8. Электропотребление и потери при движении четного пакета поездов 3х6000 т

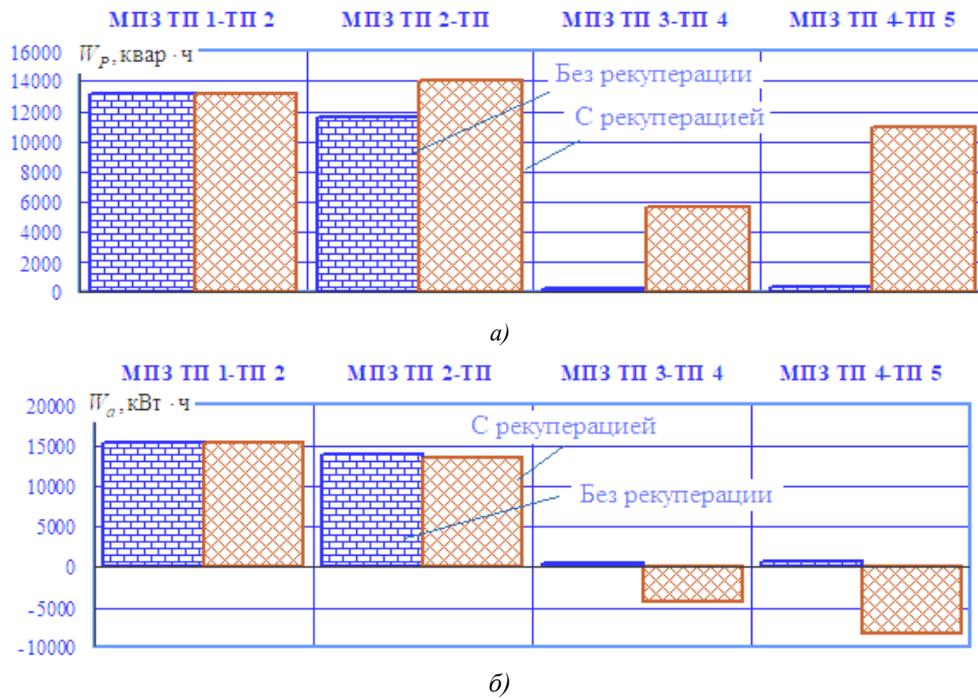


Рис. 9. Диаграммы реактивного (а) и активного (б) электропотребления в межподстанционных зонах (МПЗ)

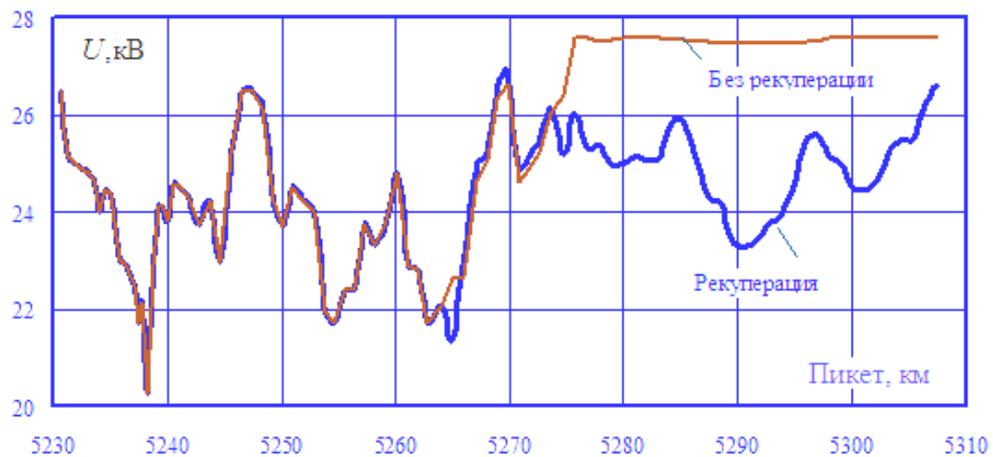


Рис. 10. Напряжение на токоприемнике среднего поезда

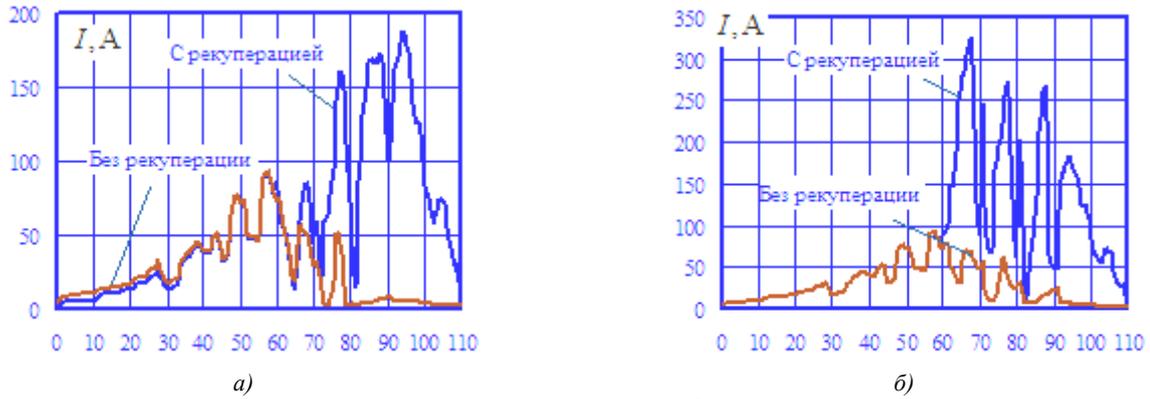


Рис. 11. Токи фидеров 1 (а) и 2 (б) ТП 4

Повышенное реактивное потребление при рекуперации требует применения устройств компенсации реактивной мощности, что позволяет выровнять электропотребление по плечам питания.

**Вторичные эффекты рекуперации.** Протекание тока в контактной сети приводит к появлению наведенных напряжений и токов в рельсах. На рис. 12 показаны потенциалы рельсов на участке с тягой, а на рис. 13 — аналогичные параметры на участке с рекуперацией при проводимости рельсы — земля 0,5 См/км. Номера 1 и 2 соответствуют рельсам нечетного пути, 3 и 4 — рельсам четного, рельсы 2 и 3 располагаются с внутренних сторон путей. Параметры всех рельсов приняты одинаковыми.

Потенциалы рельсов на частоте 50 Гц на участке с тягой достигают 230 В (рис. 12), на участке с рекуперацией — 85 В (рис. 13). На рис. 14 показаны временные зависимости напряжения между рельсами нечетного пути, из которых видно, что на участке с рекуперацией эффект несимметрии напряжения рельсов существенно меньше, чем на участке с тягой, где напряжение между рельсами смежного пути достигает 9 В.

Линии электроснабжения автоблокировки (ЛЭП АБ) на рассматриваемом участке получают питание от повышающих трансформаторов, подключенных к шинам собственных нужд ТП. Вследствие наличия связи тяговой сети с системой питания автоблокировки через тяговые трансформаторы режим ЛЭП АБ зависит от ситуации в тяговой сети, в том числе и на участке с рекуперацией. Расчетная схема содержит в своем составе модели питания автоблокировки с подстанций ТП 1 и ТП 5, что позволяет получить динамику изменения напряжения при движении пакета поездов. На рис. 15, а показана зависимость от времени линейного напряжения прямой последовательности на шинах питания автоблокировки подстанции ТП 5, а на рис. 15, б — такая же зависимость для напряжения обратной последовательности. Эффекты несимметрии напряжения питания автоблокировки возникают в основном из-за падения напряжения на тяговом трансформаторе, поскольку внешняя сеть на ТП 5 характеризуется большим значением мощности короткого замыкания.

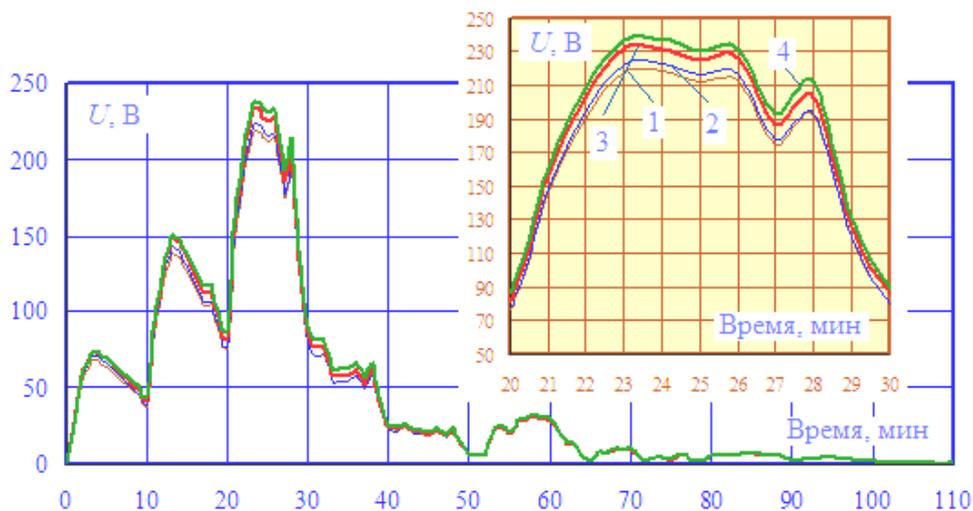


Рис. 12. Потенциалы рельсов на участке с тягой (цифрами обозначены номера рельсов)

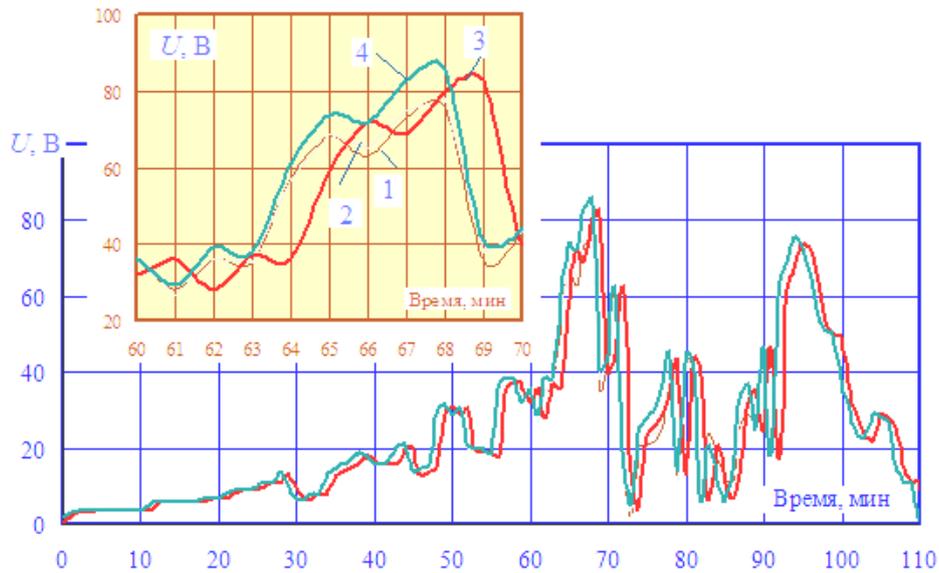


Рис. 13. Потенциалы рельсов на участке с рекуперацией, нечетное направление (цифрами обозначены номера рельсов)

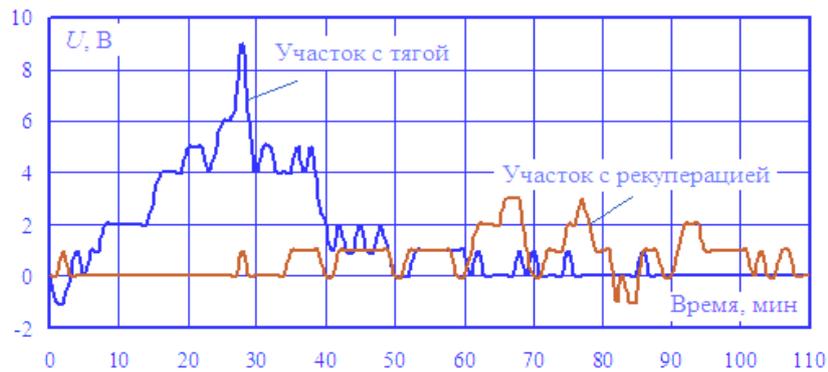


Рис. 14. Напряжение между рельсами смежного пути

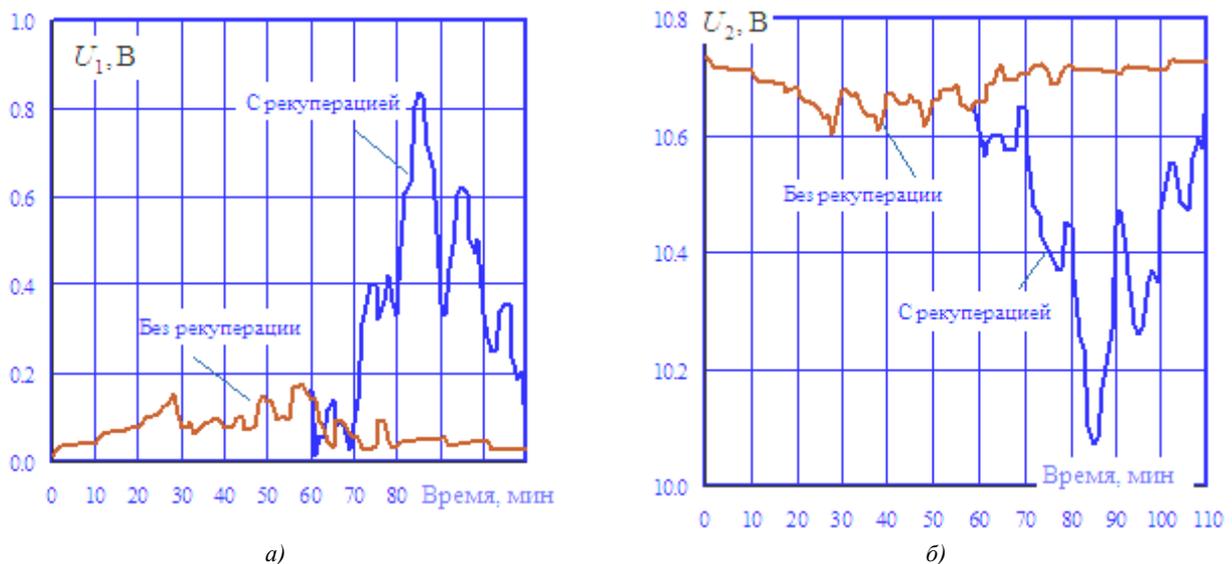


Рис. 15. Напряжение прямой (а) и обратной (б) последовательности на шинах СЦБ ТП 5

**Заключение.** Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Для характеристики эффективности рекуперации можно использовать показатель эффективности рекуперации, равный произведению ускорения свободного падения на долю запасенной поездом потенциальной

энергии. Этот показатель мало зависит от скорости движения и массы поезда; для средних и тяжелых поездов он равен в среднем 0,0017 кВт·ч/(т·м) с разбросом  $-7...+7\%$ . При уклонах менее 10 тысячных значение показателя уменьшается, а при уклоне менее 3 тысячных он близок к нулю. Зависимость показателя эф-

фективности от уклона хорошо аппроксимируется многочленом 3-й степени.

2. Рекуперативное торможение сопровождается возникновением уравнивающих токов в смежных межподстанционных зонах и приводит к росту абсолютных и относительных значений потерь электрической энергии в тяговой сети. Доля потерь активной энергии в тяговой сети возрастает в несколько раз.

3. Наличие рекуперации приводит к изменению направления потоков активной энергии на тяговых подстанциях с резким (до двукратного) увеличением реактивного электропотребления.

4. Рекуперация приводит к значительному снижению напряжения на токоприемниках электропоездов. На рассматриваемом участке при трех поездах массой 6 тыс. т получено снижение напряжения до 23 кВ, происходящее из-за большого реактивного потребления.

5. Протекание тягового тока в контактной сети приводит к появлению наведенных напряжений на рель-

сах, потенциал которых может составить в режиме тяги 200 В и более. При этом возникает несимметрия напряжений рельсовых нитей, которая достигает 9 В. Рекуперативное торможение характеризуется существенно меньшими величинами потенциалов рельсов и их несимметрии.

6. Рекуперативное торможение способно приводить к заметному снижению напряжения питания автоблокировки и возникновению несимметрии. Для одной из подстанций рассмотренного участка рекуперация приводит к снижению линейного напряжения автоблокировки на 5 % и к повышению коэффициента несимметрии до 8 %.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока»*

#### Литература

1. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 411 с.
2. Лыков А.В. Теплообмен: справ. М.: Энергия, 1978. 479 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
4. Карташов Э.М., Кудинов В.А., Калашников В.В. Теория теплообмена: решение задач для многослойных конструкций. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Юрайт», 2018. 435 с.
5. Садиков И.Н. Ламинарный теплообмен в плоском канале при неравномерном поле температуры на входе // Инженерно - физический журнал. 1965. Т. 8. № 3. С. 283-289.
6. Карташов Э.М. Теплопроводность при переменном коэффициенте теплообмена // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. Вып. 5. С. 694-701.
7. Цой П.В. Методы расчета задач тепло- массопереноса. М.: Энергоатомиздат, 1984. 414 с.
8. Видин Ю.В., Федяев А.А., Казаков Р.В. Инженерные методы расчета задач теплообмена при ламинарном течении жидкости в каналах: моногр. Братск: Изд-во БрГУ, 2020. 307 с.
9. Видин Ю.В., Злобин В.С., Иванов В.В., Медведев Г.Г. Инженерные методы расчета задач нелинейного теплообмена при ламинарном течении жидкости в каналах. Красноярск: СФУ, 2015. 155 с.
10. Видин Ю.В., Иванов В.В., Казаков Р.В. Инженерные методы расчета задач теплообмена. Красноярск: СФУ, 2014. 167 с.
11. Федяев А.А. Особенности структуры пограничных слоев канальных течений // Тр. Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки: в 2 т. Братск, 2013. Т. 2. С. 166-170.
12. Федяев А.А. Математическая модель для оценки потенциала энергосбережения в низкотемпературных процессах тепло- и массопереноса // Тр. Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки: в 2 т. Братск, 2013. Т. 1. С. 72-78.
13. Видин Ю.В., Казаков Р.В. Расчет теплообмена при ламинарном течении жидкости в цилиндрическом канале при наличии аксиальной теплопроводности // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 2. С. 308-311.
14. Маделунг Э. Математический аппарат физики. М.: Наука, 1968. 618 с.
15. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М.:

Наука, 1977. 342 с.

16. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 833 с.
17. Polyanin A.D., Manzhirov A.V. Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists. 2007 by Taylor & Francis Group, LLC.
18. Baehr H.D., Stephan K. Heat and Mass Transfer. Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.
19. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976. 576 с.

#### References

1. Petuhov B.S. Heat transfer and resistance in laminar fluid flow in pipes. M.: Energiya, 1967. 411 p.
2. Lykov A.V. Heat and mass transfer: sprav. M.: Energiya, 1978. 479 p.
3. Lojcyanskij L.G. Mechanics of liquid and gas. M.: Nauka, 1978. 736 p.
4. Kartashov E.M., Kudinov V.A., Kalashnikov V.V. Theory of heat and mass transfer: problem solving for multilayer structures. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izd-vo «YUrajt», 2018. 435 p.
5. Sadikov I.N. Laminar heat transfer in a flat channel with an uneven temperature field at the inlet // Journal of Engineering Physics. 1965. V. 8. № 3. P. 283-289.
6. Kartashov E.M. Thermal conductivity with a variable heat transfer coefficient // High Temperature. 2019. V. 57. Vyp. 5. P. 694-701.
7. Coj P.V. Methods for calculating problems of heat and mass transfer. M.: Energoatomizdat, 1984. 414 p.
8. Vidin YU.V., Fedyayev A.A., Kazakov R.V. Engineering methods for calculating heat transfer problems in laminar fluid flow in channels: monogr. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2020. 307 p.
9. Vidin YU.V., Zlobin V.S., Ivanov V.V., Medvedev G.G. Engineering methods for calculating problems of nonlinear heat transfer in laminar fluid flow in channels. Krasnoyarsk: SFU, 2015. 155 p.
10. Vidin YU.V., Ivanov V.V., Kazakov R.V. Engineering methods for calculating heat transfer problems. Krasnoyarsk: SFU, 2014. 167 p.
11. Fedyayev A.A. Features of the structure of the boundary layers of channel flows // Tr. Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki: v 2 t. Bratsk, 2013. V. 2. P. 166-170.
12. Fedyayev A.A. Mathematical model for assessing the potential for energy saving in low-temperature processes of heat and

- mass transfer // Tr. Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki: v 2 t. Bratsk, 2013. V. 1. P. 72-78.
13. Vidin YU.V., Kazakov R.V. Calculation of heat transfer in a laminar fluid flow in a cylindrical channel in the presence of axial heat conduction // High Temperature. 2019. V. 57. № 2. P. 308-311.
  14. Madelung E. Mathematical apparatus of physics. M.: Nauka, 1968. 618 p.
  15. Yanke E., Emde F., Lyosh F. Special functions. M.: Nauka, 1977. 342 p.
  16. Abramovic M., Stigan I. Handbook of special functions. M.: Nauka, 1979. 833 p.
  17. Polyanin A.D., Manzhirov A.V. Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists. 2007 by Taylor & Francis Group, LLC.
  18. Baehr H.D., Stephan K. Heat and Mass Transfer. Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.
  19. Kamke E. Handbook of Ordinary Differential Equations. M.: Nauka, 1976. 576 p.