



Методика оценки использования энергии рекуперации



Василий ЧЕРЕМИСИН
Vasily T. CHEREMISIN

Михаил НИКИФОРОВ
Mikhail M. NIKIFOROV



Александр ВИЛЬГЕЛЬМ
Alexander S. WILHELM

Черемисин Василий Титович — доктор технических наук, профессор, директор НИИ энергосбережения Омского государственного университета путей сообщения (НИИЭ ОмГУПС), Омск, Россия.

Никифоров Михаил Михайлович — кандидат технических наук, заместитель директора НИИЭ ОмГУПС, Омск, Россия.

Вильгельм Александр Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент ОмГУПС, Омск, Россия.

Method for Estimating the Use of Regenerative Energy

(текст статьи на англ. яз. —
English text of the article — p. 41)

При ежегодном росте объёмов энергии, рекуперированной подвижным составом, особую актуальность приобретает оценка использования такой энергии. В статье определены показатели эффективности энергии рекуперации при торможении и её составляющие. Выявлены влияющие на это факторы и эмпирические коэффициенты, корректирующие оценку распределения энергии рекуперации на участке. Перечислены исходные данные, представлены подготовительные расчёты и сам алгоритм методики оценки эффективности рекуперации. Предложен способ распределения возвращённой на тяговые подстанции энергии по составным её полезного использования.

Ключевые слова: железная дорога, рекуперация, энергетическая эффективность, система тягового электроснабжения, тяговые подстанции.

Опыт применения рекуперативного торможения на электрифицированных участках железных дорог мира показывает высокую степень энергетической эффективности использования энергии рекуперации [1–3]. К примеру, в Великобритании доля возврата энергии рекуперации в контактную сеть составляет 7,2 % от расхода энергии по тяговым подстанциям. Процент возврата в систему внешнего электроснабжения при этом 1,7 %. Сопоставимые результаты имеют Испания, Швеция.

Исследование потокораспределения энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения (СТЭ) позволяет принимать технические решения по оснащению электрифицированных участков дополнительными приёмниками избыточной энергии (накопителями энергии или инверторами), определять их характеристики, разрабатывать подходы к созданию энергооптимальных графиков движения поездов.

Для определения меры эффективности и направлений использования энергии

рекуперации специалистами ОмГУПС предлагается оценивать:

- абсолютное значение полезного использования энергии рекуперации, выработанной ЭПС;

- относительную величину полезного использования энергии рекуперации (в процентах) от абсолютного её значения по показаниям счётчиков рекуперации ЭПС.

Эффективное использование энергии рекуперации начинается с её потребления на собственные нужды рекуперирующего ЭПС. Эта энергия не учитывается счётчиками, однако предлагаемая авторами статьи методика [6] даёт возможность расчётным путём оценить её величину в зависимости от эксплуатационных и технических условий на участке.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОДГОТОВКА К РАСЧЁТУ

Пользователь методики осуществляет сбор исходной информации из имеющихся в ОАО «РЖД» отчётно-аналитических форм за расчётный период отдельно для каждого участка постоянного и переменного тока. Так, отчётная форма ТХО-125 служит источником информации об объёме энергии рекуперации, линейном пробеге, средней технической и участковой скорости ЭПС. Автоматизированная система управления путевым хозяйством АСУ-П выступает источником информации о количестве главных путей и характеристиках путевого профиля, а автоматизированная система ведения и анализа графика исполненного движения ГИД «Урал-ВНИИЖТ» — источником данных о средних массах и размерах движения поездов.

Автоматизированная система управления хозяйством электрификации и электроснабжения АСУ-Э выдаёт:

- количество тяговых подстанций и ВИП (для участков постоянного тока);

- типы контактной подвески и степень её износа;

- длины и схемы питания межподстанционных зон участка;

- мощности потерь холостого хода и короткого замыкания трансформаторов тяговых подстанций.

Исходные показатели для определения величины энергии рекуперации, возвра-

щённой на тяговые подстанции расчётного участка, с разбивкой по составляющим систематизируются на основе статистических данных «Трансэнерго», получаемых из АСКУЭ. Для участка постоянного тока анализируются и заносятся в специальную таблицу по каждой подстанции:

- величина возврата энергии по счётчикам вводов ВИП на стороне переменного тока;

- величина возврата энергии по счётчикам вводов понизительных трансформаторов 6 (10) кВ;

- величина возврата энергии по счётчикам вводов высшего напряжения понизительных трансформаторов;

- величина расхода энергии по счётчикам вводов высшего напряжения понизительных трансформаторов.

Для расчётных участков переменного тока анализируются и заносятся в специальную таблицу по каждой тяговой подстанции следующие данные:

- возврат энергии по счётчикам присоединений фидеров контактной сети (ФКС);

- возврат энергии по счётчикам, установленным на вводах 27,5 кВ понизительных трансформаторов;

- расход энергии на тягу поездов по счётчикам вводов 27,5 кВ;

- возврат энергии по счётчикам, установленным на вводах на стороне высшего напряжения понизительных трансформаторов;

- расход электроэнергии по счётчикам, установленным на вводах на стороне высшего напряжения понизительных трансформаторов;

- расход электроэнергии по счётчикам, установленным на вводах 6/10/35 кВ понизительных трансформаторов.

Затем выполняется анализ характеристик профиля пути для определения более энергозатратного для движения поездов направления расчётного участка (чётного или нечётного), которое в методике принято называть «сложным направлением». Это делается расчётом величины эквивалентного уклона участка в чётном и нечётном направлениях по формуле:

$$i_{\text{экр}} = \frac{\sum_{j=1}^J i_j \cdot S_j}{\sum_{j=1}^J S_j}, \quad (1)$$



где i_j — уклон j -го элемента профиля пути расчётного участка, ‰; S_j — длина j -го элемента профиля пути расчётного участка в нечётном направлении, м; J — количество элементов профиля расчётного участка.

Сложным направлением принимается направление с большим значением величины эквивалентного уклона.

В дальнейшем расчёте средние массы грузовых поездов как факторы, влияющие на эффективность использования энергии рекуперации, учитываются отдельно для сложного и лёгкого направлений движения поездов.

Влияние типов контактной подвески, степени её износа, а также длин и схем питания межподстанционных зон (МПЗ) участка в методике учитывается через значение относительного сопротивления тяговой сети. После этого определяются средние для участка значения относительных сопротивлений тяговой сети в зависимости от протяжённости контактной подвески определённого типа и длин МПЗ с различными схемами питания, которые используются в дальнейшем расчёте в качестве исходных данных. Кроме того, предварительно рассчитываются средние мощности потерь холостого хода и короткого замыкания понижающих трансформаторов тяговых подстанций участков переменного тока и преобразовательных трансформаторов участков постоянного тока, которые также являются исходными данными.

АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ

Методология оценки эффективности использования энергии рекуперации, общий алгоритм и основные расчётные формулы представлены в [6].

1. На первом этапе расчётов из объёма выработанной ЭПС и переданной в контактную сеть энергии рекуперации на участке за расчётный период выделяется доля энергии рекуперации за вычетом потерь энергии в контактной сети. Осуществляется это посредством расчёта коэффициента эффективности использования энергии рекуперации $k_{рек.эфф.}^{KC}$. При этом в расчёт берутся такие данные, как средние массы грузовых составов — отдельно в сложном и лёгком направлениях, средняя техническая скорость в грузовом движе-

нии, среднесуточные размеры движения поездов (и отдельно грузовых поездов), тип контактной подвески, средний износ контактного провода, схема питания участка и т.д. Рассчитанный для участка коэффициент $k_{рек.эфф.}^{KC}$ умножением на отчётное значение выработанной ЭПС энергии рекуперации $W_{рек}^{KC}$ даёт величину, которая уже не содержит в себе потери энергии в контактной сети $W_{рек.эфф.}^{KC}$.

2. На основе тех же исходных данных по эмпирическим формулам [5] определяются коэффициенты возврата энергии рекуперации для каждой тяговой подстанции участка $k_{рек}^{ЭЧЭ}$, а для участков постоянного

тока также и коэффициенты потерь энергии рекуперации в преобразовательных агрегатах подстанций $k_{пот}^{ЭЧЭ}$. С помощью этих коэффициентов выделяется объём энергии рекуперации, возвращённый на тяговые подстанции участка $W_{рек}^{ЭЧЭ}$, а также объём потерь энергии в трансформаторах при такой передаче энергии $\Delta W_{рек}^{ВИП}$ для участков постоянного тока.

3. Определяется энергия рекуперации, выработанная ЭПС и переданная в контактную сеть, за вычетом потерь энергии в контактной сети и возврата энергии на тяговые подстанции. Она образует долю энергии рекуперации, потреблённую на тягу поездов на расчётном участке $W_{рек}^{ЭПСор.}$.

4. Рассчитываются две составляющие, определение которых позволяет более полно и объективно оценить эффективность использования энергии рекуперации на расчётном участке, а именно:

1) разность потерь энергии в СТЭ для случаев с применением и без применения рекуперативного торможения — алгоритм расчёта подробно представлен в [9];

2) объём энергии рекуперации, потреблённой на собственные нужды рекуперирующего ЭПС.

Вторая составляющая находится с помощью коэффициента использования машин собственных нужд ЭПС и коэффициента времени в режиме рекуперации, который определяется по формуле:

$$k_{t,рек} = t + \sum_i (s_i \cdot X_i^{t,рек}), \quad (2)$$

где t, s_i — эмпирические коэффициенты для соответствующего количества главных путей и влияющего фактора $X_i^{рек}$; $X_i^{рек}$ — значения факторов, влияющих на коэффициент времени в режиме рекуперации.

Значения факторов в данном случае — это численное отражение таких исходных данных, как массы поездов, технические и участковые скорости, размеры движения поездов.

5. Определение величины энергии рекуперации, возвращённой на каждую тяговую подстанцию расчётного участка с разбивкой по составляющим её использования, выполняется отдельно для участков постоянного и переменного тока.

5.1. На участках постоянного тока расчёт делается только для случаев с ВИП на тяговых подстанциях и наличием возврата энергии по счётчикам вводов ВИП за расчётный период в следующем порядке.

Исходя из общей величины возврата энергии рекуперации по счётчикам вводов ВИП каждой тяговой подстанции расчётного участка $W_{возв(сч.)}^{ЭЧЭн}$ и суммарного значения возврата энергии по счётчикам вводов ВИП всех тяговых подстанций участка $\sum_{n=1}^N W_{возв(сч.)}^{ЭЧЭн}$, определяется доля возврата энергии рекуперации по вводам ВИП каждой подстанции:

$$\gamma_{рек}^{ЭЧЭн} = \frac{W_{возв(сч.)}^{ЭЧЭн}}{\sum_{n=1}^N W_{возв(сч.)}^{ЭЧЭн}}, \quad (3)$$

где n — номер тяговой подстанции расчётного участка; N — количество тяговых подстанций расчётного участка.

Далее выделяется доля рекуперированной энергии, возвращённой из тяговой сети на каждую тяговую подстанцию по вводам ВИП расчётного участка, которая находится по формуле:

$$W_{рек}^{ЭЧЭ} = W_{рек}^{ЭЧЭ} \cdot \gamma_{рек}^{ЭЧЭн}, \quad (4)$$

где $W_{рек}^{ЭЧЭ}$ — объём энергии рекуперации, возвращённый на тяговые подстанции участка согласно п. 2 алгоритма.

Определяется доля возврата энергии рекуперации по вводам низшего напряжения понижающих трансформаторов каждой тяговой подстанции расчётного участка:

$$\gamma_{рек}^{HHn} = \frac{W_{возв(сч.)}^{HHn}}{W_{возв(сч.)}^{ЭЧЭн}}, \quad (5)$$

где $W_{возв(сч.)}^{HHn}$ — возврат энергии по счётчикам вводов низшего напряжения понижающего трансформатора каждой тяговой подстанции участка.

Величина возврата энергии рекуперации по вводам низшего напряжения понижающего трансформатора каждой тяговой подстанции расчётного участка вычисляется по формуле, кВт • ч:

$$W_{рек}^{HHn} = W_{рек}^{ЭЧЭн} \cdot \gamma_{рек}^{HHn}. \quad (6)$$

Рассчитывается объём возврата энергии рекуперации по присоединениям шин 6/10 кВ (ЛПЭ, ТСН и др.) i -й тяговой подстанции расчётного участка, кВт • ч:

$$W_{рек}^{(6/10)n} = W_{рек}^{ЭЧЭн} - W_{рек}^{HHn}. \quad (7)$$

Доля возврата энергии рекуперации по вводам высшего напряжения понижающего трансформатора в систему внешнего электроснабжения каждой тяговой подстанции расчётного участка определяется по формуле:

$$\gamma_{рек}^{BHHn} = \frac{W_{возв(сч.)}^{BHHn}}{W_{возв(сч.)}^{HHn}}, \quad (8)$$

где $W_{возв(сч.)}^{BHHn}$ — возврат энергии по счётчикам вводов высшего напряжения каждой тяговой подстанции расчётного участка.

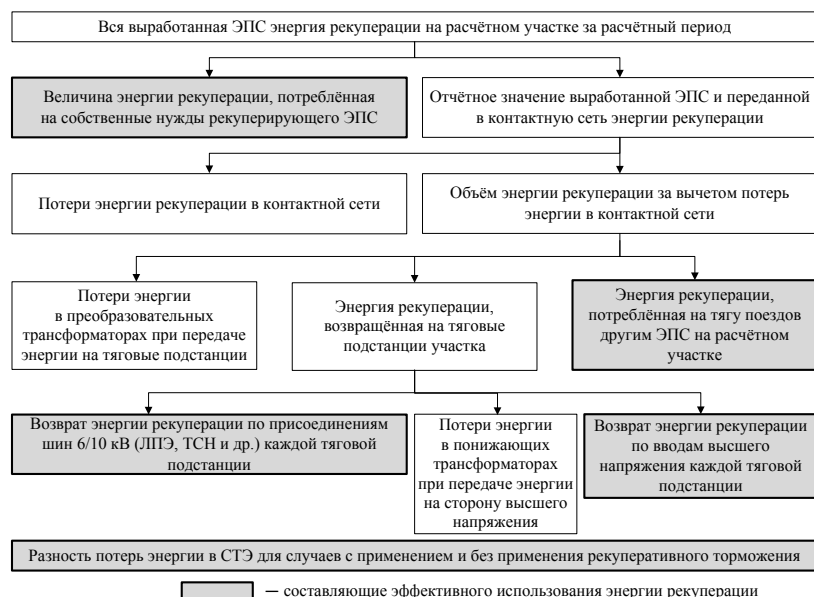
Величина возврата энергии рекуперации по вводам высшего напряжения понижающего трансформатора каждой тяговой подстанции расчётного участка, кВт • ч:

$$W_{рек}^{BHHn} = W_{рек}^{HHn} \cdot \gamma_{рек}^{BHHn}. \quad (9)$$

В случае отсутствия отчётной информации о возврате энергии по вводам и присоединениям какой-либо из тяговых подстанций участка (например, при отсутствии учёта энергии на присоединениях или вводах) расчёт по формулам, в которых фигурируют неизвестные величины, для такой тяговой подстанции не выполняется. Это вносит некоторую погрешность в распределение энергии рекуперации внутри тяговых подстанций участка, но является неизбежным допущением и упрощением. Следует отметить, что в расчёте суммарного объёма полезного использования энергии рекуперации по участкам и полигону в целом ошибки не будет. В соответствии



Рис. 1. Схема составляющих использования энергии рекуперации на участках постоянного тока.



с представленной методологией суммарный объём возврата по всем присоединениям 6/10 кВ и по вводам высшего напряжения всех тяговых подстанций будет определён корректно, а погрешность проявится только в распределении объёмов возврата между присоединениями конкретных тяговых подстанций.

Таким образом, составляющие использования энергии рекуперации на участках постоянного тока, определяемые по методике, можно проиллюстрировать в виде блок-схемы (рис. 1).

5.2. На участках переменного тока расчёт величины энергии рекуперации, возвращённой на каждую тяговую подстанцию расчётного участка с разбивкой по составляющим, выполняется для случаев наличия возврата энергии по счётчикам присоединений ФКС в следующем порядке.

Сразу оговорка: как и в случае с участками постоянного тока, при отсутствии отчётной информации о возврате энергии по каким-либо вводам и присоединениям одной или нескольких тяговых подстанций участка расчёт по формулам, в которых фигурируют неизвестные величины, для данных подстанций выполнять не следует.

Кроме того, очевидно, что в объёме возврата энергии по ФКС может содержаться энергия уравнильных токов, протекающих в СТЭ переменного тока. Установить эту величину можно расчётным путём, но для этого потребуются выполнить

ряд дополнительных операций, в том числе с применением имитационного моделирования работы участка за расчётный период. Подобный вопрос для любого участка переменного тока может быть решён и с применением синхронных измерений на ФКС тяговых подстанций и ЭПС. В предлагаемой методике величина перетока энергии не определяется, а лишь отмечается, что данное обстоятельство вносит погрешность в расчёт и является неизбежным допущением. При этом нужно понимать, что, как и в случае с отсутствующей информацией по присоединениям и вводам тяговых подстанций о расходе и возврате энергии, данная погрешность распространяется только на распределение объёмов возврата энергии рекуперации между присоединениями конкретных тяговых подстанций, не нанося вреда оценке эффективности использования энергии рекуперации на участке и полигоне в целом.

Исходя из доли возврата энергии рекуперации по присоединениям ФКС каждой тяговой подстанции расчётного участка $\gamma_{рек}^{ФКС-ЭЧЭн}$, определяемой как отношение возврата энергии по всем счётчикам ФКС тяговой подстанции $n \sum_j W_{возв(сч.)}^{ФКС-ЭЧЭн}$ к суммарному значению возврата энергии по всем ФКС, питающим расчётный участок, всех тяговых подстанций $\sum_{n=1}^N W_{возв(сч.)}^{ФКС-ЭЧЭн}$, расчи-



Рис. 2. Схема составляющих использования энергии рекуперации на участках переменного тока.

тывается величина энергии, возвращённой на каждую тяговую подстанцию участка:

$$W_{рек}^{ЭЧЭп} = W_{рек}^{ЭЧЭ} \cdot \gamma_{рек}^{ФКС-ЭЧЭп}. \quad (10)$$

Доля возврата энергии рекуперации по вводам 27,5 кВ каждой тяговой подстанции расчётного участка определяется по формуле:

$$\gamma_{рек}^{ввод27,5н} = \frac{W_{возв(сч.)}^{ввод27,5н}}{\sum_j W_{возв(сч.)}^{ФКС-ЭЧЭп}}, \quad (11)$$

где $W_{возв(сч.)}^{ввод27,5н}$ — возврат энергии по счётчикам вводов 27,5 кВ каждой подстанции участка.

Величина возврата энергии рекуперации по вводам 27,5 кВ каждой тяговой подстанции участка находится по формуле, кВт·ч:

$$W_{рек}^{ввод27,5н} = W_{рек}^{ЭЧЭп} \cdot \gamma_{рек}^{ввод27,5н}. \quad (12)$$

Далее определяется величина возврата энергии рекуперации по присоединениям шин 27,5 кВ (ДПР, ТСН, ГРШ и др.) каждой тяговой подстанции расчётного участка, кВт·ч:

$$W_{рек}^{27,5н} = W_{рек}^{ЭЧЭп} - W_{рек}^{ввод27,5н}. \quad (13)$$

Относительная величина потерь энергии в понижающих силовых трансформаторах тяговых подстанций составляет:

$$\delta_{ПТ} = \frac{\left(\frac{(W_{расх(сч.)}^{ВНп} - W_{возв(сч.)}^{ВНп}) - (W_{расх(сч.)}^{ввод27,5н} - W_{возв(сч.)}^{ввод27,5н}) - W_{расх(сч.)}^{6/10/35н}}{W_{расх(сч.)}^{ВНп} - W_{возв(сч.)}^{ВНп}} \right)}{1}, \quad (14)$$

где $W_{расх(сч.)}^{ВНп}$ — расход энергии по счётчикам вводов высшего напряжения каждой тяговой подстанции участка; $W_{возв(сч.)}^{ВНп}$ — возврат энергии по счётчикам вводов высшего напряжения каждой тяговой подстанции участка; $W_{расх(сч.)}^{ввод27,5н}$ — расход энергии по счётчикам вводов 27,5 кВ каждой тяговой подстанции участка; $W_{расх(сч.)}^{6/10/35н}$ — расход энергии по счётчикам вводов 6/10/35 кВ (вводов обмотки районной нагрузки) понижающих силовых трансформаторов каждой тяговой подстанции участка.

Доля возврата энергии рекуперации по вводам 6/10/35 кВ каждой тяговой подстанции расчётного участка:

$$\gamma_{рек}^{6/10/35н} = \frac{W_{возв(сч.)}^{ввод27,5н} (1 - \delta_{ПТ}) - W_{возв(сч.)}^{ВНп}}{W_{возв(сч.)}^{ввод27,5н}}. \quad (15)$$

Величина возврата энергии рекуперации по вводам 6/10/35 кВ каждой тяговой подстанции участка, кВт·ч:

$$W_{рек}^{6/10/35н} = W_{рек}^{ввод27,5н} \cdot \gamma_{рек}^{6/10/35н}. \quad (16)$$

Величина возврата энергии рекуперации по вводам высшего напряжения каждой тяговой подстанции участка, кВт·ч:

$$W_{рек}^{ВНп} = W_{рек}^{ввод27,5н} (1 - \delta_{ПТ}) - W_{рек}^{6/10/35н}. \quad (17)$$

Составляющие эффективного использования энергии рекуперации на участках переменного тока, определяе-



мые по методике, можно проиллюстрировать в виде блок-схемы (рис. 2).

6. Абсолютное значение полезного использования энергии рекуперации на расчётном участке за расчётный период $W_{рек.эф}^{ЭПС}$ определяется как сумма составляющих эффективного использования энергии рекуперации, представленных соответственно на рис. 1 и 2 для участков постоянного и переменного тока. При этом относительная величина полезного использования энергии рекуперации, выработанной ЭПС, %:

$$\delta_{рек.эф}^{ЭПС} = \frac{W_{рек.эф}^{ЭПС}}{W_{рек}^{ЭПС}} \cdot 100\%, \quad (18)$$

где $W_{рек}^{ЭПС}$ — объём энергии рекуперации, определяемый по формуле:

$$W_{рек}^{ЭПС} = W_{рек}^{КС} + W_{рек}^{ЭПС с.л.}, \quad (19)$$

где $W_{рек}^{КС}$ — объём переданной ЭПС в контактную сеть энергии рекуперации на расчётном участке за расчётный период; $W_{рек}^{ЭПС с.л.}$ — объём энергии рекуперации, потреблённой рекуперирующим ЭПС на собственные нужды.

Абсолютные и относительные величины полезного использования энергии рекуперации, рассчитанные для полигона железных дорог, могут быть использованы для оценки экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации [10].

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования и разработанная в результате методика, описанные в статье, позволяют оценить меру эффективности использования энергии рекуперации на отдельных участках железных дорог и полигоне в целом.

В предлагаемой методологии заложен принцип, основанный на получении значений пяти коэффициентов, определяющих эффективность использования энергии рекуперации и подчёркивающих уникальность авторской методики.

Методика помогает аналитическим путём, без затрат на оснащение участков дополнительной измерительной техникой выполнять оценку влияния на эффективность использования энергии рекуперации режимов работы СТЭ, организации движения поездов, деятельности подразделений локомотивного хозяйства с целью интенсификации применения рекуперативного торможения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gonzalez I., Pilo E. Regenerative braking and the different traction systems. Energy Recovery Workshop. [Электронный ресурс]: http://uic.org/forms/IMG/pdf/regenerative_braking_traction_systems.pdf. Доступ 18.09.2017.
2. Frilli A., Meli E., Nocciolini D., Pugi L., Rindi A. Energetic optimization of regenerative braking for high speed railway systems. *Energy Conversion and Management*, 2016, Vol. 129, pp. 200–215. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.10.011.
3. Nozomu Ashida. Energy storage systems. Way-side System for Optimizing Regenerative Brakes. Energy Recovery Workshop. [Электронный ресурс]: http://uic.org/forms/IMG/pdf/recovery_system_jr_east.pdf. Доступ 18.09.2017.
4. Черемисин В. Т., Никифоров М. М. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2012. — С. 9–15.
5. Никифоров М. М., Каштанов А. Л., Кандаев В. А. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения // Известия Транссиба. — 2012. — № 1. — С. 72–78.
6. 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. — С. 114–120.
7. Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Каштанов А. Л., Вильгельм А. С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока: Монография. — Омск: ОмГУПС, 2016. — 176 с.
8. 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. — С. 74–90.
9. Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Влияние энергии рекуперации на уровень потерь в системе тягового электроснабжения // Транспорт Урала. — 2017. — № 2. — С. 55–60.
10. Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Вильгельм А. С. Методика расчёта экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Транспорт Урала. — 2016. — № 3. — С. 95–99. ●

Координаты авторов: Черемисин В. Т. — cheremisintv@gmail.com,

Никифоров М. М. — nikiforovmm@rambler.ru, Вильгельм А. С. — vilgelm87@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 18.09.2017, принята к публикации 21.10.2017.