

А. С. Самойлова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННОГО ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ «ЕРМАК»

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока серии «Ермак», представляющего собой основу тяжеловесного движения поездов на грузонапряжённых линиях железных дорог Восточного полигона (Транссиб и БАМ). В условиях сложного горно-перевального рельефа с затяжными спусками на данных железнодорожных магистралях особую роль приобретает эффективность работы электровозов в режиме рекуперативного торможения.

В процессе исследования выявлена проблема, ограничивающая тормозные характеристики электровоза по каналу регулирования выпрямительно-инверторного преобразователя на уровне 3,5 зон ввиду конструкционной специфики построения электрических силовых цепей.

В качестве решения предлагается способ, позволяющий расширить область регулирования напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя свыше принятого ограничения вплоть до полных четырёх зон.

Для подтверждения эффективности реализации предлагаемого способа выполнен расчёт его работы применительно к современному отечественному электровозу переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак». В результате применения предлагаемого способа улучшаются тормозные характеристики электровоза, повысится его скорость по спуску и увеличится возврат электрической энергии в контактную сеть.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, тормозные характеристики, электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, блок балластных резисторов.

Для цитирования: Самойлова, А. С. Совершенствование тормозных характеристик современного отечественного электровоза серии «Ермак» / А. С. Самойлова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 124–133. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_124.

Введение

Ежегодно в России наблюдается рост грузооборота по всем видам транспорта, и каждый из них вносит свой вклад в развитие страны [1]. Среди них лидирующую позицию занимает железнодорожный транспорт, обеспечивая 87 % грузооборота и около трети пассажиропотока. Российские железные дороги занимают первое место в мире по интенсивности использования, поэтому представляют собой транспортную артерию страны [2]. В качестве стратегического приоритета выступает эффективное развитие железнодорожной сети Восточного полигона [3]. Своевременное наращивание провозной способности Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей (Транссиба и БАМа) играет существенную роль для экономики страны. К 2030 году объём перевозки грузов должен возрасти до 210 млн тонн в год [4]. Провозная способность железнодорожной сети тесно коррелирует со скоростью движения поездов, поэтому в рамках стратегии технического развития железнодорожного транспорта её повышение является важнейшей задачей для Российских железных дорог.

Особенностью железных дорог Восточного полигона является сложный горно-перевальный рельеф местности с многочисленными затяжными подъёмами и спусками, а также кривыми малого радиуса [5]. Грузонапряжённость Транссиба и БАМа составляет 60 млн ткм брутто/км, что в 1,5 раза превышает средний показатель по сети. Один из наиболее грузонапряжённых участков Большой Луг – Слюдянка. Здесь протяжённость кривых участков достигает 72,3 % от общей длины дистанции пути, причём 49 % из них имеют радиус менее 350 метров. Более половины участков характеризуются подъёмами и спусками в диапазоне от 10 до 21 ‰ [6]. Для преодоления этих сложных участков пути в работу включаются подталкивающие локомотивы, которые увеличивают суммарную силу тяги или создают дополнительное тормозное усилие для тяжеловесного поезда.

В настоящее время ведётся модернизация железнодорожной инфраструктуры Транссиба и БАМа с целью увеличения провозной способности железных дорог Восточного полигона и расширения поставок продукции через дальневосточные порты [7]. Вместе с этим глобальным процессом для повышения интенсивности движения поездов и, как следствие, объёмов грузооборота активно применяется и развивается технология интервального регулирования движения поездов (ИРДП) «Виртуальная сцепка». Данная технология использует цифровой радиоканал для оперативной синхронизации параметров режима движения между локомотивами ведущего и ведомого поезда, тем самым обеспечивая минимальный интервал времени их следования при сохранении требуемого уровня безопасности [8]. «Виртуальная сцепка» уже сегодня способствует увеличению интенсивности движения поездов на Восточном полигоне, дополняя процесс модернизации инфраструктуры без необходимости её непосредственной реконструкции.

Стоит заметить, что все стоящие перед железнодорожной отраслью стратегические задачи по увеличению грузооборота и провозной способности железнодорожной сети, а также по повышению интенсивности и скорости движения поездов неизбежно оказывают влияние на характеристики тягового подвижного состава и выдвигают дополнительные требования к его надёжности и эффективности работы. Основную тяговую мощность железных дорог Восточного полигона составляют современные отечественные электровагоны переменного тока 2(3, 4)ЭС5К серии «Ермак». Эти локомотивы специально адаптированы для работы на горно-перевальных участках и способны вести тяжеловесные поезда массой до 7100 тонн. По состоянию на конец 2024 года инвентарный парк Восточного полигона насчитывает более 1800 таких электровагонов с общим пробегом свыше 6,8 млрд км. Для обеспечения планируемых объёмов грузоперевозок в ближайшей и долгосрочной перспективе ОАО «РЖД» ежегодно закупает более 50 электровагонов данной серии на Восточный полигон. В соответствии с современными требованиями конструкция и алгоритмы управления электровагонами постоянно совершенствуются.

Таким образом, улучшение эксплуатируемых отечественных электровагонов является ключевым фактором для устойчивого развития железных дорог Восточного полигона в масштабах всей страны. В контексте этого развития совершенствование режима рекуперативного торможения современных отечественных электровагонов переменного тока становится особенно актуальным и востребованным направлением. Применение рекуперативного торможения позволяет осуществлять подтормаживание локомотива для стабилизации скорости движения поезда на затяжных спусках и обеспечивает значительное энергосбережение за счёт возврата электрической энергии обратно в контактную сеть. Вопросы реализации указанного потенциала посвящены современные исследования и научные работы в области совершенствования режима рекуперативного торможения на электровагонах переменного тока с коллекторным приводом [9–19].

Описание предлагаемого способа

В интересах достижения поставленных целей и желаемого эффекта от совокупности реализуемых стратегий развития железнодорожного транспорта России, а именно совершенствования и модернизации отечественного электровагоностроения, в настоящий момент разработан способ, предназначенный для повышения эффективности работы режима рекуперативного торможения электровагонов переменного тока.

В ходе исследования особенностей реализации режима рекуперативного торможения было выявлено, что его работа осуществляется не в полной мере вследствие конструктивной специфики построения электрических силовых цепей электровагона [20–22]. Данная специфика обусловлена наличием блоков балластных резисторов (ББР) в электрической цепи якорей тяговых электродвигателей (ТЭД), согласно рассматриваемому режиму – якорей генераторов. Их роль в процессе реализации электровагоном рекуперативного торможения заключается в обеспечении электрической устойчивости и выравнивании токов якорей ТЭД, что позволяет устранять и сглаживать влияние возникающих возмущающих воздействий [23]. При этом негативная составляющая наличия ББР в силовой электрической цепи электровагона выражается в ограничении регулирования выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) на уровне 3,5 зон [24], введённом по причине возникновения значительных потерь напряжения на ББР при максимально возможном значении тока якоря ТЭД. На рис. 1 представлена тормозная характеристика электровагона переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» – зависимость тормозной силы и тока якоря ТЭД от скорости движения при фиксированных значениях напряжения на ТЭД. Регулирование скорости движения электровагона в режиме рекуперативного торможения за счёт изменения конфигурации цепи питания ТЭД осуществляется в зоне высоких скоростей фазным регулированием напряжения выпрямительной установки возбуждения (ВУВ) (белая область) и в зоне средних и малых скоростей зонно-фазным регулированием напряжения ВИП до

уровня 3,5 зоны (серая область) с учётом ограничений по сцеплению и максимальному току (950 А) на ББР (красные линии).

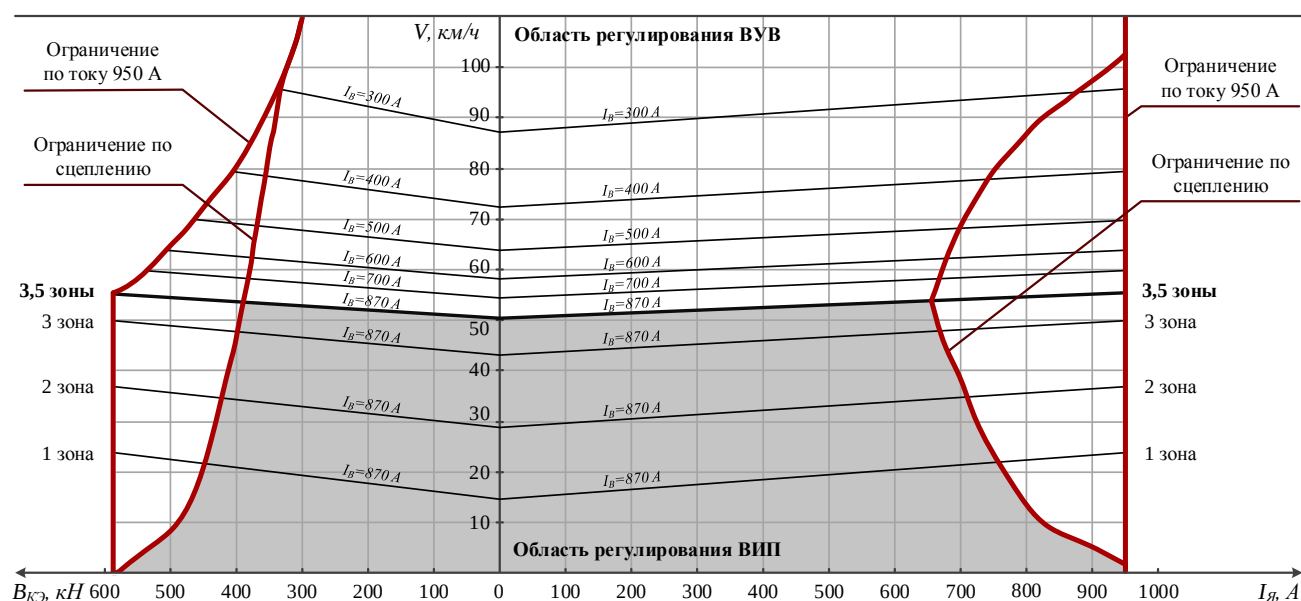


Рис. 1. Тормозные характеристики электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак»

Анализ режимных карт вождения поездов на участке Восточного полигона Большой Луг – Слюдянка выявил на всём его протяжении ограничение по скорости движения 60 км/ч. При такой скорости электровоз, согласно своей тормозной характеристике (рис. 1), находится в области 3,5 зоны регулирования ВИП (установленное ограничение по регулированию ВИП) с управлением по каналу ВУВ. Учитывая наличие затяжных спусков, движение электровоза в таком режиме осуществляется на протяжении 40 % всего участка. Принимая во внимание данный факт недоиспользование возможностей электровоза в режиме рекуперативного торможения вызывает ряд негативных последствий:

- сокращение объёмов электрической энергии, возвращаемой электровозом в контактную сеть, из-за наличия её недорекуперируемой части;
- снижение скорости движения поезда по спуску, что препятствует росту пропускной способности тяговых участков железных дорог и лимитирует тем самым интенсивность движения поездов;
- вследствие перехода на регулирование тормозной силы по каналу ВУВ (путём ослабления магнитного потока ТЭД) возникают пульсации магнитодвижущей силы и магнитного потока, дополнительные потери, нагрев обмоток ТЭД и нарушение его коммутации;
- увеличение вероятности потери сцепления по причине ослабления магнитного потока ТЭД при разнице токов якоря и возбуждения, и, следовательно, возникновение юза в режиме рекуперативного торможения.

Потенциал совершенствования алгоритмов управления электрооборудованием электровоза, закладываемых в программное обеспечение микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД), с учётом специфики построения его электрических силовых цепей позволил реализовать способ регулирования выпрямленного напряжения ВИП в рассматриваемом режиме свыше установленного ограничения 3,5 зоны. Способ заключается в том, что для возможности регулирования выпрямленного напряжения свыше 3,5 зоны в зависимости от скорости движения электровоза формируется предлагаемая величина угла регулирования на четвёртой зоне в соответствии с определяемой максимально возможной величиной выпрямленного напряжения, ограничиваясь текущей величиной тока якоря ТЭД, постоянно контролируемой с датчиков тока [25].

Расчёт работы предлагаемого способа для современного отечественного электровоза серии «Ермак»

В качестве подтверждения результативности реализации предлагаемого авторами способа произведём расчёт его работы применительно к современному отечественному электровозу переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак». Величина предлагаемого угла регулирования $\alpha_p^{\text{предл}}$ будет рассчитываться по формуле (1):

$$\alpha_p^{\text{предл}} = \pi - \arccos \left(\frac{2U_{d\max} - U_{d4} \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta + (2 \cdot \varepsilon^2 + \varepsilon + \mu / \varepsilon - \mu + 1) \cdot \frac{2 \cdot \lambda \cdot X_{T4} \cdot I_d}{\pi}}{U_{d4} \cdot (1 - \varepsilon)} \right), \quad (1)$$

где $U_{d\max}$ – максимально возможная величина среднего выпрямленного напряжения инвертора, В;

ε – коэффициент, выражающий отношение амплитудного значения переменного напряжения предыдущей зоны ВИП к такому же напряжению последующей зоны, 0,75;

δ – угол запаса инвертора, 25 эл. град.;

μ – коэффициент, выражающий отношение приведенного эквивалентного значения индуктивного сопротивления цепи переменного тока ВИП предыдущей зоны к такому же сопротивлению последующей зоны, 0,075;

λ – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций выпрямленного тока, 1,05;

X_{T4} – индуктивное сопротивление обмоток тягового трансформатора на четвёртой зоне регулирования (цепи переменного тока), 0,088 Ом;

I_d – среднее значение выпрямленного тока инвертора, А;

U_{d4} – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора на четвёртой зоне регулирования, 1260 В.

При этом $U_{d\max}$ принимается в соответствии с условием (2) относительно текущей максимальной величины тока якоря ТЭД $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$ в зависимости от значения задаваемой скорости движения электровоза V_3 :

$$U_{d3,5} \leq U_{d\max}^{\text{тек}} \leq U_{d\max}^3, \quad (2)$$

где $U_{d\max}^{\text{тек}}$ – максимально возможная величина среднего выпрямленного напряжения относительно $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$, В;

$U_{d\max}^3$ – максимально допустимая величина среднего выпрямленного напряжения в зависимости от V_3 .

$U_{d3,5}$ определяется по формуле (3) при величине угла регулирования α_p равной 90 эл. град., что соответствует 3,5 зонам регулирования ВИП:

$$U_{d3,5} = \frac{U_{d4}}{2} \cdot ((1 + \varepsilon) \cdot \cos \delta + (1 - \varepsilon) \cdot \cos \beta_p) - (2 \cdot \varepsilon^2 + \varepsilon + \mu / \varepsilon - \mu + 1) \cdot \frac{\lambda \cdot X_{T4} \cdot I_d}{\pi}, \quad (3)$$

где β_p – угол регулирования, равный $\beta_p = \pi - \alpha_p$, эл. град.

$U_{d\max}^{\text{тек}}$ вычисляется по формуле (4) с учётом текущих потерь напряжения на ББР относительно $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$:

$$U_{d\max}^{\text{тек}} = U_{d3,5} + U_{\text{доб}}^{\text{тек}} = U_{d3,5} + R_{\text{ББР}} \cdot (I_{\text{яmax}}^{\text{огр}} - I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}), \quad (4)$$

где $U_{d3,5}$ – величина среднего выпрямленного напряжения, соответствующая установленному ограничению 3,5 зоны регулирования ВИП, В;

$U_{\text{доб}}^{\text{тек}}$ – величина потенциального резерва по напряжению относительно максимальных и текущих потерь напряжения на ББР, В;

$R_{\text{ББР}}$ – сопротивление ББР типа ББР-64, 0,143 Ом;

$I_{\text{яmax}}^{\text{огр}}$ – ограничение по максимальному значению тока якоря ТЭД на ББР, 950 А.

$U_{d\max}^3$ рассчитывается по формуле (5) в зависимости от V_3 и с учётом текущего значения скорости движения электровоза $V_{\text{тек}}$:

$$U_{d\max}^3 = U_{d3,5} + U_{\text{доб}}^3 = U_{d3,5} + C_V \Phi \cdot (V_3 - V_{\text{тек}}), \quad (5)$$

где $U_{\text{доб}}^3$ – величина добавочного напряжения относительно разницы V_3 и $V_{\text{тек}}$, В;

$C_V \Phi$ – удельная ЭДС ТЭД в зависимости от величины тока возбуждения I_B , В/км/ч.

В рамках расчёта по формуле (6) $V_{\text{тек}}$ принимается в отношении величины $U_{d3,5}$ в качестве установления ограничения 3,5 зоны регулирования ВИП при определённой величине $I_{\text{яmax}}^{\text{тек}}$, также по формуле (7) V_3 реализуется в данном примере относительно $U_{d\max}^{\text{тек}}$ как максимально возможная величина в диапазоне регулирования ВИП свыше 3,5 зон:

$$V_{\text{тек}} = \frac{(U_{d3,5} - I_{\text{яmax}}^{\text{тек}} \cdot n_d \cdot (\frac{2\lambda}{\pi} X_{T4} - \varepsilon \cdot R_{T4} - r_{\text{ср}}) + \Delta U_{\text{вент}}) + I_{\text{яmax}}^{\text{тек}} \cdot (\sum r'_d + R_{\text{ББР}})}{C_V \Phi}, \quad (6)$$

$$V_3 = \frac{(U_{d\max}^{I_{\text{тек}}} - I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot n_d \cdot (\frac{2\lambda}{\pi} X_{T4} - \varepsilon \cdot R_{T4} - r_{\text{ср}}) + \Delta U_{\text{вент}}) + I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot (\sum r'_d + R_{\text{ББР}})}{C_V \Phi}, \quad (7)$$

где n_d – количество ТЭД, получающих питание от одного ВИП, 2;

R_{T4} – активное сопротивление обмоток тягового трансформатора на четвёртой зоне регулирования, 0,007 Ом;

$r_{\text{ср}}$ – сопротивление обмотки сглаживающего реактора типа РС-19, 0,0182 Ом;

$\Delta U_{\text{вн}}$ – падение напряжения в тиристорах плеч ВИП, 8,4 В;

$\sum r'_d$ – сопротивление якорной обмотки ТЭД с учетом обмоток добавочных полюсов и компенсационной обмотки, 0,0237 Ом.

Результаты расчёта величины предлагаемого угла регулирования $\alpha_r^{\text{предл}}$ и максимально возможной величины среднего выпрямленного напряжения инвертора $U_{d\max}$ по формулам (1), (2) и (4) в диапазоне изменения $I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}$ от 100 А до 900 А сведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина предлагаемого угла регулирования $\alpha_r^{\text{предл}}$ и максимально возможной величины среднего выпрямленного напряжения инвертора $U_{d\max}$ в диапазоне изменения текущей максимальной величины тока якоря ТЭД $I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}$

$I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}$, А	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$U_{d\max}$, В	1101,77	1069,33	1035,14	1003,95	971,26	938,56	905,87	873,18	840,49
$\alpha_r^{\text{предл}}$, эл.град.	140	133	125	120	114	109	103	98	93

Основываясь на возможности реализации регулирования выпрямленного напряжения ВИП вплоть до четырёх полных зон применительно к рассматриваемому электровозу, тормозные характеристики приобретают совершенный вид. Произведём расчёт тормозной силы по формуле (8) при её регулировании в зоне средних скоростей движения электровоза по каналу ВИП в диапазоне изменения $I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}$ от 100 А до 950 А.

$$B_{\text{кэ}} = \frac{3,6 \cdot n_d \cdot C_V \Phi \cdot I_{\text{ямак}}^{\text{тек}}}{\eta_{\text{зп}} \cdot \eta_d}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{зп}}$ – коэффициент, учитывающий потери в зубчатой передаче в процессе преобразования энергии, 0,975;

η_d – коэффициент, отражающий потери силы в ТЭД, 0,95.

При этом расчёт скоростей движения электровоза выполним по формуле (9) при условии установления ограничения 3,5 зоны и свыше данного уровня вплоть до четырёх полных зон за счёт реализации предлагаемого способа:

$$V_{\text{тек}} = \frac{(U_{d0} - I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot n_d \cdot (\frac{2\lambda}{\pi} X_T - \varepsilon \cdot R_T - r_{\text{ср}}) + \Delta U_{\text{вент}}) + I_{\text{ямак}}^{\text{тек}} \cdot (\sum r'_d + R_{\text{ББР}})}{C_V \Phi}, \quad (9)$$

где U_{d0} – выпрямленное напряжение холостого хода инвертора, В.

Результаты расчёта необходимых данных для построения тормозных характеристик электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» по формулам (8) и (9) сведены в таблицу 2.

На основании рассчитанных значений построим тормозные характеристики электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» с применением предлагаемого способа в режиме рекуперативного торможения, позволяющего расширить их область регулирования по каналу ВИП с 3,5 зон до полной 4 зоны (штрихованная область) и тем самым повысить скорость движения поезда на 4 км/ч (диапазон ΔV) (рис. 2).

Таблица 2

**Результаты расчёта тормозных характеристик электровоза переменного тока 2ЭС5К
серии «Ермак» с применением предлагаемого способа**

Параметры по каналу регулирования ВИП												
$I_{\text{ямах}}^{\text{тек}}$, А		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950
$B_{\text{кэ}}$, кН		0	61,8	123,6	185,4	247,3	309,1	370,9	432,7	494,5	556,3	587,2
V , км/ч	3 зона	43,2	43,9	44,6	45,3	46	46,7	47,4	48,1	48,8	49,4	49,8
	3,5 зоны	50,4	50,9	51,4	51,9	52,5	53	53,5	54	54,5	55,1	55,3
	4 зона	54,6	55,2	44,7	56,2	56,7	57,2	57,8	58,3	58,8	59,3	59,6
Параметры по каналу регулирования ВУВ												
$B_{\text{кэ}}$, кН	$I_{\text{В}}=700\text{ А}$	0	57,2	114,5	171,7	229	286,2	343,5	400,7	457,9	515,2	543,8
	$I_{\text{В}}=600\text{ А}$	0	53,5	107,1	160,6	214,2	267,7	321,3	374,8	428,3	481,9	508,7
V , км/ч	$I_{\text{В}}=700\text{ А}$	59	59,6	60,1	60,7	61,3	61,8	62,4	62,9	63,5	64,1	64,3
	$I_{\text{В}}=600\text{ А}$	63,1	63,7	64,3	64,9	65,5	66,1	66,7	67,3	67,9	68,5	68,8

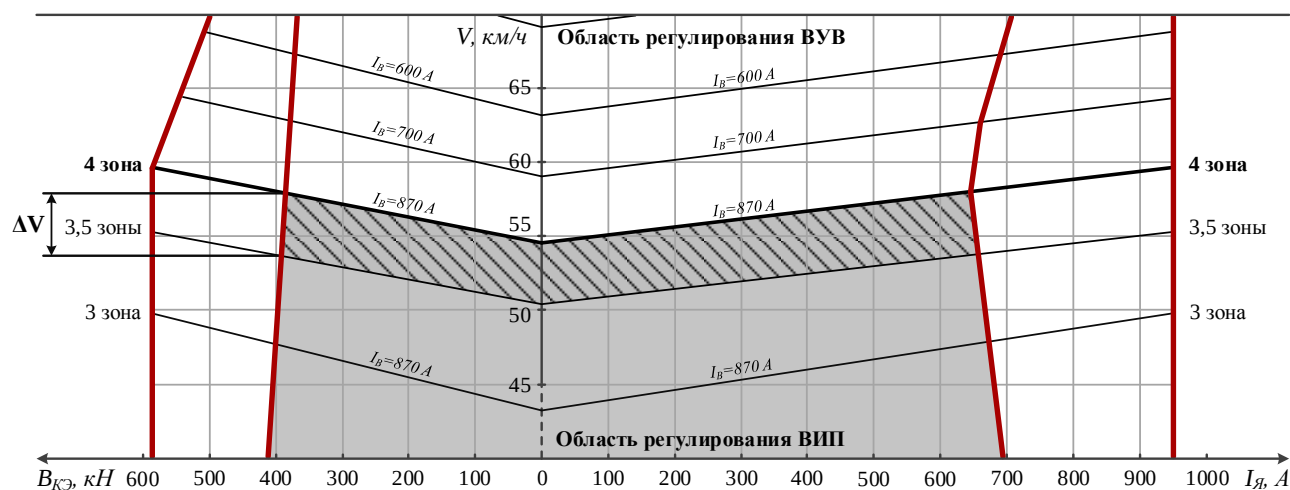


Рис. 2. Часть тормозных характеристик электровоза переменного тока 2ЭС5К серии «Ермак» с применением предлагаемого способа

Заключение

Применение предлагаемого способа в режиме рекуперативного торможения на современном отечественном электровозе переменного тока серии «Ермак» способствует улучшению его тормозных характеристик за счёт расширения области их регулирования по каналу ВИП вплоть до полных четырёх зон. Разработанное решение повышает эффективность работы электровоза в исследуемом режиме, позволяя достичь следующих преимуществ:

- прирост продуктивности использования энергоресурсов при сокращении затрат электрической энергии на тягу поездов за счёт увеличения объёмов возвращаемой электрической энергии в контактную сеть не менее чем на 5 % [26];
- наращивание интенсивности движения поездов на железных дорогах Восточного полигона при повышении их скорости движения по спуску не менее чем на 4 км/ч;
- предотвращение возникновения юза в режиме рекуперативного торможения на электровозе благодаря увеличению длительности работы ТЭД на полном поле, а также снижение дополнительных потерь, пульсаций магнитодвижущей силы и магнитного потока, нагрева обмоток ТЭД и нарушений его коммутации.

Рост и улучшение приведённых показателей эффективности работы электровоза переменного тока напрямую способствует решению стратегических задач отрасли, направленных на увеличение грузооборота и провозной способности железнодорожной сети, а также на повышение интенсивности перевозочного процесса.

Список литературы

1 Перевозки грузов транспортом в РФ за 2024 год выросли на 5,5% // Информационное агентство ТАСС : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/23084489> (дата обращения: 28.02.2026).

2 РЖД в цифрах // ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377/page/1417901?id=17127#main-header> (дата обращения: 28.02.2026).

3 Совещание по развитию Восточного полигона железных дорог // Президент России : официальный сайт. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/73078> (дата обращения: 01.03.2026).

4 Реализация III этапа развития Восточного полигона // Официальное представительство ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (дата обращения: 01.03.2026).

5 Восточный полигон. Общая характеристика // Официальное представительство ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (дата обращения: 01.03.2026).

6 **Лисицын, А. И.** Совершенствование системы технического обслуживания пути со сложными эксплуатационными условиями горно-перевальных участков : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.9.2 / Лисицын Андрей Иванович ; Российский университет транспорта (РУТ МИИТ). – Москва, 2022. – 149 с.

7 Утвержден третий этап модернизации БАМа и Транссиба на 3,7 трлн рублей // Сетевое издание Ведомости : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://www.vedomosti.ru/strana/siberian/articles/2024/05/02/1035157-modernizatsii-bam-transsiba> (дата обращения: 04.03.2026).

8 Системы интервального регулирования и управления движением поездов // АО «НИИАС» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://niias.ru/projects/isuzht/> (дата обращения: 04.03.2026).

9 **Власьевский, С. В.** Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов однофазно-постоянного тока с рекуперативным торможением : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.03 / Власьевский Станислав Васильевич. – Москва, 2001. – 396 с.

References

1 Cargo transportation by transport in the Russian Federation increased by 5.5% in 2024 // TASS Information Agency : official website. – 2025. –

URL: <https://tass.ru/ekonomika/23084489> (date of access: 28.02.2026).

2 RZD in numbers // JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377/page/1417901?id=17127#main-header> (date of access: 28.02.2026).

3 Meeting on the development of the Eastern Railway Polygon // President of Russia : official website. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/73078> (date of access: 01.03.2026).

4 Implementation of Stage III of the Eastern Polygon Development // Official representative office of JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (date of access: 01.03.2026).

5 Eastern Polygon. General Characteristics // Official Representative Office of JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19722#main-header> (date of access: 01.03.2026).

6 **Lisitsyn, A. I.** Improvement of the track maintenance system with complex operating conditions of mountain-transshipment sections : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 2.9.2 / Lisitsyn Andrey Ivanovich ; Russian University of Transport (RUT MIIT). – Moscow, 2022. – 149 p.

7 The third stage of the modernization of the Baikal – Amur Mainline and the Trans-Siberian Railway for 3.7 trillion rubles has been approved // Online edition of Vedomosti : official website. – 2024. – URL: <https://www.vedomosti.ru/strana/siberian/articles/2024/05/02/1035157-modernizatsii-bam-transsiba> (date of access: 04.03.2026).

8 Interval regulating and train traffic control systems // JSC NIIAS : official website. – 2025. – URL: <https://niias.ru/projects/isuzht/> (date of access: 04.03.2026).

9 Vlashevsky, S. V. Increasing the efficiency of rectifier-inverter converters of single-phase DC electric locomotives with regenerative braking : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.09.03 / Vlashevsky Stanislav Vasilyevich. – Moscow, 2001. – 396 p.

10 **Линьков, А.О.** Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Линьков Алексей Олегович. – Иркутск, 2015. – 177 с.

11 **Шрамко, С. Г.** Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет изменения параметров балластных резисторов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.09.03 / Шрамко Сергей Геннадьевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – 142 с.

12 Способ повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Е. В. Буняева, В. Г. Скорик, С. В. Власьевский, Д. С. Фокин // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 17–20. – ISSN 0013-5860.

13 **Савоськин, А. Н.** Анализ электромагнитных процессов в тяговой сети при взаимодействии электровозов в режимах рекуперации и тяги / А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков, И. И. Гарбузов // Электротехника. – 2014. – № 5. – С. 47–52. – ISSN 0013-5860.

14 **Кучумов, В. А.** О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения / В. А. Кучумов, И. Н. Никончук // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81, № 1. – С. 31–37. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37.

15 **Мельниченко, О. В.** Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с помощью разнофазного управления инверторами на первой зоне регулирования / О. В. Мельниченко, С. В. Власьевский // Вестник ИРГТУ. – 2014. – № 7 (90). – С. 93–99. – ISSN 1814-3520.

16 **Кулинич, Ю. М.** Повышение качества электроэнергии, потребляемой электровозом однофазно-постоянного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.03 / Кулинич Юрий Михайлович. – Москва, 2002. – 270 с.

17 **Соловьёв, В. А.** Выравнивание нагрузок в параллельных цепях тяговых двигателей, работающих в режиме генератора, и снижение энергетических потерь электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В. А. Со-

10 **Linkov, A. O.** Improving the rectifier excitation unit of AC electric locomotive traction motors in regenerative braking mode : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.22.07 / Linkov Aleksey Olegovich. – Irkutsk, 2015. – 177 p.

11 **Shramko, S. G.** Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives in the regenerative braking mode by changing the parameters of ballast resistors : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.09.03 / Shramko, Sergey Gennadievich. – Komsomolsk-on-Amur, 2016. – 142 p.

12 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. Vlashevsky, D. S. Fokin // Russian Electrical Engineering. – 2016. – No. 2. – P. 17–20. – ISSN 0013-5860.

13 **Savoskin, A. N.** Analysis of electromagnetic processes in the traction network during the interaction of electric locomotives in recovery and traction modes / A. N. Savoskin, O. E. Pudovikov, I. I. Garbuzov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – No. 5. – P. 47–52. – ISSN 0013-5860.

14 **Kuchumov, V. A.** On the implementation of regenerative braking on an AC electric locomotive with a single-phase reversible voltage converter / V. A. Kuchumov, I. N. Nikonchuk // Vestnik of the Railway research institute. – 2022. – Vol. 81, No. 1. – P. 31–37. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37.

15 **Melnichenko, O. V.** Increasing the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the regenerative braking mode by means of multiphase control of inverters in the first control zone / O. V. Melnichenko, S. V. Vlashevsky // The Bulletin of Irkutsk State University. – 2014. – No. 7 (90). – P. 93–99. – ISSN 1814-3520.

16 **Kulinich, Ju. M.** Improving the quality of electricity consumed by a single-phase DC electric locomotive, based on the use of a hybrid reactive power compensator : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.09.03 / Kulinich Yuri Mikhailovich. – Moscow, 2002. – 270 p.

17 **Soloviev, V. A.** Load balancing in parallel circuits of traction motors operating in generator mode and reducing energy losses of an AC electric locomotive in regenerative braking mode / V. A. Soloviev, A. I. Malyukova,

ловьев, А. И. Малюкова, С. В. Власьевский // Информатика и системы управления. – 2013. – № 3 (37). – С. 168–174. – ISSN 1814-2400.

18 **Томилов, В. С.** Повышение эффективности режима рекуперативного торможения электроваз переменного тока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.9.3 / Томилов Вячеслав Станиславович. – Иркутск, 2022. – 154 с.

19 Оценка энергетической эффективности электровазов 3ЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский, О. А. Малышева, Н. Г. Шабалин, В. В. Семченко // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79, № 1. – С. 17–25. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25.

20 **Трахтман, Л. М.** Электрическое торможение электроподвижного состава / Л. М. Трахтман. – Москва : Транспорт, 1965. – 204 с.

21 **Мельниченко, О. В.** Повышение эффективности работы рекуперативного торможения электровазов переменного тока в зоне высоких скоростей движения / О. В. Мельниченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 1 (29). – С. 174–179. – ISBN 978-5-98710-157-5.

22 **Мельниченко, О. В.** Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровазов переменного тока : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.03 / Мельниченко Олег Валерьевич. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

23 **Самойлова, А. С.** Проблема негативного влияния ББР на эффективность работы электроваз переменного тока серии 2(3)ЭС5К в режиме рекуперативного торможения и способ её решения / А. С. Самойлова // Молодежная наука : Труды XXVII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 20 апреля 2023 года. – Красноярск : ФГБОУ ВО ИрГУПС, 2023. – С. 227–231. – ISBN 978-5-903293-88-9.

24 Электроваз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы : ИДМБ.661142.009-05РЭ1 (ЗТС.001.012-05РЭ1) / разработчик и изготовитель – НЭВЗ. – Новочеркасск, 2015. – 348 с.

25 **Самойлова, А. С.** Разработка способа повышения эффективности работы электровазов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А. С. Самойлова, О. В. Мельниченко, П. В. Григоренко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. –

S. V. Vlasievsky // Computer Science and Control Systems. – 2013. – No. 3 (37). – P. 168–174. – ISSN 1814-2400.

18 **Tomilov, V. S.** Improving the efficiency of regenerative braking mode in AC electric locomotives : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 2.9.3 / Vyacheslav Stanislavovich Tomilov. – Irkutsk, 2022. – 154 p.

19 Energy efficiency assessment of the 3ES5K electric locomotives when using interval traffic control technology in the form of “virtual coupling” / S. V. Vlasievsky, O. A. Malysheva, N. G. Shabalin, V. V. Semchenko // Vestnik of the Railway Research Institute. – 2020. – Vol. 79, No. 1. – P. 17–25. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25.

20 **Trakhtman, L. M.** Electric braking of electric rolling stock / L. M. Trakhtman. – Moscow : Transport, 1965. – 204 p.

21 **Melnichenko, O. V.** Improving the efficiency of regenerative braking of AC electric locomotives in the high-speed zone / O. V. Melnichenko // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2011 – No. 1 (29) – P. 174–179. – ISBN 978-5-98710-157-5.

22 **Melnichenko, O. V.** Improving the energy efficiency of traction electric drives of AC electric locomotives : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 09/05/03 / Melnichenko Oleg Valerievich. – Khabarovsk, 2015. – 392 p.

23 **Samoilova, A. S.** The problem of the negative impact of the regenerative braking system on the efficiency of the 2(3) ES5K Series AC electric locomotive in regenerative braking mode and a method for solving it / A. S. Samoilova // Youth Science : proceedings of the XXVII All-Russian student scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 20, 2023. – Krasnoyarsk : ISTU, 2023. – P. 227–231. – ISBN 978-5-903293-88-9.

24 Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). User manual. Book 1. Description and operation. Electrical circuits : IDMB. 661142.009-05RE1 (ЗТС.001.012-05RE1). – NEVZ. – Novocherkassk, 2015. – 348 p.

25 **Samoilova, A. S.** Development of a method to increase the efficiency of AC electric locomotives in regenerative braking mode / A. S. Samoilova, O. V. Melnichenko, P. V. Grigorenko // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2025. –

2025. – № 3 (67). – С. 72–79. – DOI 10.20291/2079-0392-2025-3-72-79.

26 **Самойлова, А. С.** Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А. С. Самойлова, О. В. Мельниченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 1 (77). – С. 136–143. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

No. 3 (67). – P. 72–79. – DOI 10.20291/2079-0392-2025-3-72-79.

26 **Samoilova, A. S.** Improving the energy efficiency of a modern domestic AC electric locomotive in the regenerative braking mode / A.S. Samoilova, O.V. Melnichenko // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2023. – No. 1 (77). – P. 136–143. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

A. S. Samoilova

IMPROVING THE BRAKING CHARACTERISTICS OF A MODERN DOMESTIC ELECTRIC LOCOMOTIVE OF THE ERMAK SERIES

Abstract. The article is devoted to the urgent task of improving the efficiency of a modern domestic AC electric locomotive of the “Ermak” series. This is the basis for heavy-haul train traffic on heavily loaded railway lines in the Eastern Polygon (Trans-Siberian Railway and Baikal-Amur Mainline). In conditions of difficult mountainous terrain and protracted descents, the efficiency of these electric locomotives during regenerative braking plays a special role.

In the course of the study, a problem was identified that limits the braking characteristics of an electric locomotive through the control channel of a rectifier-inverter converter at the level of 3.5 zones due to the design specifics of the construction of electrical power circuits. A proposed solution allows for expanding the voltage regulation range of a rectifier-inverter converter beyond the accepted limit, up to a full four zones.

To confirm the effectiveness of the proposed method's implementation, the calculation of its operation was carried out for a modern domestic AC electric locomotive of the 2ES5K “Ermak” series. The proposed method will improve the locomotive's braking performance, increase its downhill speed, and increase the return of electrical energy to the overhead contact system.

Keywords: regenerative braking mode, braking characteristics, alternating current electric locomotive, rectifier-inverter converter, block of ballast resistors.

For citation: Samoilova, A. S. Improving the braking characteristics of a modern domestic electric locomotive of the Ermak series / A. S. Samoilova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 124–133. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_124.

Сведения об авторах

Самойлова Анастасия Сергеевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Транспортное машиностроение»,
аспирант,
e-mail: a.s.samoilova@mail.ru

Information about the authors

Samoilova Anastasia Sergeevna

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair “Transport Engineering”,
Postgraduate Student,
e-mail: a.s.samoilova@mail.ru