

УЛУЧШЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

А.С. Самойлова¹, О.В. Мельниченко², П.В. Григоренко¹

¹аспирант, ИрГУПС, г. Иркутск

²д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «ЭПС», ИрГУПС, г. Иркутск

***Аннотация.** В статье рассмотрены особенности реализации режима рекуперативного торможения на современных отечественных электровозах переменного тока серии 2ЭС5К. В процессе исследования выявлено, что работа данного режима осуществляется не в полной мере ввиду того, что регулировочная характеристика инвертора на высшей зоне ограничена по причине конструкционной специфики построения электрических силовых цепей электровоза. На основании этого, авторами определена возможность расширения области регулировочной характеристики инвертора, направленная на улучшение показателей эффективности работы электровоза в режиме рекуперативного торможения, что в целом может повысить пропускную и провозную способности участков железных дорог Восточного полигона.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, ресурсосбережение, электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, регулировочная характеристика, инвертор, выпрямительно-инверторный преобразователь.*

Энергоэффективность и ресурсосбережение выступают сопутствующими элементами каждого этапа развития железнодорожного транспорта и устанавливают вектор его прогресса и эволюции. Их учёт при создании и совершенствовании тягового подвижного состава отражается в повышении интенсивности перевозочного процесса и увеличении эффективности использования энергоресурсов [1]. На сегодняшний день в числе реализованных способов, применяемых на электроподвижном составе, соответствующих требованиям экологичности, энерго- и ресурсосбережения является режим рекуперативного торможения. Данный режим относится к одному из видов электрического торможения, при котором работа тягового электродвигателя (ТЭД) осуществляется в режиме генератора, т.е. происходит создание электрической энергии из механической в процессе формирования тормозного усилия, стремящегося задержать вращение колёсной пары для

достижения эффекта торможения. В отношении электроподвижного состава переменного тока, вырабатываемая от ТЭД электрическая энергия преобразуется тяговым преобразователем, выступающим в качестве инвертора, из постоянного тока в переменный промышленной частоты 50 Гц и, таким образом, совершается возврат её в контактную сеть [2,3].

Рассмотрим принцип реализации режима рекуперативного торможения для раскрытия особенностей процессов, протекающих в электрической цепи электровоза. Для приведения в работу электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, применительно к электровозу переменного тока серии 2ЭС5К [4], необходимо выполнить переход с тягового режима работы ТЭД в генераторный режим с независимым возбуждением. Это осуществляется за счёт отсоединения обмоток возбуждения от якорей ТЭД и последовательным соединением их с выпрямительной установкой возбуждения (ВУВ), обеспечивая изменение полярности ЭДС ТЭД при соединении общего катода с минусовым зажимом, а нулевой вывод – с плюсовым (рис. 1). Следовательно, установленное согласное направление ЭДС E_{Γ} и тока якоря $I_{\text{я}}$ генератора обеспечивает возврат электрической энергии обратно в контактную сеть, а противоположное направление тока возбуждения $I_{\text{в}}$ и тока якоря генератора $I_{\text{я}}$ образуют тормозной эффект электровоза, то есть снижение скорости движения поезда без воздействия механического торможения [5]. Регулирование скорости движения электровоза V в данном режиме, в соответствии с выражениями (1) и (2), осуществляется за счёт изменения тока возбуждения $I_{\text{в}}$ в обмотках возбуждения генератора при помощи ВУВ и зонно-фазным регулированием выпрямленного напряжения ВИП U_d , работающего в режиме инвертора и подключенного к сглаживающим реакторам, якорям генераторов, диодам и блокам балластных резисторов (ББР):

$$E_{\Gamma} = C_V \Phi \cdot V = U_d + I_{\text{я}} \sum R, \quad (1)$$

где $C_V \Phi$ – удельная ЭДС ТЭД в зависимости от величины тока возбуждения $I_{\text{в}}$, В/км/ч;

$\sum R$ – сумма сопротивлений всех элементов цепи тока якоря генератора, Ом;

следовательно:

$$V = \frac{U_d + I_{\text{я}}(\sum r_{\text{д}} + R_{\text{ББР}})}{C_V \Phi}, \quad (2)$$

где $\sum r_{\text{д}}$ – суммарное сопротивление обмоток ТЭД без учёта компенсационной обмотки, Ом;

$R_{\text{ББР}}$ – сопротивление ББР, Ом.

В зоне малых и средних скоростей регулирование происходит путём подачи управляющих импульсов $\alpha_{\text{р}}^{\text{ВИП}}$ и β на тиристорные плечи ВИП, а в зонах

Имеется особенность в регулировании выпрямленного напряжения ВИП на четвёртой зоне в связи с наличием ББР в цепи якорей ТЭД. Роль ББР заключается в необходимости обеспечения электрической устойчивости цепей в данном режиме, а также для улучшения распределения тока по якорям ТЭД при расхождениях величины тока в отдельных группах ТЭД и колебаниях напряжения в контактной сети [7]. Ток якоря генератора протекая по ББР образует потери напряжения, в результате именно они ограничивают работу режима рекуперативного торможения. Это выражается в неполноценном задействовании регулировочной характеристики инвертора на четвёртой зоне регулирования, в которой диапазон изменения типового управляющего импульса $\alpha_p^{\text{тип}}$ не превышает границы 90 эл. град., что составляет 3,5 зоны регулирования ВИП по отношению к формируемой величине его выпрямленного напряжения U_d , согласно выражения (3) [8]:

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

где U_{d4} – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора (ТТ) на четвёртой зоне регулирования, В;

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

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

λ – коэффициент, учитывающий влияния пульсаций выпрямленного тока;

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

I_d – среднее значение выпрямленного тока инвертора, А;

δ – угол запаса инвертора, эл. град.;

β_p – управляющий импульс, равный $\beta_p = \pi - \alpha_p$, эл. град.

На текущий момент наличие данной особенности реализации режима рекуперативного торможения на современных отечественных электровозах ограничивает их возможности в эксплуатации, такие как увеличение скорости движения поезда по спуску и возврат электрической энергии в контактную сеть. Преимущества данного режима играют существенную роль в уменьшении межпоездного интервала в целях обеспечения роста пропускной и провозной способностей российских железных дорог.

Максимально-возможную величину выпрямленного напряжения ВИП U_{dmax} предлагается реализовывать по слежению за величиной тока якоря ТЭД

для учёта текущих потерь напряжения на ББР. Это напряжение определяется следующим образом по формуле (4):

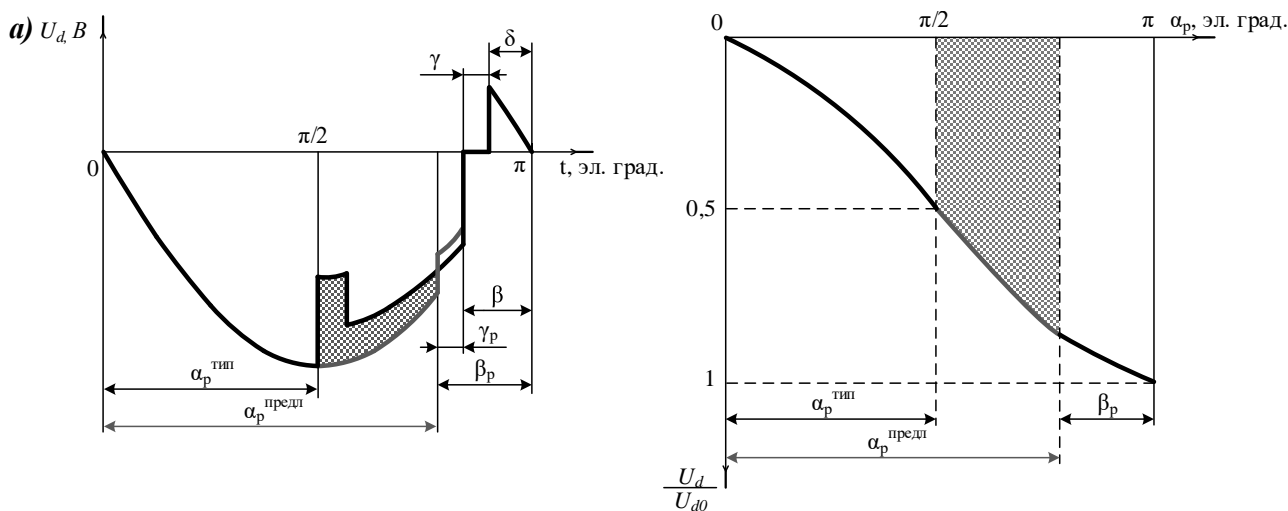
$$U_{dmax} = U_d + U_{доб}^{I_{Яmax}^{тек}} = U_d + \Delta U_{R_{ББР}}^{max} - \Delta U_{R_{ББР}}^{тек} = U_d + R_{ББР}(I_{Яmax}^{огр} - I_{Яmax}^{тек}), (4)$$

где $U_{доб}^{I_{Яmax}^{тек}}$ – добавочное напряжение относительно максимальных и текущих потерь напряжения на ББР, В;

$\Delta U_{R_{ББР}}^{max}$ – максимальные потери напряжения на ББР при максимальном ограничении значения тока якоря ТЭД $I_{Яmax}^{огр}$, В;

$\Delta U_{R_{ББР}}^{тек}$ – текущие потери напряжения на ББР при текущей максимальной величине тока якоря ТЭД $I_{Яmax}^{тек}$, В.

Следовательно величина предлагаемого управляющего импульса $\alpha_p^{предл}$ (рис. 2 а) определяется в зависимости от максимально-возможной величины выпрямленного напряжения ВИП U_{dmax} , в результате регулировочная характеристика инвертора будет иметь больший угол с фазой α_p (рис. 2 б).




 – добавочная часть области регулирования выпрямленного напряжения ВИП на четвёртой зоне при предлагаемом управляющем импульсе $\alpha_p^{предл}$.

Рисунок 2 – Регулирование выпрямленного напряжения ВИП на четвёртой зоне в режиме рекуперативного торможения:

а – диаграмма регулирования выпрямленного напряжения ВИП;

б – регулировочная характеристика инвертора

На основании вышеизложенного, авторами предлагается способ регулирования выпрямленного напряжения ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, направленный на повышение эффективности его работы за счёт расширения области регулировочной характеристики инвертора. Предлагаемый способ будет выполнен в виде подпрограммы управления режимом рекуперативного торможения на

четвёртой зоне регулирования ВИП для программного обеспечения МСУД. Его применение на электроподвижном составе в процессе эксплуатации позволит улучшить следующие показатели:

– повысить пропускную и провозную способности железных дорог Восточного полигона при увеличении скорости движения поезда по спускам;

– сократить время межпоездного интервала при использовании новой технологии «Виртуальная сцепка» в результате наращивания интенсивности движения поездов;

– обеспечить рост эффективности использования энергоресурсов при сокращении затрат электрической энергии на тягу поездов и снижении нагрузок на тяговых подстанциях за счёт увеличения возврата электрической энергии в контактную сеть;

– экономить эксплуатационные расходы по смене тормозных колодок, ремонту тормозного механического оборудования, обточке бандажей колёсных пар локомотива.

Список использованных источников

1. Устойчивое развитие // Компания ОАО «РЖД» [сайт] URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386/page/103290?id=17513> (дата обращения: 23.11.2024).

2. Засорин С.Н. Электронная и преобразовательная техника: Учебник для вузов ж.-д. трансп. Под ред. С.Н. Засорина / С.Н. Засорин, В.А. Мицкевич, К.Г. Кучма. – М.: Транспорт, 1981. – 319 с.

3. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава [Текст] / Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.

4. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы [Текст]: ИДМБ.661142.009РЭ1 (ЗТС.001.012.РЭ1) / разработчик и изготовитель – НЭВЗ / Новочеркасск. – 2006. – 265 с.

5. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. Учебник для вузов ж.-д. трансп. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.; Транспорт, 1980. – 471 с.

6. Микропроцессорная система управления и диагностики для электровоза переменного тока МСУД-015. Руководство по эксплуатации. [Текст]: АРКИ.421455.015РЭ / разработчик и изготовитель – ЗАО «ЛЭС» / Новочеркасск. – 2014. – 188 с.

7. Повышение эффективности работы современных отечественных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / А.С. Самойлова, П.В. Григоренко, С.А. Кахаев, О.В. Мельниченко // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2024. – Т. 1. – С. 108-112.

8. Мельниченко О.В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Мельниченко О.В.; [Место защиты: Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т]. – Хабаровск, 2015. – 392 с.