Мельниченко О. В., Власьевский С. В.
Oleg V. Melnichenko, Stanislav V. Vlasevskiy

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AC LOCOMOTIVES IN THE REGENERATION BRAKING MODE

Мельниченко Олег Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, дом 15; +7-902-1702437. E-mail: melnichenko@irgups.ru
Mr. Oleg V. Melnichenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, head of the Department of Electrically Propelled Vehicles, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk);664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo Str.; +7 (902) 1702437. E-mail: melnichenko@irgups.ru.

Власьевский Станислав Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47; +7-914-5475447. E-mail: vlas@festu.khv.ru
Mr. Stanislav V. Vlasevskiy - Doctor of Engineering, Professor, Department of Electrotechnical Engineering, Electromechanical Engineering, Electric Technologies, the Far Eastern State University of Transport (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk, 47, Serysheva Str.; +7 (914) 5475447. E-mail: vlas@festu.khv.ru.

Аннотация. В статье раскрыты причины низкой энергетической эффективности работы современных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения. Показан путь ее повышения с помощью применения способа расширения регулировочной области напряжения инвертора на четвертой зоне регулирования по слежению за величиной тока якоря генератора путем уменьшения регулируемого угла опережения инвертора.

Summary. In this paper we try to reveal the causes of the unsatisfactory energy efficiency of modern AC locomotives in the regeneration braking mode. Our idea is to apply the method of expanding the control range of inverter voltage at the fourth control zone for controlling the amperage of the armature current of a power generator by reducing the adjustable phase advance angle of the inverter.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, инвертор, генератор, тяговый трансформатор.

Key words: AC locomotive, regeneration braking, inverter, power generator, traction transformer.

УДК 629.423.1

В настоящее время существует проблема недостаточности энергоэффективности работы современных электровозов переменного тока с тиристорными четырехзонными выпрямительно-инверторными преобразователями. Особенно это относится к режиму рекуперативного торможения электровоза, интерес к которому проявляется потому, что он является энергосберегающим режимом, существенно снижающим эксплуатационные затраты на тягу поездов.

Научные поиски способов повышения энергетической эффективности системы рекуперативного торможения электровозов ведутся специалистами ряда научно-исследовательских и образовательных организаций нашей страны. Особую актуальность им придают большие масштабы использования электрической тяги на сети железных дорог России.

Материал поступил 21.02.2014

Анализ процессов работы четырехзонных инверторов, ведомых сетью, позволил выявить основные причины низкой энергетической эффективности режима рекуперативного торможения электровоза, коэффициент мощности которого в эксплуатации не превышает 0,65.

Снижение энергетической эффективности рекуперативного торможения связано, прежде всего, с достаточно большой величиной угла запаса инвертора (δ = 25 – 30 эл. град), который поддерживается автоматически по закону δ = const с помощью системы автоматического регулирования угла опережения β в зависимости от угла коммутации γ, состоящего из суммы двух углов: γ_1 – угол коммутации большого контура и γ_2 – угла коммутации малого контура. Установка большой величины угла запаса δ необходима потому, чтобы избежать нарушения инверторного режима в реальных условиях эксплуатации. Причина этого – влияние колебательного переходного процесса, который возникает во время коммутации и распространяется за ее пределы, вызывая повторное отпирание плеч преобразователя, тогда как они должны быть надежно заперты в пределах угла δ [1; 3].

Помимо большого угла запаса инвертора δ энергетическая эффективность современных электровозов снижается еще и потому, что для обеспечения электрической устойчивости инвертора и улучшения распределения тока нагрузки между параллельно включенными двигателями, работающими при рекуперативном торможении в режиме генератора, в цепь их якоря вводят добавочный резистор $R_д$. Однако при этом возникает достаточно большие потери энергии в добавочных резисторах, которые при высокой скорости движения и достаточно больших токах якоря генератора (700 – 800 А) на высших зонах регулирования достигают величины 12 – 15 % от всей энергии, возвращаемой в сеть. Кроме того, на электровозе при номинальном напряжении сети существует ограничение по напряжению на коллекторе генератора при регулировании напряжения инвертора на четвертой (высшей) зоне. Здесь при достижении середины четвертой зоны (т.е. три с половиной зоны) и соответствующей ей скорости движения на генераторе устанавливается номинальное значение напряжения, выше которого на нем уже нежелательно допускать. Это обстоятельство сужает область регулирования напряжения инвертора и сохраняет достаточно большую величину потерь активной энергии на добавочных резисторах.

Уменьшить эти потери можно путем постоянного поддержания уменьшенных величин тока якоря генератора $I_я$ при регулировании соответствующих тормозных сил с целью сохранения допустимых высоких скоростей движения поезда на спуске. Для этого вместо уменьшения тока возбуждения (уменьшения магнитного потока генератора, а следовательно, и уменьшение его напряжения $U_Г$), которое выполняется на 4-й зоне регулирования в настоящее время на электровозах, необходимо увеличивать выпрямленное напряжение инвертора $U_d = U_{d\,(4)}$ на этой зоне путем увеличения регулируемого угла управления тиристоров инвертора $\alpha_р$ (или иначе – уменьшения регулируемого угла опережения инвертора $\beta_р$, так как $\beta_р = \pi - \alpha_р$) в пределах зоны. В результате такое регулирование приведет к уменьшению тока $I_я$ при неизменном напряжении генератора $U_Г$. Это следует из рассмотрения выражения

$$I_я = \frac{U_Г - U_d}{\sum R}, \qquad (1)$$

где $\sum R$ – алгебраическая сумма сопротивлений всех элементов цепи тока якоря генератора.

Кроме того, при таком способе увеличивается возврат тока рекуперации из электровоза в контактную сеть, что будет видно при дальнейшем рассмотрении этого способа.

Таким образом, с целью повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения путем увеличения возврата тока рекуперации из электровоза в контактную сеть и снижения потерь энергии в добавочных резисторах предлагается применить способ расширения регулировочной области инвертора на 4-й

зоне регулирования по слежению за величиной тока якоря генератора. В этом способе поддержание на 4-й зоне диапазона высоких скоростей на уклоне пути можно обеспечить не путем регулирования в сторону уменьшения тока в обмотке возбуждения $I_в$, а регулированием в сторону уменьшения тока якоря генератора $I_я$, сохраняя неизменным ток возбуждения $I_в$ при соответствующей скорости движения электровоза. Такой способ регулирования в случае уменьшения величины уклона пути (а следовательно, и уменьшения тормозной силы) осуществляется с помощью увеличения выпрямленного напряжения инвертора U_d путем изменения в сторону уменьшения угла $\beta_р$ от 180 до 30 эл. град и, наоборот, при увеличении уклона пути (увеличения тормозной силы) – уменьшение U_d путем увеличения $\beta_р$. В генераторе в этом случае можно поддержать соотношение $I_в / I_я \geq 0{,}5$ в более широком диапазоне высоких скоростей, чем в существующей системе. Поддержание такого соотношения токов необходимо для обеспечения нормальной машинной коммутации на коллекторе генератора.

Рассмотрим более подробно данный механизм повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения.

Согласно [1], номинальные напряжения холостого хода тяговых обмоток трансформатора равны 1230 В (4-я зона), 922,5 (3-я зона), 615 В (2-я зона) и 307,5 В (1-я зона). Эти данные напряжений и коэффициенты трансформации трансформатора по зонам регулирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Напряжение и коэффициенты трансформации трансформатора электровоза ВЛ80Р по зонам регулирования

Номер зоны регулирования напряжения	1	2	3	4
Номинальное напряжение сетевой обмотки, В	25 000			
Напряжение холостого хода тяговых обмоток, В	307,5	615	922,5	1230
Коэффициент трансформации тягового трансформатора, $K_т$	81,3	40,6	27,1	20,3

На рис. 1 представлена упрощенная схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме электрического рекуперативного торможения.

В качестве примера на рис. 2 представлена диаграмма выпрямленного напряжения при работе инвертора на 4-й зоне регулирования. Известно, что регулирование среднего значения выпрямленного напряжения на 4-й зоне осуществляется с помощью подачи регулируемых импульсов управления с фазой $\beta_р$ на тиристорные плечи V3 в одном полупериоде напряжения и V4 в другом полупериоде, находящихся внутри внешнего моста инвертора, образованного плечами V1, V2, V7 и V8. Плечи V3 и V4 присоединены к выводу 1 регулируемой секции a_1-1 вторичной обмотки трансформатора. В результате открытия данных плеч выпрямленное напряжение инвертора от регулируемой секции вычитается из выпрямленного напряжения инвертора от суммы всех секций вторичной обмотки трансформатора на 4-й зоне, что обеспечивает регулирование выпрямленного напряжения $U_{d(4)}$ 4-й зоны, а значит, и регулирование тока якоря генератора $I_я$ согласно (1).

В то же время в момент времени $\beta_р$ происходит переключение суммы секций a_1-1, 1-2 и 2-x_1 вторичной обмотки трансформатора, участвующих в образовании более высокой 4-й зоны, на сумму секций 1-2 и 2-x_1, участвующих в создании более низкой 3-й зоны (происходит переход с 4-й на 3-ю зону). В результате такого переключения происходит изменение коэффициента трансформации тягового трансформатора $K_т$ с одной меньшей величины на другую большую вследствие того, что меняется (уменьшается) количество витков секций вторичной обмотки трансформатора, участвующих в процессе инвертирования.

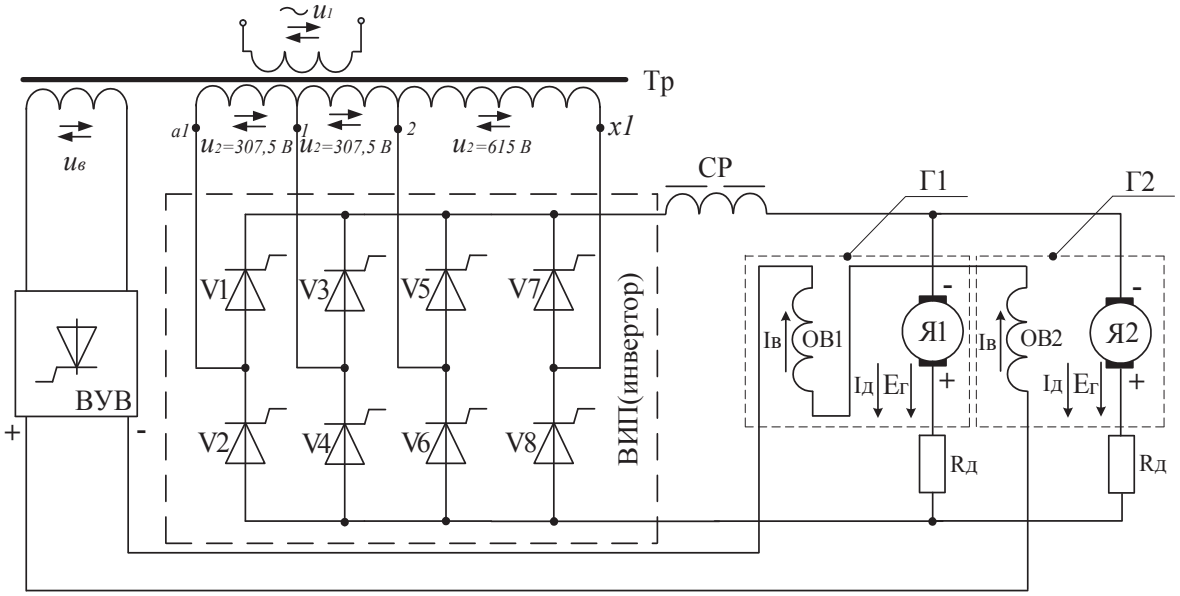

Рис. 1. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения:
Тр – трансформатор; ВИП (инвертор) – выпрямительно-инверторный преобразователь; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; СР – сглаживающий реактор; Г1 и Г2 – генераторы независимого возбуждения; Я – якорь генератора; ОВ – обмотка возбуждения генератора; $R_Д$ – добавочный резистор; V1 – V8 – тиристорные плечи ВИП

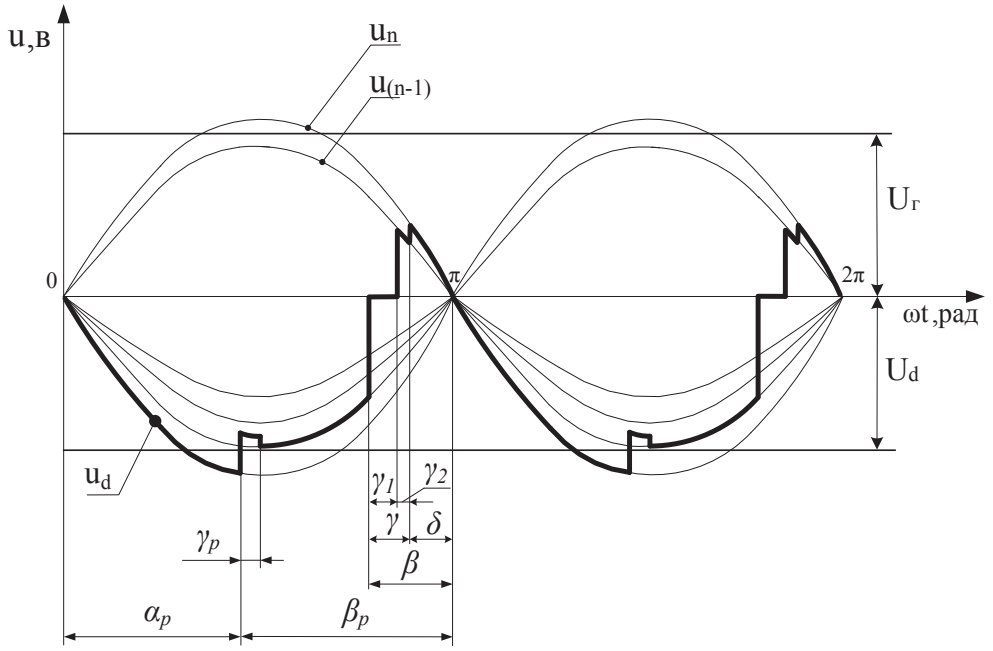

Рис. 2. Диаграмма выпрямленного напряжения при работе четырехзонного инвертора на 4-й зоне регулирования:
u_n и $u_{(n\text{-}1)}$ – переменное напряжение вторичной обмотки трансформатора, подаваемое на инвертор, на последующей n-й зоне регулирования кроме 1-й (при n = 4) и на предыдущей (n-1) зоне; $U_Г$ – напряжение генератора; U_d – среднее выпрямленное напряжение инвертора; β – угол опережения инвертора; δ – угол запаса инвертора; γ_1 – угол коммутации большого контура; γ_2 – угол коммутации малого контура; γ – суммарный угол коммутации; $\gamma_р$ – регулируемый угол коммутации; $\alpha_р$ – регулируемый угол управления инвертора; $\beta_р$ – регулируемый угол опережения инвертора

Уменьшение количества витков приводит к уменьшению величины действующего значения напряжения $U_2 = U_{(3)}$ вторичной обмотки трансформатора, подаваемого на плечи инвертора на соответствующей более низкой (третьей) зоне регулирования (см. рис. 2).

Величина среднего выпрямленного напряжения U_d инвертора на холостом ходу в конце любой зоны регулирования (полная зона) определяется выражением, в котором выполняются следующие соотношения: $\beta_р = \beta$ и $\alpha_р = \pi - \beta_р$

$$U_d = \frac{1}{\pi}\int_{\pi-\beta}^{2\pi-\beta} U_m \cdot \sin\omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \Big|_{\pi-\beta}^{2\pi-\beta} - \cos\omega t = \\ = \frac{\sqrt{2}}{\pi}(-\cos\beta - \cos\beta)\cdot U = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U(-\cos\beta) = -\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \cdot \cos\beta. \quad (2)$$

Знак минус в (2) означает, что при инвертировании выпрямленное напряжение меняет свою полярность на обратную по отношению к выпрямлению. Величина среднего выпрямленного напряжения $U_{d(4)}$ инвертора, например, на 4-й зоне под нагрузкой без учета регулируемой коммутации $\gamma_Р$ в силу ее малости (допущение в этой статье) определяется выражением, в котором проделаны предварительные преобразования и выполняются следующие соотношения:

$$\beta = \delta + \gamma \quad \text{и} \quad \cos(\delta + \gamma) = \cos\delta - \frac{2X_т I_d K_{тп}}{\pi},$$

$$U_{d(4)} = \frac{1}{\pi}\left(\int_{\pi-\delta}^{2\pi-\beta_P} \sqrt{2}U_{(4)} \cdot \sin\omega t d\omega t + \int_{2\pi-\beta_P}^{2\pi-\delta} \sqrt{2}\varepsilon U_{(4)} \cdot \sin\omega t d\omega t\right) = \\ = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{(4)}((1+\varepsilon)\cos\delta + (1-\varepsilon)\cos\beta_р) - \frac{2X_т I_d K_{тп}}{\pi}, \quad (3)$$

где $\varepsilon = \dfrac{U_{(3)}}{U_{(4)}}$ – отношение действующих значений напряжений вторичной обмотки трансформатора на 3-й и 4-й зоне; $K_{тп} = \dfrac{K_{т3}}{K_{т4}}$ – отношение коэффициентов трансформации трансформатора 3-й и 4-й зоны; $X_Т$ – индуктивное сопротивление обмоток трансформатора на 4-й зоне; I_d – среднее значение выпрямленного тока инвертора.

Из теории электротехники переменного синусоидального тока известно, что между действующим значением переменного напряжения и его средним значением, которым является выпрямленное напряжение инвертора, существует зависимость в виде коэффициента формы $K_Ф$

$$K_Ф = \frac{U}{U_d} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}1.$$

Опираясь на это соотношение при регулировании $U_{d(4)}$ на 4-й зоне путем изменения угла $\beta_р$, можно рассчитать изменение величины действующего значения переменного напряжения $U_{(4)}$ суммы трех секций вторичной обмотки тягового трансформатора, используемого в инверторе на 4-й зоне регулирования для инвертирования постоянного тока генератора в сеть.

Используя все эти данные, произведем расчет изменения среднего значения выпрямленного напряжения $U_{d(4)}$ и действующего значения переменного напряжения $U_{(4)}$ на 4-й зоне

в процессе изменения угла $\beta_р$ от 180 до 30 эл. град, а также действующего значения переменного напряжения полной 3-й зоны $U_{(3)}$ без регулирования угла $\beta_р$, что эквивалентно началу 4-й зоны. Расчет выполним при условии номинальной токовой нагрузки для якорной цепи генератора ($I_я$ = 900 А) и для инвертора (I_d = 2 □ 900 = 1800 А – инвертор нагружен на два генератора), а также при условии, что δ = 30 эл. град, $K_Т$ = 0,75, $X_Т$ = 0,05 Ом. Результаты этого расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения напряжений $U_{d(4)}$ и $U_{(4)}$ на 4-й зоне в зависимости от угла $\beta_р$ и $U_{(3)}$ на 3-й зоне без регулирования угла $\beta_р$ при действии номинальной токовой нагрузки

$\beta_р$, эл. град	180	150	120	90	60	30
$U_{d(4)}$ (4-я зона), В	611,46	633,55	680,49	749,52	818,56	865,5
$U_{(4)}$ (4-я зона), В	678,72	703,24	755,34	831,96	908,60	960,70
$U_{(3)}$ (3-я зона), В	678,72	678,72	678,72	678,72	678,72	678,72

По данным табл. 2 можно рассчитать отношения величины действующего значения напряжения секций вторичной обмотки тягового трансформатора на 4-й зоне регулирования в зависимости от изменения величины угла $\beta_р$ к действующему значению напряжения на полной 3-й зоне. Это отношение принимаем в качестве коэффициента регулирования $K_р$ величины действующего значения переменного напряжения на 4-й зоне. В табл. 3 даны значения коэффициента регулирования $K_р$ в зависимости от величины угла $\beta_р$.

Таблица 3

Значения коэффициента регулирования $K_р$ в зависимости от величины угла $\beta_р$

$\beta_р$, эл. град	180	150	120	90	60	30
$K_р = \dfrac{U_{(4)}}{U_{(3)}}$	1,00	1,036	1,112	1,225	1,338	1,415

По расчетным данным табл. 3 построена зависимость $K_р = f(\beta_р)$ на 4-й зоне регулирования, представленная на рис. 3.

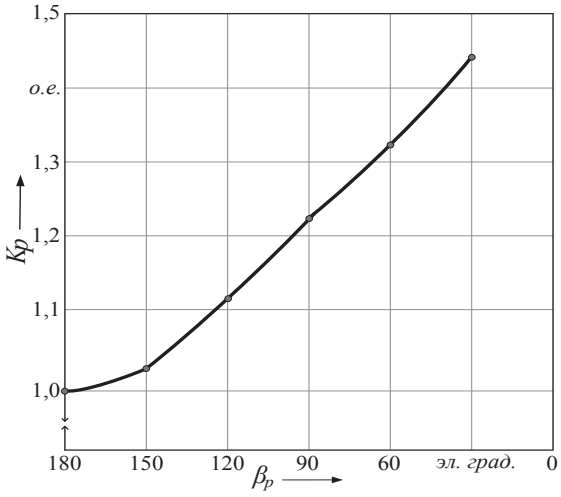

Рис. 3. Зависимость коэффициента регулирования $K_р$ действующего значения напряжения вторичной обмотки трансформатора на 4-й зоне регулирования от величины угла $\beta_р$

Как было сказано выше, поддержание на 4-й зоне постоянной по величине скорости движения поезда на уклоне пути можно осуществить путем регулирования тока якоря генератора, сохраняя неизменным его ток возбуждения. В результате тормозная сила будет также регулироваться. Диапазон применения этих скоростей будет зависеть от величины уклона и других элементов профиля пути. В случае, когда величина уклона (спуска) пути уменьшается, требуется снижение тормозной силы электровоза с целью сохранения достигнутой ранее высокой скорости движения поезда. Для этого необходимо уменьшать ток якоря генератора $I_я$ путем увеличения U_d с помощью уменьшения угла $\beta_р$. Когда величина уклона увеличивается, то ток необходимо увеличивать путем уменьшения U_d с помощью увеличения угла $\beta_р$.

Известно, что коэффициент трансформации трансформатора $K_Т$ равен отношению витков или напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора, а при работе трансформатора под нагрузкой $K_Т$ можно определить и как отношение токов его вторичной и первичной обмоток

$$K_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \qquad (4)$$

В секции электровоза ВЛ80Р находится один тяговый трансформатор и два инвертора, каждый из которых нагружен на два параллельно включенных генератора. В итоге две пары параллельно включенных генераторов нагружены через свои инверторы на вторичные обмотки тягового трансформатора. В результате ток во вторичных обмотках трансформатора I_2 будет складываться из токов четырех генераторов, т.е. $I_2 = 4I_я$. Используя (4), получим следующее выражение:

$$I_1 = \frac{I_2}{U_1} U_2. \qquad (5)$$

Для 4-й зоны, используя табл. 2, получим данные для расчета значений тока I_1 в первичной обмотке трансформатора при поддержании постоянным по величине тока I_2 во вторичной обмотке трансформатора в зависимости от значений напряжения $U_2 = U_{(4)}$, которые, в свою очередь, зависят от величины угла $\beta_р$.

Чтобы увеличить возврат тока рекуперации из электровоза в контактную сеть при условии поддержания постоянной высокой скорости движения и изменении профиля пути, необходимо ток якоря генератора $I_я$, а соответственно, и ток I_2 поддерживать постоянным во всем интервале изменения угла $\beta_р$. Согласно выражению (1), это можно сделать путем увеличения $U_Г$ через увеличение тока возбуждения $I_В$ с одновременным увеличением U_d путем уменьшения угла $\beta_р$.

В диапазоне скоростей движения (50 – 80 км/ч) на 4-й зоне регулирования величину тока якоря генератора $I_я$ необходимо поддерживать в диапазоне 300 – 600 А.

В табл. 4 представлен расчет возврата в сеть тока рекуперации I_1 в первичной обмотке трансформатора на 4-й зоне регулирования при постоянстве различных величин тока якоря генератора $I_я$, а следовательно, и тока I_2 во вторичной обмотке трансформатора в зависимости от уменьшения угла $\beta_р$.

По расчетным данным табл. 4 построены графики зависимостей $I_1 = f(\beta_р)$ возврата тока рекуперации в первичной обмотке трансформатора I_1 на 4-й зоне регулирования при уменьшении угла $\beta_р$, представленные на рис. 4.

Полученные зависимости $I_1 = f(\beta_р)$ при неизменной высокой скорости во время регулирования напряжения инвертора U_d на 4-й зоне и при условии поддержания постоянной величины тока якоря генератора $I_я$ показывают, что с уменьшением угла $\beta_р$ возврат тока I_1 в сеть увеличивается. В то же время с возрастанием самой величины тока якоря генератора $I_я$

возврат тока I_1 в контактную сеть увеличивается на большую величину в равных условиях изменения $\beta_р$.

Таблица 4

Возврат тока рекуперации I_1 в зависимости от уменьшения угла $\beta_р$

При условии $I_Я$ = 300 А (I_2 = 300 □ 4 = 1200 А) и U_1 = 25 000 В						
$\beta_р$, эл. град	180	150	120	90	60	30
U_2, В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1, А	32,5	33,7	36,2	39,9	43,6	46,1
При условии $I_Я$ = 400 А (I_2 = 400 □ 4 = 1600 А) и U_1 = 25 000 В						
U_2, В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1, А	43,4	45	48,3	53,2	58,1	61,4
При условии $I_Я$ = 500 А (I_2 = 500 □ 4 = 2000 А) и U_1 = 25 000 В						
U_2, В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1, А	54,2	56,2	60,4	66,5	72,6	76,8
При условии $I_Я$ = 600 А (I_2 = 600 □ 4 = 2400 А) и U_1 = 25 000 В						
U_2, В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1, А	65,2	67,5	72,5	79,9	87,2	92,2

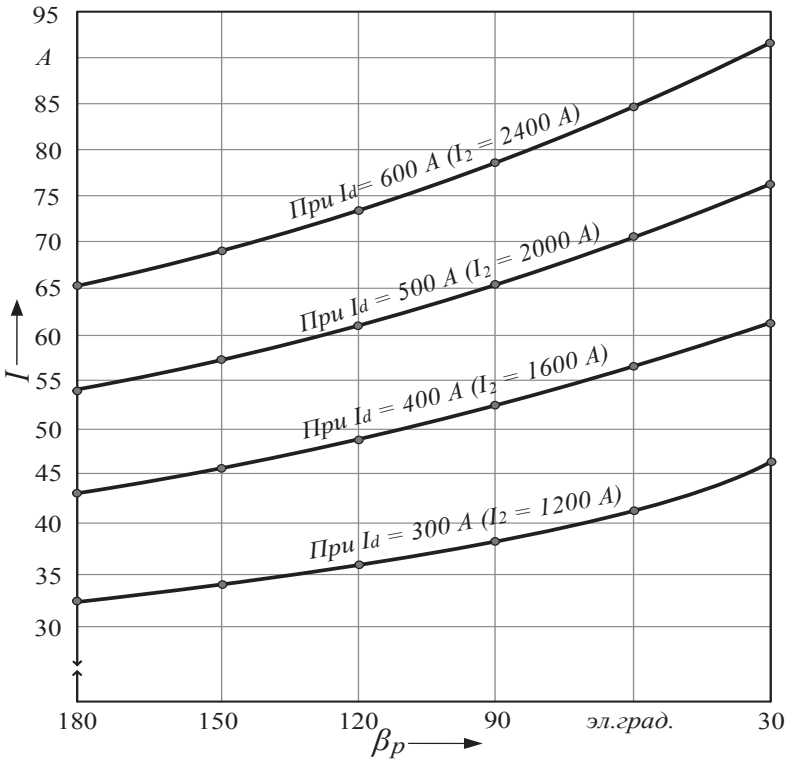

Рис. 4. Зависимость $I_1 = f(\beta_р)$ при регулировании U_d инвертора на 4-й зоне

Поддержание тока $I_Я$ по закону $I_Я$ = const возможно только в том случае, если одновременно с увеличением напряжения U_d на 4-й зоне посредством уменьшения угла $\beta_р$ будет увеличиваться и напряжение генератора $U_Г$ путем увеличения его тока возбуждения $I_В$. Такой закон управления необходимо обеспечить с помощью системы автоматического регулирования.

Выводы:

1. Предложен способ расширения регулировочной области инвертора (свыше 3,5 зон) электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения по слежению за величиной тока якоря генератора, который позволяет повысить энергетическую эффективность рекуперативного торможения электровоза за счет уменьшения регулируемого угла опережения $\beta_р$.

2. С возрастанием величины тока якоря генератора $I_Я$ возврат тока I_1 в контактную сеть увеличивается на большую величину в равных условиях изменения $\beta_р$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.
2. Электровоз ВЛ80Р: Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1985. – 622 с.
3. Кулинич, Ю. М. Повышение энергетической эффективности пассивного компенсатора электровоза переменного тока / Ю. М. Кулинич, В. К. Духовников // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 20-28.