



УДК 629.423.31

© 2013 г. **В.А. Соловьев**, д-р техн. наук,
А.И. Малюкова

(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет),

С.В. Власьевский, д-р техн. наук

(Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск)

ВЫРАВНИВАНИЕ НАГРУЗОК В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЦЕПЯХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА, И СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы выравнивания нагрузок в параллельных цепях тяговых двигателей, работающих в режиме генератора, и повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет системы автоматического выравнивания нагрузок.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, система управления, потери энергии.

Введение

К системам электрического рекуперативного торможения электровозов переменного тока предъявляются требования электрической устойчивости и равномерного распределения нагрузок между параллельно включенными тяговыми электродвигателями, работающими в режиме генератора. Кроме того, система управления рекуперативным торможением должна допускать возможно меньшие отклонения токов генераторов и их тормозных сил при колебаниях напряжения в сети. Для получения электрически устойчивой системы рекуперативного торможения тяговые электродвигатели переводят в режим генератора с независимым возбуждением. Однако при независимом возбуждении тяговые машины имеют жесткие характеристики, при которых в силу небольших отклонений в их магнитных характеристиках может возникнуть большая неравномерность в нагрузках параллельно включенных машин и большие изменения их нагрузок при колебаниях напряжения в сети. При изготовлении и ремонте неизбежны различные отклонения размеров деталей, технологии обработки и качества применяемых материалов в допустимых пределах. По этой причине скоростные и электротяговые характеристики каждой электрической машины несколько различаются. Разные колесные пары также могут иметь допустимые отклонения в диаметрах колес. Все эти различия и отклонения являются причиной неравномерного распределения нагрузок

по параллельно включенным тяговым электродвигателям, работающих в режиме генератора [1].

Система выравнивания нагрузок

На рис. 1 показана упрощенная принципиальная схема силовых цепей одной тележки четырехосной секции магистрального электровоза 2ЭС5К в режиме рекуперативного торможения. Каждая секция электровоза оборудована двумя четырехзонными тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). В контуре регулирования тока управляющий сигнал α_p отпирания тиристоры ВИП формируется по наибольшему из сигналов всех датчиков тока [3]. Таким образом, в системе управления не учитывается неравномерность токов в параллельных цепях тяговых двигателей, работающих в режиме генератора.

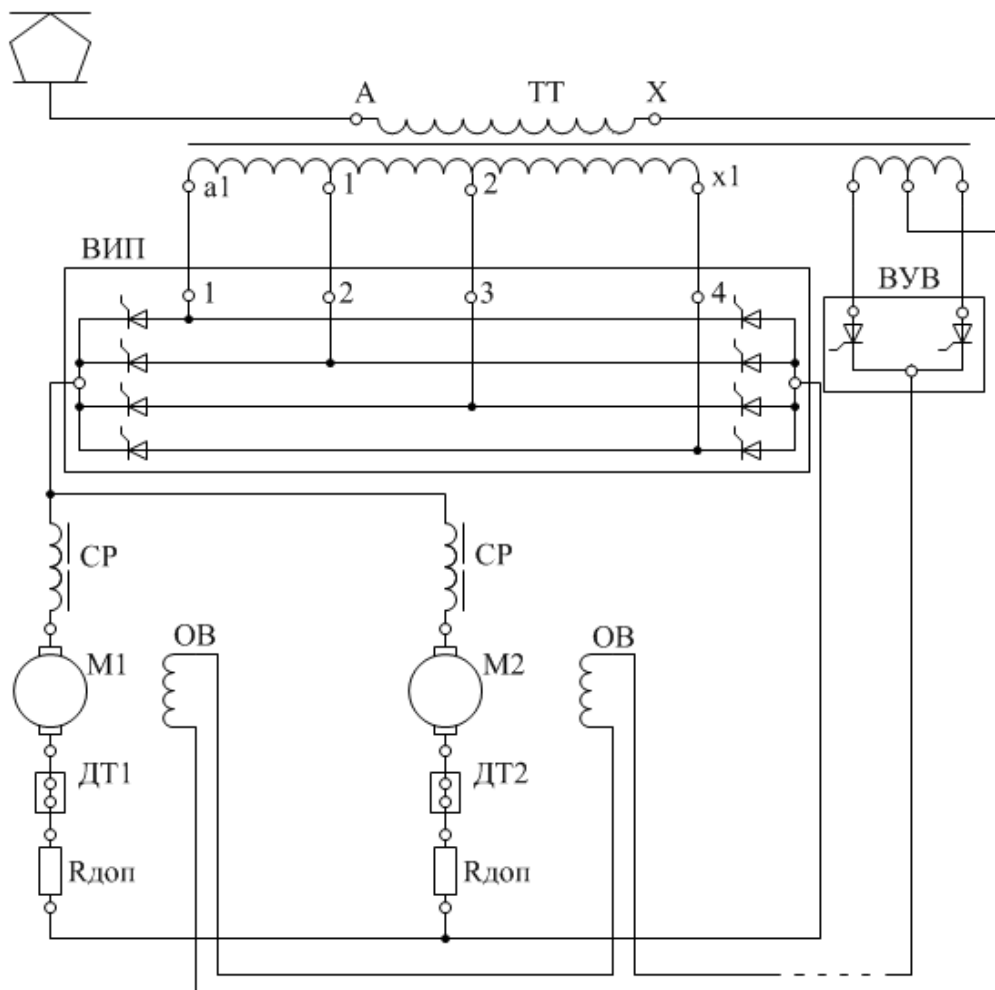


Рис. 1. Принципиальная схема силовых цепей в режиме рекуперации.

Блок дополнительных (балластных) резисторов $R_{доп}$, включенный последовательно с якорем электрической машины, предназначен для обеспечения электрической устойчивости рекуперативного торможения, а также для улучшения распределения тока между параллельно включенными якорями тяговых двигателей, работающих в режиме генератора [3]. Выравнивание токов в параллельных цепях электрических машин происходит вследствие падений напряжения в резисторах $R_{доп}$. Выравнивающее действие резисторов проявляется в изменении на-

пряжения, подведенного к якору генератора каждой параллельной цепи. Однако такое действие связано с потерями энергии [4] и не обеспечивает полной компенсации разности токов (рис. 2). Поэтому целесообразно применять в качестве дополнительных резисторов управляемые сопротивления с диапазоном изменения сопротивления от номинального значения $R_{\text{доп ном}}$ до минимального его значения $R_{\text{доп мин}}$, при котором еще сохраняется электрическая устойчивость рекуперативного торможения и ток якоря не превышает допустимого значения.

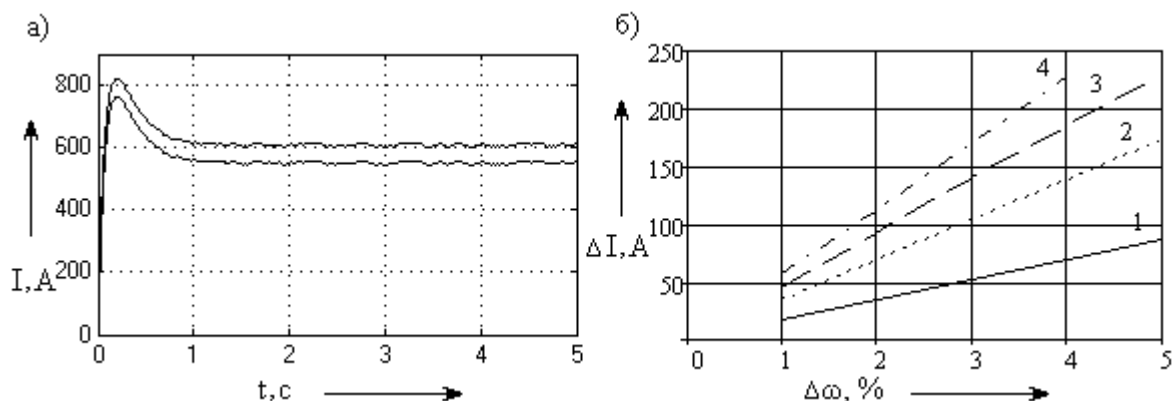


Рис. 2. Распределение токовой нагрузки двух тяговых двигателей, работающих в режиме генератора: а – на 4-й зоне регулирования при рассогласовании частот вращения их якорей в 1%; б – зависимости разности токов их якорей от величины рассогласования частот вращения для 1 – 4 зон регулирования.

Для получения возможности изменения величины сопротивления предлагается параллельно резистору подключать силовой управляемый ключ. Подавая на ключ отпирающие импульсы, длительность которых пропорциональна величине разности токов якорей двигателей М1 и М2, работающих в режиме генератора, будем уменьшать падение напряжения на балластном резисторе. В результате увеличивается ток, протекающий по недогруженной цепи.

На рис. 3 приведена функциональная схема системы выравнивания токов. Входным сигналом для подсистем С1 и С2 формирования импульсов является разность токов, полученная как разница показаний датчиков тока якорей (ДТ1 и ДТ2, см. рис. 1) $\Delta I = I_{я1} - I_{я2}$ для системы С2 и минус ΔI – для системы С1. При возникновении положительной разности ΔI она масштабируется и подается на вход регулирующего звена Р2, на выходе которого формируется сигнал $U_p(\Delta I)$.

Угол отпираания ключа К2 системы С2 вычисляется как $\varphi = \pi - \arcsin(U_p)$. Таким образом, часть полупериода от 0 до φ ток протекает через балластный резистор, а от φ до π – через открывшийся ключ, т.е. $R_{\text{доп}} = \varphi/\pi \cdot R_{\text{доп ном}}$. Чем больше положительная разность $\Delta I = I_{я1} - I_{я2}$, тем больше $\arcsin(U_p)$ и тем раньше отпирается транзистор, уменьшая падение напряжения на $R_{\text{доп ном}}$ и увеличивая ток в цепи генератора М2. Величина $\arcsin(U_p)$ ограничена пределами от 0 до π , поэтому при возникновении отрицательной разности ΔI угол отпираания ключа К2 $\varphi_2 = \pi$, т.е. в течение всего полупериода ток протекает через дополнительный резистор. Так как на вход С1 разность подается с противоположным знаком, то в случае, если $\Delta I = I_{я1} - I_{я2} < 0$, сигнал отпираания будет формироваться для ключа К1 цепи генератора М1. Звенья Р1 и Р2 представляет собой ПИ-регуляторы, которые могут быть реализованы на основе интеллектуальных алгоритмов.

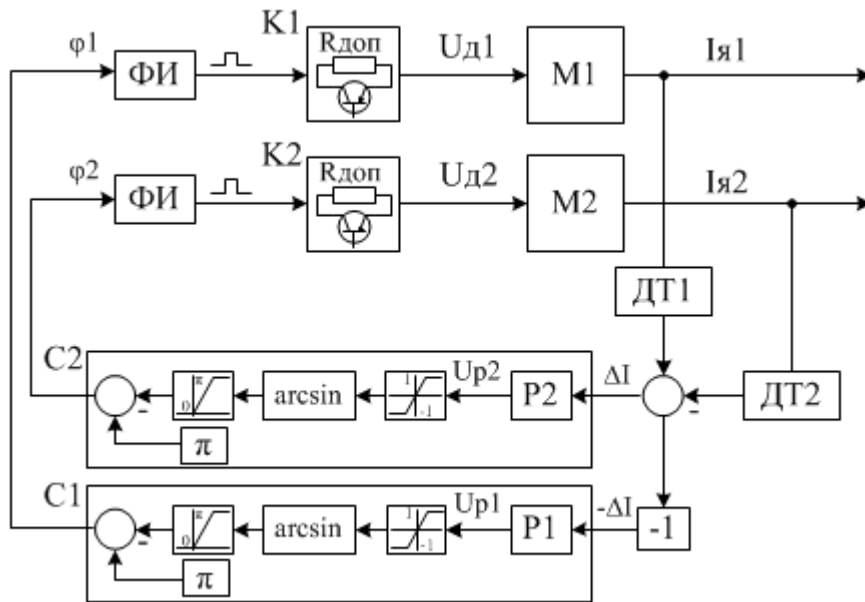


Рис. 3. Функциональная схема системы выравнивания токов.

Рассмотрим выравнивающее действие системы, в которой участвует выпрямленное напряжение U_n преобразователя (инвертора), зависящее от величины напряжения в контактной сети, и ЭДС двух параллельно включенных генераторов с отличающимися друг от друга величинами E_1 и E_2 , что вызвано различием их характеристик. В параллельной цепи генераторов возникает неравномерность токов, вызванная разностью ЭДС генераторов E_1 и E_2 . На рис. 4 показано выравнивающее действие системы при возникновении неравномерности токов генераторов $I_{я1}$ и $I_{я2}$.

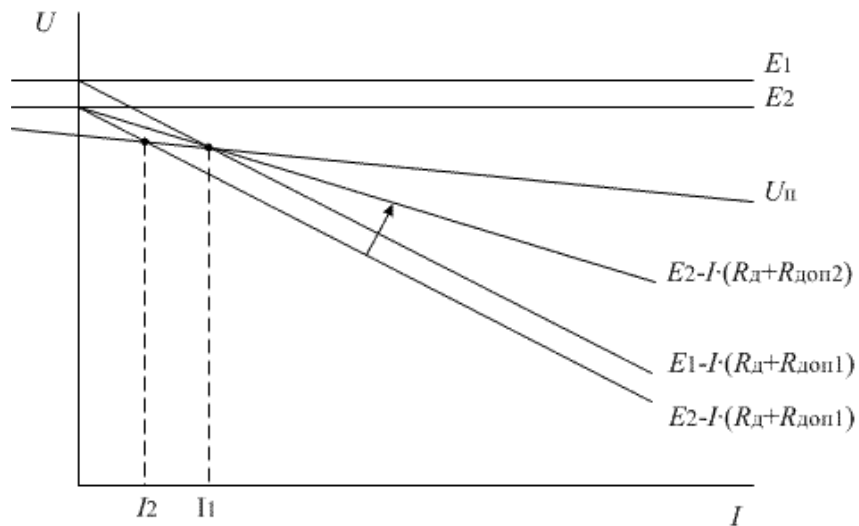


Рис. 4. Выравнивание нагрузок при неравномерности токов, вызванной разностью ЭДС генераторов.

Определим диапазон допустимых значений $R_{доп}$, исходя из условий, описанных выше. Требованиям электрической устойчивости удовлетворяют системы рекуперативного торможения, у которых внешняя характеристика параллельно включенных генераторов независимого возбуждения с учетом падения напряжения на $R_{доп}$ в цепи каждого из них снижается с увеличением тока [4]. С другой стороны, описанная система направлена на увеличение тока недогруженной машины

до значения, установившегося в параллельной ей цепи. Таким образом, требования, описанные выше, выполняются при любых значениях дополнительного сопротивления $R_{\text{доп}}$.

Для оценки эффективности работы предложенной схемы выравнивания нагрузки было произведено моделирование работы силовой схемы и системы управления электровоза 2ЭС5К, на котором установлены тяговые двигатели НБ-514Б, работающие в режиме генератора. При моделировании работы системы с использованием пакета программ MATLAB были получены следующие результаты. При заданном токе рекуперации 600 А на 4-й зоне регулирования при разности линейных скоростей осей в 1% разность токов при нерегулируемом сопротивлении составила около 60 А (рис. 2). При включении системы выравнивания разность была практически устранена за 1 с. Схожие результаты были получены для всех четырех зон при различных значениях рассогласования скоростей. На рис. 5 приведены результаты моделирования для двух зон (3-й и 4-й) регулирования при рассогласовании скоростей в 2%. Таким образом, описанная система позволяет равномерно распределять токовые нагрузки между параллельно включенными тяговыми электродвигателями, работающими в генераторном режиме.

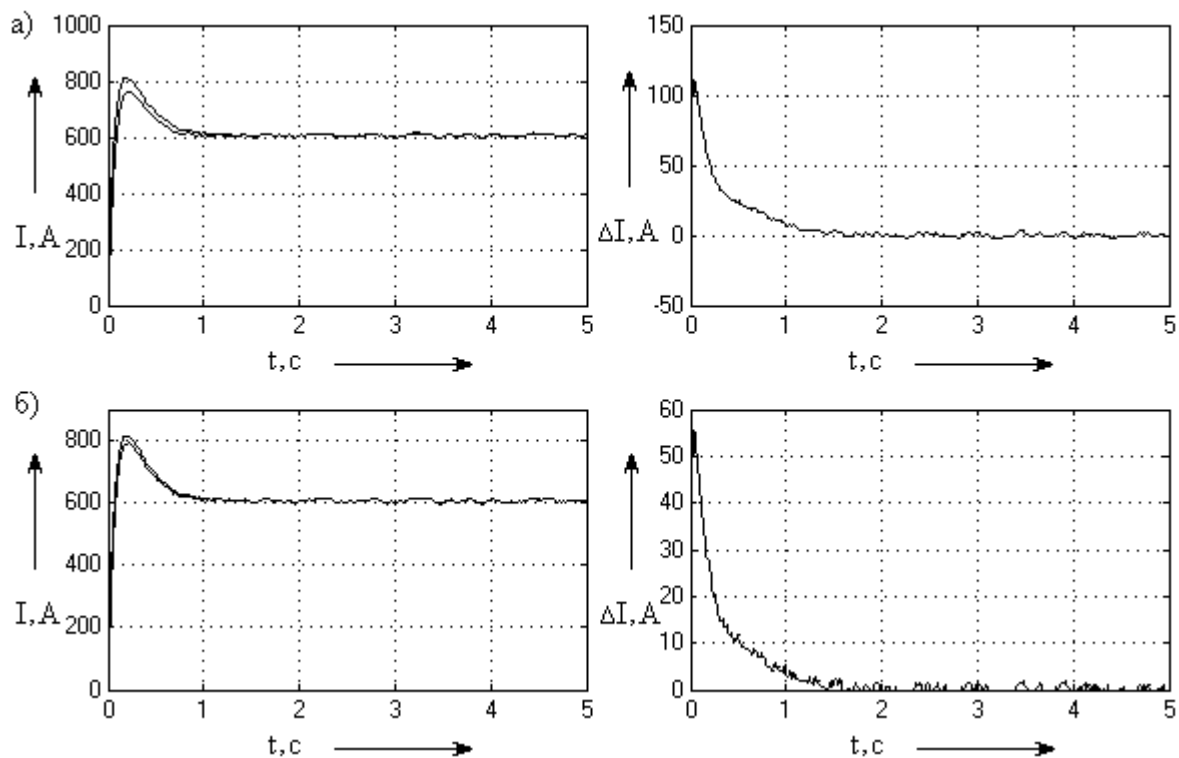


Рис. 5. Распределение нагрузки тяговых двигателей при выравнивании токов на 4-й (а) и 3-й (б) зонах при разнице частот вращения в 2 %.

Кроме равномерного распределения нагрузок в системе рекуперативного торможения при колебаниях напряжения в контактной сети необходимо автоматически поддерживать примерно один и тот же ток рекуперации, а значит, и тормозной момент, установленный в зависимости от условий движения поезда. Толчки тока и тормозной силы могут отразиться на плавности движения состава. В этой связи регулирование сопротивления $R_{\text{доп}}$ может быть применено не только для компенсации отклонения токов, но и в дополнение к существующей на электро-

зе системе регулирования посредством изменения угла отпирания тиристоров ВИП, которая реагирует на изменение тока относительно заданного значения от действия внешних возмущений (например, колебания напряжения в контактной сети). Для этого необходимо ввести в рассматриваемую систему выравнивания токов обратную связь по уровню выпрямленного напряжения преобразователя $U_{п}$, зависящему от колебаний напряжения в контактной сети. На рис. 6 показано компенсирующее действие такой системы.

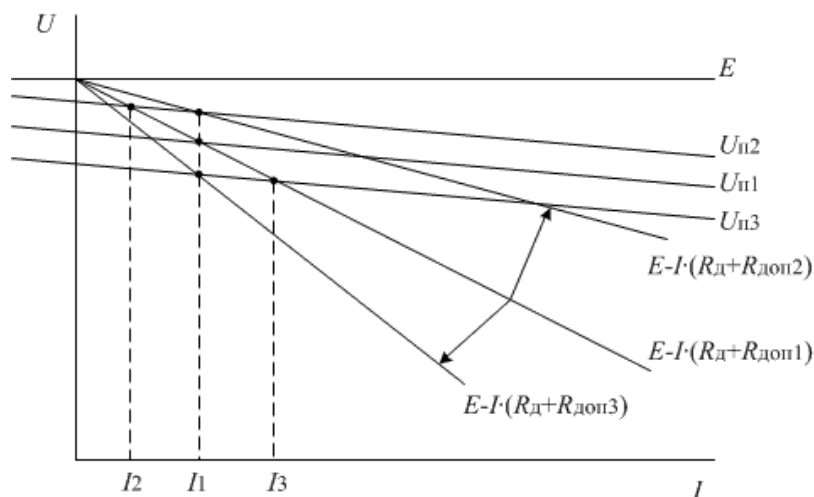


Рис. 6. Компенсация отклонений токов при колебаниях напряжения в контактной сети, $R_{доп2} < R_{доп1} < R_{доп3}$.

При увеличении напряжения $U_{п}$ с первоначального значения $U_{п1}$ до $U_{п2}$ ток в цепи двигателей уменьшится со значения I_1 до I_2 , что приведет к снижению тормозной силы. В этом случае уменьшение $R_{доп}$ смещает внешнюю характеристику ТЭД вверх и точка электрического равновесия возвращается в положение, при котором $I = I_1$. При снижении напряжения в контактной сети до $U_{п3}$ увеличение $R_{доп}$ восстанавливает значение тока, возросшего до значения I_3 .

Снижение энергетических потерь на дополнительных резисторах

Помимо выравнивания токовой нагрузки, предлагаемое техническое решение позволяет значительно снижать потери электрической энергии на регулируемых дополнительных резисторах $R_{доп}$. Во время прохождения тока через дополнительный резистор электрическая энергия преобразуется в тепловую и выделяется в окружающую среду. Эту энергию можно оценить как квадрат силы тока, умноженный на значение сопротивления. Для исходной системы энергия, выделяемая в дополнительных резисторах, равна:

$$W_1 = I_{я1}^2 \cdot R_{доп} + I_{я2}^2 \cdot R_{доп} = R_{доп}(I_{я1}^2 + I_{я2}^2) = R_{доп}(I_{я1}^2 + (I_{я1} - \Delta I)^2).$$

Для случая выравнивания нагрузок:

$$W_2 = I_{я1}^2 \cdot R_{доп} + I_{я1}^2 \cdot \varphi/\pi \cdot R_{доп} = I_{я1}^2 \cdot R_{доп}(1 + \varphi/\pi).$$

На рис. 7 показаны кривые, отмеченные цифрой 1, которые соответствуют исходной системе для 1 – 4-й зон, и кривые, отмеченные цифрой 2, – для случая выравнивания нагрузок также для 1 – 4-й зон. В диапазоне рассогласования нагрузок ΔI от 0 до 170 А предложенная схема позволяет экономить до 100% энергии, выделяемой в сопротивлении в виде тепла. Однако при разностях токов более 170

А количество расходуемой энергии увеличивается по сравнению с исходной системой.

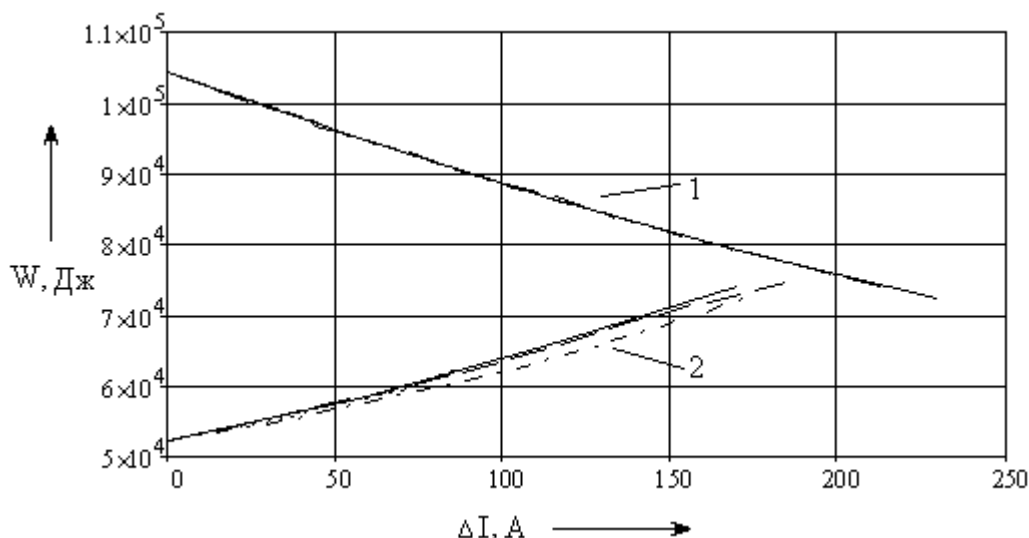


Рис. 7. Потери энергии для 1– 4-й зон при различных значениях рассогласования нагрузок в случае их выравнивания (2) и без такового (1).

Заключение

Рассмотренная система выравнивания токовой нагрузки в режиме рекуперативного торможения электровозов переменного тока позволяет:

равномерно распределить нагрузки по параллельным цепям ТЭД, работающих в генераторном режиме. Введение регулируемого дополнительного сопротивления в каждую цепь дает возможность уменьшать сопротивление недогруженной цепи, увеличивая ток рекуперации, а также может позволить компенсировать отклонения токов, связанные с колебаниями напряжения в контактной сети;

значительно снижать потери электрической энергии на регулируемых дополнительных резисторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов – М.: УМК МПС России, 2000.
2. Якушев А.Я. Исследование системы автоматического управления тяговыми электродвигателями электровозов переменного тока – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010.
3. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации.
4. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты – М.: Транспорт, 1980.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.

E-mail:

Соловьев Вячеслав Алексеевич – kerapu@knastu.ru;

Малюкова Александра Игоревна – malyukovaai@rambler.ru;

Власьевский Станислав Васильевич – vlas@festu.khv.ru.