

способствует улучшению состояния как пути, так и самого подвижного состава. В результате получает выгоды как провайдер инфраструктуры, так и операторы.

На ближайшее будущее запланировано внедрение на сети железных дорог Нидерландов и других систем мониторинга. Например, все топливозаправочные станции намечено оснастить устройствами считывания информации с маркеров системы идентификации подвижного состава. Таким образом станет возможным полностью автоматизировать контроль за потреблением топлива каждой единицей подвижного состава с дизельным тяговым приводом и своевременно принимать меры по улучшению технического состояния дизелей, перерасходу топлива. Намечена также разработка систем постоянного контроля за содержанием вредных веществ в выхлопных газах, за уровнем шума и

вибраций, возникающих при движении поездов. Местоположение пилотных постов таких систем определено в рамках проекта Footprint общеевропейской программы Eureka. Следует в этой связи отметить, что, например, информацию об уровне и частотном спектре излучаемого шума, получаемую в результате измерений от такой системы, предполагают использовать не только органы экологического контроля, но и службы локомотивного и вагонного хозяйства для выявления дефектных буксовых подшипников. Следовательно, комплекс разнообразных систем мониторинга обеспечит в недалекой перспективе всесторонний контроль за состоянием практически всех технических средств железнодорожного транспорта.

*G. den Buurman. European Railway Review, 2005, № 3, p. 80 – 86.*

## Использование резисторов для повышения эффективности рекуперативного торможения с высокой скоростью

*Рекуперативное торможение в настоящее время широко применяется на электрифицированных железных дорогах для регулирования скорости движения поездов от максимальной практически до нулевой. Однако его использованию зачастую препятствуют ограничения по напряжению, вырабатываемому тяговыми двигателями в генераторном режиме. Научно-исследовательским институтом железнодорожной техники Японии (RTRI) предложен метод снятия этих ограничений за счет введения в цепь дополнительных резисторов.*

### Введение

В последнее время все в больших масштабах стал вводиться в эксплуатацию электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями с векторным регулированием, получающими питание от инверторов. Такие электровозы и электропоезда доказали свою эффективность с точки зрения контроля за боксованием и проскальзыванием, а также управле-

ния рекуперативным торможением в условиях переменной нагрузки.

Вместе с тем остаются в силе ограничения в применении рекуперативного торможения, обусловленные тем, что напряжение, генерируемое тяговыми двигателями, по величине не может превышать напряжения контактной сети, а также предельного напряжения, выдерживаемого полупроводниковыми приборами в силовой цепи. Вследствие этого тормозное усилие в диапазоне высоких скоростей оказывается меньшим, чем в диапазоне средних и низких скоростей. Поэтому в диапазоне высоких скоростей вынужденно приходится приводить в действие механический тормоз. Отсюда возникла проблема повышения эффективности рекуперативного торможения в диапазоне высоких скоростей, решение которой позволит уменьшить износ тормозных колодок и тем самым сократить трудоемкость работ по техническому обслуживанию подвижного состава.

Для выхода из положения предложен метод, сущность которого состоит во введении в силовую схему дополнительных резисторов между тяговыми двига-

телями и инверторами. Важно, что при этом не требуется увеличение расчетной мощности инвертора и проходящего по нему тока.

**Схемное решение**

Типичная силовая схема единицы электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом включает реактивный фильтр и конденсатор (на входе), преобразовательно-инверторную установку и (в целях упрощения) один тяговый двигатель. Предложено ввести между тяговым двигателем и инвертором дополнительные резисторы, включенные параллельно с короткозамыкателями, в качестве которых можно использовать полупроводниковые ключи или вакуумные выключатели. В режиме тяги все короткозамыкатели замкнуты и, следовательно, все резисторы выведены из цепи. В режиме рекуперативного торможения все или некоторые (по потребности) короткозамыкатели размыкаются и, следовательно, все или некоторые резисторы вводятся в цепь.

Таким образом, можно допустить, чтобы напряжение на выходе тягового двигателя превышало напряжение на выходе инвертора, максимальная величина которого, в свою очередь, равна величине напряжения в контактной сети (применительно к системе электроснабжения постоянного тока, принятой на значительной части сети обычных, т. е. не высокоскоростных, узкоколейных линий железных дорог Японии, это 1300 В). В результате тормозное усилие рекуперативного торможения в диапазоне высоких скоростей будет больше того, которое реализуется при схеме без резисторов. Кроме того, тормозящий момент тягового двигателя в диапазоне высоких скоростей возрастает без необходимого при этом увеличения номинального тока инвертора. Когда скорость движения поезда снижается до значения, соответствующего постоянному диапазону крутящего момента, резисторы можно вывести из схемы (замкнув короткозамыкатели), чтобы исключить потери электроэнергии в них.

Система уравнений, описывающих напряжение на выходе тягового двигателя в системе координат  $d$  и  $q$  (вращательные координаты при начальной угловой скорости) в установившемся режиме, выглядит следующим образом:

$$u_{1d} = R_1 i_{1d} - \omega_1 \sigma_1 L_1 i_{1q}, \text{ В}; \tag{1}$$

$$u_{1q} = R_1 i_{1q} + \omega_1 L_1 i_{1d}, \text{ В}; \tag{2}$$

$$\omega_1 = \omega_{2n} + \omega_s, \text{ рад/с}; \tag{3}$$

$$\omega_s = \frac{R_2}{L_2} \frac{i_{1q}}{i_{1d}}, \text{ рад/с}, \tag{4}$$

где  $u_{1d}$  и  $u_{1q}$  — напряжение на выходе тягового двигателя в осях  $d$  и  $q$ ;  $i_{1d}$  и  $i_{1q}$  — ток статора в осях  $d$  и  $q$ ;

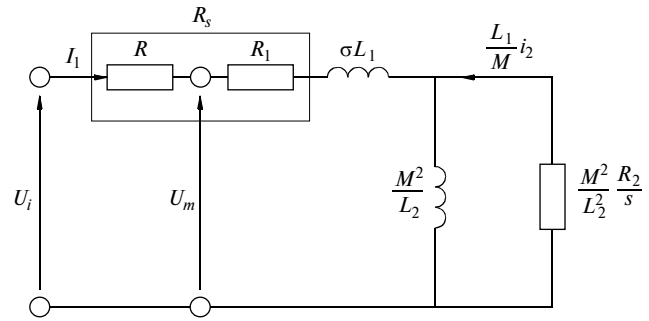


Рис. 1. Эквивалентная схема асинхронного двигателя

$R_1$  — сопротивление статора;  $R_2$  — сопротивление ротора;  $\omega_1$  — первичная угловая скорость;  $\omega_{2n}$  — окружная угловая скорость;  $\omega_s$  — скорость углового скольжения;  $\sigma = 1 - M^2/L_1/L_2$ .

Параметры в уравнениях (1) и (2) равны параметрам эквивалентной цепи асинхронного электродвигателя, приведенной на рис. 1.

**Параметры тягового двигателя**

Сопротивление статора $R_1$ , Ом.....	0,094
Сопротивление ротора $R_2$ , Ом.....	0,088
Собственная индуктивность статора $L_1$ , Гн.....	0,034
Собственная индуктивность ротора $L_2$ , Гн.....	0,034
Взаимная индуктивность $M$ , Гн.....	0,033

Здесь  $U_i$  означает эффективное значение выходного напряжения инвертора, которое рассчитывается с использованием уравнения (6), а  $u_{1d}$  и  $u_{1q}$  рассчитываются с использованием сопротивления  $R_s$ .

$$I_m = \sqrt{i_{1d}^2 + i_{1q}^2} / \sqrt{3}, \text{ А}, \tag{5}$$

где  $I_m$  — эффективный ток электродвигателя;

$$U_m = \sqrt{u_{1d}^2 + u_{1q}^2}, \text{ В}, \tag{6}$$

где  $U_m$  — эффективное напряжение на выходе электродвигателя.

Следующие уравнения показывают взаимосвязь между вращающим моментом  $\tau$  асинхронного тягового двигателя и тормозным усилием рекуперативного торможения  $F$  соответствующей колесной пары (величина отрицательная), а также между скоростью движения поезда  $V_t$ , км/ч, и угловой скоростью вращения ротора двигателя  $\omega_{2n}$ , рад/с:

$$F = \frac{G}{r} \tau, \text{ Н}; \tag{7}$$

$$\tau = P \frac{M^2}{L_2} i_{1d} i_{1q}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \tag{8}$$

$$V_t = \frac{3,6 \omega_{2n}}{PG}, \text{ км/ч}, \tag{9}$$

где  $G$  — передаточное отношение тяговой передачи (6,53);  $r$  — радиус колес (0,41 м);  $\tau$  — крутящий момент асинхронного электродвигателя;  $P$  — число пар полюсов (2);  $M$  — взаимная индуктивность;  $L_2$  — собственная индуктивность ротора.

Характеристику тормозящего момента  $\tau_{bd}$  можно подобрать путем ввода резисторов сопротивлением

$R$ . Его величина определяется с помощью следующего уравнения:

$$\tau_{bd} = (N_p R_2 M^2 |V_i|^2 \omega_s) / [(R_s R_2 - \omega L_1 \omega_s L_2 \sigma)^2 + (R_s \omega_s L_2 + R_2 \omega L_1)^2], \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (10)$$

где  $R_s = R_1 + R$ .

$F_{bd}$  представляет собой параметр преобразования тормозящего момента  $\tau_{bd}$  в тормозное усилие на ободе колеса и определяется уравнением:

$$F_{bd} = \frac{G}{r} \sigma_{bd}. \quad (11)$$

### Расчетные характеристики рекуперативного торможения

Рекуперативное торможение в традиционных тормозных системах применяется преимущественно для повышения эффективности использования генерируемой при торможении электроэнергии. Если тормозного усилия рекуперативного торможения недостаточно для требуемого снижения скорости движения поезда, оно дополняется силой, создаваемой механическим тормозом. Когда скорость движения поезда превышает 80 км/ч (т. е. когда он находится в диапазоне высоких скоростей), сила механического тормоза является основной при торможении.

Каждая из характеристических кривых, приведенных на рис. 2, 3, 4 и 5 (см. далее), получена с помощью уравнений (1) – (6). Индекс «0» при различных параметрах соответствует обычному (без введения резисторов) рекуперативному торможению. Характеристики рекуперативного торможения при введенных резисторах исследовались при ограничении допустимых значений тока в инверторе (222 А) и напряжения в контактной сети (1300 В) в качестве

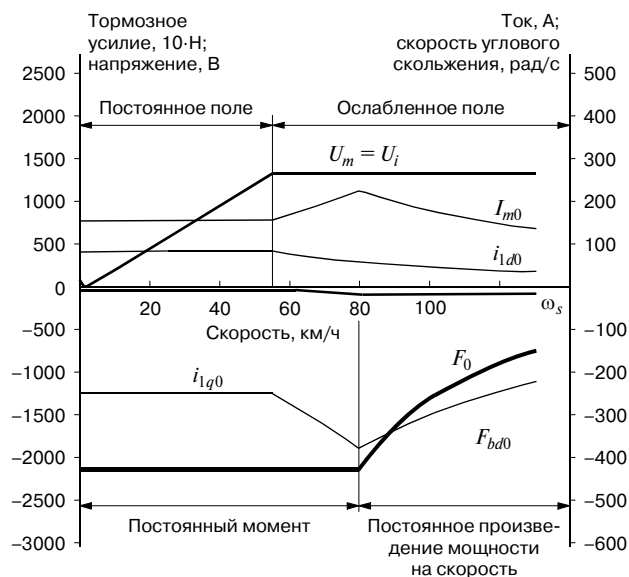


Рис. 2. Характеристики обычного рекуперативного торможения

верхнего предела. Значениями КПД тяговой передачи и коэффициента мощности инвертора в данном случае можно было пренебречь.

На рисунках на левой оси ординат отложены параметры  $F$ , Н;  $F_0$ , Н;  $F_{bd0}$ , Н;  $U_m$ , В и  $U_i$ , В, на правой оси ординат — параметры  $I_m$ , А;  $i_{1d}$ , А;  $i_{1q}$ , А и  $\omega_s$ , рад/с, на оси абсцисс — скорость движения поезда, км/ч.  $F_0$  — максимальное тормозное усилие обычного рекуперативного торможения,  $F_{bd0}$  — тормозящий момент электродвигателя при обычном рекуперативном торможении.

### Характеристики обычного рекуперативного торможения (рис. 2)

От максимальной (130 км/ч) скорости движения поезда до скорости 80 км/ч напряжение на выходе тягового электродвигателя  $U_m$  остается на уровне 1300 В, а скорость углового скольжения  $\omega_s$  постоянна. Крутящий момент асинхронного двигателя по величине обратно пропорционален квадрату частоты вращения ротора. Рассматриваемый скоростной диапазон соответствует постоянному значению произведения мощности на частоту вращения. Частота скольжения уменьшается пропорционально скорости движения поезда, а магнитный поток усиливается при дальнейшем снижении скорости движения от 80 до 55 км/ч. При снижении скорости движения поезда до величины менее 55 км/ч поток ротора  $Mi_{1d}$  и вращающий момент  $\tau$  поддерживаются на постоянном уровне. При скорости менее 55 км/ч напряжение на выходе тягового двигателя  $U_m$  пропорционально синхронной угловой скорости  $\omega_1$ , а поток ротора  $Mi_{1d}$  поддерживается постоянным.

### Характеристики рекуперативного торможения с введенными резисторами (рис. 3, 4 и 5)

Здесь  $F_{bd}$  — величина тормозного усилия на ободе колеса, полученная в результате преобразования тормозящего момента  $\tau_{bd}$ . Индекс «bd» соответствует обычному рекуперативному торможению, индексы «bd1», «bd2» и «bd3» — рекуперативному торможению с введенными резисторами сопротивлением соответственно 1, 2 и 3 Ом.

При рекуперативном торможении можно повысить напряжение на выходе асинхронного тягового двигателя за счет падения напряжения в резисторах. Так как тормозящий момент пропорционален квадрату напряжения на выходе двигателя, тормозное усилие рекуперативного торможения в диапазоне высоких скоростей (в диапазоне постоянного напряжения) возрастает.

При введении резисторов сопротивлением 1 Ом диапазон постоянного значения тормозящего момента расширен и соответствует скорости движения

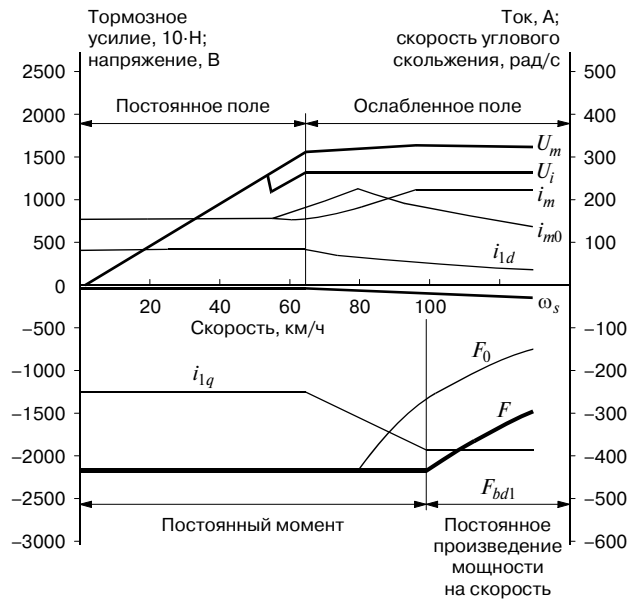


Рис. 3. Характеристики рекуперативного торможения с введенными резисторами сопротивлением 1 Ом

от нулевой до 98 км/ч, при введении резисторов сопротивлением 2 Ом — от нулевой до 115 км/ч. При введении резисторов сопротивлением 3 Ом тормозное усилие рекуперативного торможения в соответствии с постоянством величины тормозящего момента оказывается постоянным почти во всем диапазоне скоростей движения поезда (от нулевой до 129 км/ч).

**Распределение энергии торможения**

Распределение энергии торможения рассмотрено для условного восьмивагонного электропоезда, сформированного из трех моторных и пяти прицепных вагонов (3М + 5Т).

**Параметры условного электропоезда**

Масса трех моторных вагонов, т. . . . .	115,9
Масса пяти прицепных вагонов, т. . . . .	148,4
Масса пассажиров при полной населенности, т. . . . .	17,0
Общее тормозное усилие при замедлении 3,0 км/ч/с, кН. . . . .	333,6
Число тяговых двигателей в каждом моторном вагоне. . . . .	4
Общее тормозное усилие рекуперативного торможения трех моторных вагонов при постоянном тормозящем моменте, кН. . . . .	256,4

Кинетическая энергия поезда при торможении поглощается рекуперативным и механическим тормозом.

На рис. 6 показано распределение кинетической энергии при торможении с максимальной скорости 130 км/ч до 80 км/ч, на рис. 7 — при торможении с максимальной скорости до полной остановки. Для сравнения приведено также распределение энергии торможения для поездов из того же числа вагонов (восьми), но измененной составности (5М + 3Т и 6М + 2Т).

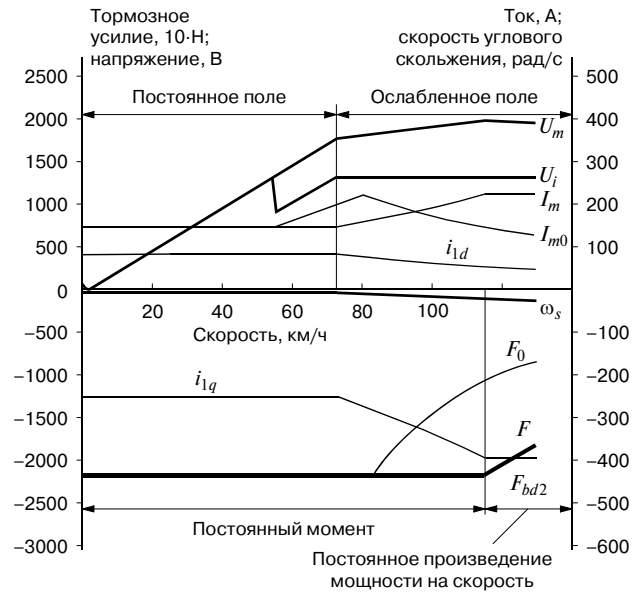


Рис. 4. Характеристики рекуперативного торможения с введенными резисторами сопротивлением 2 Ом

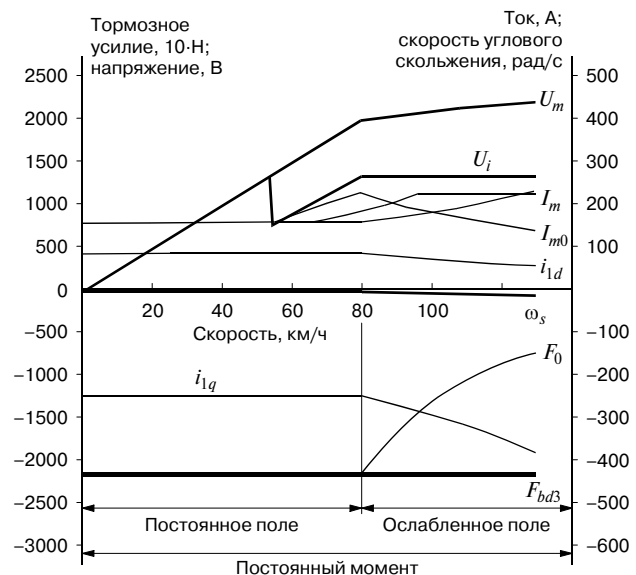


Рис. 5. Характеристики рекуперативного торможения с введенными резисторами сопротивлением 3 Ом

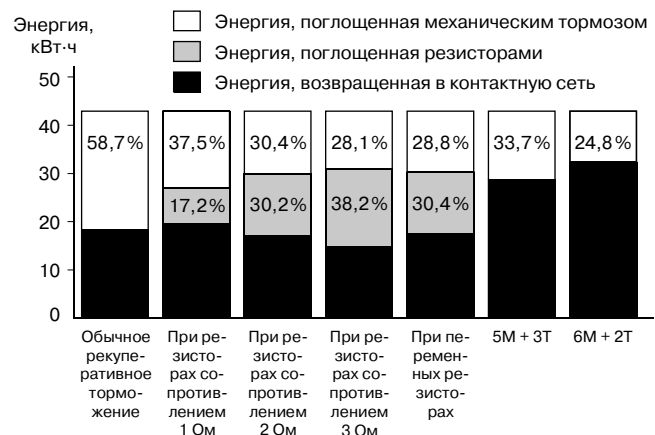


Рис. 6. Распределение энергии торможения со 130 до 80 км/ч

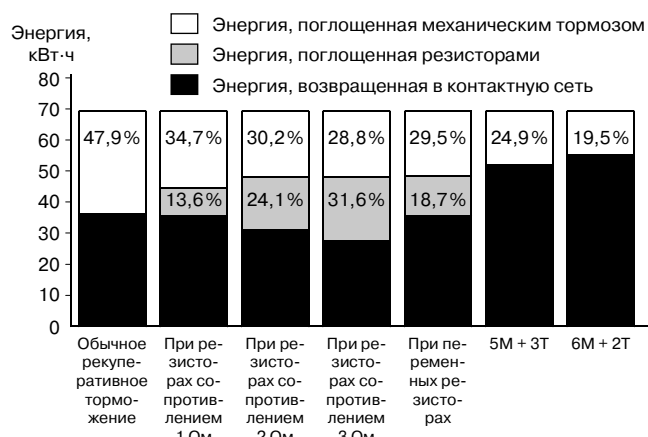


Рис. 7. Распределение энергии торможения со 130 км/ч до полной остановки

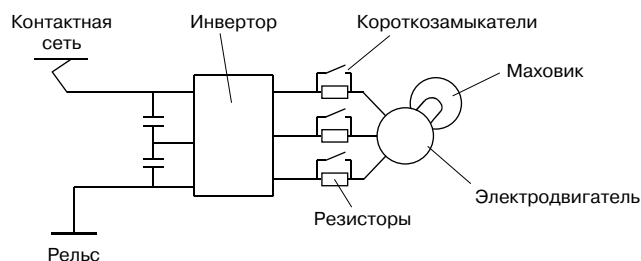


Рис. 8. Схема экспериментального стенда

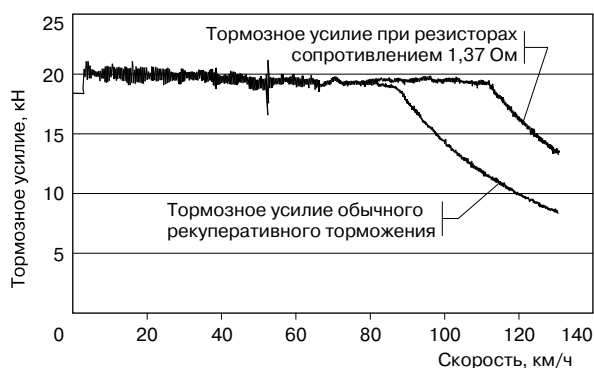


Рис. 9. Экспериментальные характеристики рекуперативного торможения

Общая поглощаемая кинетическая энергия поезда при торможении со скорости 130 до 80 км/ч равна 42,4 кВт·ч, при торможении со скорости 130 км/ч до полной остановки — 68,9 кВт·ч. Таким образом, при торможении со 130 до 80 км/ч поглощению подлежат примерно 62 % полной кинетической энергии.

При введении в цепь резисторов сопротивлением 3 Ом эффективность рекуперативного торможения поезда составности 3М + 5Т приблизительно равна эффективности торможения поезда составности 5,5М + 2,5Т, т. е. промежуточной между 5М + 3Т и 6М + 2Т.

### Эксперимент и его результаты

На рис. 8 приведена схема экспериментального стенда. Резисторы с короткозамыкателями введены в схему между инвертором и асинхронным электродвигателем. Для имитации нагрузки вместо колесной пары использован массивный маховик.

Эксперименты выполнялись с применением электрического торможения со скорости 130 км/ч до полной остановки. При поступлении команды на торможение короткозамыкатели размыкались для введения резисторов. Рекуперативное торможение начиналось после проверки положения короткозамыкателей, что занимало несколько десятков микросекунд. По снижению скорости до 50 км/ч подавалась команда на замыкание короткозамыкателей в целях выведения резисторов из цепи. Непосредственно после этого значение параметра  $R$ , используемого для управления электродвигателем, должно измениться, так же как и амплитуда и фаза напряжения  $U_i$  на выходе инвертора.

Результаты эксперимента с использованием резисторов сопротивлением 1,37 Ом приведены на рис. 9. Видно, что эксперимент дал вполне удовлетворительные результаты. Было подтверждено, что диапазон скорости, в котором регистрируется постоянная величина крутящего момента двигателя, расширяется от 0 – 82 км/ч для обычного рекуперативного торможения до 0 – 105 км/ч для рекуперативного торможения с введенными резисторами. Хотя при выведении резисторов и имеют место некоторые колебания величин тока и вращающего момента, это все же не вызывает серьезных проблем. Однако колебания вращающего момента становятся заметными, если имеет место запаздывание выведения резисторов относительно изменения выходного напряжения инвертора. По этой причине в случае использования подобной схемы на эксплуатирующемся подвижном составе требуется применение контрольно-управляющего устройства для точного определения электрическим путем момента закрытия короткозамыкателей резисторов.

Таким образом, данными, полученными как расчетным, так и экспериментальным путем, доказано, что использование предложенного RTRI и рассмотренного выше метода введения резисторов между тяговым двигателем и инвертором является эффективным решением проблемы повышения эффективности рекуперативного торможения.

M. Yamashita et al. Quarterly Report of RTRI, 2003, № 1, p. 34 – 38.