

Следящая система электродинамического торможения электропоезда постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями

В. А. БАРАНОВ¹, И. П. ВИКУЛОВ², А. А. КИСЕЛЕВ², А. С. МАЗНЕВ²

¹ Санкт-Петербургский центр организации работы станций Октябрьской дирекции управления движением, Санкт-Петербург, 191036, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Санкт-Петербург, 190031, Россия

Аннотация. Рассмотрена следящая система электродинамического торможения электропоезда, которая позволяет регулировать ток рекуперации в зависимости от возможности его потребления изменением сопротивления реостатного контура. Исследованы электромагнитные процессы в силовой цепи моторного вагона электропоезда со следящей системой в режиме электродинамического торможения. Показана возможность следящей системы регулировать ток якоря в режиме рекуперации совместно с системой автоматического управления торможением в случае увеличения напряжения контактной сети. При провале напряжения следящая система не способна ограничить возрастающий тормозной ток, его стабилизация осуществляется за счет изменения магнитного потока тяговых двигателей. Рассчитана регулировочная характеристика, оценены технический эффект от внедрения следящей системы и ожидаемое снижение общего расхода электроэнергии.

Ключевые слова: электропоезд постоянного тока; электродинамическое торможение; импульсный преобразователь

Введение. На железных дорогах России эксплуатируются электропоезда постоянного тока с коллекторными (ЭР2Т, ЭТ2М, ЭД4М, ЭП2Д) и асинхронными (ЭВС1, ЭВС2, ЭС1, ЭС2Г) тяговыми двигателями (АТД).

Электропоезда с асинхронным приводом более экономичны за счет снижения потребления энергии в тяговом режиме, более широкого диапазона скоростей рекуперативного торможения и меньших эксплуатационных расходов [1]. Однако следует отметить высокую стоимость этого вида моторвагонного подвижного состава (МВПС) и относительно небольшую долю в общем количестве электропоездов [2, 3]. На обновление всего парка МВПС электропоездами с АТД потребуется длительное время, поэтому улучшение технико-экономических показателей электропоездов с коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД) является важной задачей, которую можно решить за счет более эффективного использования энергии, вырабатываемой ТЭД в режиме рекуперативного торможения [4, 5, 6]. Существующая элементная база полупроводниковых приборов [7] позволяет

применять импульсную рекуперацию [8, 9], перенаправлять вырабатываемую энергию в емкостные накопители [10] и реализовывать адаптивные системы, отслеживающие величину напряжения в контактной сети (КС) [1, 11].

Следящая система электродинамического торможения. На эксплуатируемых электропоездах типа ЭР2Т, ЭТ2М, ЭД4М применяется система рекуперативно-реостатного торможения (РРТ) с независимым возбуждением тяговых двигателей, которая в режиме РРТ при токе якорей 350 А позволяет реализовывать ток рекуперации 20–50 А [12]. Контактные системы РРТ не позволяют осуществлять переход из режима реостатного торможения в рекуперативный, если возможность потребления энергии тяговой сетью восстановилась.

В схемах РРТ с импульсными преобразователями [13] напряжение двигателя и ток рекуперации определяются режимом работы тиристора $VS1$ (рис. 1, а), дополнительный элемент $VS2$ включается по сигналу датчика контроля входного напряжения, и избыток энергии расходуется в резисторе R_r . При восстановлении условий приема энергии рекуперации резистор R_r отключается.

Вариант схемы рис. 1, б относится к системе следящего РРТ, в которой оба вида торможения действуют совместно в установленном диапазоне изменения напряжения КС в пределах каждого периода регулирования. При напряжении выше верхнего уровня диапазона включается реостатный тормоз (тиристор $VS2$), ниже — только рекуперативный (тиристор $VS1$).

Применение импульсных систем регулирования напряжения связано с принципиальным изменением оборудования электропоездов и значительными затратами.

В данной работе рассмотрены особенности и возможности следящей системы РРТ на основе схемы электропоезда постоянного тока с коллекторными ТЭД, которая за счет импульсного регулирования величины сопротивления тормозного резистора осуществляет поддержание заданного тока рекуперации (рис. 2) [14].

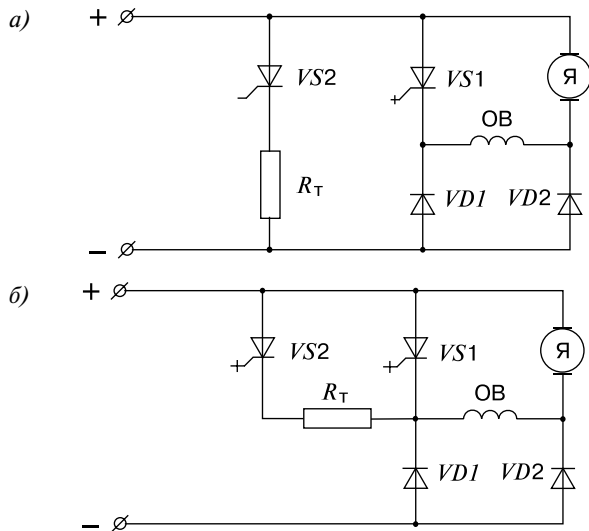


Рис. 1. Схемы рекуперативно-реостатного торможения: а — с подключением тормозного резистора; б — с совместным действием режимов электродинамического торможения в пределах каждого периода регулирования; Я — обмотка якоря тягового электродвигателя; ОВ — обмотка возбуждения тягового электродвигателя; VS1, VS2 — тиристоры; VD1, VD2 — разделительные диоды; R_т — тормозной резистор

Fig. 1. Recuperative braking modes:

a — with connection of the brake resistor; б — with the combined effect of the electrodynamic braking modes within each period of regulation; Я — armature winding of the traction motor; ОВ — excitation winding of the traction motor; VS1, VS2 — thyristors; VD1, VD2 — separation diodes; R_т — braking resistor

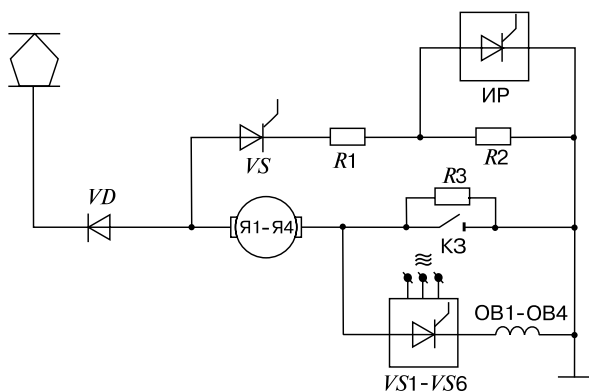


Рис. 2. Принципиальная схема моторного вагона электропоезда в режиме электродинамического торможения:

ИП — импульсный преобразователь; КЗ — контактор защиты; VS1–VS6 — трехфазный управляемый мостовой выпрямитель

Fig. 2. Schematic diagram of a motor car of an electric train in the mode of electrodynamic braking:

ИП — pulse converter; КЗ — protection contactor; VS1–VS6 — three-phase controlled bridge rectifier

При увеличении тока обмоток возбуждения ОВ1–ОВ4, питаемых от трехфазного управляемого мостового выпрямителя VS1–VS6, ток обмоток якорей Я1–Я4 возрастет до значения, определяемого его уставкой (например, до 350 А), протекая по контуру «земля — контактор защиты КЗ — обмотки якорей Я1–Я4 — диод VD — токоприемник».

При исчезновении потребителя рекуперированной энергии отпираются тиристор VS и импульсный преобразователь ИП, ток обмоток якорей ТЭД замыкается по контуру «обмотки якорей Я1–Я4 — тиристор VS — резистор R1 — импульсный преобразователь ИП». Силовая цепь реализует режим реостатного торможения с независимым возбуждением.

Очевидно, что тиристор VS заменяет определенный контактор, называемый Т, исходной силовой цепи. Для защиты тяговых двигателей в режиме электродинамического торможения применяется быстродействующий КЗ. Резистор R3 ограничивает ток короткого замыкания при размагничивании обмоток возбуждения.

Сопротивление резистора R1 определяется из условия среднего напряжения на токоприемнике 3500 В

$$R1 = \frac{U_{\text{тп ср}}}{I_{\text{max}}} = \frac{3500}{350} = 10 \text{ Ом}, \quad (1)$$

где $U_{\text{тп ср}}$ — средняя величина напряжения на токоприемнике, В; I_{max} — максимальный тормозной ток, определяемый его нормальной уставкой, А.

В случае появления потребителя рекуперированной энергии импульсный преобразователь ИП запирается, вводя в реостатный контур дополнительный резистор R2. Таким образом, ток реостатного контура снижается до минимального, а оставшая часть тормозного тока коммутируется в КС. Суммарное сопротивление реостатного контура R в цепи якорей определяется резисторами R1 и R2 и рассчитывается по выражению

$$R = \frac{U_{\text{тп ср}}}{I_{\text{min}}} = \frac{3500}{100} = 35 \text{ Ом}, \quad (2)$$

где I_{min} — минимальный ток реостатного контура, определяемый минимальной уставкой тормозного тока, А.

Сопротивление добавочного резистора

$$R2 = R - R1 = 35 - 10 = 25 \text{ Ом}. \quad (3)$$

Имитационная модель электропоезда постоянного тока со следящей системой электродинамического торможения. Для расчета электромагнитных процессов в силовых цепях электропоезда в режиме электродинамического торможения (ЭДТ) целесообразно использовать математическую модель, которая разработана в среде Matlab с помощью пакета Simulink на основе схемно-технических модулей элементов электрооборудования [15] и позволяет решать дифференциальные уравнения численным методом Рунге — Кутты.

В качестве исходного варианта для исследования был принят 10-вагонный электропоезд постоянного тока серии ЭД4М с тяговыми двигателями ТЭД-2У1, длина максимальной зоны 10 км, скорость начала торможения 120 км/ч, уставка тока 350 А.

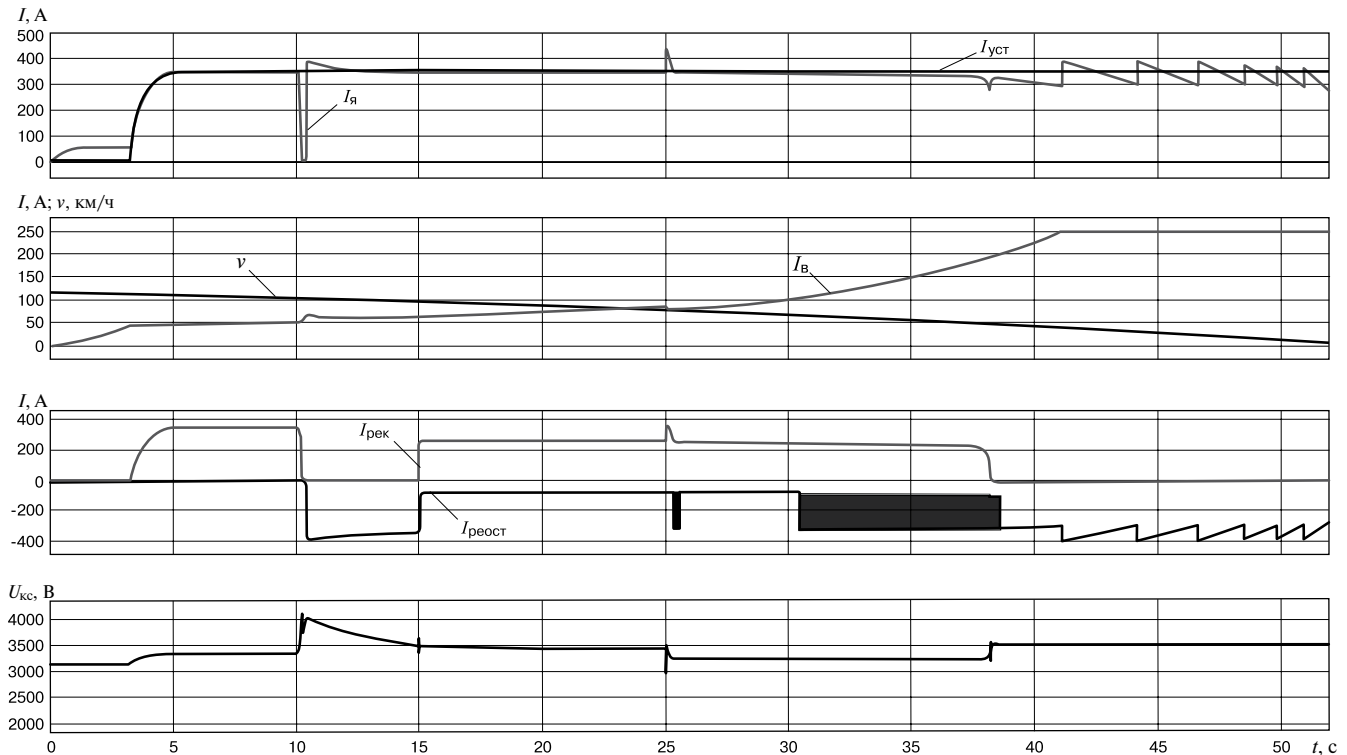


Рис. 4. Результаты моделирования — осциллограммы уставки тока $I_{уст}(t)$, токов якорей $I_{я}(t)$, возбуждения ТЭД $I_{в}(t)$ и скорости движения электропоезда $v(t)$, токов рекуперации $I_{рек}(t)$ и реостатного контура $I_{реост}(t)$ секции электропоезда, напряжения на токоприемнике электропоезда со следящей системой РРТ $U_{кв}(t)$

Fig. 4. Simulation results — oscillograms of the current settings $I_{уст}(t)$, armature currents $I_{я}(t)$, excitation of traction electric motor $I_{в}(t)$ and the speed of the electric train $v(t)$, recuperation $I_{рек}(t)$ and rheostat circuit currents $I_{реост}(t)$ of the electric locomotive section, voltage at the current collector of the electric locomotive with monitoring system of RRB $U_{кв}(t)$. Black area means the pulsed nature of the change in the current of a rheostatic circuit with an amplitude of 250 A and a constant component of 100 A

исчезает первый потребитель (рассчитанный на ток 400 А), в результате чего происходит завышение напряжения в КС до 3950 В с последующим переходом на реостатное торможение, которое продолжается до 15-й с. В интервале времени 15–25 с реализуется РРТ со вторым потребителем (рассчитанным на ток 250 А), а в интервале времени 25–38 с — со вторым и третьим потребителями (на общий ток 450 А). Черная область на графике тока реостатного контура $I_{реост}(t)$ означает импульсный характер его изменения с амплитудой 250 А и постоянной составляющей 100 А. Так как импульсы следуют с частотой 1000 Гц, в выбранном на осциллограмме масштабе времени они отображаются в виде черной полосы. На 38-й с происходит очередной срыв рекуперации, и система управления переводит силовую цепь электропоезда в режим реостатного торможения. Ток возбуждения продолжает увеличиваться до максимального значения 250 А, после чего в интервале времени 42–52 с реализуется реостатное торможение с выводом ступеней тормозных резисторов до начала электропневматического дотормаживания.

Следящая система регулирует коэффициент заполнения импульсного преобразователя, начиная с появления второго потребителя. Рекуперативное торможение с первым потребителем протекает

по алгоритму силовой цепи электропоездов ЭР2Т, ЭТ2М, ЭД4М [19].

Для оценки качества регулирования следящей системы РРТ рассмотрены результаты моделирования при подключении и отключении потребителей энергии рекуперации.

При появлении второго потребителя видно (рис. 5), что размах пульсаций напряжения на токоприемнике $2\Delta U_c$ при коэффициенте заполнения λ , равном 0,5, составил 109 В. При этом напряжение на токоприемнике достигло максимальной величины 3600 В.

Ток рекуперации $I_{рек}$ монотонно возрастал за время регулирования 0,015 с до установившегося значения 250 А.

Появление очередного, третьего потребителя приводит к броску тормозного тока (рис. 6), и следящая система РРТ осуществляет стабилизацию тока рекуперации, достигающего значения 244 А за 0,4 с. Переходный процесс имеет аperiодический характер. Данное событие аналогично снижению напряжения контактной сети и показало неспособность исследуемой следящей системы ограничить возрастающий ток якоря в этом режиме. Стабилизация тока якоря осуществлялась за счет уменьшения тока возбуждения с помощью УВВ в инверторном режиме.

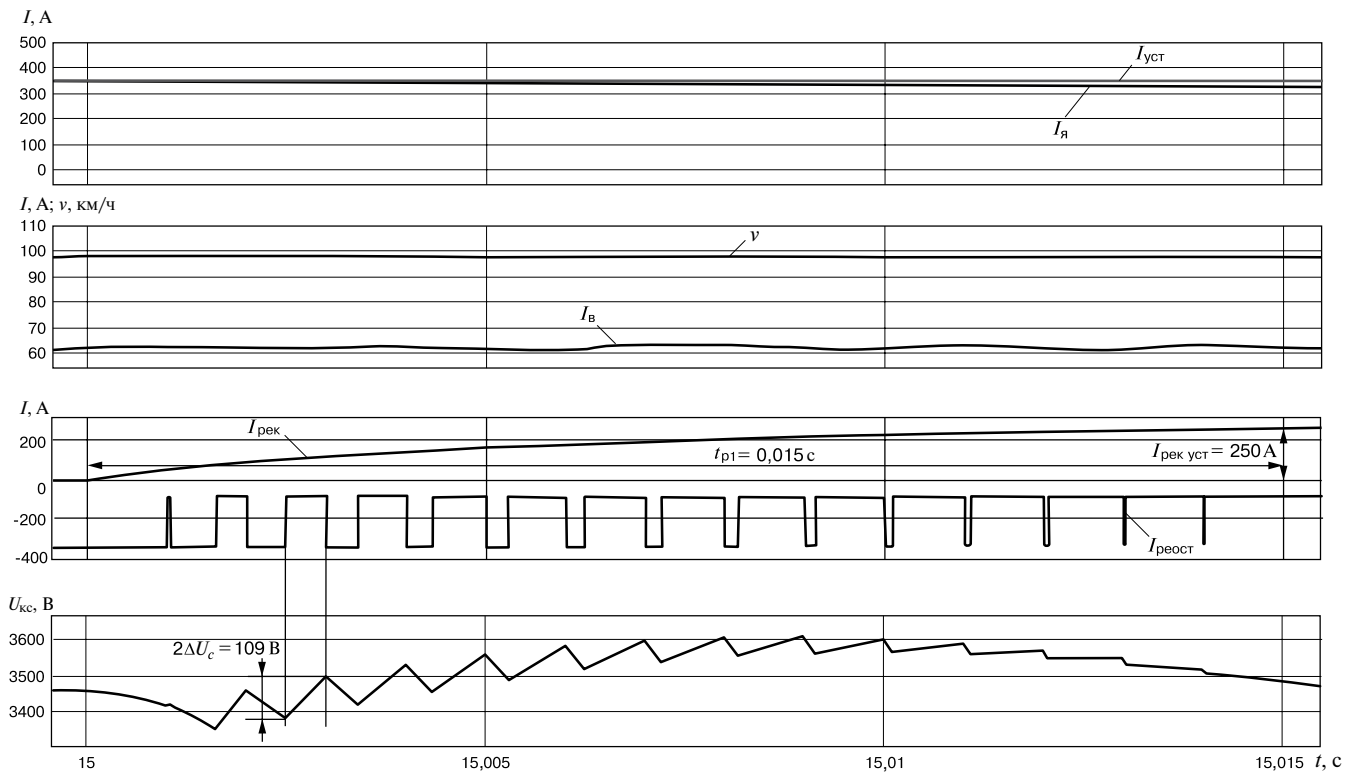


Рис. 5. Результаты моделирования — осциллограммы токов, скорости и напряжения

при появлении второго потребителя энергии рекуперации: t_{p1} — время регулирования при появлении второго потребителя

Fig. 5. Simulation results — oscillograms of currents, speeds and voltages with the appearance of the second consumer of energy recuperation: t_{p1} — regulation time when a second consumer appears; $2\Delta U_c$ — voltage pulsation range on the current collector; $I_{рек уст}$ — recuperation current setting

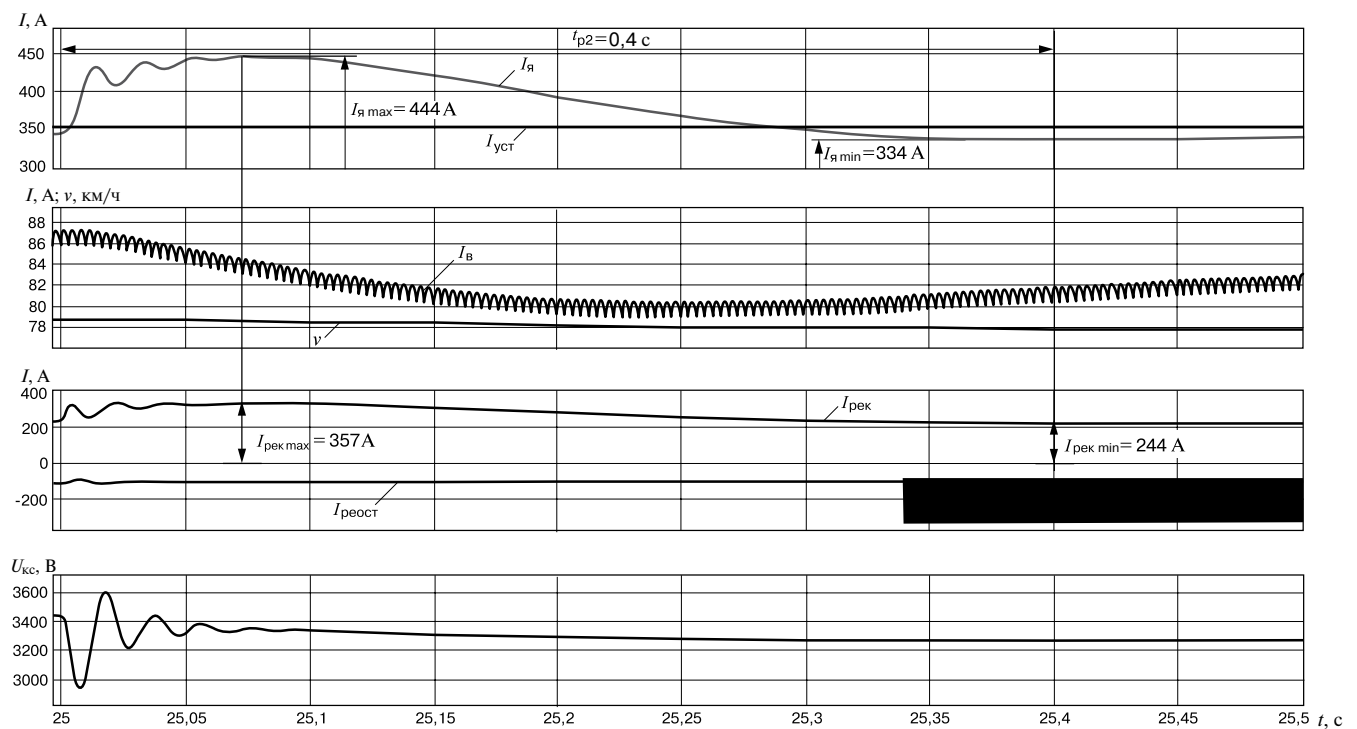


Рис. 6. Результаты моделирования — осциллограммы токов, скорости и напряжения

при появлении третьего потребителя энергии рекуперации: t_{p2} — время регулирования при появлении третьего потребителя

Fig. 6. Simulation results — oscillograms of currents, speeds and voltages with the appearance of the third consumer of energy recuperation: t_{p2} — regulation time when a third consumer appears

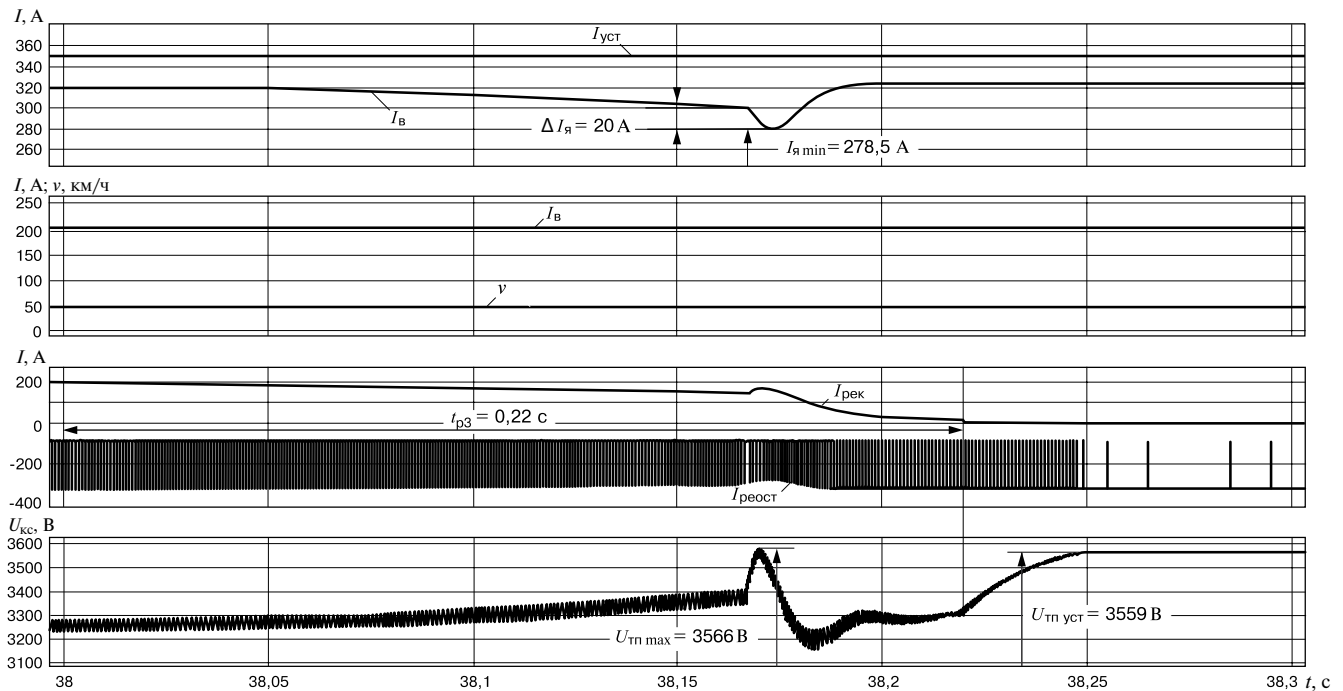


Рис. 7. Результаты моделирования — осциллограммы токов, скорости и напряжения при отключении второго и третьего потребителей энергии рекуперации: $t_{пз}$ — время регулирования при отключении второго и третьего потребителя; $U_{тп\ уст}$ — установившееся значение напряжения на токоприемнике; $U_{тп\ max}$ — максимальное напряжение на токоприемнике

Fig. 7. Simulation results — oscillograms of currents, speeds and voltages with the switching off the second and the third consumer of energy recuperation: $t_{пз}$ — regulation time when switching off the second and the third consumer; $U_{тп\ уст}$ — steady-state voltage at the current collector; $U_{тп\ max}$ — maximum voltage at the current collector

Относительная допустимая ошибка регулирования тока рекуперации находится из выражения

$$\Delta I_{рек*} = \frac{I_{рек\ уст} - I_{рек\ min}}{I_{рек\ уст}} = \frac{250 - 244}{250} = 0,024 = 2,4\ \% \quad (4)$$

где $I_{рек\ уст}$ — уставка тока рекуперации, А; $I_{рек\ min}$ — нижняя граница допустимых значений тока рекуперации, А.

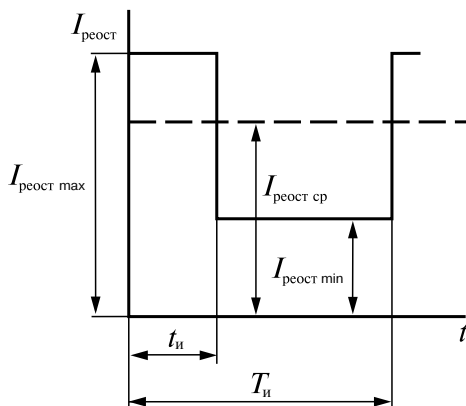


Рис. 8. Параметры импульсного цикла тока реостатного контура:

$t_{и}$ — длительность импульса тока;
 $T_{и}$ — период следования импульсов тока
 Fig. 8. Parameters of the pulse cycle of current rheostat circuit:
 $t_{и}$ — current pulse duration; $T_{и}$ — pulse sequence period

Относительная допустимая ошибка регулирования тока якоря равна

$$\Delta I_{я*} = \frac{I_{я\ уст} - I_{я\ min}}{I_{я\ уст}} = \frac{350 - 334}{350} = 0,046 = 4,6\ \% \quad (5)$$

где $I_{я\ уст}$ — уставка тока рекуперации, А; $I_{я\ min}$ — нижняя граница допустимых значений тока якоря, А.

При отключении второго и третьего потребителей видно, что процесс перевода электропоезда в режим реостатного торможения с независимым возбуждением ТЭД осуществляется за время 0,22 с (рис. 7), в течение которого ток рекуперации аperiodически снижается до нуля. Напряжение на токоприемнике при максимальном значении 3566 В достигает установившейся величины 3559 В.

Разработанная математическая модель позволяет рассчитать значение отданной энергии (в кВт·ч) по следующему уравнению:

$$A_{рек} = \left(\int E_{сумм} I_{рек} dt \right) / 36 \cdot 10^5, \quad (6)$$

где $E_{сумм}$ — суммарная электродвижущая сила тяговых двигателей моторного вагона электропоезда, В; dt — дифференциал времени; $36 \cdot 10^5$ — коэффициент для перевода кВт·ч в Вт·с.

Результаты моделирования исходной и следящей систем РРТ показывают соответствующие значения энергии рекуперации: 2,576 кВт·ч и 7,845 кВт·ч.

Относительное увеличение энергии рекуперации за счет следящей системы находим по формуле

$$\Delta A_{\text{р}} = \frac{A_{\text{р}} \text{ Сл} - A_{\text{р}} \text{ Исх}}{A_{\text{р}} \text{ Исх}} = \frac{7,845 - 2,576}{2,576} = 2,045 = 204,5 \%, \quad (7)$$

где $A_{\text{р}} \text{ Сл}$ — количество отданной энергии электропоездом со следящей системой РРТ, кВт·ч; $A_{\text{р}} \text{ Исх}$ — количество отданной энергии электропоездом с исходной системой РРТ, кВт·ч.

Полученное значение объясняется следующими условиями:

- скорость начала торможения — 120 км/ч;
- доля времени режима рекуперативного торможения от времени режима ЭДТ — 14 %;
- время режима РРТ от времени режима ЭДТ — 47 %;
- эквивалентные сопротивления потребителей энергии рекуперации подобраны таким образом, чтобы обеспечивать максимальное значение тока рекуперации 250 А в режиме РРТ.

С целью увеличения диапазона применения рекуперативного торможения, ввиду запаса мощности двигателя по кривой намагничивания, предлагается увеличить максимальный ток возбуждения до 350 А. Это возможно осуществить, применив более мощный вращающийся преобразователь либо статический преобразователь собственных нужд. Последний вариант также позволит снизить эксплуатационные расходы и массу подвагонного оборудования.

Технический эффект от модернизации электропоезда следящей системой был оценен с учетом снижения скорости окончания рекуперативного торможения, статистических данных по расходу электроэнергии электропоездами и числа срывов рекуперации. Результаты показали, что по отношению к электропоездам серий ЭР2Т, ЭТ2М и ЭД4М объем отдаваемой в сеть электроэнергии увеличится на 30,8 %. С учетом того что энергия, возвращаемая при рекуперации, составляет в среднем 15 % от ее общего расхода, снижение расхода электроэнергии за счет следящей системы составит 4,62 %.

С помощью математической модели рассчитана регулировочная характеристика $I_{\text{рек}} = f(\lambda)$ следящей системы РРТ.

Коэффициент заполнения импульсного преобразователя λ определяется следующим выражением (рис. 8):

$$\lambda = \frac{I_{\text{реост ср}} - I_{\text{реост min}}}{I_{\text{реост max}} - I_{\text{реост min}}}, \quad (8)$$

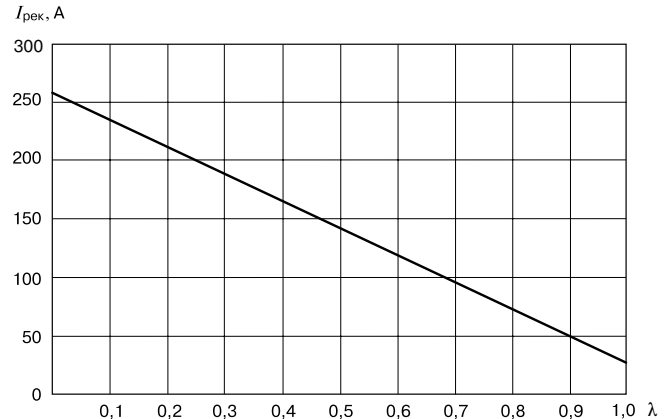


Рис. 9. График регулировочной характеристики

$I_{\text{рек}} = f(\lambda)$ следящей системы РРТ

Fig. 9. Schedule of the adjustment characteristics

$I_{\text{рек}} = f(\lambda)$ of the monitoring system of RRB

где $I_{\text{реост max}}$, $I_{\text{реост min}}$ — максимальный и минимальный ток реостатного контура, А; $I_{\text{реост max}} = 350 \text{ А}$, $I_{\text{реост min}} = 100 \text{ А}$; $I_{\text{реост ср}}$ — средний ток реостатного контура за период импульсного цикла, А. $I_{\text{реост ср}}$ находится из выражения

$$I_{\text{реост ср}} = \frac{1}{T} \int I_{\text{реост}} dt. \quad (9)$$

Регулировочная характеристика приведена на рис. 9.

Выводы. 1. Следящая система электродинамического торможения повышает технико-экономические показатели электропоездов постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями.

2. Предложенный вариант следящей системы позволяет регулировать величины токов рекупирующего и реостатного контуров в зависимости от эквивалентного сопротивления потребителя энергии рекуперации. При уставке тока обмотки якорей 350 А максимальный ток рекуперации в режиме рекуперативно-реостатного торможения равен 250 А при сохранении тока реостатного контура 100 А.

3. Результаты исследования на математической имитационной модели с помощью пакета Simulink среды Matlab показали способность системы управления торможением с интегрированной следящей системой стабилизировать ток якоря при набросе напряжения контактной сети уменьшением сопротивления реостатного контура и увеличением тока возбуждения, а при снижении напряжения контактной сети — уменьшением тока возбуждения.

4. Применение статического преобразователя собственных нужд позволяет увеличить максимальный ток возбуждения до 350 А и расширить тем самым зону применения рекуперативного торможения, а также снизить эксплуатационные расходы и массу подвагонного оборудования.

5. Относительное увеличение отдаваемой энергии в систему тягового электроснабжения может достигать 30,8%. При доле энергии рекуперации на эксплуатируемых электропоездах, равной 15% от общего расхода, его (расхода) снижение за счет следящей системы составит 4,62%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров О. Н. К оценке энергетической эффективности перспективных пригородных электропоездов постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1998. № 6. С. 35–39.
2. Назаров О. Н. Перспективный подвижной состав: проблемы и решения // Локомотив. 2005. № 5. С. 5–9.
3. Списки подвижного состава [Электронный ресурс] // Сайт TrainPix. URL: <https://trainpix.org/list.php?mid=1> (дата обращения: 06.06.2018 г.).
4. Методические рекомендации по определению экономической эффективности мероприятий научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте / ВНИИЖТ МПС. М.: Транспорт, 1991. 239 с.
5. Симак Р. С. Повышение энергоэффективности ОАО «РЖД» в контексте энергетической стратегии России // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 6. С. 21–25.
6. Об утверждении государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики: распоряжение Правительства РФ от 03.04.2013 № 512-р // Собрание законодательства РФ. 2013. № 14 (8 апр.). Ст. 1739.
7. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника: учеб.: в 2 т. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. Т. 1: Электроника. 480 с. Т. 2: Электронная преобразовательная техника. 307 с.
8. Евстафьев А. М., Зеленченко А. П., Мищенко В. М. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения пригородных электропоездов постоянного тока // Известия ПГУПС. 2014. № 3. С. 63–69.
9. Якушев А. Я. Совершенствование системы управления электропоездами постоянного тока // Транспортные средства и техника. 2012. № 2. С. 48–51.
10. Performance indices of stationary energy storage in the traction substations of the Moscow Metro / L. A. Baranov, V. A. Grechishnikov, A. V. Ershov et al. // Russian Electrical Engineering. August 2014. Vol. 85, iss. 8. P. 493–497. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068371214080033> (дата обращения: 28.06.2018 г.).
11. Adaptive systems of traction power supply / V. I. Sopov, N. I. Shchurov, A. V. Ivanov, A. P. Kuznetsov // Russian Electrical Engineering. December 2014. Vol. 85, iss. 12. P. 729–733. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068371214120141> (дата обращения: 28.06.2018 г.).
12. Баранов В. А. Совершенствование электрооборудования электропоездов с коллекторным тяговым приводом // Вестник ВЭЛНИИ. 2010. № 2. С. 147–154.
13. Тяговые электрические машины: учеб. / В. Г. Щербаков, А. Д. Петрушин, Б. И. Хоменко и др.; под ред. В. Г. Щербакова, А. Д. Петрушина. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 641 с.
14. Электропривод постоянного тока: патент 164435 ФИПС (Роспатент): МПК В60L 9/04 (2006/01) / В. А. Баранов, А. С. Мазнев, И. П. Видулов; патентообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС. № 2016100894/11; заявл. 12.01.2016; опубл. 27.08.2016. Бюл. № 24.
15. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие. СПб.: Корона Принт, 2001. 320 с.
16. Savos'kin A. N., Pudovikov O. E., Garbuzov I. I. Analysis of electromagnetic processes in the traction network under the interaction of electric locomotives in the regeneration and traction modes // Russian Electrical Engineering. May 2014. Vol. 85, iss. 5. P. 305–311. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068371214050113> (дата обращения: 28.06.2018 г.).
17. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока. М.: Энергия, 1974. 112 с.
18. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом. М.: Маршрут, 2005. 360 с.
19. Баранов В. А. Электрические схемы электропоездов постоянного тока с электрическим торможением // Локомотив. 2009. № 8. С. 36–37; № 9. С. 26–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРАНОВ Валерий Александрович,

канд. техн. наук, дежурный по станции, Санкт-Петербургский центр организации работы станций, Октябрьская дирекция управления движением ОАО «РЖД»

ВИКУЛОВ Илья Павлович,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрическая тяга», ФГБОУ ВО ПГУПС

КИСЕЛЕВ Александр Александрович,

аспирант, кафедра «Электрическая тяга», ФГБОУ ВО ПГУПС

МАЗНЕВ Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электрическая тяга», ФГБОУ ВО ПГУПС

Статья поступила в редакцию 29.06.2018 г., принята к публикации 16.08.2018 г.

Monitoring system of electrodynamic braking of DC electric train with collector traction motors

V. A. BARANOV¹, I. P. VIKULOV², A. A. KISELEV², A. S. MAZNEV²

¹ Saint Petersburg Center for Organization of Station Work of the Oktyabr'skaya Directorate of Traffic Management, Saint Petersburg, 191036, Russia

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Railways of the Emperor Alexander I (FGBOU VO PGUPS), Saint Petersburg, 190031, Russia

Abstract. High proportion of electric trains with collector traction motors in the multiple unit fleet and its low cost in comparison with electric trains with an asynchronous traction make it necessary to improve the control system of motor collectors. One of the ways is to create devices to improve the efficiency of recuperative braking.

A monitoring system of electrodynamic braking has been developed with preservation of the electric train standard equipment. It allows regulating the recuperative current depending on the possibility of its consumption by changing the resistance of the braking resistors.

Imitation model of DC electric train power circuit in the electrodynamic braking mode with a monitoring system was developed.

It takes into account the influence of eddy currents in the motor frame, armature current ripples and the catenary voltage increase during recuperative braking.

Electromagnetic processes in the electric train power circuit are investigated. Analysis of the obtained oscillograms shows the change in the armature current and the catenary voltage within the specified limits in the braking mode. Recuperative current regulator is tuned to an aperiodic transient with a time equal to 0.015 s.

The paper shows possibility of the monitoring system to regulate the armature current in the recuperative mode together with the automatic braking control system in case of increasing the catenary voltage. When the voltage fails, the monitoring system is not able to limit the increasing braking current, its reduction is effected by the magnetic flux of the traction motors.

Adjusting characteristic and the technical effect from the implementation of the monitoring system are calculated. The possibility of reducing the electric power consumption by 4.62 % is shown.

Keywords: direct current electric train; electrodynamic braking; pulse converter

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-301-309>

REFERENCES

1. Nazarov O. N. *K otsenke energeticheskoy effektivnosti perspektivnykh prigorodnykh elektropoezdov postoyannogo toka* [Evaluation of the energy efficiency of promising suburban DC electric trains]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1998, no. 6, pp. 35–39.
2. Nazarov O. N. *Perspektivnyy podvizhnoy sostav: problemy i resheniya* [Perspective rolling stock: problems and solutions]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2005, no. 5, pp. 5–9.
3. *Rolling stock lists*. URL: <https://trainpix.org/list.php?mid=1> (retrieved on 06.06.2018).
4. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu ekonomicheskoy effektivnosti meropriyatiy nauchno-tekhnicheskogo progressa na zheleznodorozhnom transporte* [Guidelines for determining the cost-effectiveness of scientific and technological progress in railway transport]. VNIIZhT MPS, Moscow, Transport Publ., 1991, 239 p.
5. Simak R. S. *Povyshenie energoeffektivnosti OAO "RZhD" v kontekste energeticheskoy strategii Rossii* [Improving the energy efficiency of Russian Railways in the context of Russia's energy strategy]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 6, pp. 21–25.
6. *On approval of the state program "Energy Efficiency and Energy Development"*. Government Decree of 03.04.2013 No. 512r. Collection of the legislation of the Russian Federation, 2013, no. 14, (Apr 8), art. 1739. (in Russ.).
7. Burkov A. T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika*. Ucheb.: v 2 t. [Electronics and converter equipment. Reference book in 2 vol.]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBOU "Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport"] Publ., 2015, Vol. 1: Elektronika [Electronics], 480 p.; Vol. 2: Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika [Electronic converter technology], 307 p.
8. Evstaf'ev A. M., Zelenchenko A. P., Mishchenko V. M. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti reкуперативного торможения prigorodnykh elektropoezdov postoyannogo toka* [Increasing the energy efficiency of regenerative braking of suburban DC electric trains]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2014, no 3, pp. 63–69.
9. Yakushev A. Ya. *Sovershenstvovanie sistemy upravleniya elektropoezdami postoyannogo toka* [Improving the control sys-

tem of direct current electric trains]. *Transportnye sredstva i tekhnika* [Vehicles and equipment], 2012, no. 2, pp. 48–51.

10. Baranov L. A., Grechishnikov V. A., Ershov A. V., Rodionov M. D., Shevlyugin M. V. *Performance indices of stationary energy storage in the traction substations of the Moscow Metro*. Russian Electrical Engineering. August 2014, Vol. 85, iss. 8, pp. 493–497. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068371214080033> (retrieved on 28.06.2018).

11. Sopov V. I., Shchurov N. I., Ivanov A. V., Kuznetsov A. P. *Adaptive systems of traction power supply*. Russian Electrical Engineering, December 2014, Vol. 85, iss. 12, pp. 729–733. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068371214120141> (retrieved on 28.06.2018).

12. Baranov V. A. *Sovershenstvovanie elektrooborudovaniya elektropoezdov s kollektornym tyagovym privodom* [Improvement of electrical equipment of electric trains with collector traction drive]. *Vestnik VEINII*, 2010, no. 2, pp. 147–154.

13. Scherbakov V. G., Petrushin A. D., Khomenko B. I., Sedov V. I., Pakhomin S. A., Maznev A. S., Kopakhch'yan P. G. *Tyagovye elektricheskie mashiny*. Ucheb. [Traction electrical machines. Reference book]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBOU "Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport"], 2016, 641 p.

14. Baranov V. A., Maznev A. S., Vikulov I. P. *DC electric drive*. Patent no. 164435 FIPS (Rospatent), publ. August 27, 2016, Bul. no. 24.

15. German-Galkin S. G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0*. Ucheb. posobie [Computer simulation of semiconductor systems in MATLAB 6.0. Reference book]. St. Petersburg, KoronaPrint Publ., 2001, 320 p.

16. Savos'kin A. N., Pudovikov O. E., Garbuzov I. I. *Analysis of electromagnetic processes in the traction network under the interaction of electric locomotives in the regeneration and traction modes*. Russian Electrical Engineering, May 2014, Vol. 85, iss. 5, pp. 305–311. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068371214050113> (retrieved on 28.06.2018).

17. Zhits M. Z. *Perekhodnye protsessy v mashinakh postoyannogo toka* [Transients in DC machines]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 112 p.

18. Plaks A. V. *Sistemy upravleniya elektricheskimi podvizhnymi sostavom* [Electric rolling stock control systems]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 360 p.

19. Baranov V. A. *Elektricheskie skhemy elektropoezdov postoyannogo toka s elektricheskimi tormozheniem* [Electric circuits of DC electric trains with electric braking]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2009, no. 8, pp. 36–37; no. 9, pp. 26–28.

ABOUT THE AUTHORS

Valeriy A. BARANOV,

Cand. Sci. (Eng.), Station Duty Officer, Saint Petersburg Center for Organization of Station Work, Oktyabr'skaya Directorate of Traffic Management of the JSC "RZD".

Il'ya P. VIKULOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Electric traction", FGBOU VO PGUPS

Aleksander A. KISELEV,

Post-graduate, Department "Electric traction", FGBOU VO PGUPS

Aleksander S. MAZNEV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Electric traction", FGBOU VO PGUPS

Received 29.06.2018

Accepted 16.08.2018

■ E-mail: akiselev1995@mail.ru (A. A. Kiselev)