УДК 629.423.25 DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-103-116

Исследование функциональной схемы и алгоритма работы следящей системы электродинамического торможения электропоезда постоянного тока

В. А. БАРАНОВ[1], И. П. ВИКУЛОВ[2], А. А. КИСЕЛЕВ[2], А. С. МАЗНЕВ[2]

[1] Санкт-Петербургский центр организации работы железнодорожных станций Октябрьской дирекции управления движением (ДЦС-3, Окт. Д, ЦД ОАО «РЖД»), 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. Выполнен анализ следящей системы электродинамического торможения электропоезда постоянного тока с коллекторным тяговым приводом, которая осуществляет регулирование тока рекуперации путем изменения сопротивления тормозного резистора, а тока якорей — за счет магнитного потока двигателей. Рассчитаны характеристики импульсного регулятора тормозного сопротивления для уставок тока якорей 250 и 350 А. Разработана функциональная схема следящей системы с описанием ее отдельных элементов. На имитационной модели исследованы электромагнитные процессы в силовой цепи электропоезда при изменяющемся токе потребления. На основе анализа результатов моделирования показана возможность следящей системы регулировать ток якорей при полном поглощении электроэнергии потребителем. Уточнен алгоритм перехода следящей системы из режима рекуперативно-реостатного торможения в реостатный при избыточной генерации электроэнергии. Разработанный алгоритм следящей системы обеспечивает устойчивую реализацию тормозного усилия во всем диапазоне скоростей движения и при различных уровнях потребления вырабатываемой электроэнергии. Предложена схема реостатного торможения со стабилизацией максимального значения тока возбуждения на низких скоростях движения.

Ключевые слова: электропоезд постоянного тока; электродинамическое торможение; следящая система; функциональная схема

Введение. Одним из ключевых способов экономии эксплуатационных затрат в пригородном движении на линиях, электрифицированных на постоянном токе, является увеличение возврата электроэнергии при использовании машинистами режима рекуперативного торможения. Однако его применение ограничено непостоянством потребителя вырабатываемой энергии, которое связано с особенностями секционирования контактной сети и недостаточным количеством тяговых подстанций с инверторными преобразователями [1, 2, 3]. На моторвагонном подвижном составе (МВПС) с коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД) серий ЭР2Т, ЭТ2М, ЭД4М, ЭП2Д отсутствует возможность обратного переключения в режим рекуперации в случае восстановления потребления. Схема каждого электропоезда работает в режиме рекуперативно-реостатного торможения и позволяет реализовывать ток рекуперации 20–50 А при токе якорей 350 А [4, 5]. В результате среднеэксплуатационная величина возврата энергии МВПС составляет 70–90 % от возможной [6].

Системы управления электродинамическим торможением (ЭДТ), отслеживающие величину напряжения контактной сети (КС), позволяют повысить процент возврата электрической энергии от применения рекуперативного торможения за счет оперативного перераспределения энергии, вырабатываемой ТЭД. Подобные системы (так называемые следящие системы) используются на электропоездах постоянного тока с асинхронным тяговым приводом (ЭВС1, ЭВС2, ЭС1, ЭС2Г, ЭГ2Тв) [7, 8]. В них предусмотрено автоматическое подключение тормозных резисторов по достижении максимального значения напряжения на конденсаторе фильтра автономного инвертора и их отключение после снижения напряжения до определенного уровня [9]. Существуют схемы ЭДТ для коллекторного тягового привода с импульсными преобразователями: первый преобразователь обеспечивает стабилизацию тока двигателя, а второй подключает тормозные резисторы по сигналу датчика контроля входного напряжения [10]. Также на основе силовой и полупроводниковой электроники и микропроцессорной техники возможна реализация устройств обмена энергией с бортовыми накопителями [11, 12, 13, 14, 15]. Однако применение как импульсных систем регулирования напряжения, так и согласующих преобразователей с бортовыми источниками энергии связано с принципиальным изменением электрооборудования и значительными затратами на его установку.

В статье [16] авторами предложена следящая система на основе патента [17], которая обеспе-

E-mail: akiselev1995@mail.ru (А. А. Киселев)

чивает поддержание заданного тока рекуперации за счет импульсного регулирования сопротивления тормозного резистора и заданного тока якорей путем управления возбуждением. Данную систему можно установить на электропоезд постоянного тока с коллекторными ТЭД. В [16] описан принцип работы следящей системы, рассчитаны сопротивление добавочной секции и регулировочная характеристика импульсного преобразователя при токе якорей 350 А, на имитационной модели исследована работа следящей системы при максимальном токе потребителя энергии рекуперации. Показана способность системы стабилизировать ток якорей в режиме торможения в случае завышения напряжения сети путем изменения сопротивления тормозного резистора и магнитного потока двигателей, а при снижении напряжения – только за счет магнитного потока. Оценено ожидаемое уменьшение общего расхода электроэнергии от внедрения системы.

Используя результаты описанного выше исследования [16], в настоящей статье предлагается подробно рассмотреть работу следящей системы, определить границы применимости алгоритма ее работы и пути совершенствования. Для этого целесообразно рассчитать регулировочные характеристики для всех уставок тока якорей тяговых двигателей электропоезда, составить алгоритм и функциональную схему, позволяющую рассмотреть работу отдельных компонентов, создать на ее основе структурную схему для дальнейшей настройки задающих, регулирующих и исполнительных устройств системы. Также следует рассмотреть работу следящей системы при изменяющемся токе потребителя, обозначить пути решения выявленных недостатков и апробировать их на модели.

В ходе исследования использовались методы математического анализа и имитационного моделирования в программном пакете Simulink среды MatLab [18]. В качестве объекта исследования был принят электропоезд серии ЭД4М с тяговыми двигателями ТЭД-2У.

1. Алгоритм работы следящей системы ЭДТ и ее регулировочные характеристики. На рис. 1 представлена упрощенная принципиальная схема силовой цепи электропоезда с установленной следящей системой ЭДТ [16].

Схема содержит последовательно соединенные обмотки якорей Я1–Я4 четырех тяговых двигателей, подключенные к КС через диод рекуперации *VD*. Параллельно обмоткам якорей подключена последовательность элементов, состоящая из тиристора *VS*, основной *R*1 и добавочной *R*2 секций тормозных резисторов, последняя шунтирована импульсным преобразователем (ИП). Обмотки возбуждения ОВ1–ОВ4 получают питание от мостового тиристорного выпрямителя *VS*1–*VS*6. Со стороны минусового провода контуры обмоток якорей и возбуждения имеют общую ветвь с быстродействующим контактором защиты (КЗ) от токов короткого замыкания, шунтирующим защитный резистор *R*3. Принцип работы схемы (рис. 1) рассмотрен в [16].

С целью исследования устойчивости работы силовой цепи со следящей системой (рис. 1) составлен алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 2. Перед системой поставлены две задачи: стабилизация тока якорей тяговых двигателей и максимизация тока рекуперации.

Первая задача решается в рамках алгоритма с помощью регулятора тока якорей, определяющего величину угла регулирования $\alpha_в$ мостового преобразователя *VS*1–*VS*6 (так же как и в схемах ЭДТ электропоездов постоянного тока с коллекторными ТЭД) [4]. Например, в случае превышения тока якорей заданного значения регулятор пересчитывает угол $\alpha_в$ на большую величину. Уменьшается напряжение на выходе преобразователя *VS*1–*VS*6 и пропорционально ему ток возбуждения и электродвижущая сила (ЭДС) тяговых двигателей, что приводит к снижению тока якорей.

Вторая задача решается с помощью регулятора тока рекуперации, который поддерживает максимальное соотношение токов рекуперации и якорей $K_{рек} = I_{рек}/I_я$, изменяя коэффициент заполнения ИП. В случае если соотношение будет меньше заданного, следящая система уменьшает коэффициент заполнения. Вследствие этого увеличивается общее сопротивление тормозных резисторов (так как в цепь вводится часть добавочной секции *R*2, сопротивление которой обратно пропорционально коэффициенту заполнения) и снижается протекающий через них ток. Он (реостатный ток) замещается током рекуперации при условии полного потребления вырабатываемой электропоездом энергии.

Следящая система работает следующим образом. В начале алгоритма задаются исходные значения переменных (блок 2). Переменная срыва рекуперации $N_{ср}$ и коэффициент заполнения λ импульсного преобразователя приравниваются к нулю, значение угла $\alpha_в$ равняется расчетному для текущей скорости движения в соответствии с регулировочной характеристикой $\alpha_в(I_в)$ преобразователя *VS*1–*VS*6 и кривой намагничивания двигателей $СФ(I_в)$ [19]. На протяжении всего режима ЭДТ следящая система управления увеличивает ток возбуждения двигателей пропорционально снижению скорости движения. Пока ток возбуждения $I_в$ не достиг значения $I_{в\ max}$, равного 250 А (блок 3), и напряжение на токоприемнике не превышает максимально допустимого значения $U_{кс\ max}$, равного 3950 В (блок 4), при условии, что ток якорей $I_я$ меньше заданной уставки $I_{я\ уст}$, равной 350 А (блок 5),

угол $\alpha_в$ уменьшается (блок 6). Значение $I_я$ увеличивается до $I_{я\,уст}$. Если $I_я$ больше $I_{я\,уст}$, то угол $\alpha_в$ увеличивается (блок 7), обеспечивая уменьшение $I_я$. Далее осуществляется проверка наличия тока рекуперации $I_{рек}$. При условии, что ток рекуперации больше минимального значения $I_{рек\,min}$, равного 20 А (блок 8), и $N_{ср}$ меньше единицы (так как срыва рекуперации не было) (блок 9), осуществляется возврат к проверке тока возбуждения $I_в$ (блок 3). Если потребитель отсутствует, то $I_{рек}$ равен нулю, происходит увеличение напряжения контактной сети $U_{кс}$. По достижении $U_{кс\,max}$ (проверяемого в блоке 4) $N_{ср}$ присваивается значение единицы (блок 10). Подается сигнал (Вкл *VS*) на отпирание тиристора *VS*, ИП начинает работать с максимальным коэффициентом заполнения λ_{max} (блок 11), что приводит к замыканию обмоток якорей Я1–Я4 на резистор *R*1. Реализуется реостатное торможение с независимым возбуждением. В случае появления потребителя энергии рекуперации произойдет некоторое снижение напряжения КС, и часть тока якорей через диод рекуперации *VD* будет поступать в КС (рис. 1). При токе рекуперации, превышающем минимальное значение $I_{рек\,min}$ (блок 8), и условии произошедшего ранее срыва рекуперации (блок 9) регулирование данного тока осуществляется следующим образом. Если отношение тока рекуперации к току якорей $I_{рек}/I_я$ меньше заданного (блок 14), то коэффициент заполнения λ уменьшается (блок 15), увеличивается сопротивление секции *R*2 и снижается ток реостатного контура. В результате ток рекуперации замещает реостатный ток. При уставке тока якорей 250 А отношение $I_{рек}/I_я$ принимается равным 3/5, а при уставке 350 А — равным 5/7. В случае когда потребитель снова пропадает, ток рекуперации уменьшается, и по скорости изменения этого тока отслеживается его критическое снижение $-dI_{крит}/dt$ (блок 12). В случае обнаружения следящей системой подобного снижения происходит увеличение коэффициента заполнения ИП до максимального значения в соответствии с регулировочной характеристикой (блок 13). Отслеживание по минимальной величине тока рекуперации $I_{рек\,min}$ в данном случае нецелесообразно, так как за время снижения тока до этого значения напряжение на токоприемнике существенно увеличится, что может привести к возрастанию тока якорей до недопустимых величин.

Когда ток возбуждения достигнет максимального значения $I_{в\,max}$, равного 250 А (блок 3), если до этого не было перехода в режим реостатного торможения (переменная $N_{ср}$ равна нулю) (блок 17), включается тиристор *VS* (блок 18). Аналогично увеличивается коэффициент заполнения ИП до максимального значения λ_{max} (блоки 19 и 20). В ином случае *VS* и ИП уже включены. Осуществляется реостатное торможение с выводом ступеней тормозных резисторов

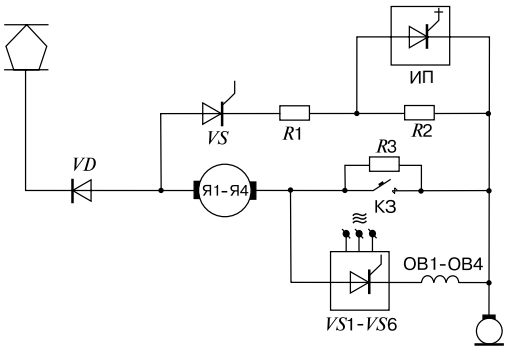

Рис. 1. Схема силовой цепи электропоезда в режиме ЭДТ (рабочем) [16, рис. 2]
Fig. 1. Scheme of the power circuit of the electric train in the electrodynamic braking (EDB) mode (working) [16, fig. 2]

(их основной секции *R*1) и стабилизацией $I_в$. Так как в микропроцессорную систему управления электропоездов серий ЭД4М, ЭТ2М, ЭП2Д включен датчик тока возбуждения (ДТВ), который используется только для обнаружения максимального тока $I_{в\,max}$ (250 А), а процесс торможения с самовозбуждением довольно кратковременный, то целесообразно вместо множества переключений контактных элементов и разрыва контуров оставить независимое возбуждение ТЭД с поддержанием максимального тока возбуждения. При токе возбуждения меньше значения $I_{в\,max}$ (блок 21) угол $\alpha_в$ уменьшается (блок 22), при большем токе возбуждения ($I_в > I_{в\,max}$) — увеличивается (блок 23). Если ток якорей уменьшается ниже минимального значения $I_{я\,min}$ (блок 24), равного 320 А (заданного с помощью переключателя В400 [4]), происходит ступенчатое уменьшение тормозного сопротивления основной секции *R*1 до минимального значения $R_{т\,min}$, равного 1,3 Ом (блок 25 и 26). По достижении этой величины процесс электродинамического торможения завершается (блок 27). Далее осуществляется переход к электропневматическому дотормаживанию, алгоритм которого не указан на рис. 2, так как соответствует штатному на электропоездах постоянного тока с контакторно-реостатной системой регулирования.

Таким образом, алгоритм (см. рис. 2) охватывает все режимы ЭДТ электропоезда с учетом внесенных авторских предложений в схему и систему управления.

Параметры работы алгоритма следящей системы зависят от величины уставки тока якорей ТЭД. На электропоездах постоянного тока типа ЭД4М, ЭТ2М в блоке управления торможением (БУТ) заданы три уставки тока якорей (100, 250 и 350 А) [4]. Предлагаемая к установке следящая система при уставке тока, равной 100 А, будет действовать по штатному алгоритму, так как минимальный ток, протекающий через тормозные резисторы, не превышает этого значения.

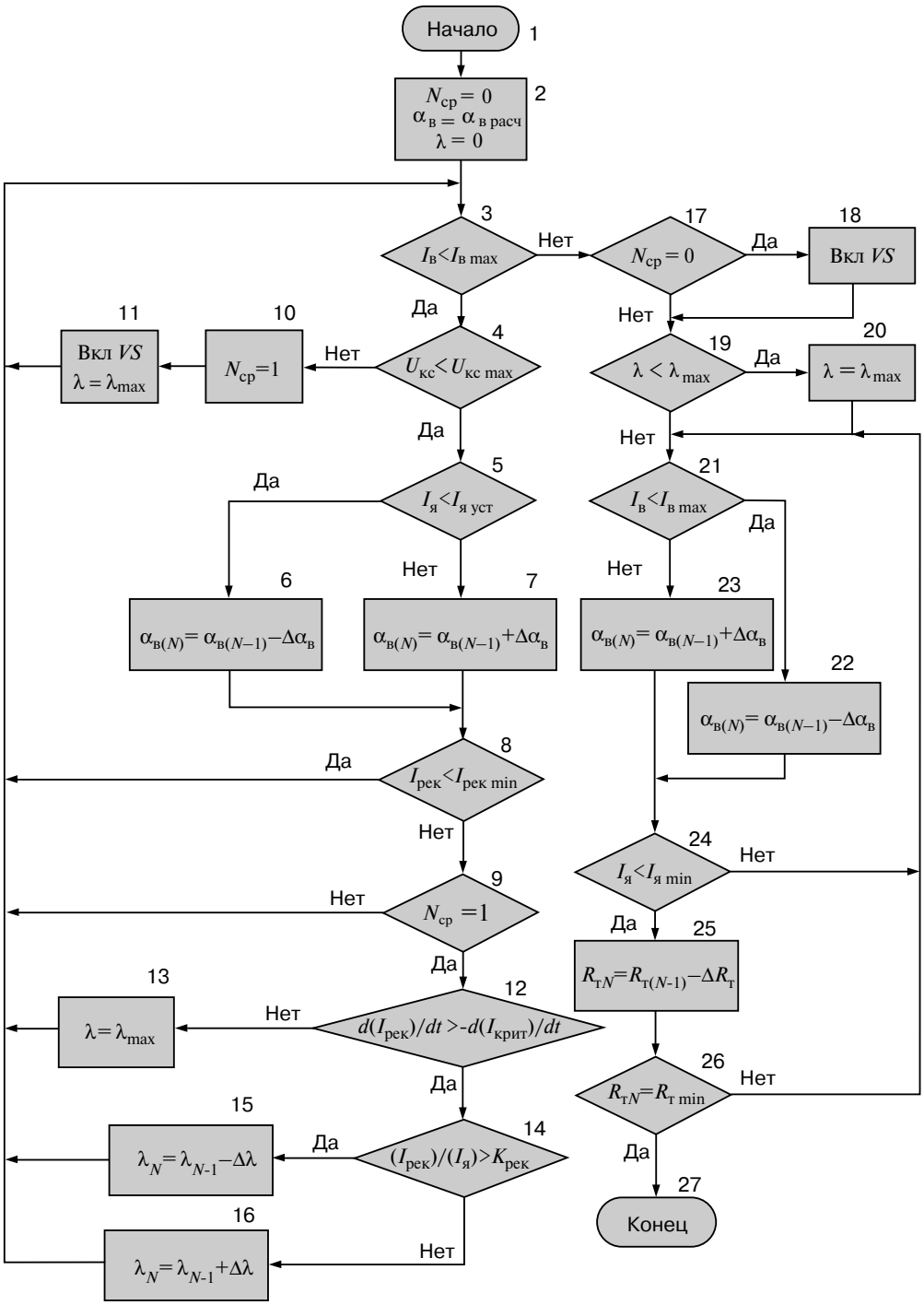

Рис. 2. Блок-схема алгоритма следящей системы ЭДТ
Fig. 2. Block diagram of the algorithm of the EDB tracking system

По результатам расчета для уставки тока якорей, равной 350 А, сопротивления секций тормозных резисторов $R1$ и $R2$ соответственно равны 10 и 25 Ом [16]. При уставке тока якорей, равной 250 А, целесообразно при входе в режим реостатного торможения для снижения бросков тока якорей ТЭД увеличить сопротивление тормозных резисторов, для чего ИП должен работать с меньшим значением максимального коэффициента заполнения λ_{max}.

Требуемое значение сопротивления $R1$ основной секции тормозных резисторов при уставке тока якорей 250 А определяется по (1) [16]:

$$R1_{250\,А} = \frac{U_{тп\,ср}}{I_{max}} = \frac{3500}{250} = 14\ Ом, \quad (1)$$

где $U_{тп\,ср}$ — средняя величина напряжения на токоприемнике; I_{max} — максимальный тормозной ток при данной уставке.

Максимальный коэффициент заполнения ИП при уставке тока якорей 250 А вычисляется следующим образом:

$$\lambda_{max\,250\,А} = \lambda_{max\,350\,А} - \frac{R1_{250\,А} - R1_{350\,А}}{R2} = 1 - \frac{14-10}{25} = 0{,}84, \quad (2)$$

где $R1_{350\,А}$ — сопротивление основной секции тормозных резисторов при уставке тока якорей 350 А, Ом; $\lambda_{max\,350\,А}$ — максимальный коэффициент заполнения ИП при уставке тока якорей 350 А, равный единице [16].

Следовательно, при минимальном коэффициенте заполнения λ_{min}, равном нулю, ток рекуперации достигнет максимального значения, определяемого следующим образом:

$$I_{рек\,max\,250\,А} = I_{max} - I_{min} = 250 - 100 = 150\ А, \quad (3)$$

где I_{max}, I_{min} — максимальный и минимальный ток реостатного контура соответственно, А.

На рис. 3 приведены регулировочные характеристики ИП при уставках тока якорей 250 и 350 А.

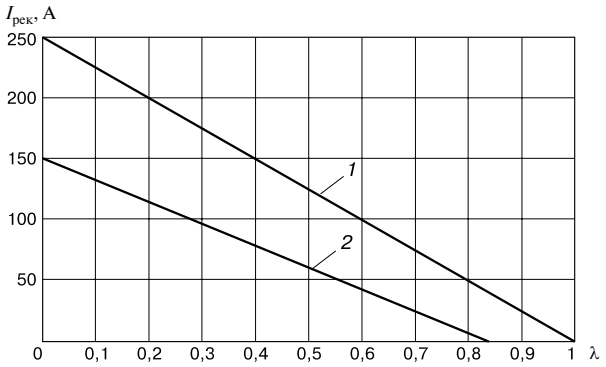

Рис. 3. Регулировочные характеристики импульсного преобразователя при уставках тока якорей 250 А (кривая *1*) и 350 А (кривая *2*)

Fig. 3. Adjusting characteristics of a pulse converter at current settings of 250 A armature (curve *1*) and 350 A armature (curve *2*)

2. Функциональная схема следящей системы ЭДТ. На рис. 4 представлена упрощенная принципиальная схема силовых цепей электропоезда постоянного тока с функциональной схемой следящей системы ЭДТ, составленной в соответствии с алгоритмом ее работы.

По ней возможно составить структурную схему с целью расчета параметров настройки основных элементов системы управления (задающие устройства, датчики тока, регуляторы токов якорей и рекуперации).

Ниже рассмотрена работа функциональной схемы в различных режимах ЭДТ.

2.1. Рекуперативное торможение. Ток рекуперации определяется соотношением ЭДС вращения двигателей, напряжения сети и сопротивлений цепи. Он замыкается по контуру «заземляющее устройство — КЗ — ДТЯ1 — Я1 — Я4 — ДТР — *VD* — токоприемник» (ДТЯ — датчик тока якорей; ДТР — датчик тока рекуперации) и равен току якорей (см. рис. 1). Величина тока регулируется за счет изменения угла $\alpha_в$ управляемого выпрямителя возбуждения (УВВ). Уставка тока якорей выставляется с помощью задатчика тока якорей (ЗТЯ) и определяется в соответствии с положением контроллера машиниста (КМ). Блок переключений (БП) находится в нулевом положении по условию $I_в < I_{в\,max}$. Поэтому на вход регулятора тока якорей (РТЯ) поступает сигнал рассогласования $\Delta I_я$ с выхода элемента сравнения ЭС1 уставки $I_{я\,уст}$ и сигнала $I_я$ датчика ДТЯ1. Рассчитанная величина угла регулирования $\Delta\alpha_в(p)$ проходит через блок ограничения Огр1, в котором задан диапазон его изменения от 20 до 170 эл. град. По полученному значению на таймере фазорегулятора тока возбуждения (ФРВ) вычисляется соответствующее время $\tau_в$ от момента синхронизации до момента подачи импульса управления на УВВ. В выходном усилителе возбуждения (ВУВ) формируются управляющие импульсы $\Pi\alpha_в$ и распределяются по соответствующим тиристорным плечам выпрямителя возбуждения *VS*1–*VS*6 [20].

2.2. Замещающее реостатное торможение. В случае недостаточного потребления энергии рекуперации напряжение контактной сети $U_{кс}$, измеряемое с помощью датчика напряжения (ДН), увеличивается и в определенный момент превышает максимально допустимое значение $U_{кс\ max}$, равное 3950 В. На выходе элемента сравнения ЭС2 сигнал рассогласования $\Delta U_{кс}$ становится положительным, на выходе блока фиксации БФ1 закрепляется логическая единица. Сигнал с данного блока проходит логическое ИЛИ и активирует блок выходного усилителя тиристора (ВУТ). С блока ВУТ приходит импульс управления на тиристор *VS*. Положительный сигнал рассогласования $\Delta U_{кс}$ также активирует блок плавного переключения БПП1 (при появлении положительного сигнала на входе создает на выходе величину, изменяющуюся по апериодическому закону до значения, соответствующего максимальному коэффициенту заполнения λ_{max}), сигнал с которого проходит через блок ИЛИ MAX (передает на выход сигнал входа с максимальным значением) и фазорегулятор импульсного преобразователя (ФРИ), вычисляющий время $\tau_и$, соответствующее максимальному коэффициенту

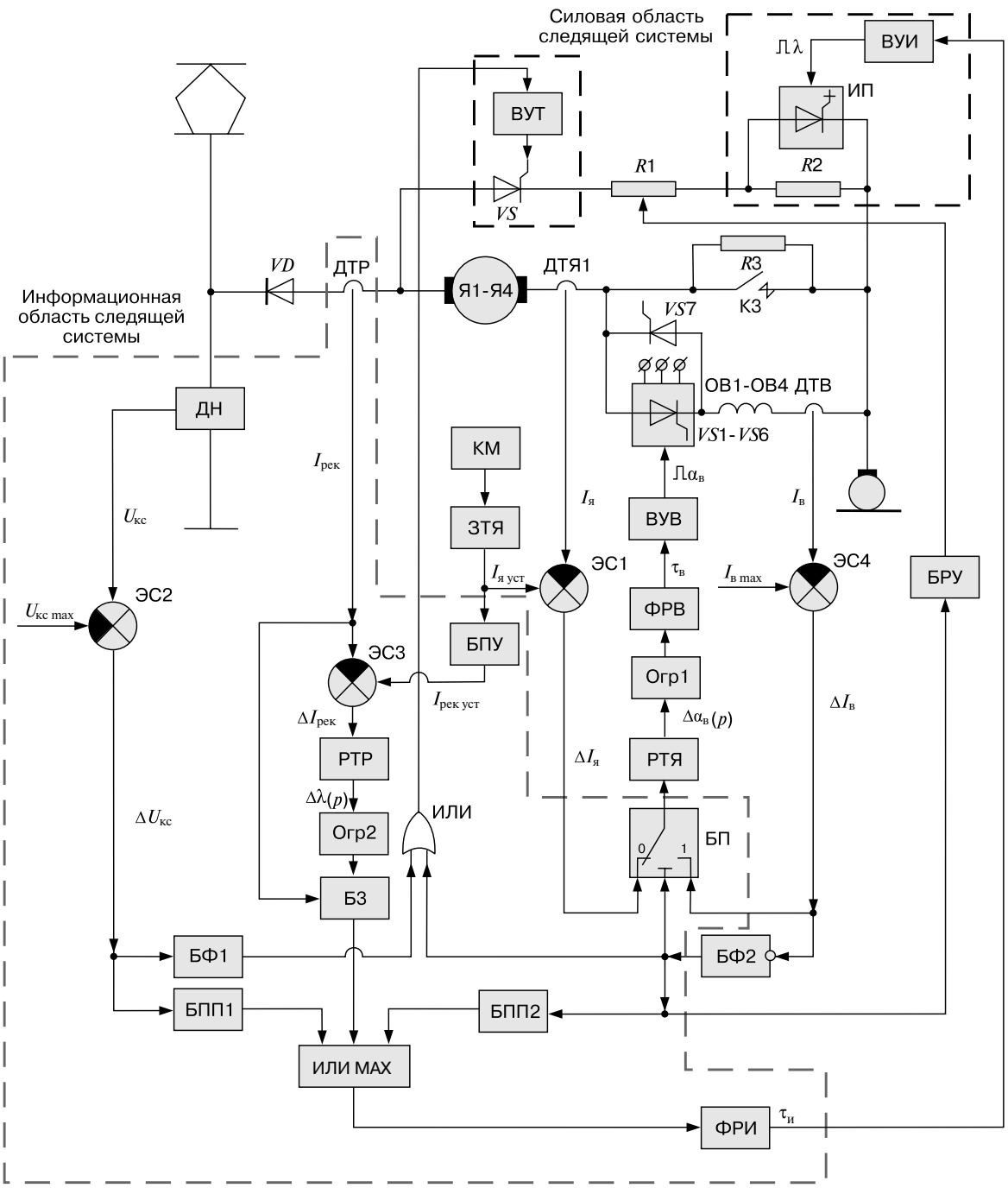

Рис. 4. Схема силовой цепи моторного вагона электропоезда и функциональная схема следящей системы ЭДТ (серым пунктиром показана часть системы управления, относящаяся к следящей системе, черным — элементы силовой цепи и усилители сигналов управления, входящие в следящую систему)

Fig. 4. Circuit connections diagram of an electric train car and the functional diagram of the EDB tracking system (the gray dotted line shows the part of the control system related to the tracking system, black — elements of the power circuit and control signal amplifiers included in the tracking system)

заполнения λ_{max} (значение коэффициента заполнения изменяется в зависимости от выходных величин блока запрета (БЗ), БПП1 и БПП2). Блок выходного усилителя импульсного преобразователя (ВУИ) формирует соответствующие импульсы управления $\Pi\lambda$ на ИП. Собирается контур протекания тока якорей через секцию тормозных резисторов $R1$. Поскольку ток рекуперации $I_{рек}$ равен нулю, блок БЗ контура его регулирования формирует на выходе значение, соответствующее максимальному коэффициенту заполне-

ния λ_{max} (так как ток рекуперации меньше заданного в блоке минимального значения $I_{рек\ min}$). Соответственно, если напряжение $U_{кс}$ уменьшится ниже максимального значения (на выходе БПП1 будет ноль) и ток рекуперации останется меньше минимального значения $I_{рек\ min}$ (на выходе БЗ будет максимальное значение), гарантирована работа ИП с максимальным коэффициентом заполнения λ_{max} и осуществление электропоездом режима реостатного торможения с независимым возбуждением, пока ток возбуждения не достигнет максимума $I_{в\ max}$.

2.3. Рекуперативно-реостатное торможение. В случае увеличения мощности потребителя электроэнергии либо его появления после срыва рекуперации в КС будет протекать небольшая часть тока якорей. Эта часть тока, измеряемая ДТР, превысит минимальный порог $I_{рек\ min}$, блок БЗ деактивируется. Ток рекуперации $I_{рек}$ будет изменяться путем воздействия регулятора тока рекуперации (РТР) на коэффициент заполнения λ. На вход РТР приходит сигнал рассогласования $\Delta I_{рек}$ с элемента сравнения ЭС3 уставки тока рекуперации $I_{рек\ уст}$, значение которой получено с помощью блока преобразования уставки (БПУ) (в нем происходит умножение $I_{я\ уст}$ на коэффициент $K_{рек}$), и сигнала $I_{рек}$ датчика ДТР.

Сигнал, соответствующий вычисленному коэффициенту заполнения $\Delta\lambda(p)$, проходит через блок ограничения Огр2, задающий диапазон его изменения от нуля до максимального значения λ_{max}. После блока ИЛИ МАХ сигнал поступает на вход таймера ФРИ и далее в ВУИ, который формирует соответствующие импульсы управления λ с полученным коэффициентом заполнения λ.

В случае если $I_{рек}$ меньше $I_{рек\ уст}$ регулятор РТР будет пересчитывать коэффициент заполнения λ на меньшее значение, что приведет к увеличению сопротивления тормозных резисторов $R1-R2$. Ток реостатного контура снизится и вызовет увеличение тока рекуперации.

В случае снижения мощности потребителя электроэнергии напряжение $U_{кс}$ будет расти и будет падать ток рекуперации $I_{рек}$, следящая система будет уменьшать коэффициент заполнения λ. При превышении максимального значения на выходе блока БПП1 сформируется изменяющееся до максимума по апериодическому закону значение коэффициента заполнения λ, которое пройдет через блоки ИЛИ МАХ, ФРИ и ВУИ. В результате ИП будет работать с максимальным коэффициентом заполнения λ_{max}, следящая система перейдет в режим реостатного торможения.

2.4. Реостатное торможение с выводом ступеней тормозного резистора при независимом возбуждении. По достижении тока возбуждения, измеряемого ДТВ, максимального значения $I_{в\ max}$ на выходе блока БФ2 с инвертирующим входом сформируется величина, соответствующая максимальному коэффициенту заполнения λ_{max}. Данный сигнал активирует блок ВУТ для сборки реостатного контура, если до этого не происходило превышение напряжения КС максимального значения $U_{кс\ max}$ (в ином случае тиристор *VS* и ИП уже включены). С помощью сигнала на выходе блока БФ2 осуществляется переключение блока БП в положение «1», в результате чего на вход регулятора РТЯ будет поступать сигнал рассогласования $\Delta I_{в}$ с элемента сравнения ЭС4. УВВ будет осуществлять стабилизацию максимального значения тока возбуждения $I_{в\ max}$. Сигнал с блока БФ2 активирует блок БПП2, на выходе которого формируется изменяющееся до максимума по апериодическому закону значение коэффициента заполнения λ, которое проходит через блоки ИЛИ МАХ, ФРИ и ВУИ. ИП будет работать с максимальным коэффициентом заполнения λ_{max}, сформируется контур протекания тока якорей через секцию тормозных резисторов *R*1. Тот же сигнал активирует блок регулирования ускорения (БРУ), который будет управлять выводом ступеней тормозных резисторов по значению уставки тока якорей, заданному с помощью переключателя В400.

3. Результаты моделирования работы силовой цепи электропоезда постоянного тока со следящей системой. С целью исследования электромагнитных процессов в программном пакете Simulink среды MatLab создана модель электропоезда ЭД4М с двигателями ТЭД-2У и установленной следящей системой ЭДТ. Исходные данные имитационной модели соответствуют приведенным в [16]. Скорость начала торможения 10-вагонного электропоезда ЭД4М составляет 120 км/ч, уставка тормозного тока равна 350 А. Тяговая подстанция, оборудованная выпрямительным агрегатом, работает по схеме параллельного соединения путей в режиме консольного питания [1]. Длина фидерной зоны равна 10 км. В качестве потребителей энергии рекуперации принят электрический подвижной состав постоянного тока: первым потребителем выбран электровоз ВЛ10, работающий в тяговом режиме на последовательно-параллельном соединении ТЭД, вторым потребителем — электровоз ВЛ10 на последовательном соединении ТЭД. Модели электровозов представлены в виде источников ЭДС с эквивалентной активно-индуктивной цепью обмоток ТЭД [19]. Первый потребитель принимает электроэнергию, вырабатываемую электропоездом в режиме рекуперативного торможения, второй потребитель — в режиме рекуперативно-реостатного торможения.

Дополнительно к режиму полного потребления тока рекуперации встречным электроподвижным составом, рассмотренному в [16], исследован режим работы с ограниченным потреблением.

На рис. 5 и 6 приведены осциллограммы токов, скорости и напряжения на токоприемнике электропоезда при отдаче электроэнергии в режиме рекуперативно-реостатного торможения электровозу (второму потребителю), ток потребления которого равен соответственно 500 А (режим пуска) и 150 А (выход на автоматическую характеристику ТЭД). Назовем первый случай полным поглощением энергии рекуперации, так как ток электропоезда, изменяющийся в пределах уставки 250 А, является частью потребляемого тока электровоза, равного 500 А. Второй случай назовем избыточной генерацией электроэнергии, так как электровоз в установившемся режиме может потребить ток не более 150 А, а следящая система электропоезда настроена на ток рекуперации, равный 250 А.

Области со сплошным цветом на рис. 5 и 6 обозначают импульсный характер изменения величины тока или напряжения с высокой частотой.

В течение первых 3 с реализуется подготовительный режим, обеспечивающий создание необходимого магнитного потока для входа в рекуперацию. Далее (с 3 до 7 с) реализуется рекуперативное торможение, пока не происходит исчезновение потребителя и переход на замещающее реостатное торможение. В момент времени 10 с в фидерной зоне появляется второй электровоз. На рис. 7 и 8 показаны результаты моделирования на интервале времени от 10 до 10,5 с при появлении второго электровоза.

В случае если установившееся значение пускового тока электровоза 500 А больше уставки тока рекуперации электропоезда 250 А (рис. 7), то в момент времени 10 с происходит замещение части реостатного тока $I_{реост}$ током рекуперации $I_{рек}$. В установившемся режиме через тормозной резистор протекает ток $I_{реост}$ величиной 100 А при $I_я$, равном 350 А. Характер переходного процесса малоколебательный. При $I_{рек}$ больше уставки 250 А ИП работает с минимальным коэффициентом заполнения λ. При $I_{рек}$ меньше уставки 250 А регулятор РТР увеличивает коэффициент заполнения λ и демпфирует снижение тока якорей $I_я$.

Если установившееся значение тока электровоза 150 А меньше уставки тока рекуперации электропоезда 250 А (рис. 8), то система управления не может обеспечить заданное значение тормозного тока якорей $I_я$, так как при уменьшающемся токе рекуперации $I_{рек}$ она снижает коэффициент заполнения λ с уменьшением протекающего через тормозной резистор тока $I_{реост}$. Ток якорей $I_я$ уменьшается, система управления увеличивает ЭДС тяговых двигателей по каналу тока возбуждения $I_в$, происходит завышение напряжения на токоприемнике $U_{кс}$. Это приводит к неустойчивой

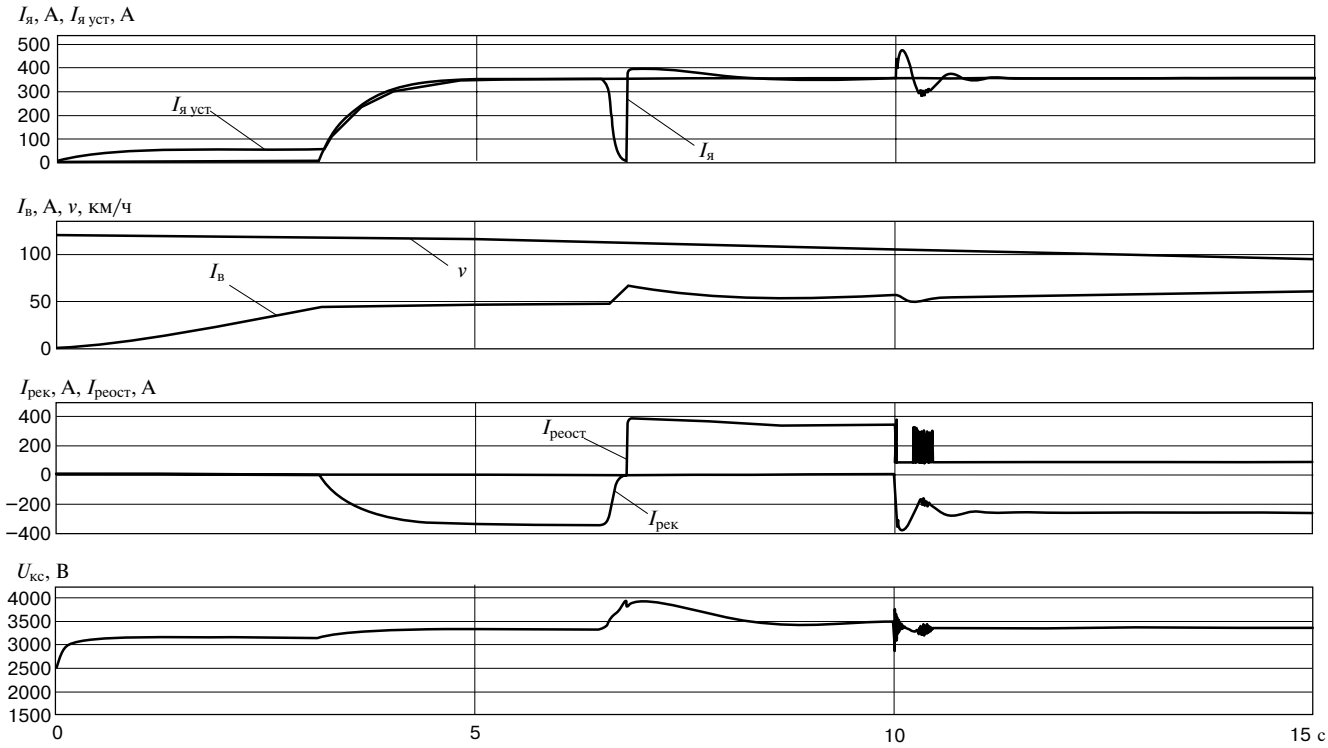

Рис. 5. Результаты моделирования работы силовой схемы электропоезда со следящей системой ЭДТ в режиме полного поглощения вырабатываемой электроэнергии при рекуперативно-реостатном торможении

Fig. 5. Results of modeling the operation of the power circuit of an electric train with EDB tracking system in the mode of complete absorption of generated electricity during regenerative-rheostatic braking

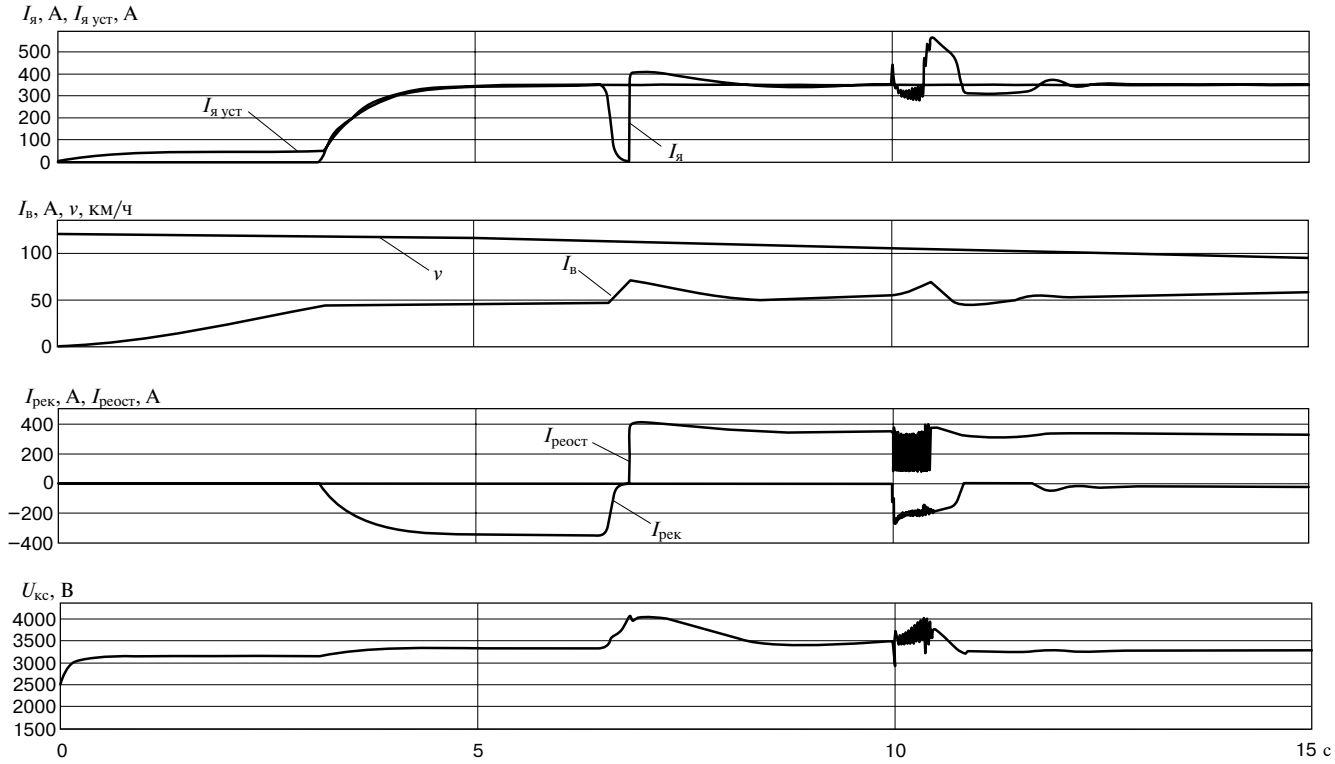

Рис. 6. Результаты моделирования работы силовой схемы электропоезда со следящей системой ЭДТ в режиме избыточной генерации электроэнергии при рекуперативно-реостатном торможении

Fig. 6. Results of modeling the operation of the power circuit of an electric train with EDB tracking system in the mode of excessive electricity generation during regenerative-rheostatic braking

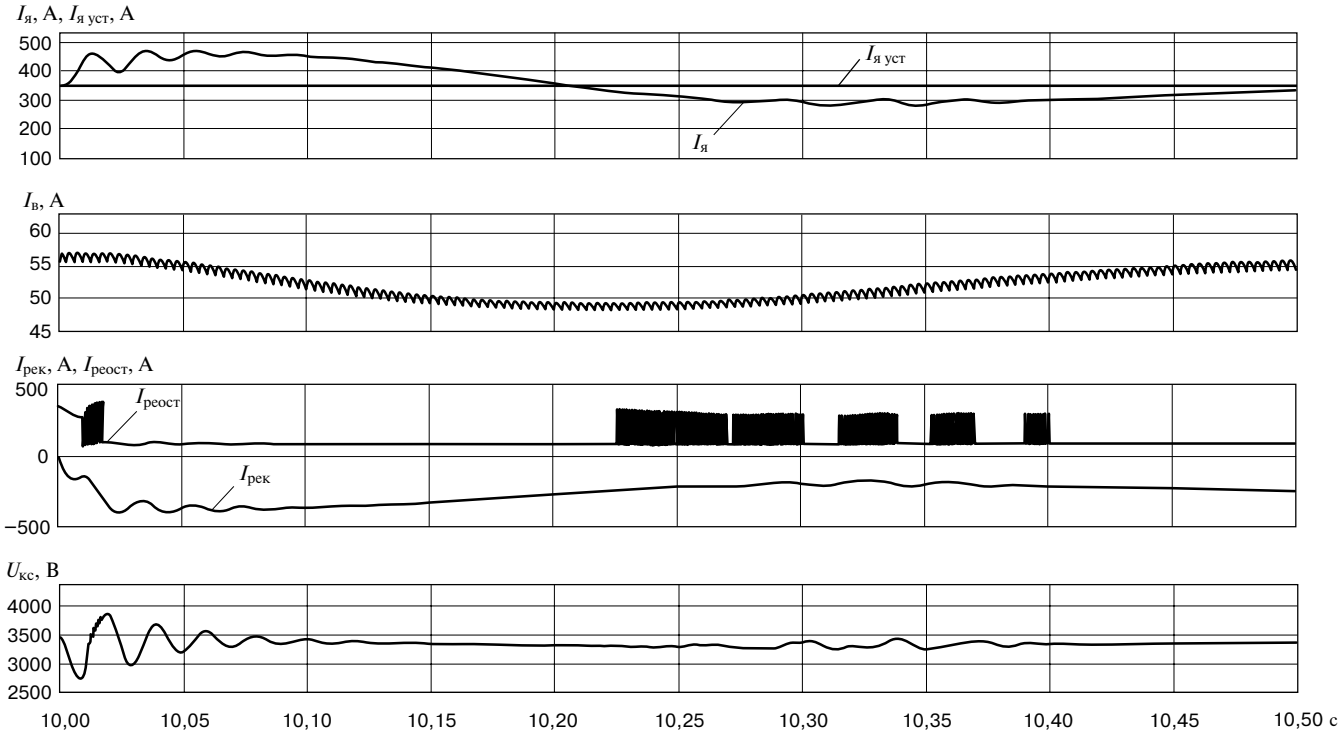

Рис. 7. Результаты моделирования работы силовой схемы электропоезда со следящей системой ЭДТ в режиме полного поглощения вырабатываемой электроэнергии на интервале времени 10–10,5 с

Fig. 7. Results of modeling the operation of the power circuit of an electric train with EDB tracking system in the mode of complete absorption of generated electricity over a time interval of 10–10.5 s

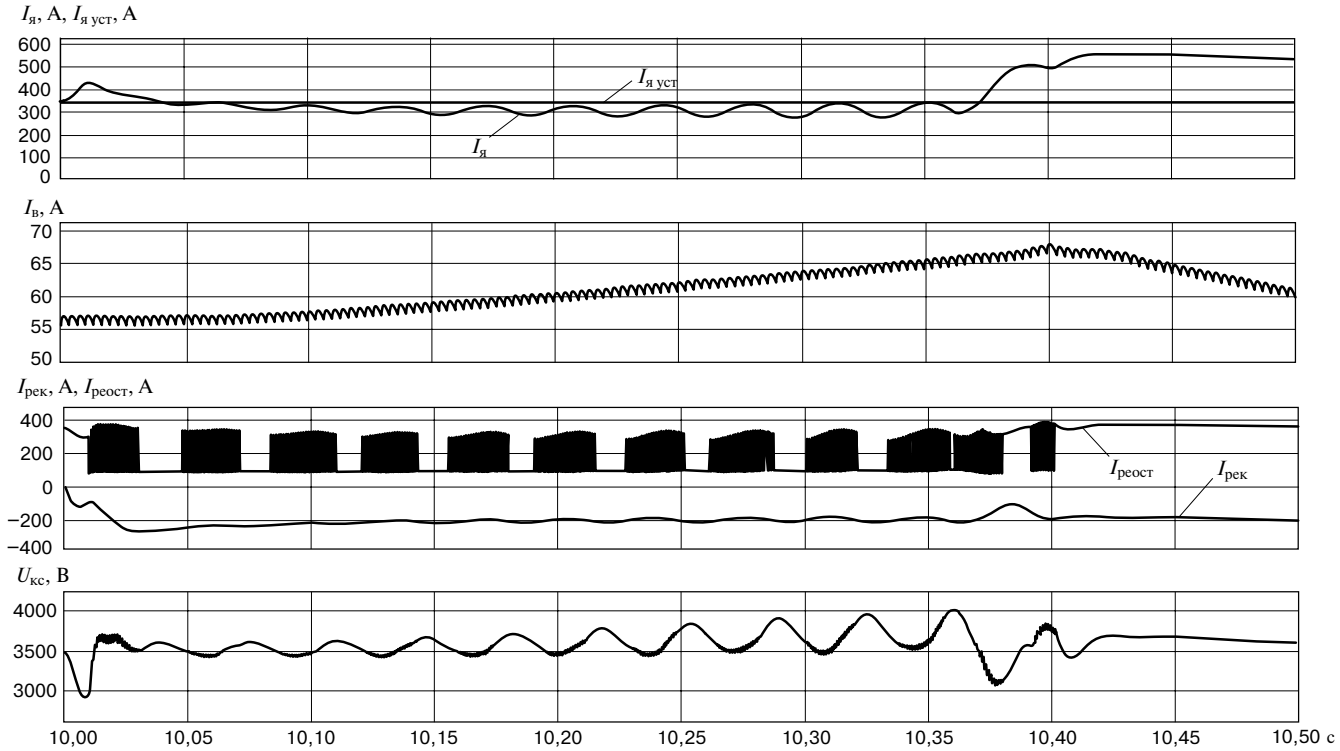

Рис. 8. Результаты моделирования работы силовой схемы электропоезда со следящей системой ЭДТ в режиме избыточной генерации электроэнергии на интервале времени 10–10,5 с

Fig. 8. Results of modeling the operation of the power circuit of an electric train with EDB tracking system in the mode of excessive electricity generation over a time interval of 10–10.5 s

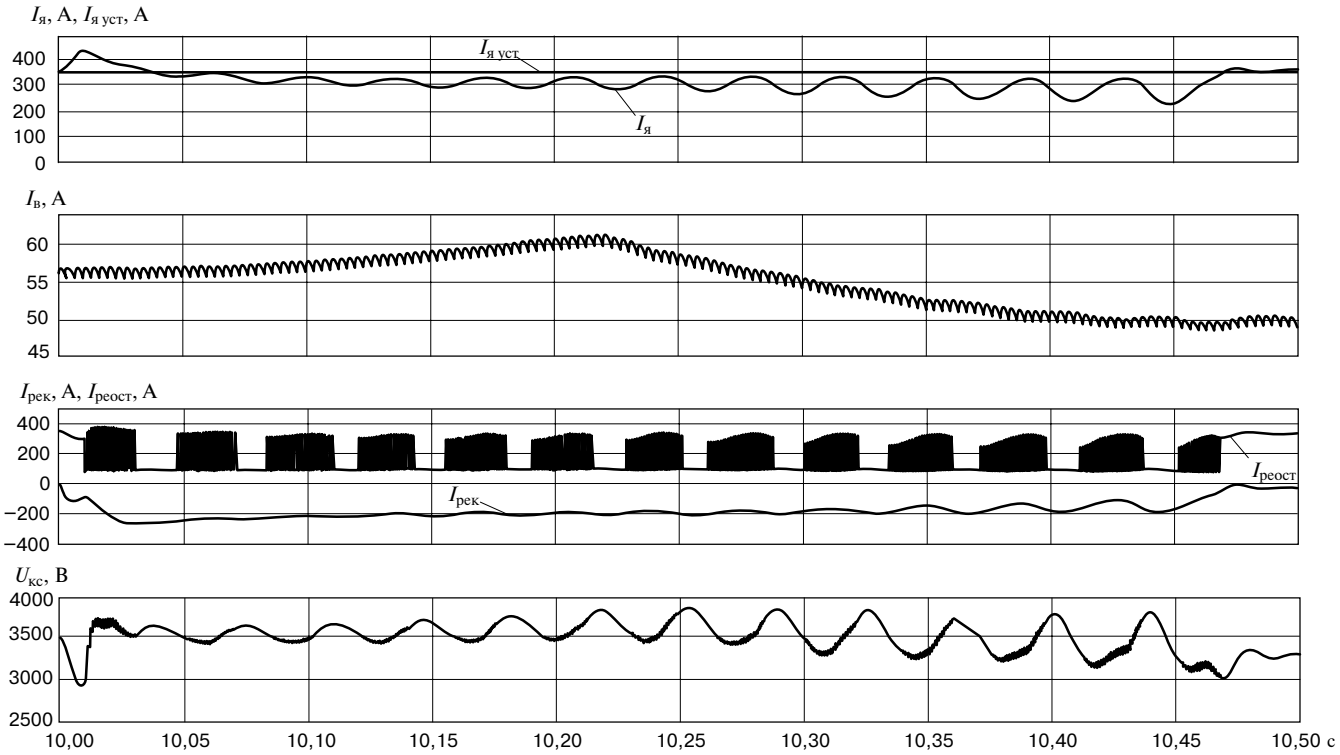

Рис. 9. Результаты моделирования работы силовой схемы электропоезда при избыточной генерации электроэнергии электропоездом с уточнением алгоритма работы следящей системы на интервале времени 10–10,5 с

Fig. 9. Results of modeling the operation of the power circuit of an electric train with excess electricity generation by an electric train with a refinement of the algorithm of the tracking system for a time interval of 10–10.5 s

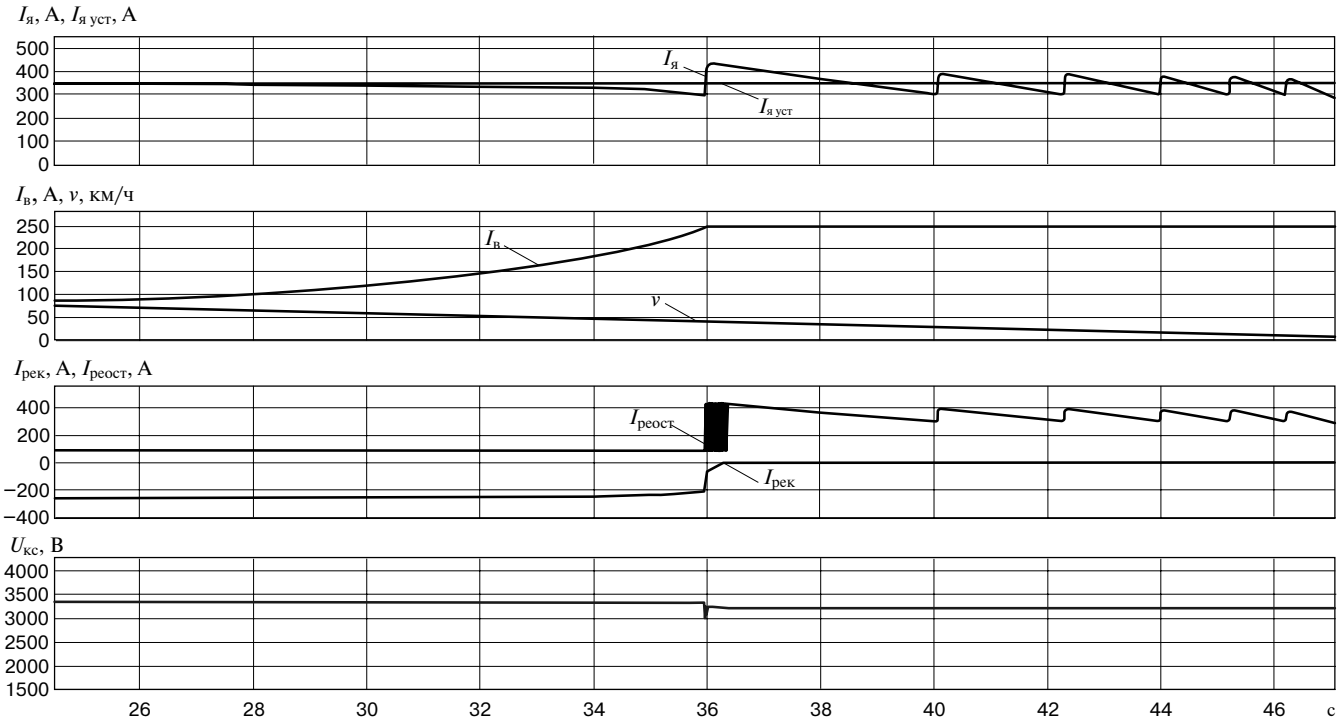

Рис. 10. Результаты моделирования работы силовой схемы электропоезда при торможении с выводом ступеней тормозных резисторов при независимом возбуждении ТЭД

Fig. 10. Results of modeling the operation of the power circuit of an electric train during braking with the output of the stages of brake resistors with independent excitation of traction electric motors (TEM)

работе системы управления и снижению возможности стабилизации тока якорей ТЭД.

По достижении максимального значения напряжения $U_{кс\ max}$, равного 3950 В, с момента времени 10,356 с следящая система увеличивает коэффициент заполнения ИП до максимального λ_{max}. Из рис. 8 видно, что уменьшения сопротивления тормозных резисторов не хватает для полного замещения тока рекуперации $I_{рек}$. Поэтому при переходе в режим реостатного торможения наблюдается бросок тока якорей $I_я$ до 550 А.

Для исключения значительного броска тока якорей целесообразно добавить в алгоритм перехода на реостатное торможение предварительное снижение тока возбуждения. По достижении $U_{кс\ max}$ происходит уменьшение $I_в$ за счет увеличения угла $\alpha_в$. Когда $I_в$ достигает заданного минимума при данной скорости v (49 А при 100 км/ч), осуществляется переход на реостатное торможение за счет плавного увеличения коэффициента заполнения λ до максимального значения λ_{max}.

На рис. 9 приведены осциллограммы токов, скорости и напряжения на токоприемнике электропоезда при избыточной генерации электроэнергии электропоездом с уточнением алгоритма работы следящей системы. Из него видно, что переход в режим реостатного торможения не сопровождается броском тока якорей и потерей тормозного эффекта.

На рис. 10 приведены результаты моделирования работы силовых цепей электропоезда в режиме реостатного торможения с выводом ступеней тормозных резисторов при независимом возбуждении ТЭД. Данный режим электрического торможения относительно кратковременный (с 36-й до 48-й с) и позволяет реализовать устойчивую тормозную силу электропоезда на низких скоростях при той же мощности генератора.

Из полученных результатов моделирования видно, что электромагнитные процессы в имитационной модели электропоезда постоянного тока со следящей системой протекают согласно приведенным выше алгоритму управления и функциональной схеме.

Выводы. 1. Разработан алгоритм следящей системы электродинамического торможения, обеспечивающий устойчивость протекания электромагнитных процессов во всем диапазоне скоростей при условии полного потребления вырабатываемой электроэнергии, что подтверждается результатами имитационного моделирования.

2. Даны рекомендации по применению следящей системы на электропоезде постоянного тока с уставками тормозного тока 250 и 350 А. Рассчитана

регулировочная характеристика импульсного преобразователя при уставке 250 А, реализующего переход в режим рекуперативно-реостатного торможения без бросков тока якорей.

3. Предложена функциональная схема системы управления торможением с интегрированной в нее следящей системой. В схеме подробно раскрыта ее структура и комплектация необходимого оборудования, что может быть полезно для разработчиков систем управления. По функциональной схеме возможно составить структурную схему с целью расчета параметров настройки оборудования следящей системы (задающих устройств, датчиков тока, регуляторов токов якорей и рекуперации).

4. По результатам моделирования выявлена опасность перехода следящей системы в неустойчивый режим при токе потребителя вырабатываемой электроэнергии ниже уставки тока рекуперации электропоезда.

5. Показано, что за счет предварительного снижения тока возбуждения возможно обеспечить переход силовой схемы в режим реостатного торможения без бросков тока якорей. Уточненный алгоритм следящей системы обеспечивает устойчивость протекания электромагнитных процессов при любом токе потребителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марквардт К. Г. Контактная сеть. М.: Транспорт, 1994. 335 с.

2. 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 [Электронный ресурс] // Russian Electrical Engineering. 2014. Vol. 85. No. 5. P. 305–311. URL: https://doi.org/10.3103/S1068371214050113 (дата обращения: 24.02.2020 г.).

3. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин [и др.] // Локомотив. 2013. № 8. С. 5–8.

4. Баранов В. А. Электрические схемы электропоездов постоянного тока с электрическим торможением // Локомотив. 2009. № 8. С. 36 – 37; № 9. С. 26–28.

5. Егоров В. П., Бургсдорф Е. А. Управление электродинамическим тормозом на электропоездах // Локомотив. 2019. № 5. С. 36.

6. Назаров О. Н. К оценке энергетической эффективности перспективных пригородных электропоездов постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1998. № 6. С. 35–39.

7. Высокоскоростные поезда Сапсан В1 и В2 / под ред. А. В. Ширяева. М.: ОАО «РЖД», 2013. 522 с.

8. Петров В. Б., Кальницкий А. С., Заболотский С. А. Особенности конструкции и электрических цепей электропоездов «Ласточка» // Локомотив. 2018. № 8. С. 38–41.

9. Асинхронный тяговый привод локомотивов / под ред. А. А. Зарифьяна. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 413 с.

10. Тяговые электрические машины / В. Г. Щербаков [и др.]; под ред. В. Г. Щербакова, А. Д. Петрушина. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 641 с.

11. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. № 4. С. 27–38.

12. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Совершенствование системы тягового электроснабжения постоянного тока с накопителями электрической энергии на полигонах обращения тяжеловесных поездов. Омск: ОмГУПС, 2018. 282 с.

13. Лапидус Б. М. Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс] // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 5. С. 274–283. URL: https://doi.org/ 10.21780/2223-9731-2019-78-5-274-283 (дата обращения: 24.02.2020 г.).

14. Performance indices of stationary energy storage in the traction substations of the Moscow Metro [Электронный ресурс] / L. A. Baranov [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2014. Vol. 85. No. 8. P. 493–497. URL: https://doi.org/10.3103/S1068371214080033 (дата обращения: 26.02.2020 г.).

15. Adaptive systems of traction power supply [Электронный ресурс] / V. I. Sopov [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2014. Vol. 85. No. 12. P. 729–733. URL: https://doi.org/10.3103/S1068371214120141 (дата обращения: 27.02.2020 г.).

16. Следящая система электродинамического торможения электропоезда постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями [Электронный ресурс] / В. А. Баранов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 5. С. 301–309. URL: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-301-309 (дата обращения: 24.02.2020 г.).

17. Электропривод постоянного тока: пат. 164435 ФИРС (Роспатент): МПК B60L 9/04 (2006/01) / В. А. Баранов [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС. № 2016100894/11; заявл. 12.01.2016; опубл. 27.08.2016, Бюл. № 24.

18. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учеб. пособие. СПб.: Корона Принт, 2001. 320 с.

19. Якушев А. Я. Автоматизированные системы управления электрическим подвижным составом: учеб. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 300 с.

20. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом. Ч. 1. Теория автоматического управления / Л. А. Баранов [и др.]. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 400 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРАНОВ Валерий Александрович,
канд. техн. наук, дежурный по станции, ДЦС-3, Окт. Д,
ЦД 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, профессор кафедры
«Электрическая тяга», ФГБОУ ВО ПГУПС

Статья поступила в редакцию 26.12.2019 г., актуализирована 18.02.2020 г.; 13.03.2020 г., принята к публикации 20.03.2020 г.

Для цитирования: Исследование функциональной схемы и алгоритма работы следящей системы электродинамического торможения электропоезда постоянного тока / В. А. Баранов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 103–116. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-103-116.

Study of the functional diagram and algorithm of tracking system for electrodynamic braking of DC electric train

V. A. BARANOV[1], I. P. VIKULOV[2], A. A. KISELEV[2], A. S. MAZNEV[2]

[1]The St. Petersburg Center for Organization of Work of Railway Stations of the Oktyabrskaya Directorate of Traffic Management (DTsS-3 of the Oktyabrskaya D, TsD of the JSC "RZD"), St. Petersburg, 191036 Russia

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

Abstract. One of the key ways to save operating costs in suburban traffic on lines electrified with direct current is to increase the return of electric energy when the drivers use the regenerative braking mode.

Electrodynamic braking control systems that track the magnitude of the voltage of the contact network can increase the percentage of return of electric energy from the use of regenerative braking due to the rapid redistribution of energy generated by traction motors. Similar systems (the so-called tracking systems) are used on DC electric trains with an asynchronous traction drive. In this work, authors analyzed an electrodynamic braking system for a DC electric train with a collector traction drive, which regulates the recovery current by changing the resistance of the braking resistor, and the armature current due to the magnetic flux of the motors. Characteristics of the pulse braking resistance controller for the current settings of the 250 and 350 A armature were calculated. Functional diagram of the tracking system with a description of its individual elements is developed. On a simulation model, electromagnetic processes in the power circuit of an electric train were studied with a changing current consumption. Based on the analysis of the model results, the ability of the tracking system to regulate the armature current with full absorption of electricity by the consumer is shown. The article provides the refined algorithm for the transition of the servo system from the mode of regenerative-rheostatic braking to rheostatic with excessive generation of electricity. The developed algorithm of the tracking system provides a stable implementation of the braking force in the entire range of speeds and at various levels of consumption of generated electricity. A rheostatic braking circuit with stabilization of the maximum value of the excitation current at low speeds is proposed.

Keywords: DC electric train; electrodynamic braking; tracking system; functional diagram

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-103-116

REFERENCES

1. Markvardt K. G. *Kontaktnaya set'* [Catenary system]. Moscow, Transport Publ., 1994, 335 p.

2. 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, 2014, Vol. 85, no. 5, pp. 305–311. URL: https://doi.org/10.3103/S1068371214050113 (retrieved on 24.02.2020).

3. Cheremisin V. T., Vil'gel'm A. S., Kvashchuk V. A., Nezevak V. L. *Vliyanie rekuperativnogo tormozheniya na sistemu tyagovogo elektrosnabzheniya* [Effect of regenerative braking on the traction power supply system]. Lokomotiv [Locomotive], 2013, no. 8, pp. 5–8.

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

5. Egorov V. P., Burgsdorf E. A. *Upravlenie elektrodinamicheskim tormozom na elektropoezdakh* [Control of the electrodynamic brake on electric trains]. Lokomotiv [Locomotive], 2019, no. 5, p. 36.

6. Nazarov O. N. *K otsenke energeticheskoy effektivnosti perspektivnykh prigorodnykh elektropoezdov postoyannogo toka* [On the assessment of the energy efficiency of promising suburban DC electric trains]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1998, no. 6, pp. 35–39.

7. Shiryaev A. V. *Vysokoskorostnye poezda Sapsan V1 i V2* [High-speed trains Sapsan V1 and V2]. Moscow, JSC "RZD" Publ., 2013, 522 p.

8. Petrov V. B., Kal'nitskiy A. S., Zabolotskiy S. A. *Osobennosti konstruktsii i elektricheskikh tsepey elektropoezdov "Lastochka"* [Features of the design and electrical circuits of electric trains "Lastochka"]. Lokomotiv [Locomotive], 2018, no. 8, pp. 38–41.

9. Zarif'yan A. A. *Asinkhronnyy tyagovyy privod lokomotivov* [Asynchronous traction drive of locomotives]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBOU Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport] Publ., 2013. 413 p.

10. Shcherbakov V. G., Petrushin A. D., Khomenko B. I., Sedov V. I. *Tyagovye elektricheskie mashiny* [Traction electric machines]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBOU Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport], 2016, 641 p.

11. Evstaf'ev A. M. *Primenenie gibridnykh tekhnologiy v tyagovom podvizhnom sostave* [Application of hybrid technologies in traction rolling stock]. Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Russian Journal of Logistics & Transport Management], 2018, no. 4, pp. 27–38.

12. Cheremisin V. T., Nezevak V. L., Shatokhin A. P. *Sovershenstvovanie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka s nakopitelyami elektricheskoy energii na poligonakh obrashcheniya tyazhelovesnykh poezdov* [Improving the traction power supply system of DC with electric energy storage at the operational areas for heavy-haul trains]. Omsk, OmGUPS Publ., 2018, 282 p.

13. Lapidus B. M. *Povyshenie energoeffektivnosti i perspektivy ispol'zovaniya vodorodnykh toplivnykh elementov na zheleznodorozhnom transporte* [Improvements in energy efficiency and the potential use of hydrogen fuel cells in railway transport]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 5, pp. 274–283. URL: https://doi.org/ 10.21780/2223-9731-2019-78-5-274-283 (retrieved on 24.02.2020).

14. 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, 2014, Vol. 85, no. 8, pp. 493–497. URL: https://doi.org/10.3103/S1068371214080033 (retrieved on 26.02.2020).

15. Sopov V. I., Shchurov N. I., Ivanov A. V., Kuznetsov A. P. *Adaptive systems of traction power supply*. Russian Electrical Engineering, 2014, Vol. 85, no. 12, pp. 729–733. URL: https://doi.org/10.3103/S1068371214120141 (retrieved on 27.02.2020).

16. Baranov V. A., Vikulov I. P., Kiselev A. A., Maznev A. S. *Sledyashchaya sistema elektrodinamicheskogo tormozheniya elektropoezda postoyannogo toka s kollektornymi tyagovymi dvigatelyami* [Monitoring system of electrodynamic braking of DC electric train with collector traction motors]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 301–309. URL: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-301-309 (retrieved on 24.02.2020).

17. Baranov V. A., Maznev A. S., Vikulov I. P. *Elektroprivod postoyannogo toka*. Pat. 164435 FIRS (Rospatent): MPK B60L 9/04 (2006/01); opubl. 27.08.2016, Byul. № 24 [Electric drive DC. Pat. 164435 FIRS (Rospatent): MPK B60L 9/04 (2006/01); published 27.08.2016, Bull. 24] (in Russ.).

18. German-Galkin S. G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovykh sistem v MatLab 6.0. Ucheb. posobie* [Computer simulation of semiconductor systems in MatLab 6.0. Textbook]. St. Petersburg, Korona Print Publ., 2001, 320 p.

19. Yakushev A. Ya. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom. Uchebnik* [Automated control systems for electric rolling stock. Textbook]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBOU Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport], 2016, 300 p.

20. Baranov L. A., Savos'kin A. N., Pudovikov O. E. [et al.]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom. Ch. 1. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automated control systems for electric rolling stock. Part 1. The theory of automatic control]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBOU Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport], 2014, 400 p.

ABOUT THE AUTHORS

Valeriy A. BARANOV,
Cand. Sci. (Eng.), Station Duty Officer, DTsS-3 of the Oktyabrskaya D, TsD 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, Professor of the Department "Electric traction", FGBOU VO PGUPS

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

Received 26.12.2019
Revised 18.02.2020 and 13.03.2020
Accepted 20.03.2020

For citation: Baranov V. A., Vikulov I. P., Kiselev A. A., Maznev A. S. Study of the functional diagram and algorithm of tracking system for electrodynamic braking of DC electric train. Vestnik of the Railway Research Institute. 2020. 79 (2): 103–116 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-103-116.

«Вестник ВНИИЖТ»
ГДЕ подписаться?

Подписку **на научно-технический журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ»)** можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (499) 260-43-19, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press , export@ural-press.ru).