

Management of Energy Exchange Process on Metro Rolling Stock with On-Board Capacitive Energy Storage

Sulym A.O.¹, Khozia P.O.¹, Fomin O.V.², Bahrov O.M.¹

¹State Enterprise “Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute”
Kremenchuk, Ukraine

²State University of Infrastructure and Technologies
Kyiv, Ukraine

Abstract. The object of this paper is to develop and synthesize a system for managing energy exchange processes between the overhead line, electric drive of metro vehicles, braking resistor and capacitive energy storage devices. To achieve this goal, the following tasks must be completed. The first task is to create a mathematical model and to define the requirements to control system for energy exchange processes currently being developed for metro rolling stock with capacitive energy storage devices. The second task is to develop a block diagram of a control unit for energy exchange processes. The third task is to synthesize a control system for energy exchange processes on metro rolling stock with capacitive energy storage devices and an algorithm for its operation. The fourth task is to check the functioning of the synthesized control system and its operating algorithm. The most significant result of the work is the improvement of the technical characteristics of the rolling stock, higher passenger safety on metro transit, minimization of electricity consumption from the overhead line by increasing the use of regenerative braking energy generated by the electric drive of the train, voltage compensation in the overhead line, train operation capability in emergencies due to the implementation of the developed control system. The significance of the results obtained is a synthesis of an adaptive control system that makes it possible to monitor and manage the energy exchange processes on metro rolling stock with capacitive energy storage devices, considering storage devices charging rate, the train-driving mode and the nature of the energy processes.

Keywords: capacitive energy storage, metro, rolling stock, energy exchange processes, control system, braking resistor, electric drive.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.04>

UDC: 625.42: [621.333.4:621.311.6]

Controlul proceselor de schimb de energie în trenurile de metrou, care au la bord unități capacitive de stocare a energiei

¹Sulâm A.A., ¹Hozea P.A., ²Fomin A.V., ¹Bagrov A.N.

¹Întreprinderea de stat „Institutul Ucrainean de cercetare pentru industrie de transport”, Kremenciug, Ucraina

²Universitatea de Stat de Infrastructură și Tehnologie, Kyiv, Ucraina

Rezumat. Obiectul acestei lucrări este de a elabora și sintetiza un sistem de gestionare a proceselor de schimb de energie între rețeaua de contact, acționarea electrică a vehiculelor de metrou, rezistența de frânare și dispozitivele de stocare a energiei capacitive. Pentru a atinge acest obiectiv trebuie îndeplinite următoarele sarcini. Prima sarcină este crearea unui model matematic și definirea cerințelor pentru sistemul de control al proceselor de schimb de energie în curs de dezvoltare pentru vehiculele de metrou cu unitățile capacitive de stocare a energiei. A doua sarcină este de a elabora o diagramă bloc a unei unități de control pentru procesele de schimb de energie. A treia sarcină este de a sintetiza un sistem de control pentru procesele de schimb de energie dintre vehiculele de metrou cu dispozitive capacitive de stocare a energiei și un algoritm pentru funcționarea acestuia. A patra sarcină este verificarea funcționării sistemului de control sintetizat și a algoritmului său de operare. Rezultatul cel mai semnificativ al lucrării este îmbunătățirea caracteristicilor tehnice ale vehiculului de metrou, siguranța mai mare a pasagerilor pe tranzitul metroului, minimizarea consumului de energie electrică de pe linia aeriană prin creșterea utilizării energiei de frânare regenerativă generată de acționarea electrică a trenului, compensarea tensiunii în linia aeriană, capacitatea de operare a trenului în situații de urgență datorită implementării sistemului de control dezvoltat. Semnificația rezultatelor obținute este o sinteză a unui sistem de control adaptiv care face posibilă monitorizarea și gestionarea proceselor de schimb de energie pe vehiculul de metrou cu unitățile capacitive de stocare a energiei, luând în considerare rata de încărcare a unităților de stocare, modul de conducere a trenului și natura proceselor energetice.

Cuvinte-cheie: stocare capacitivă de energie, metrou, material rulant, procese de schimb de energie, sistem de control, acționare electrică.

Управление процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с бортовыми емкостными накопителями энергии

Сулим А.А.¹, Хозя П.А.¹, Фомин А.В.², Багров А.Н.¹

¹Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
Кременчуг, Украина

²Государственный университет инфраструктуры и технологий, Киев, Украина

Аннотация. Рассмотрена схема подвижного состава метрополитена с асинхронным приводом и емкостными накопителями энергии. Описаны энергетические связи между силовыми блоками рассматриваемого объекта управления. Целью работы является разработка технической структуры системы управления процессами обмена энергией между контактной сетью, электроприводом подвижного состава метрополитена, тормозным резистором и емкостными накопителями энергии, а также анализ результатов исследования ее функционирования. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач. Первая задача состоит в разработке структурной схемы блока управления процессами обмена энергией. Вторая задача заключается в разработке принципиальной технической структуры системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с емкостными накопителями энергии и создании алгоритма ее работы. Третья задача состоит в проверке функционирования разработанной системы управления и алгоритма ее работы. Наиболее существенным результатом работы является разработка и техническая реализация прототипа системы управления, которая позволяет управлять процессами обмена энергией при обесточивании контактной сети. Схема отличается от известных тем, что в ней используется управляемый коммутатор для разрыва силовой цепи, имеется возможность контроля нагрева емкостных накопителей энергии, а также последние имеют свои зоны регулирования для штатного и аварийного режимов работы основного источника питания. Следующим существенным результатом является, создание алгоритма работы для разработанной системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе. Значимость полученных результатов состоит в том, что разработанная система управления, позволяет контролировать и управлять процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с емкостными накопителями энергии при возникновении аварийного режима работы системы энергообеспечения и в целом повысить безопасность процесса перевозок пассажиров в метрополитене. Исследованы процессы обмена энергией с применением разработанной системы управления и подтверждена ее работоспособность в лабораторных условиях.

Ключевые слова: емкостной накопитель энергии, метрополитен, подвижной состав, процессы обмена энергией, система управления, тормозной резистор, электропривод.

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее развитие железнодорожного транспорта базируется на таких ключевых направлениях как повышение безопасности и эффективности перевозок, ресурсоэнергосбережения, использования новых материалов и интеллектуальных технологий. Некоторые из перечисленных направлений дальнейшего развития железнодорожного транспорта рассмотрены в работах [1-3]. Исследования [1-3] посвящены внедрению асинхронного электропривода и современным системам диагностики электроприводов на тяговом железнодорожном транспорте. По результатам анализа приведенных работ, а также исследований других ученых установлено, что дальнейшему развитию железнодорожного транспорта уделяется достаточно внимания. При этом одним из перспективных видов транспорта, который нуждается в дальнейшем развитии, является метрополитен.

Метрополитен относится к безопасному экологически чистому виду городского транспорта, позволяющему ему обеспечивать

значительные объемы пассажирских перевозок в крупных городах. В мире сети метрополитенов постоянно развиваются и расширяются. Одним из главных аспектов дальнейшего развития метрополитена является использование высокотехнологичного энергосберегающего подвижного состава метрополитена с улучшенными технико-экономическими характеристиками. Этот тезис подтверждается соответствующими нормативными документами, что подтверждает актуальность и необходимость решения этого вопроса на государственном уровне.

В связи с неопределенностью относительно наличия и состояния энергоресурсов в будущем, постоянного повышения их стоимости, существующих проблем по сохранению окружающей среды при их производстве, первоочередным встает вопрос поиска мер экономии энергоресурсов при эксплуатации подвижного состава метрополитена. Поэтому, тема развития инновационных принципов, которые будут способствовать созданию энергосберегающего и экологически чистого

подвижного состава метрополитена, достаточно актуальна и отвечает потребностям общества, обороноспособности страны и будет полезна одновременно для нескольких отраслей экономики.

I. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития подвижного состава метрополитена является внедрение на нем **емкостных накопителей энергии** (ЕНЭ) [4–6]. Вопросу внедрения ЕНЭ на подвижном составе метрополитена с целью улучшения его технико-экономических характеристик посвящены многие научно-прикладные и научные публикации, что подтверждается высоким SNIP их изданий и количеством цитирований.

Обоснование рационального типа накопителя энергии для подвижного состава метрополитена с системами рекуперации и оценка количества экономии от его внедрения приводится в работах [4–8]. В этих исследованиях обоснована необходимость и целесообразность применения ЕНЭ для улучшения технических характеристик подвижного состава и расширения его функциональных возможностей. Определены резервы экономии электроэнергии от внедрения ЕНЭ за счет эффективного использования электроэнергии рекуперативного торможения подвижного состава метрополитена. Важно отметить, что в данных работах не уделяется внимания вопросам определения параметров ЕНЭ и исследования энергетических процессов при эксплуатации подвижного состава при штатных и аварийных режимах работы системы энергообеспечения метрополитена.

Определение необходимых параметров ЕНЭ для заданных условий эксплуатации подвижного состава метрополитена приведено в публикациях Iannuzzi D., Tricoli P., Lee H., Song J., Lee H.A., Jang J. [9, 10]. В этих работах предложены процедуры и подходы определения мощности и энергоемкости двухслойных ЕНЭ при известных штатных условиях эксплуатации и режимах ведения подвижного состава. Однако в этих работах не рассмотрены режимы функционирования системы энергообеспечения метрополитена с ЕНЭ, при которых обеспечивается минимизация потребленной электроэнергии из сети, и появляются возможности эвакуации подвижного состава из туннеля на бли-

жайшую станцию во время аварийного снятия питания в системе энергообеспечения метрополитена.

Моделирование и исследование процессов обмена энергией между ЕНЭ, контактной сетью, силовым оборудованием подвижного состава метрополитена выполнено в работах [11–21]. В этих работах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов обмена энергией между контактной сетью, тяговым оборудованием, стационарными и бортовыми ЕНЭ, расположенными на тяговых подстанциях и подвижном составе соответственно. В работе [11] авторов Гречишников В.А., Шевлюгина М.В. приведены результаты экспериментальных исследований при внедрении стационарных ЕНЭ в Московском метрополитене. В статьях [12, 13] под авторством Каца А.В., Шевлюгина М.В. рассмотрены вопросы обмена энергией между контактной сетью, тяговым электроприводом, стационарным и бортовым накопителем, тормозным резистором при различных схемах силового тягового оборудования. В работах [14–16] авторов Calderoro V., Chen H.X., Galdi V., Graber G., Lin F., Piccolo A., Wang B., Xia H., Yang Z.P. приведены результаты теоретических исследований процессов обмена энергией между стационарным накопителем, контактной сетью и подвижным составом с использованием имитационных компьютерных моделей для выбора оптимального размещения и размеров ЕНЭ. При этом моделирование производилось для заданных условий эксплуатации подвижного состава метрополитена. Работа [17] авторов Mezitis M., Panchenko V., Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A., Sansyzbajeva Z. посвящена разработке математической модели ЕНЭ как объекта электротяговой системы. В работах [18–21] разработаны имитационные модели поезда, оснащенного ЕНЭ для анализа процессов обмена энергией. Задача разработки системы управления процессами обмена энергией в условиях расположения ЕНЭ на подвижном составе метрополитена в данных работах не ставилась.

В работах [22–28] рассмотрены вопросы разработки концепций управления, а также систем управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ. Анализ работ [22–24] позволил установить, что основными стратегиями управления процессами обмена энергией на подвижном составе с ЕНЭ являются концепция ограни-

чения потребления тока из контактной сети, ограничения тока потребления с ЕНЭ, максимального энергообмена, зависимости от скорости движения, необходимости питания тяговых потребителей при условии аварийного снятия напряжения в контактной сети. В публикации [25] авторами Lifshitz D., Weiss G. предложено оптимальное управление, используя теорему Филиппова и принцип максимума Понтрягина. В работе [26] авторами Hu J., Fan Y., Feng Q. разработан контроллер для управления процессами обмена энергией с ЕНЭ. Авторами Zhao F., Zhu X., Chen X., Wang Y. в публикации [27] предложена гибридная рекуперативная система с двухрежимной системой управления энергией. В работе [28] авторами Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. представлена силовая часть подвижного состава метрополитена с ЕНЭ и система управления процессов обмена энергией для штатного режима работы основного источника питания (контактной сети). В указанных работах вопросы разработки систем управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ рассматриваются, однако в них не учитывается возможность ведения поезда в аварийном режиме, при котором основной источник питания (контактная сеть) обесточен.

Таким образом, проведенный обзор и анализ существующих литературных источников позволил установить, что на данный момент вопрос разработки систем управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с системами рекуперативного торможения электроприводов и ЕНЭ изучен не в полном объеме и существуют малоизученные вопросы в этом направлении. Это обуславливает необходимость проведения соответствующих актуальных исследований, целью которых является разработка вышеупомянутой системы управления, что в целом будет способствовать созданию энергоэффективного подвижного состава метрополитена с улучшенными техническими характеристиками.

Целью данной работы является разработка технической структуры системы управления процессами обмена энергией между контактной сетью, электроприводом подвижного состава метрополитена, тормозным резистором и ЕНЭ, а также анализ результатов исследования ее функционирования.

II. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В современном инновационном электроподвижном составе, в частности поездах метрополитена, используют асинхронный тяговый электропривод, который состоит из асинхронного электродвигателя и трехфазного инвертора напряжения. При такой схеме асинхронный электродвигатель получает питание от трехфазного инвертора напряжения. Исходя из чего на рис. 1 представлена блок-схема исследуемого объекта управления, которая включает следующие компоненты: основной источник электроэнергии (контактная сеть), дополнительный источник питания (бортовой ЕНЭ) и исполнительный механизм. Основной источник электроэнергии представляет собой контактную сеть (Contact network). Дополнительный источник питания представлен бортовым ЕНЭ (Capacitive energy storage) и силовым преобразователем для управления ЕНЭ (DC converter). Исполнительный механизм состоит из тягового асинхронного электродвигателя (Asynchronous motor), редуктора (Gearbox) и механизма «колесо-рельс» (Wheel-Rail). Контактная сеть и вход трехфазного инвертора напряжения (Traction Inverter) через управляемый контактор (Controlled Switch) соединены шиной звена постоянного тока, к которой через соответствующие полупроводниковые преобразователи (DC converter, Traction Inverter) параллельно подключены ЕНЭ (Capacitive energy storage), система питания собственных нужд (Auxiliary System), а также блок тормозных резисторов (Brake Resistor).

Математическая модель рассматриваемого тягового привода, представлена в виде двух составляющих: энергетических связей тяговых блоков и динамики движения поезда.

Электрическая мощность контактной сети P_{DC} в штатном режиме работы энергообеспечения обеспечивает движение подвижного состава с максимальной допустимой скоростью, а также работу устройств собственных нужд P_{AS} .

То есть, выполняется условие:

$$P_{DC} = P_{tyagy} + P_{AS}, \quad (1)$$

где P_{tyagy} – мощность, поступающая на тягу.

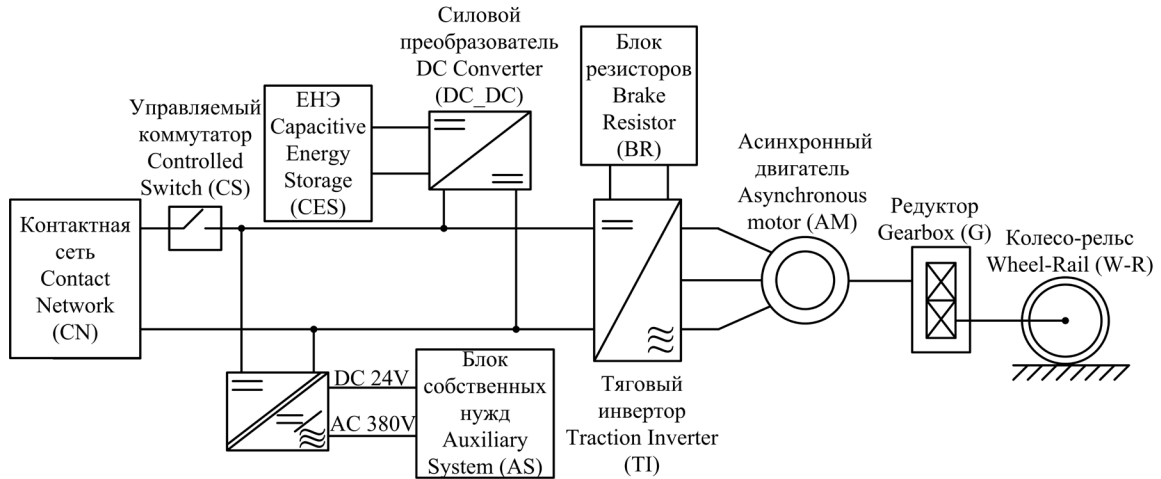


Рис. 1. Блок-схема асинхронного электропривода подвижного состава метрополитена с ЕНЭ.¹

Таким образом, основной источник (контактная сеть) в штатном режиме работы имеет неограниченную мощность, поэтому мощность рассеивания учитывать не будем.

При этом мощность, потребляемая устройствами собственных нужд, в режимах тяги и торможения подвижного состава является величиной постоянной $P_{AS} = \text{const}$ и в несколько раз меньше мощности тяги или торможения $P_{AS} \ll P_{\text{тяги}}$, поэтому для этих режимов в расчетных схемах величину P_{AS} не учитываем.

Величины энергоемкости и мощности ЕНЭ приняты такими, что в состоянии обеспечить совместно с контактной сетью требуемые режимы ускорения и торможения подвижного состава. При этом принятые величины обладают недостаточной энергоемкостью и мощностью, чтобы самостоятельно обеспечивать требуемые режимы ускорения и торможения подвижного состава.

Схемы процессов обмена энергией в режимах торможения и ускорения подвижного состава, представлены на рис. 2.

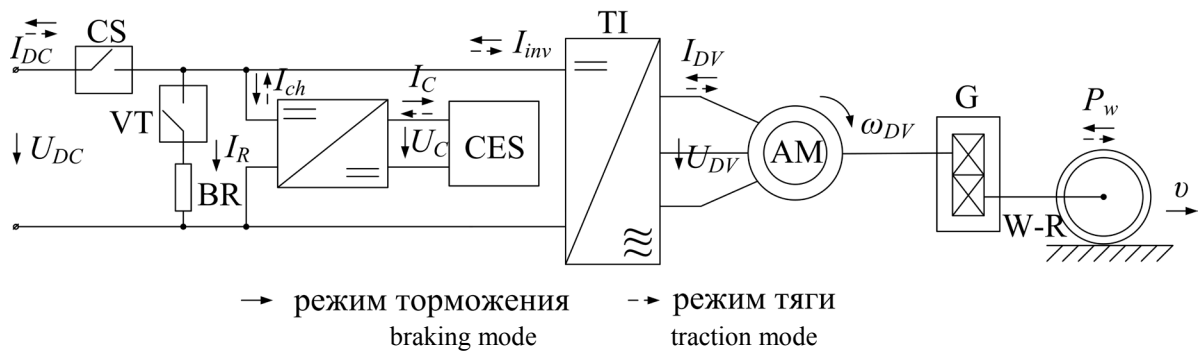


Рис. 2. Схема замещения тягового электропривода подвижного состава метрополитена с ЕНЭ для режимов торможения и тяги.²

Очевидно, что, для принятой схемы асинхронного тягового электропривода потоки мощности определяются значениями токов в соответствующих ветвях. Процессы будем рассматривать с позиции работы ЕНЭ.

На рис. 2 используются следующие обозначения I_{DC}, U_{DC} – ток и напряжение CN; I_R – ток в цепи BR; I_{ch} – ток на входе силового преобразователя DC_DC; I_C, U_C – ток и

напряжение CES; I_{inv} – ток на входе тягового инвертора TI; $I_{DV}, U_{DV}, \omega_{DV}$ – ток, напряжение, скорость AM, соответственно; P_w – мощность на ободе колес; v – скорость подвижного состава.

Режим торможения.

Ток I_C , потребляемый накопителем в этом режиме работы, в соответствии с первым законом Кирхгофа:

^{1,2} Appendix 1

$$I_{ch} = I_{inv} - I_{DC} - I_R \quad (2)$$

Ток I_{inv} , обусловленный работой АМ в режиме генератора:

$$I_{inv} = \frac{P_w}{U_{DC}} \eta_{\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{U_{DC}} \times \times U_{DV} I_{DV} \eta_{inv} \cos \varphi_{DV}, \quad (3)$$

где $\eta_{\Sigma} = \eta_G \eta_{DV} \eta_{inv}$ – суммарный к.п.д. тягового асинхронного блока; $\cos \varphi_{DV}$ – коэффициент мощности АМ; $\eta_G, \eta_{DV}, \eta_{inv}$ – к.п.д. редуктора, АМ и ТГ, соответственно.

Ток, отдаваемый в контактную сеть:

$$I_{DC} = P_{DC} / U_{DC} \quad (4)$$

Ток, в цепи блока тормозных резисторов:

$$I_R = P_R / U_{DC} \quad (5)$$

В итоге, мощность, потребляемая накопителем, подается в систему накопления током:

$$I_{ch} = \frac{\sqrt{3}}{U_{DC}} U_{DV} I_{DV} \eta_{inv} \times \times \cos \varphi_{DV} - \frac{P_{DC}}{U_{DC}} - \frac{P_R}{U_{DC}}, \quad (6)$$

Исходя из баланса мощности для накопителя:

$$U_{DC} I_{ch} \eta_{DC_DC} = U_C I_C, \quad (7)$$

где η_{DC_DC} – к.п.д. силового преобразователя DC_DC, при этом ток, потребляемый от накопителя:

$$I_C = \frac{U_{DC} I_{ch} \eta_{DC_DC}}{U_C} = C \frac{dU_C}{dt} \quad (8)$$

В итоге количество аккумулированной в накопитель энергии, зная емкость и изменение напряжения в процессе торможения подвижного состава можно представить в таком виде:

$$E_C = \frac{1}{2} C \int_0^t \frac{dU_C^2}{dt} dt = \frac{1}{2} C (U_C^2(t) - U_C^2(0)) \quad (9)$$

Режим тяги.

В штатном режиме АМ потребляет электроэнергию, которую получает из контактной сети и запасенной ЕНЭ, а в аварийном режиме работы основного источника питания – за счет запасенной ЕНЭ.

В этом режиме, ток отдаваемый накопителем, в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$I_{ch} = I_{inv} - I_{DC} \quad (10)$$

Ток I_{inv} , потребляемый ТГ в режиме тяги:

$$I_{inv} = \frac{P_w}{U_{DC} \eta_{\Sigma}} = \frac{\sqrt{3}}{U_{DC} \eta_{inv}} \times \times U_{DV} I_{DV} \cos \varphi_{DV}. \quad (11)$$

Учитывая, что цепь BR в обмене энергией для режима тяги не участвует, а выражение для тока генерируемого контактной сетью остается прежним – (4) соответственно мощность, генерируемая ЕНЭ, подается в звено постоянного тока током:

$$I_{ch} = \frac{\sqrt{3}}{U_{DC} \eta_{inv}} U_{DV} I_{DV} \times \times \cos \varphi_{DV} - \frac{P_{DC}}{U_{DC}}, \quad (12)$$

Исходя из баланса мощности для накопителя:

$$U_{DC} I_{ch} = U_C I_C \eta_{DC_DC}, \quad (13)$$

При этом ток, отдаваемый накопителем, исходя из уравнения баланса мощности (13):

$$I_C = \frac{U_{DC} I_{ch}}{U_C \eta_{DC_DC}} \quad (14)$$

Мощность, затрачиваемая на ускорение поезда, отбираемая от накопителя:

$$P_C = U_C I_C \eta_C = \frac{1}{2} C \frac{dU_C^2}{dt} \quad (15)$$

В итоге, в процессе разгона получаем убыль накопленной в ЕНЭ за счет снижения напряжения накопителя:

$$E_C = \frac{1}{2} C \int_0^t \frac{dU_C^2}{dt} dt = \frac{C}{2} (U_C^2(t) - U_C^2(0)) \eta_C \quad (16)$$

где η_C – к.п.д. ЕНЭ.

Таким образом, из приведенных выше соотношений очевидно, что при требуемой мощности на ободах колес P_w и мощности P_{DC} наличие в схеме асинхронного тягового электропривода ЕНЭ позволяет организовывать обмены мощности между его компонентами в различных режимах работы подвижного состава (по аналогии с рассмотренными выше и в режимах движения с постоянной скоростью, выбега, стоянки и аварийном режиме основного источника питания). В качестве регулятора этих потоков выступают соотношения напряжений на входах и выходах силовых частей схем полупроводниковых преобразователей (П, DC-DC), ключа VT через которые CN, CES, AM, BR подключены к шине звена постоянного тока.

Сила тяги или торможения подвижного состава F_t во всем диапазоне скоростей определяется мощностью на ободах колес P_w , которая обусловлена суммарной мощностью тяговых двигателей на осях колесных пар и вычисляется по формуле:

$$P_w = \pm F_t v, \quad (17)$$

Если предположить, что поезд массой m сосредоточенной в одной точке, движется по пути длиной s со скоростью v , имеет ускорение dv/dt , испытывает силу сопротивления движению W_{os} , силу сопротивления от уклона пути W_i , а также сопротивление от движения в кривых W_R . При этом тяговыми двигателями обеспечивается сила тяги или торможения F_t , то связь пройденного поездом пути и скорости со временем, а также действующими на него силами сопротивления представится в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{\pm F_t - W_{os} \pm W_i - W_R}{m(1+\gamma)} \\ \frac{ds}{dt} = v \end{cases}, \quad (18)$$

где $(1+\gamma)$ – коэффициент вращающихся масс поезда.

Сопротивление движению, обусловленное трением качения колес по рельсам и аэродинамикой поезда, определяется с помощью формулы Девиса:

$$W_{os} = a + bv + cv^2, \quad (19)$$

где a, b, c – постоянные коэффициенты, зависящие от технических характеристик подвижного состава.

Эти коэффициенты обусловлены следующим: a – трением качения колес по рельсам и трением осей колесных пар; b – трением гребней колес о боковые поверхности головки рельса; c – аэродинамикой подвижного состава.

Сила сопротивления от уклона вычисляется с помощью равенства:

$$W_i = mgi / 1000, \quad (20)$$

где g – ускорение свободного падения; i – уклон пути.

Сила сопротивления от движения подвижного состава в кривых определяется с помощью выражения:

$$W_R = \frac{0,007m}{R}, \quad (21)$$

где R – радиус кривой.

Таким образом, приведенная математическая модель (18) показывает, что при заданных параметрах пути и ограничениях по скорости движения подвижного состава на его участках, кривые движения определяются мощностью на ободах колес P_w . Управляя P_w посредством изменения составляющих ее компонент, возможно регулировать требуемую силу тяги и скорость движения подвижного состава.

III. МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перед разработкой системы управления процессами обмена на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ были сформулированы такие требования к ней:

– работоспособность при различных нагрузках, отвечающих условиям эксплуатации подвижного состава метрополитена;

– эффективное управление процессами обмена энергией между бортовыми ЕНЭ, тяговым, тормозным оборудованием и контактной сетью, как в штатных, так и аварийных режимах работы основного источника питания метрополитена (контактной сети);

– прием сигналов с датчиков, их обработку, определение энергетических показателей, передачу данных в систему управления поезда и мониторинга (системы высшего уровня), фиксирование и хранение данных, а также управление полупроводниковыми ключами;

– получение, анализ и обработка в режиме реального времени следующих сигналов: напряжения контактной сети, токов потребления (рекуперации) в цепи постоянного тока, фактической скорости движения, загрузки поезда, уровня задания силы тяги и торможения, тока и напряжения в цепи ЕНЭ, тока в цепи блока тормозного резистора *;

– определение (учет) потребленной из контактной сети, рекуперированной в контактную сеть, рассеянной на тормозном резисторе, потребленной из накопителей, рекуперированной в накопители электроэнергии поездом и передача этих данных в систему верхнего уровня*;

– эффективное управление силовыми ключами преобразователя, управляемого коммутатора для различных режимов движения поезда и энергетических процессов в контактной сети;

– учет технических характеристик тягового оборудования, преобразователей и бортовых ЕНЭ (характер изменения напряжения и тока в зависимости от энергоемкости) при протекании процессов обмена энергией;

– заряд бортового ЕНЭ до заданной величины энергоемкости в режиме рекуперативного торможения поезда и его разряд до минимально установленной программно и «мертвой»** величины энергоемкости при движении в режиме тяги при штатном и аварийном режиме работы основного источника питания метрополитена;

– возможность одновременного питания асинхронного электропривода от основного источника питания (контактной сети) и дополнительного (ЕНЭ) при штатной работе системы энергообеспечения;

– генерацию энергии рекуперативного торможения в контактную сеть для питания других потребителей в случае полного заряда накопителя до заданной величины энергоем-

кости во время штатной работы системы энергообеспечения метрополитена;

– рассеяние энергии рекуперативного торможения на тормозном резисторе при отсутствии потребителей в контактной сети при условии полного заряда бортового ЕНЭ до заданной величины энергоемкости во время штатной работы системы энергообеспечения метрополитена;

– питание тягового оборудования от контактной сети во время штатной работы системы энергообеспечения метрополитена и ведения поезда в режиме тяги при условии полного разряда бортового ЕНЭ;

– отключение питания поезда от контактной сети в автоматическом режиме в момент возникновения аварийной ситуации в системе энергообеспечения метрополитена (снятие питания в контактной сети), что исключит возможность питания других потребителей от бортового ЕНЭ;

– направление накопленной энергии от бортового ЕНЭ только на питание тягового оборудования поезда во время аварийной работы энергообеспечения метрополитена.

Примечание. * Объем информации, который получает, анализирует, обрабатывает, определяет и сохраняет система управления, должен быть окончательно согласован с администрациями метрополитенов на стадии внедрения этих систем.

** «Мёртвая» величина энергоемкости – это минимальное значение энергоемкости, до которой возможен процесс разряда емкостного накопителя энергии, установленный заводом-производителем.

Учитывая сформированные требования к параметрам и функциональным возможностям системы управления, концептуально эта система должна быть способной в автоматическом режиме отслеживать степень заряда/разряда бортового ЕНЭ, а также осуществлять эффективное управление потоками мощности энергии для различных режимов ведения поезда, работы системы энергообеспечения метрополитена и характера протекания энергетических процессов в контактной сети.

Основная стратегия такой системы управления состоит для режима рекуперативного торможения в обеспечении заряда накопителя генерируемой энергией асинхронного электропривода за счет регулирования тока в цепи накопителя и гашении избыточной энергии в блоке тормозных резисторов, а для ре-

жима тяги в обеспечении разряда накопителя путем регулирования тока потребления из контактной сети.

С учетом сформулированных концептуальных требований разработана система

управления процессами обмена энергией для подвижного состава метрополитена с асинхронным электроприводом и ЕНЭ, представленная в общем виде на рис. 3.

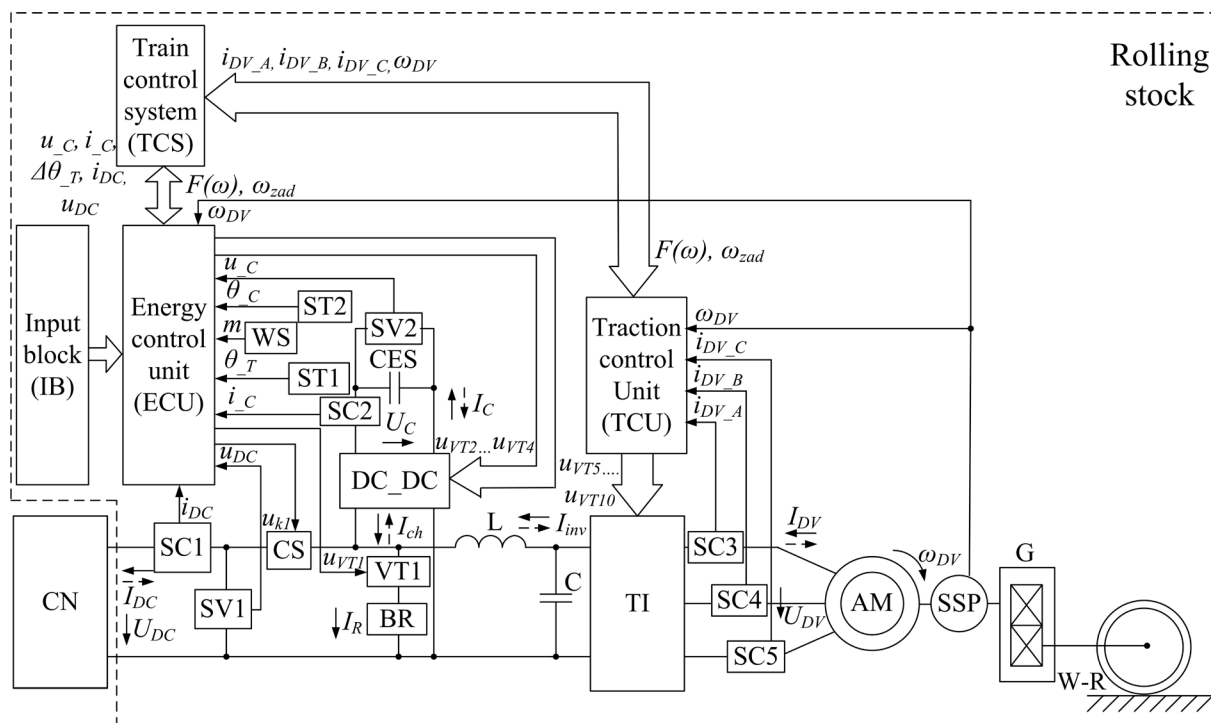


Рис. 3. Блок-схема системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ. ³

На рис. 3 приняты следующие буквенные обозначения: IB – блок ввода данных; ECU – система управления процессами обмена энергией; SC1...SC5 – датчики контроля тока; SV1...SV2 – датчики контроля напряжения; WS – датчик веса; ST1, ST2 – датчики измерения температуры; TCS – система управления поездом; L, C – индуктивность, емкость; TCU – блок контроля тяги (торможения); SSP – датчик контроля скорости; i_{DC} , u_{DC} – фактические значения тока и напряжения в цепи постоянного тока; i_{DV_A} , i_{DV_B} , i_{DV_C} , ω_{DV} – фактические значения тока фаз А, В, С и скорости электродвигателя; i_c , u_c – фактические значения тока и напряжения в цепи ЕНЭ; θ_c – фактические значения температуры ЕНЭ; θ_T – значение температуры окружающей среды; m – масса подвижного состава; $F(\omega)$ – характеристика силы тяги (торможения); ω_{zad} – заданная конечная скорость подвижного состава; u_{kl} – керующий вплив на CS; $u_{VT1}...u_{VT10}$ – управляющие воздействия на силовые ключи. Через блок IB задаются такие данные: U_{c_max} – максимальное значение напряжения на ЕНЭ; I_{c_max} – макси-

мальное значение тока в цепи ЕНЭ; $\Delta\theta_{max}$ – максимальное значение температуры нагрева ЕНЭ; U_{c_min1} , U_{c_min2} – минимальное значение напряжения на ЕНЭ первого и второго уровня соответственно; U_{c_set} , U_{R_set} – заданные значения напряжений для цепей ЕНЭ и тормозного резистора соответственно; U_{DC_c} , U_{DC_R} – граничные значения напряжений в цепи постоянного тока для перехода в режим накопления или электрического торможения; U_{DC_min} – минимальное значение напряжения контактной сети; U_{DC_nom} – номинальное напряжение в цепи постоянного тока.

В качестве управления процессами обмена энергией предложено использовать релейную систему. Релейная система управления при движении поезда в режиме торможения представлена на рис. 4, при движении в режиме тяги – на рис. 5.

Отслеживание системой управления возникновения таких аварийных режимов, как перегрев ЕНЭ и отсутствие питания от основного источника реализуется с помощью логических элементов (рис. 6).

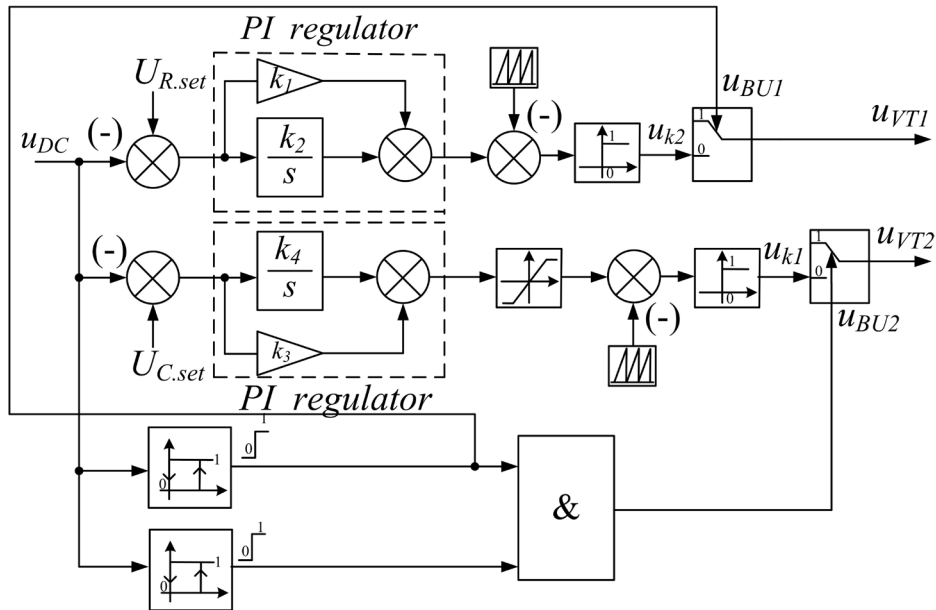


Рис. 4. Техническая структура системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ в режиме торможения. ⁵

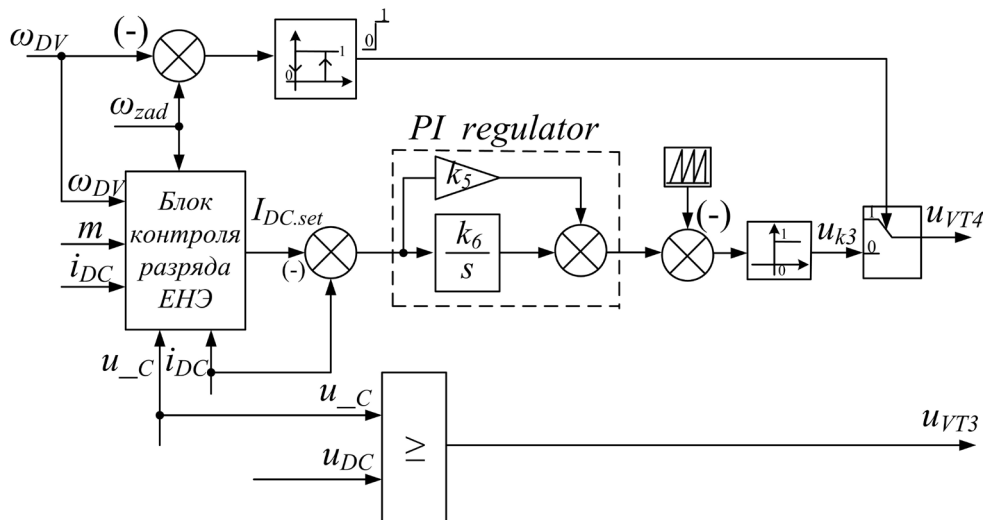


Рис. 5. Техническая структура системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ в режиме тяги. ⁶

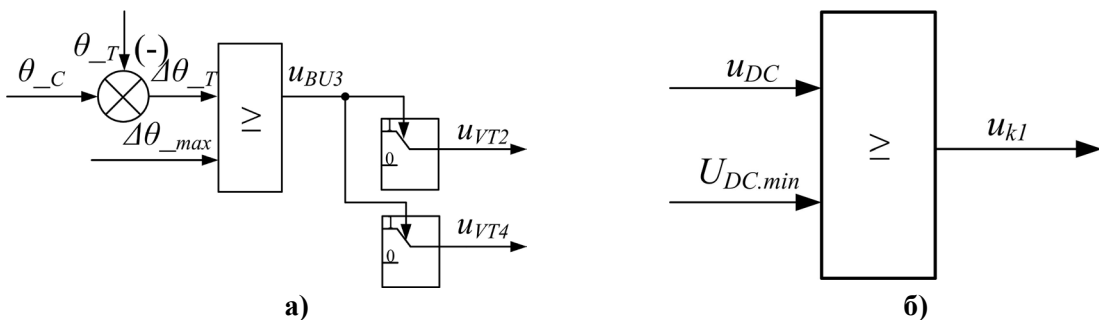


Рис. 6. Техническая структура отслеживания аварийных режимов: а – перегрев ЕНЭ; б – отсутствие питания основного источника. ⁷

На рис. 4-6 приняты следующие буквенные обозначения: k_1, k_3, k_5 – коэффициенты усиления пропорциональной составляющей ПИ-регуляторов; k_2, k_4, k_6 – коэффициенты

усиления интегральной составляющей ПИ-регуляторов; $\Delta\theta_{-T}$ – значение температуры нагрева ЕНЭ; u_{k2}, u_{k3}, u_{k4} – сигналы управляющих напряжений на транзисторы

силового преобразователя DC_DC; $u_{BU1}, u_{BU2}, u_{BU3}, u_{BU4}$ – сигналы блокировки.

При разработке системы управления процессами обмена энергией полагалось использование для тягового асинхронного привода отдельной системы автоматического управления векторного типа (TCU). Эта TCU характеризуется раздельным регулированием намагничивающей и активной проекций

обобщенного вектора статорного тока на оси вращающейся ортогональной координатной системы «x-y», связанной вещественной осью x с обобщенным вектором потокосцепления ротора двигателя. Принцип работы TCU общеизвестен и детально рассмотрен в работе [29], поэтому детально останавливаться на этом вопросе не будем.

Таблица 17.

Состояние режимов работы управляемого коммутатора и транзисторов⁸.

Режим работы систем питания подвижного состава Operating mode of rolling stock power supply	Режим ведения подвижного состава Rolling stock operating mode	Диапазон изменения величин Value range	Режим работы управляемого коммутатора и транзисторов Operating mode of the controlled switch and transistors				
			CS	VT1	VT2	VT3	VT4
штатный/ standart $u_{DC} > U_{DC.min}$ $\Delta\theta_{max} > \Delta\theta_T$	торможение/ braking	$u_{DC} \in [u_{DC.nom}...u_{DC.c}]$	3	0	И	0	0
	торможение/ braking	$u_{DC} \in [u_{DC.c}...u_{DC.R}]$	3	И	0	0	0
	тяга/traction	$i_{DC} \geq I_{DC.set}; u_C \geq u_{DC};$	3	0	0	3	И
	тяга/traction	$i_{DC} \geq I_{DC.set}; u_C < u_{DC};$ $i_D < I_{DC.set}; u_C \geq u_{DC};$ $i_D < I_{DC.set}; u_C < u_{DC};$	3	0	0	0	3
	выбег/coasting	$u_{DC} > U_{DC.min}$	3	0	0	0	0
аварийный/ emergency $u_{DC} > U_{DC.min}$ $\Delta\theta_{max} \leq \Delta\theta_T$	торможение/ braking	$u_{DC} \in [u_{DC.nom}...u_{DC.c}],$ $u_{DC} \in [u_{DC.c}...u_{DC.R}]$	3	И	0	0	0
	тяга, выбег/ traction, coasting	$u_{DC} > U_{DC.min}$	3	0	0	0	0
аварийный/ emergency $u_{DC} \leq U_{DC.min}$ $\Delta\theta_{max} > \Delta\theta_T$	торможение/ braking	$u_{DC} \in [u_{DC.nom}...u_{DC.c}]$	0	0	И	0	0
	торможение/ braking	$u_{DC} \in [u_{DC.c}...u_{DC.R}]$	0	И	0	0	0
	тяга/traction	$i_{DC} \geq I_{DC.set}; u_C \geq u_{DC};$	0	0	0	3	И
	тяга/ traction	$i_{DC} \geq I_{DC.set}; u_C < u_{DC};$ $i_{DC} < I_{DC.set}; u_C \geq u_{DC};$ $i_{DC} < I_{DC.set}; u_C < u_{DC};$	0	0	0	0	3
	выбег/coasting	$u_{DC} \leq U_{DC.min}$	0	0	0	0	0

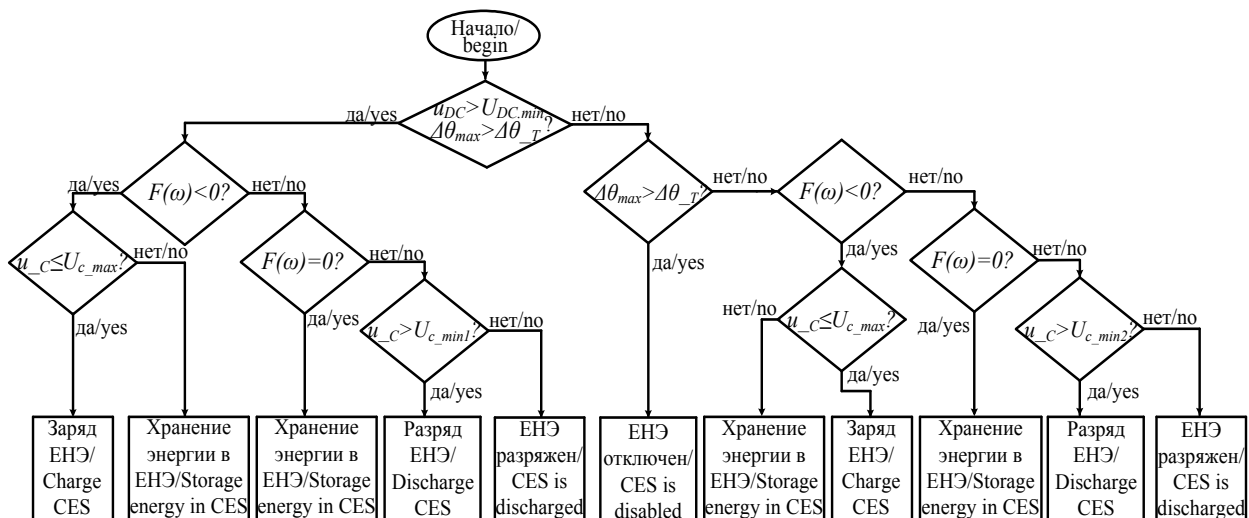


Рис. 7. Алгоритм работы системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ.⁹

Режимы работы управляемого коммутатора CS, силового ключа VT1 в цепи BR, силовых ключей VT2...VT4 преобразователя DC_DC в различных режимах движения поезда, приведены в табл. 1, где: О и З – соответственно открытое и закрытое состояния CS и ключей VT1...VT4; И – импульсный режим работы транзисторов.

Функционирование системы управления процессами обмена энергией в зависимости от режимов ведения подвижного состава и работы системы энергообеспечения метрополитена осуществляется в соответствии с алгоритмом, приведенном на рис. 7.

Выполненные исследования по разработке системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с ЕНЭ стали основой для создания ее опытного физического макета, который со-

стоит из микропроцессорной платы, панели контроля состояния работы, платы взаимодействия с внешними устройствами.

Экспериментальные исследования процессов обмена энергией выполнены при таких условиях: температура окружающей среды 18-20 °С, влажность – 50-70 %, частота опроса датчиков 2,5 кГц, максимальная частота формирования импульсов на транзисторы 2,5 кГц, частота сохранения данных 2 Гц, ЕНЭ в начале экспериментов полностью заряжен. Результаты исследования процессов обмена энергией при штатной работе основного источника питания с использованием опытного физического макета изображены на рис. 8, при возникновении аварийного режима работы – на рис. 9.

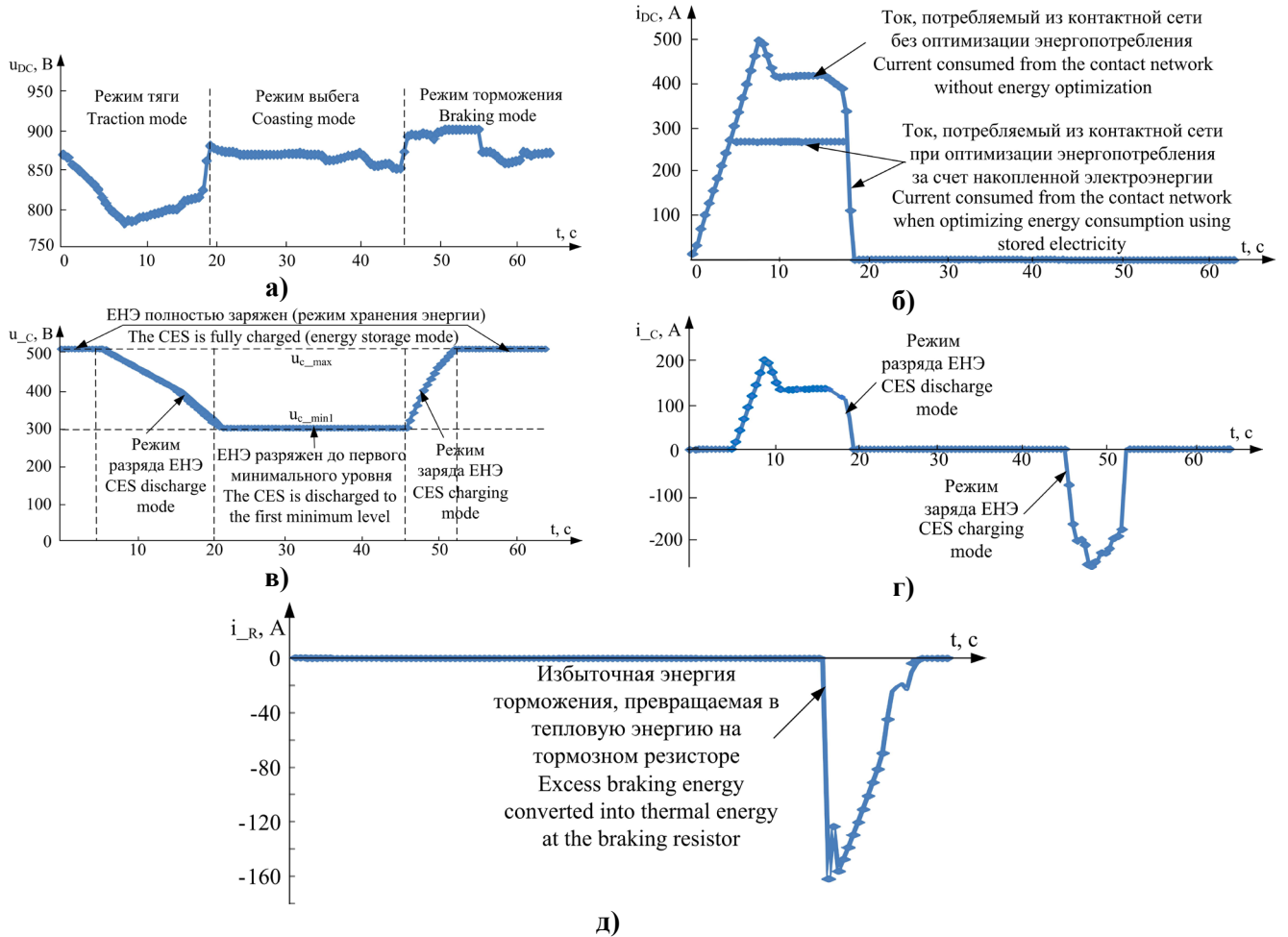


Рис. 8. Осциллограммы процессов обмена энергией при штатной работе системы энергообеспечения: а – напряжение основного источника питания; б – ток основного источника питания; в – напряжение в цепи ЕНЭ; г – ток в цепи ЕНЭ; д – ток в цепи тормозного резистора.¹⁰

¹⁰ Appendix 1

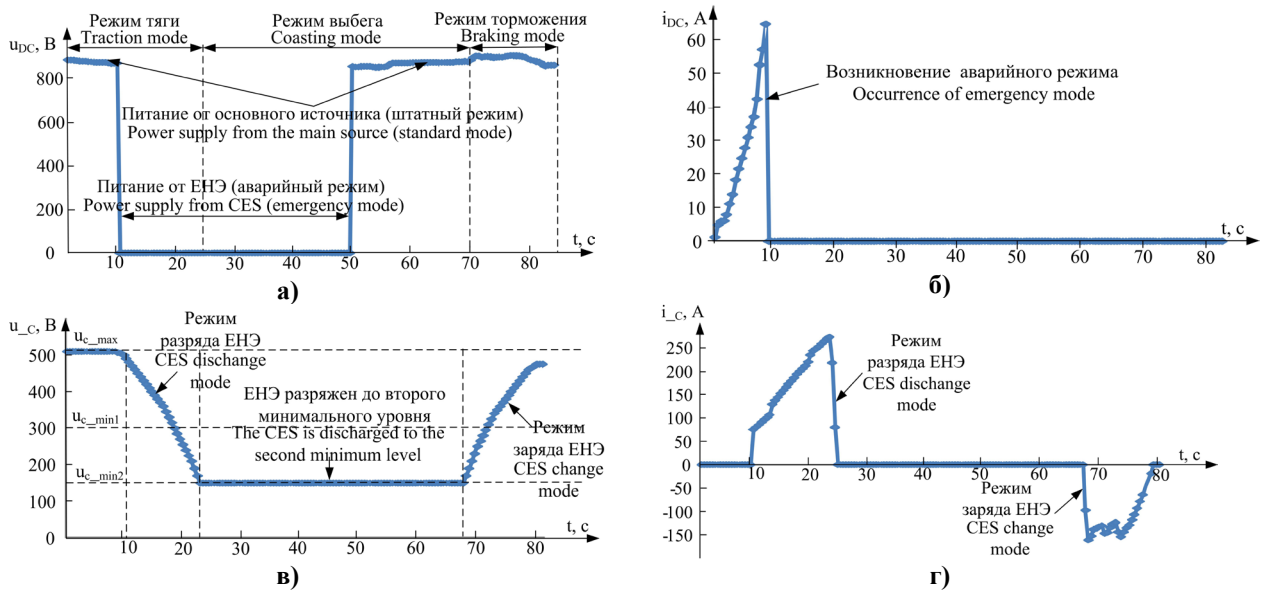


Рис. 9. Осциллограммы процессов обмена энергией при возникновении аварийного режима работы в системе энергообеспечения: а – напряжение основного источника питания; б – ток основного источника питания; в – напряжение в цепи ЕНЭ; г – ток в цепи ЕНЭ. ¹¹

Результаты исследований подтвердили работоспособность разработанного блока управления, а также показали возможность снижения потребляемой электроэнергии из основного источника питания. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию разработанной системы управления в подвижной состав метрополитена с ЕНЭ, а также на проверку работоспособности этой системы в составе поезда.

IV. ВЫВОДЫ

Выводы.

1. Разработана структурная схема блока управления процессами обмена энергией, который в отличие от существующих, имеет управляемый коммутатор и блок контроля нагрева емкостных накопителей энергии, что делает возможным отслеживать аварийные режимы работы основного и дополнительного источников питания.

2. Созданы принципиальная техническая структура и алгоритм работы системы управления процессами обмена энергией на подвижном составе метрополитена с емкостными накопителями энергии, которые описывают особенности функционирования этой системы в штатном и аварийном режимах работы основного источника питания.

3. Результаты экспериментальных исследований позволили подтвердить работоспособность разработанного прототипа системы управления процессами обмена энергией в соответствии с созданным алгоритмом работы и

показали возможность улучшения технических характеристик подвижного состава и повышения безопасности процесса перевозок пассажиров в метрополитене за счет расширения функционала существующих систем.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Block diagram of an asynchronous electric drive of metro rolling stock with a CES.

²Fig. 2. Equivalent circuit for a traction electric drive of metro rolling stock with a capacitive energy storage for braking and traction modes.

³Fig. 3. Block diagram of the control unit for energy exchange processes on metro rolling stock with a capacitive energy storage device.

⁴Fig. 4. Technical structure of control system for energy exchange processes on metro rolling stock with a capacitive energy storage device in braking mode.

⁵Fig. 5. Technical structure of control system for energy exchange processes on metro rolling stock with a capacitive energy storage device in traction mode.

⁶Fig. 6. Technical structure of emergency tracking: a – ESD overheating; b – lack of power from the main source.

^{7,8}Table 1. Status of operating modes of the control switch and transistors.

⁹Fig. 7. Algorithm for the operation of a control system for energy exchange processes on metro rolling stock with a capacitive energy storage device.

¹⁰Fig. 8. Oscillograms of energy exchange processes during normal operation of the energy supply system: a – voltage of the main power source; b – current of the main power source; c – voltage in the circuit with a capacitive energy storage device; d – current in the circuit with a capacitive energy storage device; e – current in the braking resistor circuit.

¹¹ Appendix 1

¹¹**Fig. 9.** Oscillograms of energy exchange processes when an emergency operating mode occurs in the energy supply system: a – voltage of the main power source; b – current of the main power source; c – voltage in the circuit with a capacitive energy storage device; d – current in the circuit with a capacitive energy storage device.

Литература (References)

- [1] Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Chepur-na N., Pohosov O. Simulation of a Direct Torque Control Systems in the Presence of Winding Asymmetry in Induction Motor. *Engineering Research Express*, 2023, 5, 025070-025086. doi: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acde46>
- [2] Gubarevych O., Golubieva S., Melkonova I. Comparison of the Results of Simulation Modeling of an Asynchronous Electric Motor with the Calculated Electrodynamic and Energy Characteristics. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022, 98, pp. 61-66. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2022.10.11>
- [3] Gubarevych O., Goolak S., Melkonova I., Yurchenko M. Structural Diagram of the Built-in Diagnostic System for Electric Drives of Vehicles. *Diagnostyka*, 2022, 23(4):2022406. doi: <https://doi.org/10.29354/diag/156382>
- [4] Khodaparastan M., Mohamed Ahmad A., Brandauer W. Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 20, Issue 8. pp. 2831-2847. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
- [5] Sablin O.I. Dostizhennie Efektyvnosti Protseesu Reku-peratsii Elektroenerhii v Umovakh Metropolitenu [Investigation of the Efficiency of the Process of Energy Recovery in Metro Drains]. *Shhidno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, no. 8 (72)/6/. pp. 9-13. (In Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>
- [6] Ciccarelli F., Iannuzzi D., Tricoli P. Control of Metro-Trains Equipped with onboard Supercapacitors for Energy Saving and Reduction of Power Peak Demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2012. № 24. pp. 36-49.
- [7] Mensah-Darkwa K., Zequine C., Kahol P.K., Gupta R.K. Supercapacitor Energy Storage Device Using Bowastes: a Sustainable Approach to Green Energy. *Sustainability*. 2019. Vol. 11 (2). Iss. 414. pp. 1-22. doi: <https://doi.org/10.3390/su11020414>
- [8] Chaviha N., Campillo J., Bohlin M., Dahlquist E. Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. *Energy Procedia*. 2017. № 105. pp. 4561-4568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
- [9] Iannuzzi D., Tricoli P. Speed-Based State-of-Change Traking Control for Metro Trains with Onboard Supercapacitors. *IEEE Trans. Power Electron.* 2012. № 27 (3-4). pp. 2129-2140.
- [10] Lee H., Song J., Lee H.A., Jang J., Kim G. Capacity Optimization of the Supercapacitor Energy Storage on DC Railway System Using a Railway Power Flow Algorithm. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2011. Vol. 7. No. 5(B). pp. 2739-2753.
- [11] Hrechyshnykov V.A., Shevliuhyn M.V. Ekspluatatsiya Nakopytelei Enerhii na Metropolitene [Operation of Energy Storage Devices in the Metro]. *Myr transporta – World of transport*. 2013. no 5. pp. 53–58. (In Russian).
- [12] Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Preobrazovanie Energii Reku-peratsii v Gorodskom Elektrotransporte [Energy Recovery Transformations in Urban Electric Transport]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya – Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2022. no 43. pp. 5–28. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2022.3.01>
- [13] Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Vliyanie Bufornykh Nakopiteley Bortovogo i Statsionarnogo Tipa na Energopotreblenie Tyagovykh Podstantsyi v Gorelekrotransporte [The Influence of Buffer Storages of on Board and Wayside Types on the Energy Consumption of Traction Substations in Electric Transport]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – News of TulGU. Technical science*. 2023. no 4. pp. 542–560. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-4-542-560>
- [14] Xia H., Chen H.X., Yang Z.P., Lin F., Wang B. Optimal Energy Management Location and Size for Stationary Energy Storage System in a Metro Line Based on Genetic Algorithm. *Energies*. 2015. № 8(10). pp. 11618–11640. doi: <https://doi.org/10.3390/en81011618>
- [15] Calderoro V., Galdi V., Graber G., Piccolo A. Optimal Siting and Sizing of Stationary Supercapacitors in a Metro Network Using PSO. *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, Spaine, March 17–19, 2015. pp. 2680–2685. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125493>
- [16] Teymourfar R., Asaei B., Iman-Eini H., Nejati fard R. Stationary Super-Capacitor Energy Storage System to Save Regenerative Braking Energy in a Metro Line. *Energy Conversion and Management*. 2012. Vol. 56. pp. 206–214.
- [17] Mezitis M., Panchenko V., Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A., Sansyzbajeva Z. Selection of Mathematical Model of on-board Capacity Energy Storage as Element of Hybrid Traction Unit of Motor Car Rolling Stock. *Journal of Measurements in Engineering*. 2021. Vol. 9. Iss.

2. pp. 71-86. doi: <https://doi.org/10.21595/jme2021.21818>
- [18] Radu P.V., Szelag A., Steczek M. On-Board Energy Storage Devices with Supercapacitors Metro Trains – Case Study Analyses of Application Effectiveness. *Energies*. 2019. 12, 1291. pp. 1–22. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071291>
- [19] Allegre A.L., Bouscayrol A., Delarue P., Barrade P., Chattot E., El-Fassi S. Energy Storage System with Supercapacitor for an Innovative Subway. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. Vol. 57. No. 12. pp. 4001–4012.
- [20] Istomin S., Shatohin A. Development of a Simulation Model for Controlling Energy Storage Systems on Electric Trains. *E3S Web of Conferences. XIV International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability*. 2024. 471, 02009. doi: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202447102009>
- [21] Ruigang S., Tianchen Yu., Jian Ya., Hao H. Simulation of Braking Energy Recovery for the Metro Vehicles Based on the Traction Experiment System. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*. 2017. Vol. 93 (12). pp. 1099-1112. doi: <http://doi.org/10.11770037549711726146>
- [22] Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. Recent Developments and Applications of Energy Storage Devices in Electrified Railways. *ET Electr. Syst. Transp.* 2014, Vol. 4, № 1, pp. 9–20. doi: <http://doi.org/10.1049/iet-est.2013.0031>
- [23] Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya. Development of Strategies for Reducing Traction Energy Consumption by Electric Rolling Stock. *Computational Problems of Electrical Engineering Journal*. Vol. 1. Iss. 9. pp. 44-52.
- [24] Iannuzzi D., Tricoli P. Metro Trains Equipped onboard with Supercapacitors: a Control Technique for energy saving. *Proc. Int. Symp. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Pisa, Italy, 14–16 June 2010, pp. 750–756.
- [25] Lifshits D., Weiss G. Optimal Control of a Capacitor-Type Energy Storage System. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 60. Iss. 1. pp. 216-220. doi: <http://doi.org/10.1109/TAC.2014.2323136>
- [26] Hu J., Fan Y., Feng Q. Running Control of the Supercapacitor Energy Storage System. *Energy Procedia*. 2012. № 14. pp. 1029-1034. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1050>
- [27] Zhao F., Zhu X., Chen X., Wang Y. Regenerative Braking Energy Recovery System of Metro Train Based on Dual-Mode Power Management. *Energy Engineering*. 2024. Vol. 121. No. 9. pp. 2585-2601. doi: <https://doi.org/10.32604/ee.2024.049762>
- [28] Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with onboard Energy Storage. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol. 9. No. 2. pp. 848–858.
- [29] Byalobrzhesky O.V. e.a. *Sposib Keruvannya Nakopychuval'no-Kompensuiuchym Prystroem v Skhemi Peretvoryuvacha z Lankoiu postynogostrumu* [Metod of controlling the accumulative-compensating device in the circuit of the frequency converter DC link]. Patent UA, no. 103507, 2015.

Сведения об авторах.



Сулим Андрей Александрович, кандидат технических наук, старший исследователь. Область научных интересов: энергосбережение, процессы обмена энергией на подвижном составе, емкостные накопители энергии, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>
E-mail: sulim1.ua@gmail.com



Фомин Алексей Викторович, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: транспортная инженерия, процессы обмена энергией на подвижном составе, емкостные накопители энергии. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>
E-mail: fominaleksejviktorovic@gmail.com



Хозя Павел Александрович, кандидат технических наук, старший исследователь. Область научных интересов: энергетические системы, емкостные накопители энергии ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>
E-mail: pavlo.khozia@gmail.com



Багров Александр Николаевич, кандидат технических наук. Область научных интересов: процессы обмена энергией, динамика и прочность подвижного состава ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8984-7595>
E-mail: anbagrov@meta.ua