

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

А.І. Ломонос

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600, Україна
Телефон: (066) 796-70-94, E-mail: lomonosai@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5001-1280>

СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ З АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ ТА ЄМНІСНИМИ СИСТЕМАМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

У статті розглянуто подальший розвиток новоствореного та глибокомодернізованого рухомого складу метрополітену за рахунок впровадження на ньому ємнісних систем накопичення енергії. Встановлено, що за умов впровадження на рухомому складі метрополітену бортових ємнісних накопичувачів енергії мало-вивченим питанням залишається синтез способів керування потоками енергії між контактною мережею, силовим тяговим і гальмівним обладнанням, ємнісними накопичувачами енергії.

Метою є розроблення способів та алгоритмів керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ємнісними системами накопичення енергії за можливості врахування роботи системи енергозабезпечення метрополітену як в штатному, так і в аварійному режимах.

Описано структуру блок-схеми системи керування енергетичними процесами, здатної відслідковувати виникнення аварійних режимів в системі тягового енергозабезпечення метрополітену. Розроблено три різні способи та алгоритми керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену в режимі тяги за штатної роботи системи енергозабезпечення. Запропоновано нову концепцію керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену, яка передбачає можливість живлення тягового обладнання поїзда від ємнісних систем накопичення енергії у випадку відсутності живлення в контактній мережі внаслідок наявності двох зон регулювання. Побудовано ідеалізовані осцилограми енергетичних процесів в контактній мережі і силових колах для розроблених способів керування залежно від режимів ведення поїзда та роботи системи енергозабезпечення на прикладі заданих характеристик рухомого складу та ємнісних накопичувачів енергії.

© Сулим А.О., Ломонос А.І., 2025

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Розроблено алгоритм керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену з ємнісними системами накопичення енергії в режимі тяги, вибігу, рекуперативного гальмування за штатної та аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену. Визначено необхідність зосередження подальших зусиль на дослідження ефективності кожного із розроблених способів керування та алгоритмів з метою встановлення найбільш перспективного.

Ключові слова: енергетичні процеси, ємнісні системи накопичення енергії, метрополітен, поїзд, рухомий склад, система енергозабезпечення, система керування.

Вступ та постановка проблеми. Впровадження «зеленого» екологічно чистого рухомого складу метрополітену з поліпшеними техніко-економічними характеристиками є однією з пріоритетних задач підприємств комунального транспорту на найближчі роки. При цьому першочерговим напрямком поліпшення техніко-економічних характеристик рухомого складу метрополітену є впровадження на ньому енергоефективних систем і обладнання, ресурсоенергозберігаючих технологій [1]. Це дозволить заощадити чималі кошти, оскільки останнім часом частка витрат на енергоносії у вітчизняних метрополітенах помітно збільшилась порівняно з іншими витратами внаслідок підвищення вартості тарифів у декілька разів. Особливо актуальним необхідність заощадження енергоресурсів у всіх без виключення галузях в Україні постало після повномасштабного вторгнення військ російської федерації за умов знищення об'єктів енергетичної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень. Протягом останнього часу у вітчизняному метрополітені інноваційний рухомий склад поступово вводився в експлуатацію на заміну зношеного, що був побудований у 60-70 роках та відпрацював свій ресурс. Це, передусім, новостворений та глибокомодернізований п'ятивагонний рухомий склад виробництва ПАТ «КВБЗ», який складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037 (рис. 1) та 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 (рис. 2).



Рис. 1. Поїзд, що складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037



Рис. 2. Поїзд, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01

Основними перевагами цього рухомого складу у порівнянні з існуючим виробництва 60-90 років минулого століття є впровадження енергоресурсозберігаючих технологій та інноваційних систем. Серед таких впроваджень слід окремо виділити асинхронний електропривод, статичні силові перетворювачі для живлення електродвигунів, гальмівну систему з можливістю рекуперативного гальмування, мікропроцесорну систему керування поїздом. Впровадження в експлуатацію новостворе-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

ного та глибокомодернізованого рухомого складу дозволило в значній мірі скоротити споживання електроенергії з контактної мережі у вітчизняних метрополітенах [2].

Одним з перспективних напрямків подальшого розвитку цього новоствореного та глибокомодернізованого рухомого складу є впровадження на ньому ємнісних систем накопичення енергії (ЄСНЕ). Впровадження цих систем дозволить заощадити на рівні 8-40 % обсягів електроенергії, що споживається цим рухомим складом [3]. Переваги застосування ЄСНЕ порівняно з іншими типами накопичувачів енергії на електрорухомому складі детально розглянуто в роботах [4, 5].

Ця стаття є продовженням попередніх досліджень [6–13] в напрямку створення інноваційного рухомого складу метрополітену з ЄСНЕ. За результатами аналізу цих досліджень встановлено, що останнім часом роботи за цим напрямком активно публікуються та є актуальними. При цьому одним з перспективних та важливих завдань подальших досліджень за цим напрямком є розробка ефективної системи керування потоками енергії, яка циркулює між контактною мережею, силовим обладнанням рухомого складу та ЄСНЕ.

В попередніх дослідженнях [14–25] увага розробці системи керування енергетичними процесами на тяговому рухомому складі з асинхронним приводом та ЄСНЕ приділялась. В роботах [14–17] наведено можливі концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі. В дослідженні [18] запропоновано удосконалену силову структуру двосекційного магістрального тепловоза шляхом використання накопичувачів енергії в системі тяги. В роботі [19] запропоновано структуру електровоза для кар'єрного залізничного транспорту на базі багатодвигунного асинхронного електропривода з накопичувачами енергії. В праці [20] запропоновано систему керування потоками енергії на приміському електропоїзді з тяговим асинхронним електроприводом та накопичувачем енергії. В охоронних документах [21, 22] запропоновано технічні рішення систем керування енергетичними процесам для електрорухомого складу з асинхронним приводом та ЄСНЕ. При цьому питання розробки енергоефективних алгоритмів та способів керування енергетичними процесами між тяговим електроприводом та системою тягового постачання в цих працях не розглядалось.

Аналіз робіт [12–17, 23–25] дозволив встановити, що концептуально керувати енергетичними процесами на електрорухомому складі з ЄСНЕ можливо як при роздільній роботі системи тягового постачання – контактної мережі (основне джерело живлення) та накопичувача енергії (додаткового джерела живлення), так і їх сумісній роботі. При цьому основними стратегіями керування під час руху в режимі тяги за роздільної роботи є такі: пріоритет першочергового використання накопиченої енергії в режимі пуску [12–14, 23], використання ЄСНЕ за досягнення певної швидкості руху або у певному діапазоні швидкостей руху [12–14, 23]. Основними стратегіями керування під час руху в режимі тяги за умов сумісної роботи контактної мережі і ЄСНЕ є наступні: обмеження струму споживання з контактної мережі [14–16, 21], у тому числі для певного діапазону швидкості руху [14, 16]; двохпараметричне керування, за якого визначаються значення швидкості рухомого складу та струму, за яких має розпочинатися сумісна робота контактної мережі і ЄСНЕ [17, 24].

У режимі рекуперативного гальмування на початковому етапі є пріоритет заряджання ЄСНЕ з одночасною можливістю генерації надлишкової енергії до контактної мережі або її гасінні на блоці резисторів за відсутності споживачів цієї енергії в контактній мережі [13, 16, 17, 21, 23, 24].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

На рис. 3 графічно проілюстровано зазначені стратегії керування енергетичними процесами під час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування на прикладі характеристик поїзда метрополітену, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 виробництва ПАТ «КВБЗ».

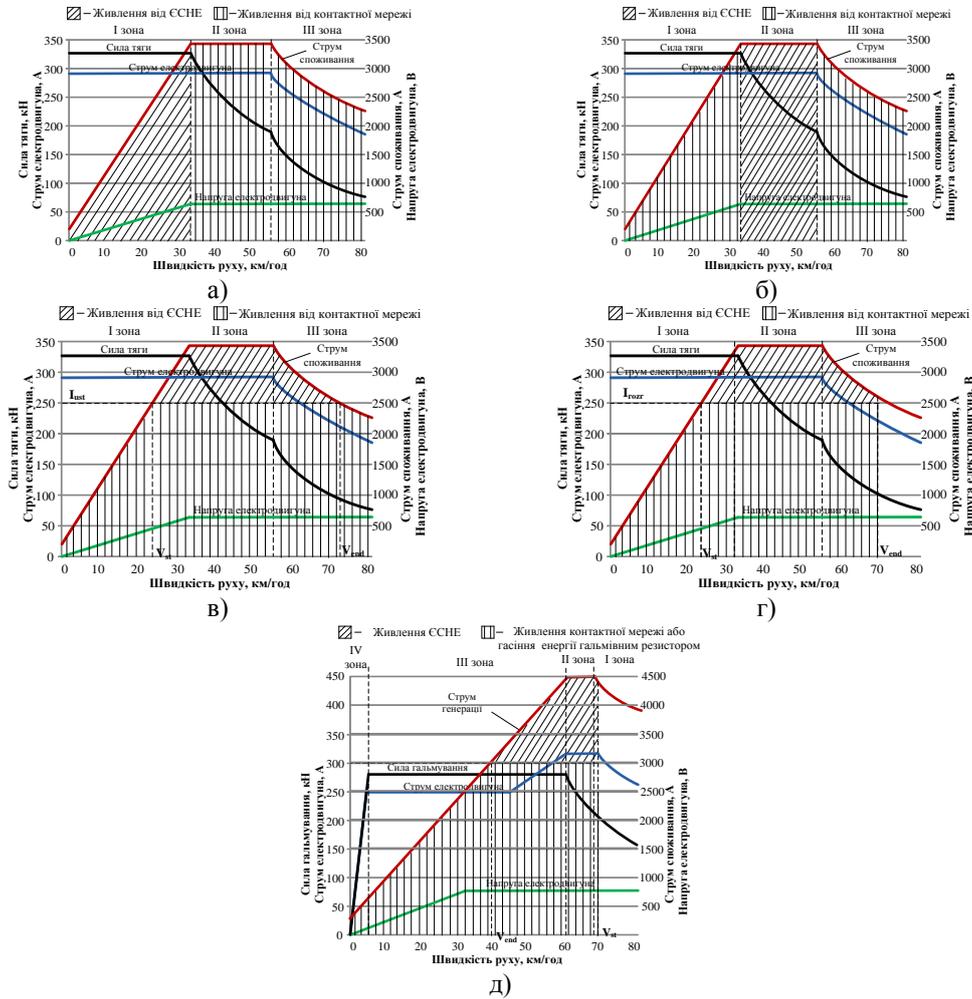


Рис. 3. Графіки поїзда метрополітену, що ілюструють стратегії керування енергетичними процесами:

- а – роздільна робота з пріоритетом використання накопиченої енергії під час пуску;
- б – роздільна робота з використання накопиченої енергії у певному діапазоні швидкості руху;
- в – сумісна робота з обмеженням струму споживання з контактної мережі;
- г – сумісна робота з обмеженням струму споживання з контактної мережі за умов двох параметричного керування за відомої кінцевої швидкості руху; д – сумісна робота в режимі рекуперативного гальмування

На рис. 3 наведено такі літерні позначення: I_{ust} , I_{rozr} – відповідно установлене та розраховане значення струму, за досягненням яких розпочинається споживання енергії з ЄСНЕ; V_{st} , V_{end} – відповідно початкова та кінцева швидкості руху, у діапазоні яких поїзд споживає енергію з ЄСНЕ.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Слід зазначити, що зазначені стратегії керування енергетичними процесами наведено саме за умов застосування ЄСНЕ незначної потужності та енергоємності, який не здатний самостійно забезпечити динамічні характеристики поїзда. Це пояснюється тим, що застосування потужних та енергоємних ЄСНЕ є недоцільним, як з економічної, так і технічної точки зору, оскільки використання таких ЄСНЕ матиме значний вплив на динамічні характеристики поїзда [26].

Основними перевагами застосування роздільного керування енергетичними процесами є простота реалізації системи керування, надійність, швидкодія. Недоліками такого керування є виникнення аварійних струмів в силових колах та необхідність їх стабілізації під час комутації джерел живлення. Також за умов застосування роздільного керування малоймовірним є зниження встановленої потужності об'єктів генерації, розподілення та передавання енергії; мінімізація витрат та пікового споживання в контактній мережі. І, навпаки, сумісне живлення поїзда від контактної мережі та ЄСНЕ передбачає побудову складнішої системи керування, однак такі системи дозволяють реалізувати пошук максимально ефективного режиму роботи ЄСНЕ шляхом вирішення задачі оптимізації, розраховувати зону роботи ЄСНЕ залежно від заданої сили тяги та кінцевої швидкості руху, завантаженості, поточної кількості накопиченої енергії тощо.

Слід зазначити, що загальним недоліком розглянутих стратегій є те, що кожна з них дозволяє керувати енергетичними процесами тільки за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення метрополітену. При цьому жодна із розглянутих стратегій не передбачає автоматизованого відстеження виникнення аварійного режиму та гарантовану можливість забезпечення ходу в режимі тяги поїзда метрополітену до найближчої станції за рахунок накопиченої енергії ЄСНЕ під час режиму рекуперативного гальмування.

Слід відмітити, що перші кроки в цьому напрямку вже зроблені. Так, в роботі [27] сформульовано основні концептуальні вимоги до розроблення відповідних систем керування. Визначено, що система керування має функціонально забезпечувати процес обміну енергією між ЄСНЕ, силовим обладнанням електроприводу, гальмівним обладнанням та контактною мережею як в штатних, так і аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення метрополітену. В охоронному документі [22] запропоновано технічне рішення системи керування енергетичними процесами для електрорухомого складу з ЄСНЕ, яке передбачає можливість керування як за штатного, так і аварійного режиму роботи системи тягового енергозабезпечення. Це технічне рішення передбачає постійний контроль рівня напруги контактної мережі та використання двох зон регулювання відповідно за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення та аварійного. Проте, в наведених роботах [22, 27] питання розроблення алгоритмів та способів керування енергетичними процесами не розглядалось. Тому, в цій роботі пропонується зосередитись та детальніше розглянути саме це питання.

Мета статті – розроблення алгоритмів та способів керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ за умов штатної та аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

В процесі досягнення поставленої мети пропонується вирішити такі задачі:

– описання структурної блок-схеми системи керування енергетичними процесами, здатної відслідковувати виникнення аварійних режимів в системі тягового енергозабезпечення метрополітену;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- розроблення способів керування енергетичними процесами за штатних та аварійних режимів роботи системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та ЄСНЕ;
- розроблення алгоритмів роботи для кожного із запропонованих способів керування енергетичними процесами;
- описання функціонування запропонованих способів за допомогою ідеалізованих осцилограм.

Матеріал та результати досліджень. Раніше в роботах [22, 28] розроблено систему керування енергетичними процесами для рухомого складу метрополітену з асинхронним електроприводом та ЄСНЕ, здатної технічно реалізувати керування енергетичними процесами як за штатного, так і аварійного режимів роботи системи тягового енергозабезпечення. Блок-схему розробленої системи керування енергетичними процесами зображено на рис. 4.

Технічна реалізація можливості відстеження аварійного режиму роботи системи тягового енергозабезпечення та керування енергетичними процесами в цьому режимі стала можливою за рахунок введення до цієї системи керування у порівнянні з існуючими керованого комутатора, додаткових логічних пристроїв та виокремлення двох зон регулювання. В цій роботі саме цю систему керування (рис. 4) запропоновано використати під час розроблення алгоритмів роботи та способів керування енергетичними процесами.

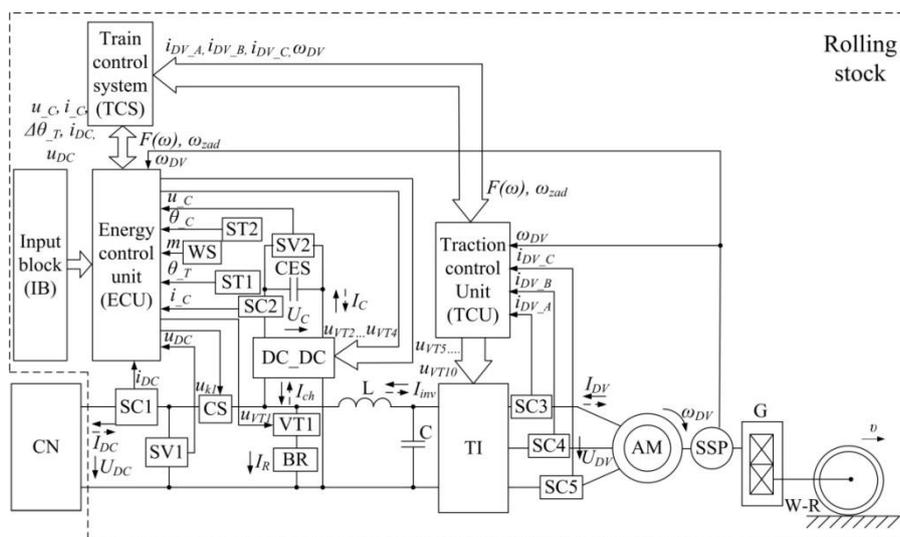


Рис. 4. Блок-схема системи керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ

На рис. 4 наведено такі літерні позначення: IB – блок введення даних; CN – контактна мережа; TCS – система керування поїздом; ECU – система керування процесами обміну енергією; SC1...SC5 – датчики контролю струму; SV1...SV2 – датчики контролю напруги; WS – датчик ваги; ST1, ST2 – датчики вимірювання температури; CS – керований комутатор; CES – ємнісна система накопичення енергії; DC_DC – силовий перетворювач; VT1 – силовий транзистор;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

BR – блок резисторів; L, C – індуктивність, ємність; TCU – блок контролю тяги (гальмування); ТІ – тяговий інвертор; АМ – асинхронний двигун; SSP – датчик контролю швидкості руху; I_{DC}, U_{DC} – струм та напруга CN; I_R – струм у колі BR; I_{ch} – струм на вході силового перетворювача DC_DC; I_C, U_C – струм та напруга у колі ССН; I_{inv} – струм на вході ТІ; $I_{DV}, U_{DV}, \omega_{DV}$ – струм, напруга, швидкість АМ, відповідно; P_w – потужність на ободі коліс; v – швидкість рухомого складу; i_{DC}, u_{DC} – фактичні значення струму та напруги у колі постійного струму; $i_{DV_A}, i_{DV_B}, i_{DV_C}, \omega_{DV}$ – фактичні значення струму фаз А, В, С та швидкості двигуна, відповідно; i_C, u_C – фактичні значення струму та напруги у колі ССН; θ_C – фактичне значення температури ССН; θ_T – значення температури навколишнього середовища; m – маса рухомого складу; $F(\omega)$ – характеристика сили тяги (гальмування); ω_{zad} – задана кінцева швидкість складу; u_{kl} – керуючий вплив на СС; $u_{VT1} \dots u_{VT10}$ – керуючі впливи на силові ключі.

Через блок ІВ задають такі данні: U_{c_max} – максимальне значення напруги на ССН; I_{c_max} – максимальне значення струму у колі ССН; $\Delta\theta_{max}$ – максимальне значення температури нагріву ССН; U_{c_min1}, U_{c_min2} – мінімальне значення напруги на ССН першого та другого рівня відповідно; $U_{C.set}, U_{R.set}$ – задані значення напруг для кіл ССН та гальмівного резистора відповідно; $U_{DC.C}, U_{DC.R}$ – граничні значення напруг в колі постійного струму для переходу в режим накопичення або електричного гальмування; $U_{DC.min}$ – мінімальне значення напруги контактної мережі; $U_{DC.nom}$ – номінальна напруга у колі постійного струму.

Силові схеми перетворювача DC_DC та тягового інвертора ТІ зображено на рис. 5, де VT2...VT10 – силові транзисторні ключі; L_c – індуктивність; VD1 – діод.

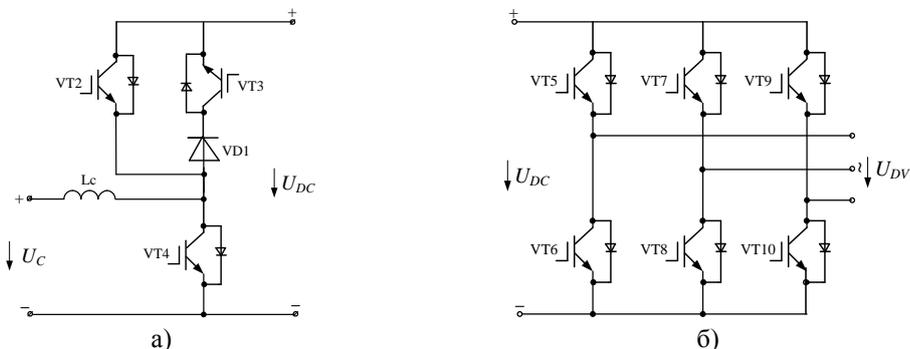


Рис. 5. Електричні схеми силових перетворювачів:
а – DC_DC; б – ТІ

З використанням системи керування (рис. 4) розроблено такі способи керування енергетичними процесами за умов штатної або аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

Штатна робота системи енергозабезпечення. Режим тяги.

Перший спосіб. Пріоритет першочергового використання накопиченої енергії від ССН під час руху в режимі тяги та можливість відстеження аварійного режиму в системі тягового енергозабезпечення метрополітену за будь-якого режиму ведення рухомого складу. Цей спосіб керування виключає одночасне живлення електродви-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

гунів від ЄСНЕ та контактної мережі. При цьому пуск рухомого складу зазвичай відбувається за рахунок накопиченої енергії рекуперативного гальмування від ЄСНЕ (I зона регулювання), а подальший рух поїзда після виснаження ЄСНЕ (II та III зони регулювання) – за рахунок енергії контактної мережі (рис. 1, а).

Цей спосіб керування опирається на переважне використання накопиченої енергії у I зоні, проте можливі випадки використання накопиченої енергії як у II зоні, так і живлення від контактної мережі у I зоні, що буде залежати від обраної енергоємності ЄСНЕ, профілю колії дослідної ділянки, завантаженості пасажирями та іншими додатковими факторами впливу. Перехід на живлення енергією тягового обладнання рухомого складу від контактної мережі здійснюється за умови виснаження ЄСНЕ до мінімально встановленого рівня, який контролюється за допомогою датчиків.

За цього способу керування задають значення швидкості ω_{zad} , формують команду на розмикання CS, живлять електродвигун АМ від ЄСНЕ шляхом формування відповідних керуючих імпульсів на керовані ключі VT3, VT4. Керований ключ VT4 відповідає за формування широтно-імпульсної модуляції шляхом релейного регулювання, а VT3 – за блокування передачі енергії та непередбачуваного (випадкового) виснаження ЄСНЕ. Живлення електродвигуна від ЄСНЕ триває до досягнення певних граничних значень за рівнем напруги U_{c_min1} , що сигналізує про виснаження ЄСНЕ. За умови досягнення цих значень керований комутатор CS замикається, формуються відповідні імпульси на керовані ключі VT3, VT4 і живлення АМ здійснюється від CN. При цьому унеможливають живлення ЄСНЕ від контактної мережі шляхом формування відповідних сигналів на ключі VT3, VT 4. Система ECU здійснює керування енергетичними процесами для наведеного способу за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення та руху в режимі тяги згідно алгоритму, який наведено на рис. 6.

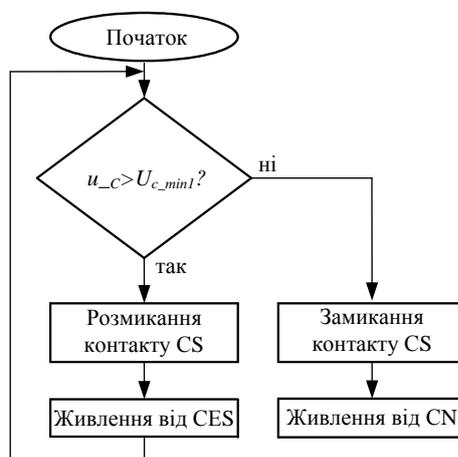


Рис. 6. Алгоритм роздільного способу керування енергетичними процесами з пріоритетом живлення від ЄСНЕ

Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЕ, а також на струмоприймачі поїзда, залежно від швидкості руху за такого способу керування наведено на рис. 7. Слід зазначити, що наведені осцилограми побудовані з урахуванням ха-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

рактик поїзда (рис. 3) та в них не враховано перехідні процеси під час зміни джерела живлення, тобто комутація здійснюється миттєво без амплітудного збільшення струму.

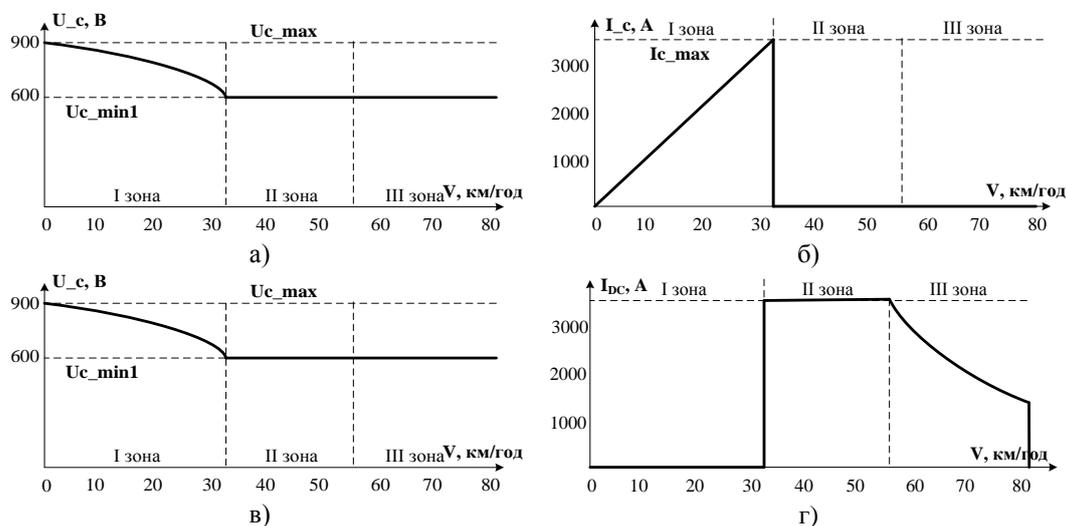


Рис. 7. Ідеалізовані осцилограми за першого способу керування енергетичними процесами:

напруги (а) та струму (б) в колі ЄСНЕ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Переваги способу: проста реалізація способу керування; мінімізація споживання електроенергії з контактної мережі; максимальне використання накопиченої енергії рекуперативного гальмування рухомого складу; прогнозована стабільність протікання енергетичних процесів; досягнення значного техніко-економічного ефекту. Недоліки способу: зниження ресурсу ЄСНЕ; відсутнє обмеження амплітудного споживання струму з контактної мережі внаслідок чого неможливе зменшення встановленої потужності силового обладнання системи енергозабезпечення; необхідність стабілізації струму під час зміни джерела живлення; виключена можливість сумісної роботи двох джерел живлення; необхідність проведення окремих досліджень для вибору потужності та енергоємності ЄСНЕ.

Режим тяги. Другий спосіб. Сумісне живлення від контактної мережі та ЄСНЕ за умови досягнення встановленого значення струму споживання або швидкості руху в режимі тяги та можливість відстеження аварійного режиму в системі тягового енергозабезпечення метрополітену за будь-якого режиму ведення рухомого складу. За цього способу керування можливо живити електродвигун від ЄСНЕ, як у I зоні, так і у II та III зонах. Цей спосіб дозволяє обмежити струм споживання з контактної мережі та зменшити встановлену потужність силового тягового обладнання системи енергозабезпечення метрополітену. За цього способу керування струм з контактної мережі споживається стабільно та практично має незмінне значення (за виключення початкового пускового режиму у I зоні) протягом всього швидкісного режиму, а живлення від ЄСНЕ здійснюється за досягненням заданих значень швидкості руху або струму споживання для покриття її пікових амплітудних значень.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За цього способу керування задають значення швидкості ω_{zad} , живлять електродвигун АМ від контактної мережі шляхом формування відповідних керуючих імпульсів системою керування вищого рівня ТСS на ТСУ, на початковому етапі руху керовані ключі VT3, VT4 відкриті. Живлення електродвигуна АМ від контактної мережі триває до досягнення певного встановленого значення струму I_{ust} або швидкості V_{st} . За умов досягнення встановленого значення розпочинається сумісне живлення електродвигуна від контактної мережі та ЄСНЕ. Керований ключ VT4 формує широтно-імпульсні модуляції шляхом релейного регулювання, а VT3 – за необхідності блокує передачу енергії у випадку виснаження ЄСНЕ. Сумісне живлення електродвигуна від контактної мережі та ЄСНЕ триває до досягнення певних значень струму I_{ust} або швидкості V_{end} , а також внаслідок виснаження ЄСНЕ. За умови досягнення цих значень або виснаження ЄСНЕ формуються відповідні імпульси на керовані ключі VT3, VT4 і подальше живлення електродвигуна здійснюється від контактної мережі. При цьому керовані ключі VT3, VT 4 знаходяться у відкритому положенні, що унеможливує подальше живлення ЄСНЕ від контактної мережі під час руху поїзда в режимі тяги. Система ECU здійснює керування енергетичними процесами для наведеного способу за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення та руху в режимі тяги згідно алгоритмів, які наведено на рис. 8, 9.

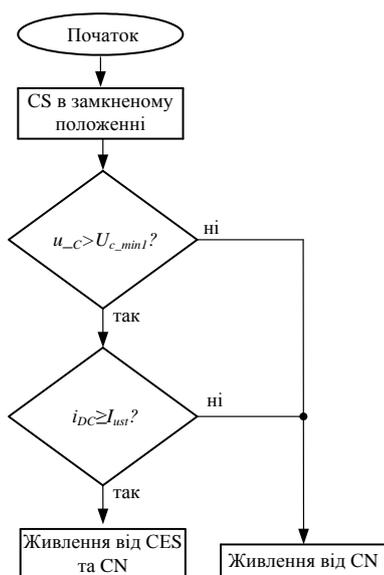


Рис. 8. Алгоритм способу керування енергетичними процесами з обмеженням струму споживання з CN

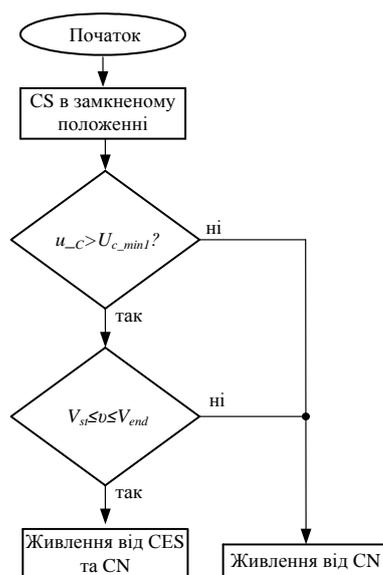


Рис. 9. Алгоритм способу керування енергетичними процесами за досягнення заданих значень швидкостей руху

Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЕ, а також в колі постійного струму, залежно від швидкості руху за такого способу керування наведено на рис. 10.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

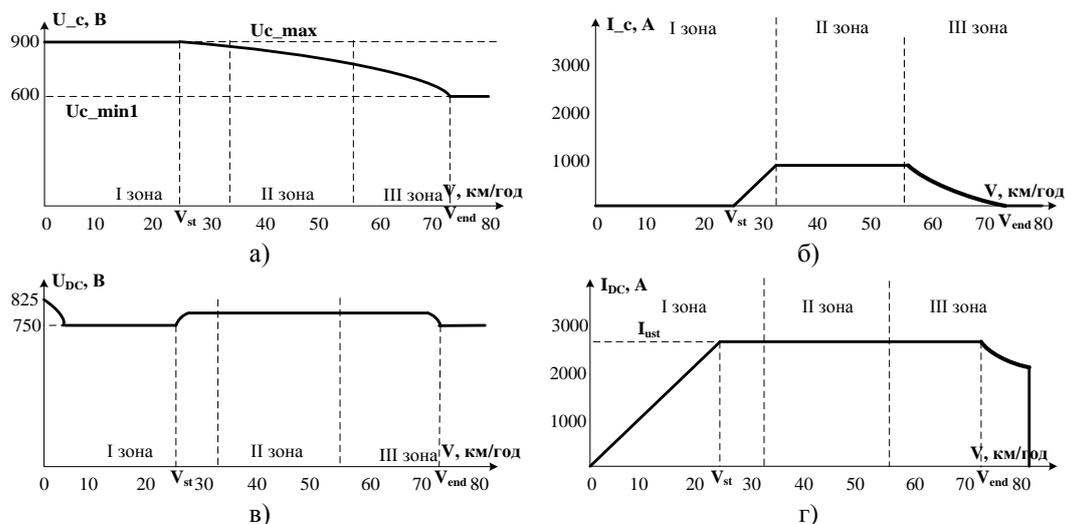


Рис. 10. Ідеалізовані осцилограми за другого способу керування енергетичними процесами:

напруги (а) та струму (б) в колі ЄСНЕ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Переваги способу: проста реалізація способу керування; можливість зменшення встановленої потужності силового обладнання системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену; зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням енергії до контактної мережі; підвищення рівня та стабільності напруги в контактній мережі, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні. Недоліки способу: низька імовірність застосування живлення від ЄСНЕ внаслідок залежності використання накопиченої енергії рекуперативного гальмування від інтенсивності розгону; залежність ефективності керування енергетичними процесів від заданої сили тяги (інтенсивності розгону), профілю колії та обраних граничних значень швидкості або струму, а також обраної енергоємності ЄСНЕ, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень.

Режим тяги. Третій спосіб. Сумісне живлення від контактної мережі та ЄСНЕ за умови досягнення розрахованого значення струму споживання та швидкості руху та можливість відстеження аварійного режиму в системі тягового енергозабезпечення метрополітену за будь-якого режиму ведення рухомого складу. Цей спосіб керування за обмеження споживання електроенергії з контактної мережі відрізняється від попереднього тим, що система керування розраховує струм обмеження на підставі даних заданої сили тяги, завантаженості поїзда та поточного значення кількості накопиченої енергії. Головною відмінністю є те, що сумісне живлення електродвигуна відбувається за досягнення розрахованого значення струму I_{rozr} , а не встановлених значень швидкостей V_{st}, V_{end} або струму I_{ust} . Таким чином, цей спосіб гарантує використання накопиченої енергії в ЄСНЕ за аналізом вхідних даних. Алгоритм керування енергетичними процесами за умов використання цього способу наведено на рис. 11.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

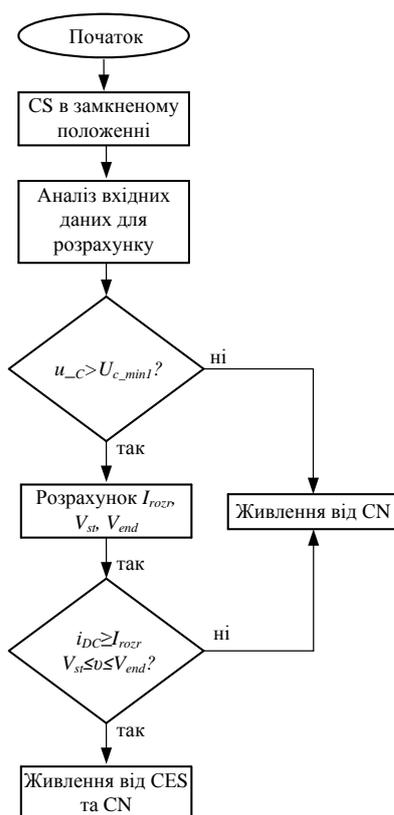


Рис. 11. Алгоритм способу керування енергетичними процесами за досягнення розрахованих значень струму та швидкостей руху

При цьому ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЕ, а також в колі постійного струму, подібні до попередніх, що зображені на рис. 10.

Переваги способу: можливість зменшення встановленої потужності силового обладнання системи енергозабезпечення поїзда; мінімізація витрат на транспортування енергії до контактної мережі; підвищення пропускної здатності на перегоні, гарантоване використання накопиченої енергії. Недоліки способу: складність побудови системи керування для реалізації способу.

Таким чином, за штатної роботи системи енергозабезпечення метрополітену в тяговому режимі руху поїзда запропоновано три різні способи керування енергетичними процесами з зазначенням переваг і недоліків кожного та наведено спрощені алгоритми їх роботи залежно від фактичних значень вимірних показників в колах постійного струму та ЄСНЕ.

Режим вибігу. За штатної роботи системи енергозабезпечення та під час руху поїзда в режимі вибігу струмоприймач з'єднаний з контактною мережею CN і рухомий склад метрополітену отримує від неї електроенергію. У цьому випадку ECU подає сигнали на керовані ключі, за яких керований комутатор CS контактної мережі має знаходитись в положенні замкнення, керовані ключі силового перетворювача DC_DC мають бути розімкнені, керовані ключі силового перетворювача ТІ – розімкнені. Таким чином, електродвигун АМ від'єднаний від конденсаторного накопичувача CES та контактної мережі CN.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Рекуперативне гальмування. За штатної роботи системи енергозабезпечення метрополітену та під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування електродвигун АМ працює в режимі генератора і за командами від ECU може живити коло з CES, споживачів контактної мережі CN або перетворювати електричну енергію у теплову за допомогою BR.

Під час постановки контролера машиніста в режим рекуперативного гальмування ключі силового перетворювача DC_DC працюють в замкнуто-розімкнутому стані (режим широтно-імпульсної модуляції), керований ключ VT1 розімкнений, керований ключ VT2 розпочинає працювати в режимі широтно-імпульсної модуляції.

На початковому етапі заряджання CES, коли швидкість руху поїзда значна, амплітудне значення струму заряду має максимальне значення та мінімальний час дії. По мірі заряду CES блок керування направляє керуючі імпульси на VT2, за якими амплітудне значення струму зменшується, однак тривалість дії імпульсів заряду збільшується (рис. 12).

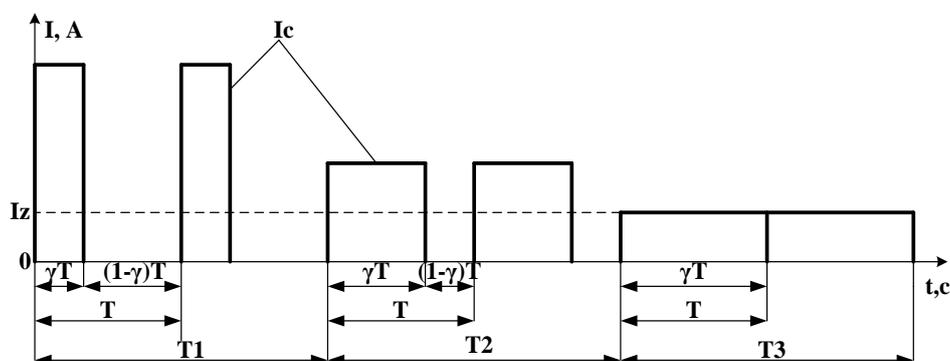


Рис. 12. Діаграма регулювання струму на ЄСНЕ:

I_c – амплітудне значення струму в колі ЄСНЕ; I_z – середнє значення зарядного струму в колі ЄСНЕ; γT – тривалість відкритого стану ключа VT2; $(1-\gamma)T$ – тривалість закритого стану ключа VT2; T – цикл роботи ключа VT2; T_1 , T_2 , T_3 – цикл роботи ключа VT2, за якого тривалість відкритого та закритого станів стану ключа VT2 не змінюється

Таким чином, здійснюють заряджання CES шляхом підтримання постійного струму заряду у колі ЄСНЕ ($I_z = \text{const}$).

За умови зарядження конденсаторного накопичувача CES до повної енергоємності та за закритого стану ключа VT2 блок керування ECU здійснює перевірку наявності інших споживачів електроенергії в CN шляхом порівняння заданої напруги, введеної через блок ІВ та виміряної напруги за допомогою датчика напруги SV1. Якщо значення напруги CN менше заданого, що відповідає значенню напруги холостого ходу тягової підстанції (контактної мережі), блок керування ECU подає сигнал на розмикання керованого ключа VT2 силового перетворювача DC_DC. При цьому керовані ключі силового перетворювача ПІ залишаються працювати в замкнуто-розімкнутому стані (режим широтно-імпульсної модуляції) за командами від системи керування вищого рівня TCS.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За відсутності споживачів електроенергії в контактній мережі та зарядження конденсаторного накопичувача CES до повної енергоємності блок керування ECU подає сигнал на замикання керованого ключа VT1 в колі гальмівного резистора, при цьому ключі силового перетворювача ТІ залишаються працювати в замкнуто-розімкнутому стані (режим широтно-імпульсної модуляції) за командами від системи керування вищого рівня TCS. Блок керування ECU контролює процес перетворення надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування в теплову енергію шляхом замикання-розмикання керованого ключа VT1. Надлишкова електроенергія, що генерується електродвигуном АМ, перетворюється у теплову енергію на BR. Функціонально блок керування ECU дозволяє частково генерувати електроенергію рекуперативного гальмування до CN, а іншу частину перетворювати у теплову енергію на BR.

Алгоритм керування енергетичними процесами за режиму рекуперативного гальмування у спрощеному вигляді наведено на рис. 13. Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ЄСНЄ, а також в колі постійного струму, залежно від швидкості руху за режиму рекуперативного гальмування наведено на рис. 14.

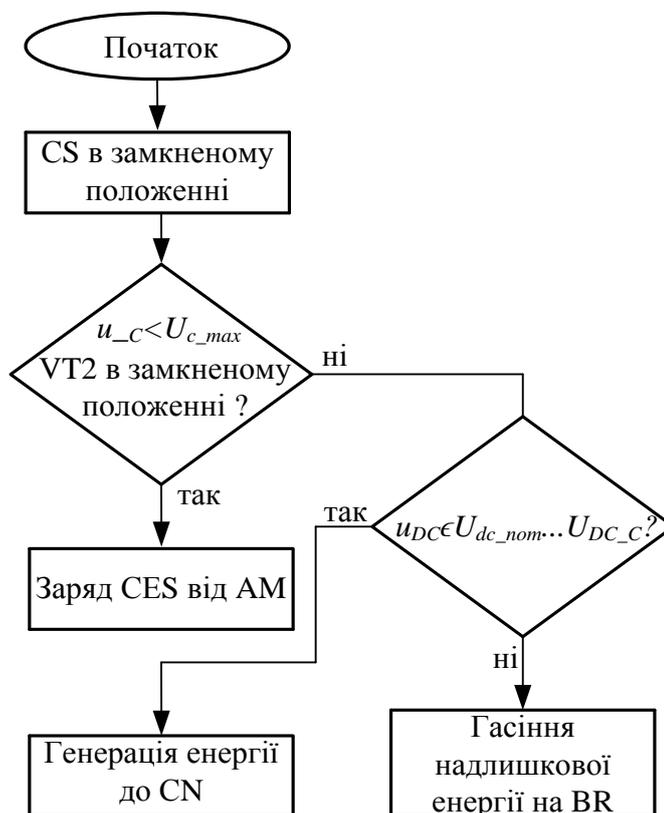
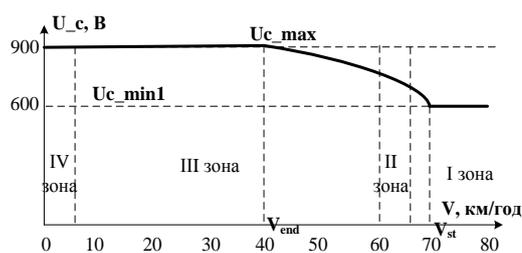
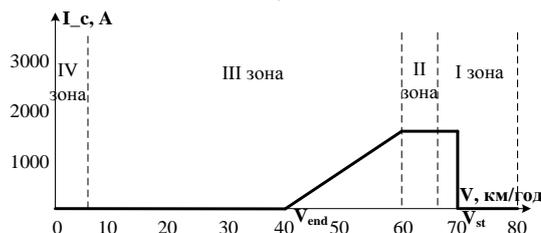


Рис. 13. Алгоритм способу керування енергетичними процесами під час режиму рекуперативного гальмування

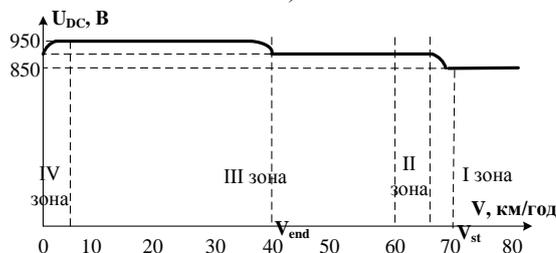
РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



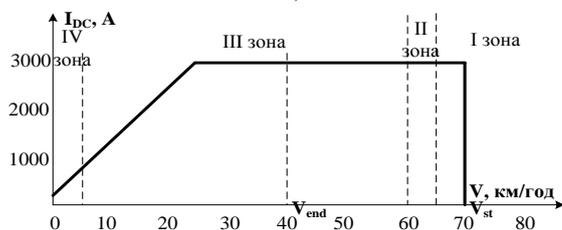
а)



б)



в)



г)

Рис. 14. Ідеалізовані осцилограми під час руху поїзда метрополітену в режимі рекуперативного гальмування: напруги (а) та струму (б) в колі ССНЕ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Аварійна робота системи енергозабезпечення.

Якщо відбулось зниження напруги в контактній мережі CN нижче заданого значення $U_{DC.min}$ або у разі аварійного відключення живлення датчика струму SC1 та напруги SV1 направляють відповідні сигнали на входи до ECU, який у свою чергу, формує команду на розмикання керованого комутатора CS. В результаті чого накопичена енергія в CES не має технічної можливості живити споживачів в контактній

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

мережі. Далі за командою машиніста щодо руху в режимі тяги ECU направляє сигнал на роботу керованих ключів в режимі широтно-імпульсної модуляції, після чого живлення електродвигуна АМ здійснюється від СЕС.

Силовий перетворювач DC_DC та силовий перетворювач ІМ забезпечують живлення електродвигуна АМ до досягнення мінімально допустимої величини напруги U_{c_min2} на конденсаторному накопичувачі СЕС (до величини «мертвого об'єму»). При цьому датчик напруги SV1 постійно контролює напругу контактної мережі CN. У разі підвищення напруги в CN до значення, що перевищує $U_{DC.min}$, ECU подає команду на замикання контакту CS і подальше живлення електродвигуна АМ здійснюється від контактної мережі CN з одночасним зарядженням конденсаторного накопичувача СЕС до мінімального значення робочої напруги U_{c_min1} .

Під час експлуатації поїзда ECU здійснює постійний моніторинг температури накопичувача СЕС та навколишнього середовища за допомогою датчиків температури ST1 та ST2. У разі, якщо різниця температур накопичувача θ_c та навколишнього середовища θ_T перевищує максимальне значення $\Delta\theta_{max}$, завдане в блоці ІВ, блок керування ECU подає команду на розмикання керованих ключів силового перетворювача DC_DC, внаслідок чого коло з СЕС відключається від системи енергозабезпечення незалежно від режиму руху поїзда.

На рис. 15 зображено характеристики поїзда метрополітену для заданих умов виникнення аварійної роботи системи енергозабезпечення. Задані умови виникнення прийнято такі: аварійна ситуація відбулась на перегоні довжиною 960 м під час руху поїзда в режимі тяги за швидкості руху 60 км/год, ССНЕ розряджена до мінімального значення робочого значення U_{c_min1} , живлення поїзда від ССНЕ відбувалось за швидкості руху 50 км/год до повної зупинки на станції.

Ідеалізовані осцилограми струму та напруги в колі ССНЕ, а також в колі постійного струму, залежно від пройденого шляху для зазначених умов виникнення аварійного режиму живлення поїзда метрополітену, наведено на рис. 16. Слід зазначити, що ідеалізовані осцилограми за штатного режиму живлення поїзда під час руху в режимі тяги побудовано для першого способу з пріоритетом живлення від ССНЕ.

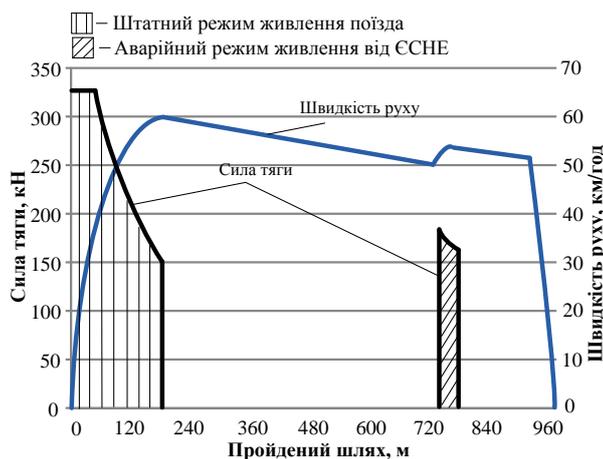


Рис. 15. Характеристики поїзда метрополітену за умов виникнення аварійної ситуації в системі енергозабезпечення

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

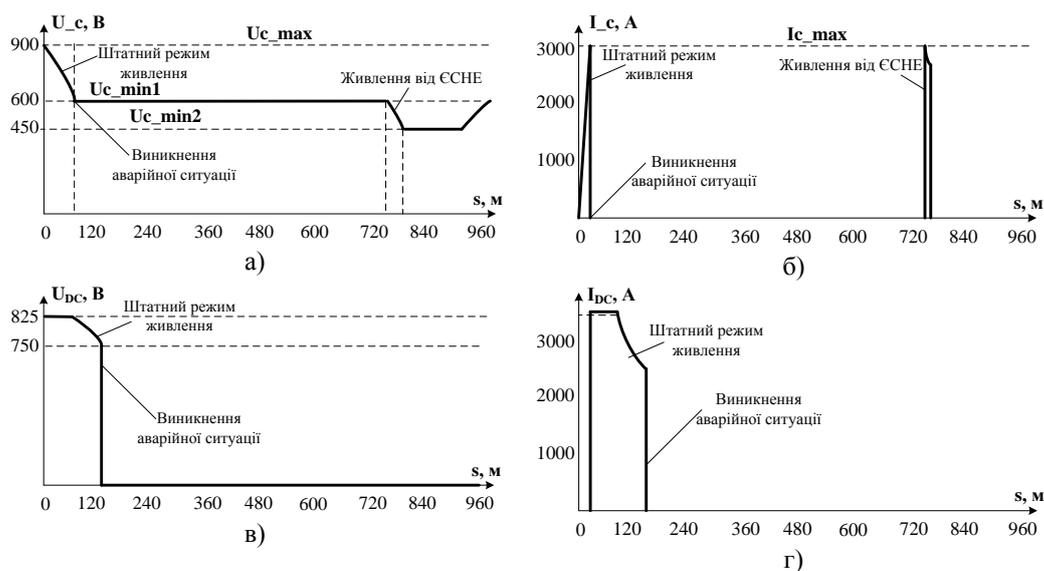


Рис. 16. Ідеалізовані осцилограми під час руху поїзда на перегоні за виникнення аварійної ситуації в системі енергозабезпечення: напруги (а) та струму (б) в колі ЄСНЕ; напруги (в) та струму (г) в колі постійного струму

Отже, для кожного із запропонованих способів передбачено двохзонне регулювання за рівнем напруги в ЄСНЕ (рис. 17). Діапазон зміни напруг за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення $[U_{c_min1} \dots U_{c_max}]$; за аварійного режиму роботи – $[U_{c_min2} \dots U_{c_max}]$.

Загальний алгоритм керування енергетичними процесами у спрощеному вигляді для розроблених способів під час руху поїзда метрополітену з ЄСНЕ в режимах тяги, вибігу, рекуперативного гальмування за штатної або аварійної роботи системи енергозабезпечення наведено на рис. 18.



Рис. 17. Характеристики ЄСНЕ за двохзонного регулювання за рівнем напруги

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

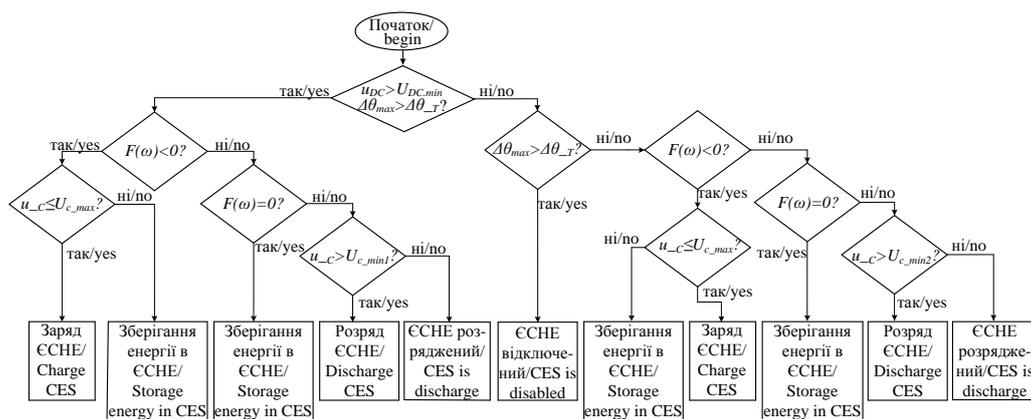


Рис. 18. Алгоритм керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ

Таким чином, розроблено способи та запропоновано нову концепцію керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ, які передбачають можливість живлення поїзда метрополітену, як за штатного режиму роботи системи енергозабезпечення, так і аварійного.

Висновки.

1. Описано блок-схему системи керування енергетичними процесами на рухомому складі з асинхронним приводом та ЄСНЕ, яка дозволяє реалізувати різні способи керування цими процесами за штатної роботи системи енергозабезпечення, а також здатна відслідковувати виникнення аварійних режимів та керувати процесами обміну енергією між контактною мережею, ЄСНЕ та силовим обладнанням поїзда в цих режимах.

2. Розроблено три різні способи та алгоритми керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену в режимі тяги за штатної роботи системи енергозабезпечення та сформульовано переваги і недоліки кожного із запропонованих способів, що у подальшому за результатами проведення окремих досліджень дозволить визначити найбільш перспективний.

3. Вперше запропоновано нову концепцію керування енергетичними процесами на рухомому складі метрополітену з ЄСНЕ, яка передбачає можливість використання накопиченої енергії в ЄСНЕ як за штатної роботи системи енергозабезпечення, так і аварійної, внаслідок виокремлення двох зон регулювання, що в цілому дозволить підвищити безпеку руху та ефективність пасажирських перевезень в метрополітені.

4. Дістали подальшого розвитку дослідження з впровадження на рухомому складі метрополітену конденсаторних накопичувачів в частині розроблення способів та алгоритмів керування енергетичними процесами між контактною мережею, силовим електричним обладнанням рухомого складу та ЄСНЕ.

5. Розроблено алгоритм керування енергетичними процесами під час руху поїзда метрополітену з ЄСНЕ в режимі тяги, вибігу, рекуперативного гальмування за штатної та аварійної роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

6. Побудовано ідеалізовані осцилограми на прикладі характеристик поїзда метрополітену, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01, що дозволило визначити закономірності енергетичних процесів в колах постійного стру-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

му та ЄСНЕ залежно від застосованого способу керування та режиму ведення поїзда.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці імітаційної моделі для дослідження енергетичних процесів на рухомому складі з асинхронним приводом та ЄСНЕ як за штатних, так і аварійних режимів роботи системи енергозабезпечення метрополітену, з метою оцінки ефективності кожного із розроблених способів та їх алгоритмів керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богомазова В.М., Кваша Т.К. Аналіз перспективних світових наукових та технологічних напрямів досліджень за ціллю сталого розвитку № 9 щодо транспортної сфери з використанням інструментів платформ «Web of Scince» та «Derwent Innovation»: науково-аналітична записка. К.: УкрІНТЕІ, 2020. 33 с.
2. Сулим А.О., Мужичук С.О., Хозя П.О., Павленко Ю.С., Єжов Ю.В. Сучасний стан та перспективи розвитку парку рухомого складу метрополітену. Залізничний транспорт України. 2019. № 3. С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-14-20>
3. 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. P. 2831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
4. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену. Восточно-Европейський журнал передових технологій. 2014. Вип. 8 (72) /том 6/. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>
5. A. L. Allegre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, and S. El-Fassi. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. Vol. 57. No. 12, P. 4001–4012.
6. Mensah-Darkwa K., Zequine C., Kahol P. K., Gupta R. K. Supercapacitor energy storage device using biowastes: a sustainable approach to Green energy. Sustainability. 2019. Vol. 11 (2). Iss. 414. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414>
7. Ciccarella 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. P. 36–49.
8. Chaviha N., Campillo J., Bohlin M., Dahlquist E. Review of application of energy storage devices in railway transportation. Energy Procedia. 2017. № 105. P. 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
9. Iannuzzi D., Tricoli P. Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors. IEEE Trans. Power Electron. 2012. № 27 (3-4). P. 2129–2140.
10. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Iss. 3 (102). P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
11. 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. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818>
12. Афанасов А.М., Арпуль С.В., Демчук Р.Н. Пусковые режимы автономного электропоезда с бортовым накопителем энергии. Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2016. № 11. С.18–23.
13. Sulym A., Lomonos A., Bialobrzheskyi O., Safronov O., Khozia P. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 3. P.59–66. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>
14. Sulym A., Khozia P. Analysis of management strategies for energy exchange processes in electric rolling stock with on board capacitive energy storages. Conference proceedings 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology. 13-17 September, № 9569992. 2021. Kharkiv, Ukraine. P. 109-114. DOI: <http://doi.org/10.1109/KhPIWeek.53812.2021.9569992>
15. Рябов Е.С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. Вісник Національного тех-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

нічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 6 (1115). С. 132–137.

16. Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electr. Syst. Transp.* 2014. Vol. 4. Iss. 1. P. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2013.0031>

17. Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational problems of electrical engineering*. Vol. 4. No 1. P. 44–52.

18. Riabov I., Goolak S., Neduzha L. Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*. 2024. No. 6 (2). P. 611–631. DOI: <http://doi.org/10.3390/vehicles6020028>

19. Рябов Є.С., Кондратьєва Л.Ю., Овер'янова А.В., Єрціян Б.Х., Гулак С.О. Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 2 (98). С. 26–44. DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2022/267984>

20. Северин В.П., Оверьянова Л.В., Омеляненко О.В. Управление потоком мощности в тяговом приводе электропоезда при питании от контактной сети и инерционных накопителей энергии. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 58 (1167). С. 29–32.

21. Деклараційний патент на корисну модель 115031 U, Україна, Н02Р 21/10, В60L 7/10. Пристрій керування тяговим електротехнічним комплексом електровоза з мінімізацією втрат у контактній мережі / Бялобржеський О.В., Слободенюк Ю.О., Смірнова Т.О.; № у 2016 11535; заявка 14.11.2016; опубл. 27.03.2017. Бюл. 6. 7 с.

22. Деклараційний патент на корисну модель 155392U, Україна, В60L9/10, Н02J15/00. Пристрій для керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з конденсаторним накопичувачем / Сулим А.О., Хозя П.О. (Україна); власник(и): ДП «УкрНДІВ». № у 2023 04635; заявка 02.10.2023; опубл. 21.02.2024. Бюл. 8. 11 с.

23. Волков В.А. Оптимизация энергопотребления троллейбуса с тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2019. № 1 (45). С. 8–24. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.8-24>

24. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with on board energy storage. *International journal of renewable energy research*. Vol. 9. No. 2. P. 848–858.

25. Деклараційний патент на корисну модель 103507 U, Україна, Н02Р 21/00, В60L 7/10. Спосіб керування тяговим електротехнічним накопичувально-компенсуючим пристроєм в схемі перетворювача частоти з ланкою постійного струму / Бялобржеський О.В., Миколаєнко Ю.О., Слободенюк Д.В., Боркунов В.С.; № у 2015 03858; заявка 23.04.2015; опубл. 25.12.2015. Бюл. 24. 8 с.

26. Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О. Застосування бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля*. 2020. № 4(260). С. 87–92. DOI: <http://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92>

27. Сулим А.О., Мельник О.О. Формування концептуальних вимог до системи керування енергообмінними процесами на поїзді метрополітену з ємнісними накопичувачами енергії. *Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». Рейковий рухомий склад*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ». 2022. Вип. 24. С. 7–20. DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-24-7-20>

28. Sulym A.O., Khozia P.O., Fomin O.V., Bahrov O.M. Management of Energy Exchange Process on Metro Rolling Stock with On-Board Capacitive Energy Storage. *Problemele energeticii regionale*. 2025. № 1 (65). P. 49–62. DOI: <http://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.04>

A.O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,

33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

Tel.: (05366) 6-03-54, E-mail: sulim1.ua@gmail.com

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

A.I. Lomonos

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University,

20 Universytetska St., Kremenchuk, 39600, Ukraine

Tel.: (066) 796-70-94, E-mail: lomonosai@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5001-1280>

METHODS OF MANAGING ENERGY PROCESSES ON METRO ROLLING STOCK WITH ASYNCHRONOUS DRIVE AND CAPACITIVE ENERGY STORAGE SYSTEMS

The article deals with the further development of the newly constructed and deeply modernised metro railway vehicles by introducing capacitive energy storage systems. It has been demonstrated that in the context of the introduction of on-board capacitive energy storage on metro rolling stock, the synthesis of methods for managing energy flows between the contact network, power traction and braking equipment, and capacitive energy storage remains an insufficiently studied issue.

The paper is aimed at developing methods and algorithms for managing energy processes on metro railway vehicles with capacitive energy storage systems, with the possibility of taking into account the operation of the metro power supply system in both normal and emergency modes.

The flowchart configuration of the energy process control system capable of monitoring the occurrence of emergency modes in the metro traction power supply system is described. Three different methods and algorithms for managing energy processes during the movement of a metro train in the traction mode under the normal operation of the power supply system have been developed. A new concept of managing energy processes in the metro rolling stock is proposed, which provides for the possibility of powering the train traction equipment from capacitive energy storage systems in the event of a power failure in the contact network due to the use of two control zones. Idealised oscillograms of energy processes in the contact network and power circuits are constructed for the developed control methods depending on the modes of train operation and the operation of the energy supply system on the example of the specified characteristics of rolling stock and capacitive energy storage systems.

An algorithm for managing energy processes during the movement of a metro train with capacitive energy storage systems in the mode of traction, run-up, regenerative braking during normal and emergency operation of the metro power supply system is proposed. The need to focus further efforts on studying the efficiency of each of the developed control methods and algorithms in order to establish the most promising one is outlined.

Keywords: energy processes, capacitive energy storage systems, metro, train, railway vehicles, energy supply system, control system.

REFERENCES

1. Bohomazova, V.M., & Kvasha, T.K. (2020). *Analiz perspektyvnykh svitovykh naukovykh ta tekhnologichnykh napriamiv doslidzhen za tsilliu staloho rozvytku № 9 shchodo transportnoi sfery z vykorystanniam instrumentiv platform [Analysis of promising world scientific and technological research areas for sustainable development goal No. 9 in the transport sector using the tools of the Web of Science and Derwent Innovation platforms: a scientific and analytical note]*. Kyiv: UkrINTEI [in Ukrainian]
2. Sulym, A.O., Muzhychuk, S.O., Khozia, P.O., Pavlenko, Y.S., & Yezhov, Y.V. (2019). *Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku rukhomoho skladu metropolitenu [Current state and prospects for the*

- development of the metro rolling stock fleet]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 3, 14-20. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-14-20> [in Ukrainian]
3. Khodaparastan, M., Mohamed Ahmad A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 8. Vol. 20, P. 2831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
4. Sablin, O.I. (2014). Doslidzhennia efektyvnosti protsesu rekuperatsii elektroenerhii v umovakh metropolitenu [Investigation of the efficiency of the process of electrical energy recovery in the conditions of the metro]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii - East European Journal of Advanced Technologies*, 8 (72), 9-13 (Vol. 6). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483> [in Ukrainian]
5. Allegre, A.L., Bouscayrol, A., Delarue, P., Barrade, P., Chattot, E., & El-Fassi, S. (2010). Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 12, 4001–4012 Vol. 57.
6. Mensah-Darkwa, K., Zequine, C., Kahol, P.K., & Gupta, R.K. (2019). Supercapacitor energy storage device using biowastes: a sustainable approach to Green energy. *Sustainability*, 414, 1–22 Vol. 11 (2). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414>
7. Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2012). Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 36–49.
8. Chaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2017). Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Energy Procedia*, 105, 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
9. Iannuzzi D., & Tricoli P. (2012). Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors. *IEEE Trans. Power Electron*, 27 (3-4), 2129–2140.
10. Sulym, A., Fomin, O., Khozia, P., Palant, O., & Stamatina, V. (2019). Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (102), 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
11. Mezitis, M., Panchenko, V., Yatsko, S., Vashchenko, Ya., Sidorenko, A., & Sansyzbajeva, Z. (2021). 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*, 2, Vol. 9, 71–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818>
12. Afanasov, A.M., Arpul, S.V., & Demchuk, R.N. (2016). Puskovye rezhimy avtonomnogo elektropoezda s bortovym nakopitelem energii [Starting modes of an autonomous electric train with an onboard energy storage]. *Elektromahnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti - Electromagnetic compatibility and safety in railway transport*, 11, 18–23
13. Sulym, A., Lomonos, A., Bialobrzeskiy, O., Safronov, O. & Khozia, P. (2020). Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 59–66. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>
14. Sulym, A., & Khozia P. (2021). Analysis of management strategies for energy exchange processes in electric rolling stock with on board capacitive energy storages. *Conference proceedings 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology. 13-17 September, No. 9569992*. 109-114. Kharkiv, Ukraine. DOI: <http://doi.org/10.1109/KhPIWeek.53812.2021.9569992>
15. Ryabov, Ye.S. (2015). Opredelenie parametrov nakopitelya energii dlya elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnim tyagovym privodom v rezhime ogranicheniya toka tyagovoi seti [Determination of energy storage device parameters for electric rolling stock with asynchronous traction drive in the mode of traction network current limitation]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» - Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 6 (1115), 132–137 Kharkiv: NTU «KhPI»
16. Ratniyomchai, T., Hillmanssen, S., & Tricoli, P. (2014). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electr. Syst. Transp.*, 1, 9–20 Vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2013.0031>
17. Yatsko, S., Vashchenko, Ya., & Sidorenko, A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational problems of electrical engineering*, 1, 44–52. Vol. 4.
18. Riabov, I., Goolak, S., & Neduzha, L. (2024). Estimation of the Energy Savings of a Mainline Diesel Locomotive Equipped with an Energy Storage Device. *Vehicles*, 6 (2), 611–631. DOI: <http://doi.org/10.3390/vehicles6020028>
19. Riabov, Ye.S., Kondratieva, L.Iu., Overianova, A.V., Yeritsian, B.Kh., & Hulak, S.O. (2022). Obhruntuvannia struktury tiahovoho elektropryvoda elektrovoza dlia zaliznychnoho kariernoho transportu [Substantiation of the structure of the traction electric drive of an electric locomotive for quarry rail haulage].

Nauka ta prohres transport - Science and progress of transport, 2 (98), 26–44
DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2022/267984> [in Ukrainian]

20. Severin, V.P., Overyanova, L.V., & Omelyanenko, O.V. (2015). Upravlenie potokom moshchnosti v tyagovom privode elektropoezda pri pitanii ot kontaktnoi seti i inertsionnikh nakopitelei energii [Control of power flow in the traction drive of an electric train when powered by the contact network and inertial energy storage]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» - Bulletin of the National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Kharkiv: NTU KHPI*, 58 (1167), 29–32

21. Bialobrzheskyi, O.V., Slobodeniuk, Yu.O., & Smirnova, T.O. (2016). Deklaratsiyni patent na korysnu model 115031 U Ukraina, H02P 21/10, B60L 7/10. Prystroi keruvannia tiahovym elektrotekhnichnym kompleksom elektrovoza z minimizatsiieiu vrat u kontaktnii merezhi [Declaration patent for utility model 115031 U. Ukraine, H02P 21/10, B60L 7/10. Device for controlling the traction electrical complex of an electric locomotive with minimisation of losses in the contact network][in Ukrainian]

22. Sulym, A.O., & Khozia, P.O. (2023). Deklaratsiyni patent na korysnu model 155392 U, Ukraina, B60L 9/10, H02J 15/00. Prystroi dlia keruvannia enerhetychnymy protsesamy na elektrorukhomomu skladi z kondensatornym nakopychuvachem [Declaration patent for utility model 155392 U, Ukraine, B60L 9/10, H02J 15/00. Device for controlling energy processes on electric rolling stock with a capacitor storage] [in Ukrainian]

23. Volkov, V.A. (2019). Optimizatsiya energopotrebleniya trolleibusa s tyagovym chastotno-reguliruemim asin-khronnim dvigatelem i superkondensatornim nakopitelem generiruemoi energii [Optimisation of power consumption of trolleybus with traction frequency-controlled asynchronous motor and supercapacitor accumulator of generated energy]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy - Electromechanical and energy-saving systems*, 1 (45), 8–24. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.8-24> [in Ukrainian]

24. Yatsko, S., Sidorenko, A., Vashchenko, Ya., Lyubarskyi, B., & Yeritsyan, B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with on board energy storage. *International journal of renewable energy research*, 2, 848–858, Vol. 9.

25. Bialobrzheskyi, O.V., Mykolaienko, Yu.O., Slobodeniuk, D.V., & Borkunov, V.S. (2015). Deklaratsiyni patent na korysnu model 103507 U, Ukraina, H02P 21/00, B60L 7/10. Sposib keruvannia tiahovym elektrotekhnichnym nakopychualno-kompensuiuchym prystroiem v skhemi peretvoriuvacha chastoty z lankoiu postoinoho strumu [Declaration patent for utility model 103507 U, Ukraine, H02P 21/00, B60L 7/10. Method for controlling a traction electrical storage and compensation device in a frequency converter circuit with a DC link]. № u 2015 03858 [in Ukrainian]

26. Sulym, A.O., Khozia, P.O., & Melnyk, O.O. (2020). Zastosuvannia bortovykh yemnisnykh nakopychuvachiv neznachnoi potuzhnosti ta enerhoiemnosti na rukhomomu skladi metropolitenu [Use of on-board capacitive storage devices of low power and energy intensity in metro rolling stock]. *Visnyk Skhidnoukr. natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia - Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 4(260), 87–92. DOI: <http://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92> [in Ukrainian]

27. Sulym, A.O., & Melnyk, O.O. (2022). Formuvannia kontseptualnykh vymoh do systemy keruvannia enerhoobminnymy protsesamy na poizdi metropolitenu z yemnisnymy nakopychuvachamy enerhii [Formation of conceptual requirements for the control system of energy exchange processes on a metro train with capacitive energy storage]. *Zbirnyk naukovykh prats SE «UkrNDIV» «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific papers of SE «UkrNDIV» Railbound rolling stock*, 24, 7 –20. Kremenchuk: SE «UkrNDIV». DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-24-7-20> [in Ukrainian]

28. Sulym, A.O., Khozia, P.O., Fomin, O.V., Bahrov, O.M. (2025). Management of Energy Exchange Process on Metro Rolling Stock with On-Board Capacitive Energy Storage. *Problemele energeticii regionale*, 1 (65), 49–62. DOI: <http://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.04>.