

¹Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

²Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

* Автор, відповідальний за листування: pavlo.khozia@gmail.com

КОНЦЕПЦІЇ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА ЕЛЕКТРОРУХОМОМУ СКЛАДІ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

В статті розглянуто основні існуючі концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Під час розгляду концепцій прийнято, що бортовий ємнісний накопичувач енергії має незначну потужність та енергоємність. Тому цей накопичувач не здатний прийняти повний об'єм енергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу. Мета – розглянути та проаналізувати концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії; сформулювати переваги і недоліки кожної із існуючих концепцій для здійснення керування енергетичними процесами на електрорухомому складі. Представлено блок-схему електрорухомого складу з бортовим ємнісним накопичувачем енергії, яку використано для аналізу концепції керування енергетичними процесами. Описано режими роботи електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Визначено п'ять основних концепцій керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Сформульовано переваги і недоліки кожної концепції з урахуванням заданих умов (характеристик електрорухомого складу, умов руху складу, осцилограм тощо). Встановлено загальні переваги і недоліки кожної із розглянутих концепцій, що дозволило сформулювати принципово нову адаптивну концепцію керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Основна ідея сформульованої концепції керування полягає у здійсненні ефективного енергообміну між тяговим обладнанням, бортовим ємнісним накопичувачем енергії, контактною мережею, як в штатних, так і аварійних режимах роботи системи тягового енергозабезпечення, за умов врахування динаміки енергетичних процесів в контактній мережі, що в цілому дозволить підвищити безпеку та енергоефективність перевізного процесу. Отримані результати досліджень сприятимуть розробці та впровадженню ефективних концепцій керування енергетичними процесами на електрорухомому складі.

Ключові слова: бортовий ємнісний накопичувач енергії, електрорухомий склад, керування, концепція, енергетичні процеси.

Вступ та постановка проблеми. На разі особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на подолання енергетичної кризи, викликані викидами вуглеводневого палива, забрудненням навколишнього середовища та глобальним потеплінням. Саме з цієї причини активно проводиться низка досліджень щодо джерел відновлювальної енергії, таких як енергія вітру, сонця, фотоелектричних джерел тощо. Перевага цих типів джерел полягає в тому, що вони не використовують корисні копалини як джерело енергії та не виділяють парниковий газ [1–4]. Інші напрямки цих досліджень, направлені на подолання енергетичної кризи, полягають у зниженні енергоспоживання і стосуються, головним чином, способів підвищення енергоефективності

використання енергії [5–12]. Як один із способів підвищення енергоефективності розглядаються застосування різних пристроїв акумулювання енергії, а дослідження їх прикладного значення проводяться у широкому діапазоні енергосистем [6, 9, 10]. Саме підвищення енергоефективності на електрорухомому складі за рахунок використання пристроїв акумулювання енергії або накопичувачів енергії запропоновано розглянути у цій роботі.

Аналіз останніх досліджень. Останні розробки пристроїв акумулювання енергії зробили накопичення енергії реалістичною технологією, яку можливо застосовувати на залізничному транспорті, в тому числі на електрорухомому складі. Існує багато пристроїв акумулювання енергії, які розроблено та використовуються у енергосистемах на залізничному транспорті, зокрема на електрорухомому складі. Ці пристрої являють собою електрохімічні (акумуляторні батареї), електромеханічні або механічні (електродвигуни, маховики), ємнісні (електричні двошарові конденсатори), індуктивні (котушки) та гібридні накопичувачі енергії, які представляють собою комбінацію технологій накопичення енергії. Впровадження пристроїв накопичення енергії в енергосистеми на залізничному транспорті сприяють підвищенню ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування його транспортних засобів. Дослідженнями щодо функціонування накопичувачів енергії в енергосистемах залізничного транспорту, зокрема на електрорухомому складі, присвячено чимало робіт як вітчизняних, так і закордонних вчених.

Серед основних слід виділити роботи Дибріна С.В., Костіна М.О., Любарського Б.Г., Шевлюгіна М.В., Черемісіна В.Т., Khodaparastan M., Lee H., Ratniyom-chai T., Tricoli P., Wiczorek M. [5–12]. В представлених роботах достатньо повно розглянуто і проаналізовано питання можливих місць розміщення накопичувачів енергії в системах енергозабезпечення залізничного транспорту та вибору раціонального типу накопичувача для цих систем. За результатами аналізу цих досліджень встановлено, що найбільш раціональним є використання бортових накопичувачів енергії ємнісного типу. При цьому одним з актуальних та недостатньо вивчених питань у цьому напрямку, яке потребує детальних досліджень, залишається розробка ефективних систем керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з ємнісними накопичувачами енергії. В цій роботі для досягнення поставленої мети щодо розробки ефективної системи керування запропоновано проаналізувати вже існуючі та реалізовані технічні рішення.

Мета – виконати порівняльний аналіз концепцій керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з ємнісними накопичувачами енергії.

Матеріал та результати досліджень. В цій роботі перед аналізом існуючих концепцій керування енергетичними процесами спочатку запропоновано розглянути блок-схему електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії, а також основні режими роботи як бортових ємнісних накопичувачів енергії, так і електрорухомого складу з цими накопичувачами.

Блок-схему електрорухомого складу з бортовим ємнісним накопичувачем енергії, яку використано для аналізу існуючих концепцій керування енергетичними процесами, зображено на рис. 1.

На зазначеній блок-схемі (рис. 1) прийнято такі позначення: 1 – струмоприймач; 2 – датчик напруги контактної мережі; 3 – керований комутатор контактної мережі; 4 – блок перетворення електроенергії; 5 – тяговий електродвигун; 6 – датчик струму тягового електродвигуна; 7 – датчик напруги електродвигуна; 8 – реверсивний перетворювач; 9 – бортовий ємнісний накопичувач; 10 – датчик струму накопичувача; 11 – датчик напруги накопичувача; 12 – блок керування; 13 – гальмівний резистор; 14 – керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора; 15 – контактна мережа; 16 – приводні колеса електрорухомого складу; 17 – рейка; 18 – електрорухомий склад.

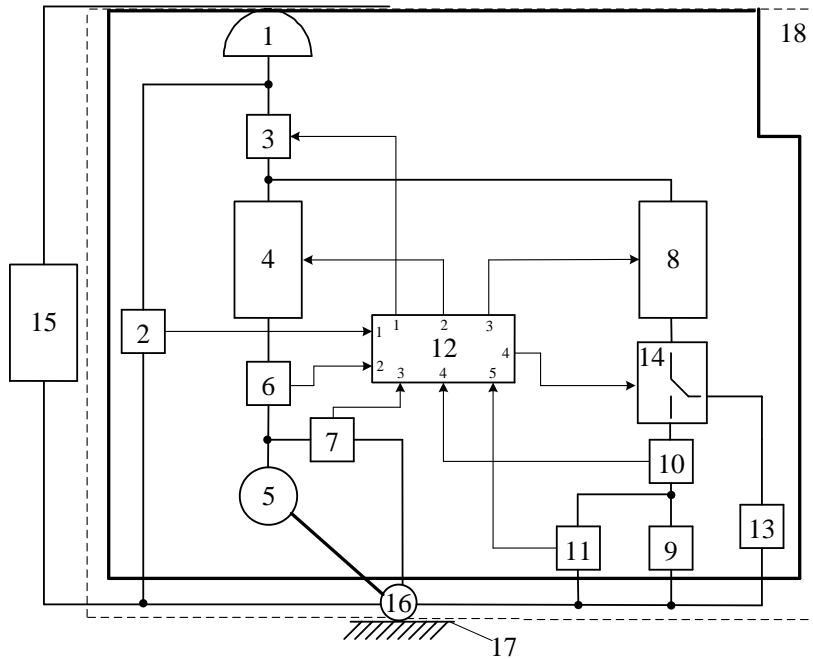


Рис. 1. Блок-схема електрорухомого складу з бортовим ємнісним накопичувачем енергії

Струмоприймач 1 виконаний з можливістю з'єднання з контактною мережею 15 і послідовно з'єднаний з тяговим електродвигуном 5 через керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4 і датчик струму тягового електродвигуна 6. Вихід струмоприймача 1 з'єднаний з датчиком напруги контактної мережі 2. Датчик напруги тягового електродвигуна 7 паралельно підключений до тягового електродвигуна 5. Тяговий електродвигун 5 виконаний з можливістю механічного з'єднання з приводними колесами електрорухомого складу 16 і рейкою 17. Вхід реверсивного перетворювача 8 з'єднаний з виходом керованого комутатора контактної мережі 3, а його вихід з'єднаний з накопичувачем 9 та гальмівним резистором 13 через керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Бортовий ємнісний накопичувач 9 виконаний у вигляді конденсаторних модулів, підключений до реверсивного перетворювача 8 та з'єднаний з датчиком струму накопичувача 10 і датчиком напруги накопичувача 11 відповідно послідовно і паралельно.

Гальмівний резистор 13 призначений для поглинання надлишкової енергії рекуперації і з'єднаний з бортовим ємнісним накопичувачем 9 паралельно.

Блок керування 12 виконаний у вигляді мікропроцесора і призначений для здійснення в автоматичному режимі керування енергообмінними процесами між контактною мережею 15, тяговим електродвигуном 5 та бортовим ємнісним накопичувачем 9. Входи 1-5 блоку керування 12 з'єднані з датчиками 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а його виходи 1-4 з'єднані з керованим комутатором контактної мережі 3, блоком перетворення електроенергії 4, реверсивним перетворювачем 8 та керованим перемикачем накопичувача і гальмівного резистора 14 відповідно.

Блок керування 12 під час будь-якого режиму ведення (тяги, вибігу, рекуперативного гальмування) на входи 1-5 отримує сигнали з датчиків 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а через виходи 1-4 здійснює керування енергообмінними процесами.

Датчик 2 контролює напругу контактної мережі 15, датчик 6 – струм тягового електродвигуна 5, датчик 7 – напругу тягового електродвигуна 5, датчик 10 – струм накопичувача 9, датчик 11 – напругу бортового ємнісного накопичувача 9.

Основними режимами роботи бортових ємнісних накопичувачів енергії є:

режим, за якого накопичувач енергії не заряджається енергією рекуперативного гальмування та не розряджається на тягові електродвигуни або контактну мережу;

режим заряду або накопичування енергії;

режим розряду або живлення тягових споживачів енергії.

Основні режими роботи електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії описано нижче:

початковий або «нульовий» штатний режим, за якого електрорухомий склад зупинено і відключено від системи зовнішнього енергопостачання; бортовий ЄНЕ має мінімально допустимий рівень заряду;

штатний режим, за якого електрорухомий склад зупинено і підключено до системи зовнішнього енергопостачання; бортовий ЄНЕ має мінімально допустимий рівень заряду;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі тяги; бортовий ЄНЕ розряджається;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі тяги; бортовий ЄНЕ розряджений до мінімального значення, тому його заряд та розряд не виконуються;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі вибігу; заряд або розряд бортового ЄНЕ не здійснюється;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі рекуперативного гальмування; бортовий ЄНЕ заряджається;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі рекуперативного гальмування; бортовий ЄНЕ заряджений до максимального значення енергоємності, тому його заряд та розряд не виконуються;

аварійний режим, за якого електрорухомий склад відключений від системи зовнішнього енергопостачання; бортовий ЄНЕ має заряд не нижче мінімально допустимого рівня;

аварійний режим, за якого електрорухомий склад відключений від системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі тяги; бортовий ЄНЕ розряджається.

Режими роботи електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії описано за умов живлення нетягових споживачів тільки від контактної мережі. Роботу електрорухомого складу з бортовими ЄНЕ в вищенаведених режимах розглянуто в праці [13]. Тому відсутня необхідність детально зупинятись на цьому питанні і в подальшому переходимо безпосередньо до аналізу існуючих концепцій керування енергетичними процесами.

Існуючі концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії та алгоритми їх роботи проаналізовано шляхом огляду ряду досліджень [8, 13–20]. Існуючі концепції керування енергетичними процесами умовно можна поділити на п'ять окремих груп:

1) обмеження струму споживання з контактної мережі (бортовий накопичувач енергії підключається тільки в момент максимального енергообміну при досягненні певного граничного значення струму або потужності);

2) обмеження струму споживання з бортового ЄНЕ (бортовий накопичувач енергії відключається за умов досягнення граничного значення струму або потужності);

3) максимальне використання енергії від бортового накопичувача енергії;

4) залежно від швидкості руху складу;

5) використання бортового накопичувача енергії тільки для живлення тягових споживачів під час аварійного зняття напруги в контактній мережі.

Переваги і недоліки кожної із вищенаведених концепцій за штатних режимів роботи запропоновано розглянути на прикладі тягових і гальмівних характеристик, струму споживання і рекуперації електрорухомого складу (рис. 2), а також осцилограм струму, напруги на струмоприймачі, швидкості руху, які наведено на рис. 3. Ці осцилограми отримано

експериментальним шляхом, під час реальних умов експлуатації електрорухомого складу з означеними характеристиками між декількома станціями.

Під час аналізу концепцій прийнято, що бортовий ЄНЕ має незначну потужність та енергоємність, і не може прийняти повний об'єм рекуперованої енергії електрорухомим складом. Процеси рекуперації (заряду бортового ЄНЕ) розглянуто за критерієм максимального енергообміну, тобто першочергово електроенергія рекуперативного гальмування направлена на заряд бортового ЄНЕ. За умов повного заряду бортового ЄНЕ до заданої величини, енергія рекуперативного гальмування електрорухомого складу віддається до контактної мережі. Якщо в контактній мережі відсутній споживач енергії, тоді надлишкова енергія рекуперативного гальмування гаситься на гальмівному резисторі. Бортовий ЄНЕ живиться від ідеального джерела з постійним струмом на швидкостях руху 50-70 км/год та з лінійно спадаючим струмом на швидкостях руху 0-50 км/год (рис. 2, б). В початковий момент руху бортовий ЄНЕ повністю заряджений (рис. 3). Контроль рівня заряду та розряду бортового ЄНЕ виконується за допомогою датчика напруги та струму в колі накопичувача.

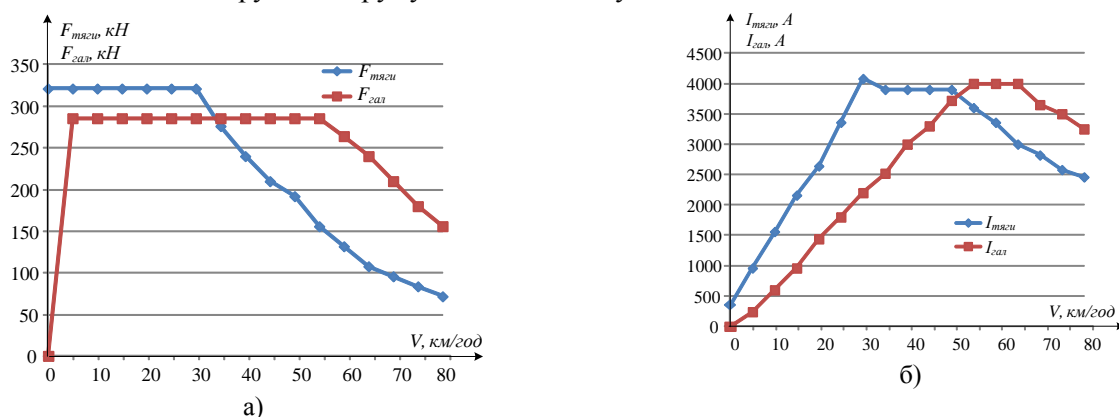


Рис. 2. Характеристики:
а – сила тяги і гальмування; б – споживання та рекуперації струму

Концепція обмеження струму або потужності споживання з контактної мережі (перша концепція) [8, 14, 15, 20, 21]. Ця концепція системи керування енергетичними процесами головним чином направлена на зниження рівня споживання електроенергії з контактної мережі. За умов перевищення заданого граничного значення струму або потужності живлення тягового приводу виконується одночасно від контактної мережі та бортового ЄНЕ, в іншому випадку – тільки від контактної мережі. Як правило, задане граничне значення струму або потужності обирається на рівні номінального, однак не виключено інші варіанти обрання цього значення. Концепція системи керування енергетичними процесами, за якої обмежується струм або потужність споживання з контактної мережі, пояснюється графіками струмів на рис. 4, 5.

На графіках рис. 4, 5 прийнято такі припущення: граничне значення струму дорівнює 2000 А, обраний бортовий ЄНЕ з заданою величиною енергоємності дозволяє повністю компенсувати споживання електроенергії з мережі за умов обраного граничного значення струму 2000 А.

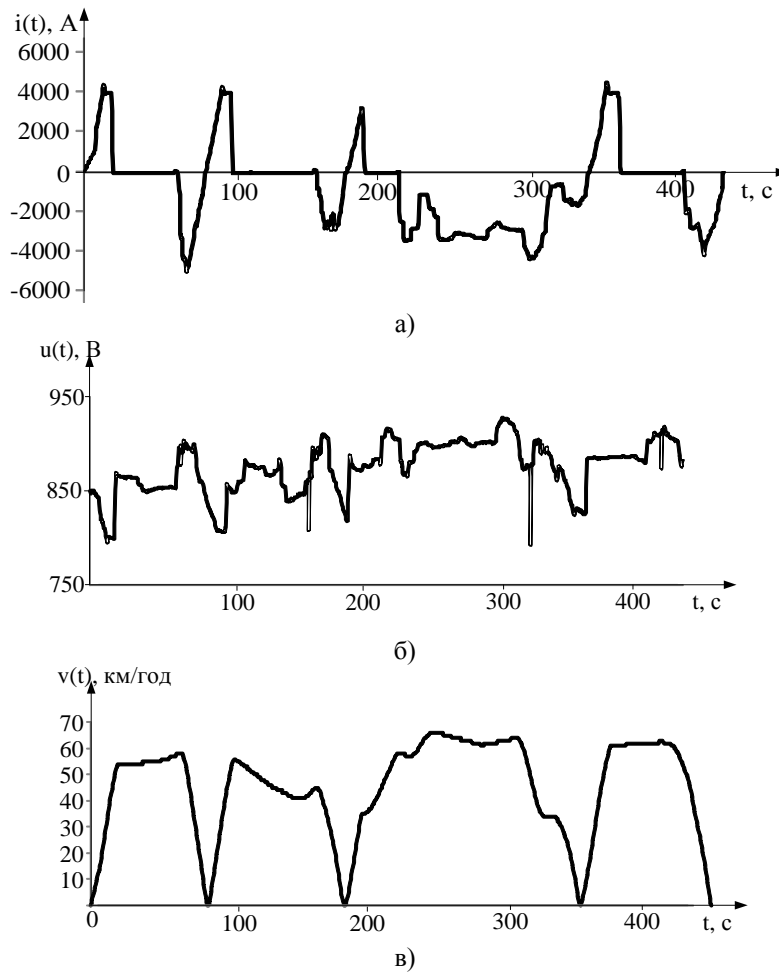


Рис. 3. Осцилограми під час експлуатації рухомого складу між станціями: а – струм рухомого складу в режимах тяги та рекуперативного гальмування $i(t)$; б – напруга на струмоприймачі $u(t)$; в – швидкість руху $v(t)$

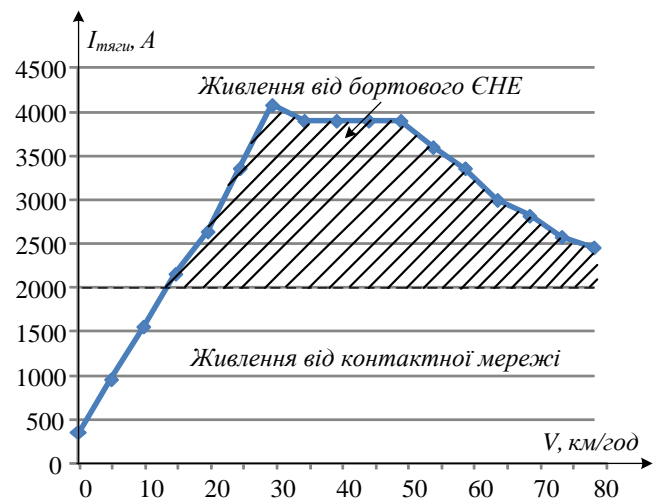


Рис. 4. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням першої концепції

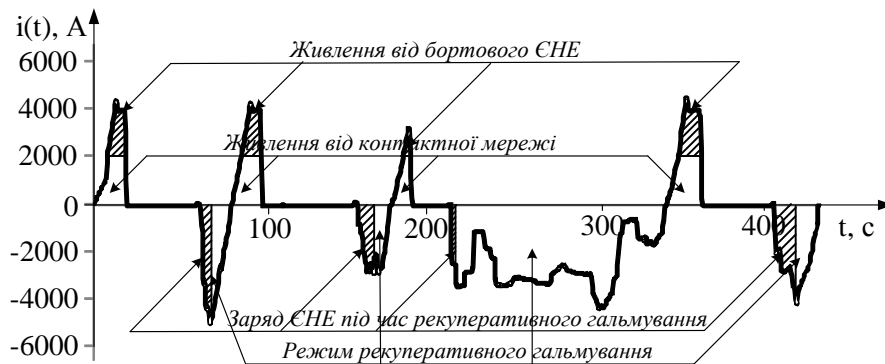


Рис. 5. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування першої концепції

Переваги застосування першої концепції:

- простий варіант реалізації системи керування;
- зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу;
- високий коефіцієнт корисної дії енергообмінних процесів внаслідок відсутності роботи бортового ЄНЕ в глибоких зарядно-розрядних режимах;
- зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;
- підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу.

Недоліки застосування першої концепції:

- імовірність виникнення енергообмінних процесів незначна порівняно з іншими концепціями, як наслідок, низька ефективність енергетичних процесів та частість використання бортового ЄНЕ;
- залежність використання енергії рекуперативного гальмування від інтенсивності розгону складу;
- ефективність енергетичних процесів значною мірою залежить від режиму руху електрорухомого складу (інтенсивності розгону), профілю колії та обраних граничних значень струму або потужності, а також обраної енергоемності бортового ЄНЕ, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;
- концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);
- концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.
- Концепція обмеження струму або потужності споживання з бортового ЄНЕ (друга концепція) [8, 18, 19]. Ця концепція системи керування, як і попередня, направлена на зниження рівня споживання електроенергії з контактної мережі та стабільне протікання енергетичних процесів. Однак принцип дії цієї концепції діаметрально протилежний попередній: спочатку до досягнення граничного струму або потужності тяговий привід отримує живлення від бортового ЄНЕ, потім за умов досягнення граничної величини живлення тягового приводу виконується одночасно від контактної мережі та бортового ЄНЕ. Під час падіння рівня напруги на бортовому ЄНЕ до мінімально заданої величини живлення тягового приводу відбувається тільки від контактної мережі.

Концепція системи керування енергетичними процесами, за якої обмежується струм або потужність споживання з бортового ЄНЕ, пояснюється графіками струмів на рис. 6, 7.

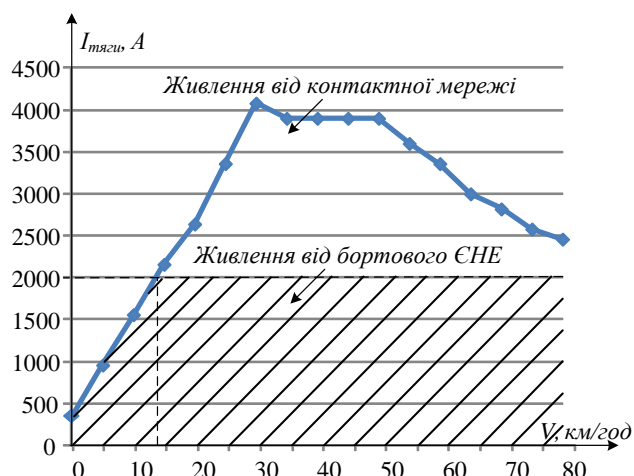


Рис. 6. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням другої концепції

На графіках рис. 6, 7 прийнято наступні припущення: граничне значення струму дорівнює 2000 А, обраний бортовий ЄНЕ заданої величини енергоємності дозволяє повністю компенсувати споживання електроенергії з мережі за умов граничного значення струму 2000 А.

Переваги застосування другої концепції:

простий варіант реалізації системи керування;

зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу;

частіше використання бортового ЄНЕ та його робота в глибоких зарядно-розрядних режимах, що в цілому дозволяє досягти значного техніко-економічного ефекту;

зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;

підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу;

пріоритет надається живленню тягового приводу від бортового ЄНЕ, що дозволяє ефективно використовувати електроенергію рекуперативного гальмування.

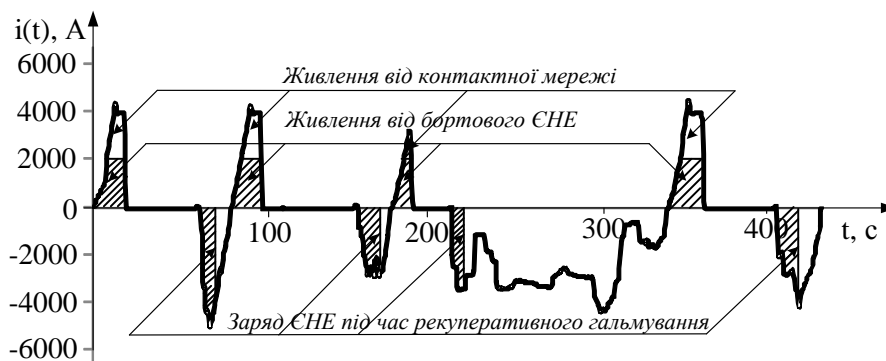


Рис. 7. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування другої концепції

Недоліки застосування другої концепції:

низький коефіцієнт корисної дії енергетичних процесів за умов роботи бортового ЄНЕ при глибокому розряді;

необхідність обґрунтування обраних значень струму або потужності, а також енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від їх правильного вибору буде залежати ефективність енергетичних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;

концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);

концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.

Концепція керування за критерієм максимального використання накопиченої енергії (третья концепція) [8, 14, 16, 22]. Ця концепція направлена на максимальне використання накопиченої електроенергії рекуперативного гальмування в бортовому ЄНЕ під час розгону електрорухомого складу. Концепція передбачає живлення тягового приводу, в першу чергу, від бортового ЄНЕ, а потім за умови його розряду до мінімально допустимого значення напруги, від контактної мережі. Концепція, за якої передбачається максимальне використання накопиченої енергії бортовим ЄНЕ, пояснюється графіками струмів на рис. 8, 9.



Рис. 8. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням третьої концепції

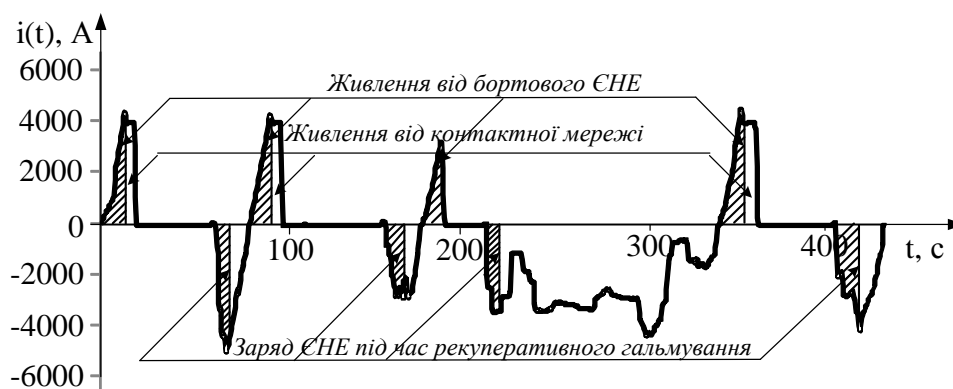


Рис. 9. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування третьої концепції

На графіках рис. 8, 9 прийнято припущення, що обраний бортовий ЄНЕ заданої енергоємності повністю забезпечує живлення тягового обладнання в режимі пуску.

Переваги застосування третьої концепції:

простий варіант реалізації системи керування;

максимальне досягнення техніко-економічного ефекту порівняно з іншими концепціями завдяки пріоритету використання енергії з бортового ЄНЕ;

максимальне використання накопиченої електроенергії рекуперативного гальмування складу;

здійснення максимального енергообміну та прогнозована стабільність протікання енергетичних процесів;

зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;

підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу;

Недоліки застосування третьої концепції:

незначний ресурс використання бортового ЄНЕ внаслідок його роботи в «глибоких» зарядно-розрядних режимах порівняно з іншими концепціями;

необхідність обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від її правильного вибору буде залежати ефективність енергообмінних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;

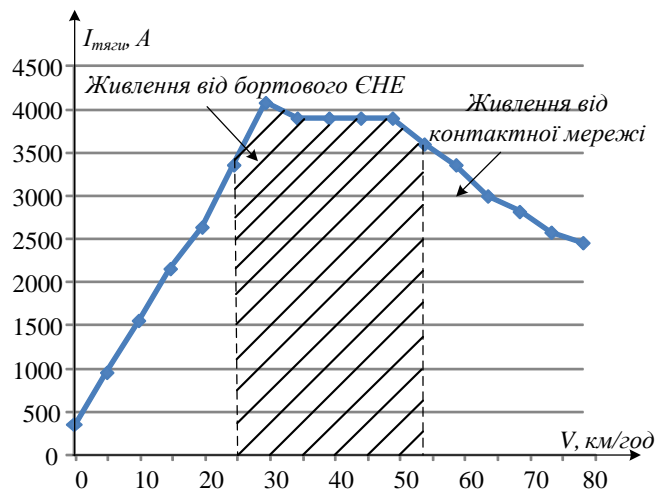
використання енергії бортового ЄНЕ на етапі початкового розгону, як наслідок, відсутні обмеження споживання струму з контактної мережі на високих швидкостях руху складу в режимі тяги та можливість зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення;

концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);

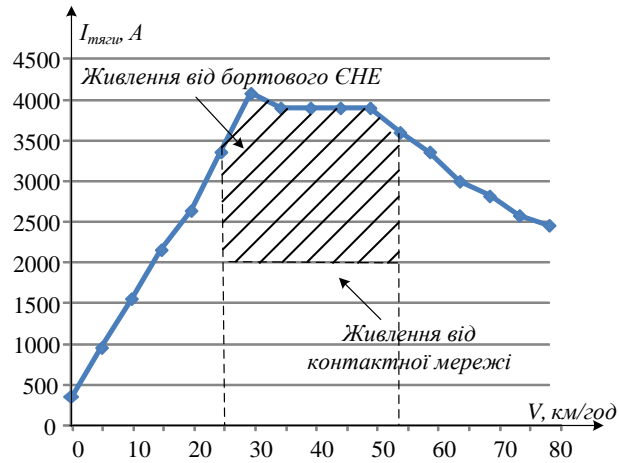
концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.

Концепція споживання енергії від бортового ЄНЕ залежно від швидкості руху (четверта концепція) [8, 23]. Ця концепція направлена на зменшення споживання електроенергії з контактної мережі за рахунок використання накопиченої енергії рекуперативного гальмування при заданих швидкостях руху. Як правило, живлення від бортового ЄНЕ здійснюється на швидкостях, при яких струм споживання максимальний. На заданих швидкостях руху можливе здійснення живлення тягового обладнання як тільки від бортового ЄНЕ, так і передбачити сумісне живлення від бортового ЄНЕ та контактної мережі. Концепцію споживання енергії від бортового ЄНЕ залежно від швидкості руху складу проілюстровано за допомогою графіків, які зображено на рис. 10, 11.

На графіках рис. 10, 11 прийнято умову, що діапазон швидкостей руху, за яких тягове обладнання отримує живлення від бортового ЄНЕ, становить 25-53 км/год. Осцилограми струму електрорухомого складу на рис. 11 наведено з урахуванням живлення тягового обладнання на зазначених швидкостях тільки від бортового ЄНЕ.



а)



б)

Рис. 10. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням четвертої концепції: а – живлення тільки від бортового ЄНЕ; б – сумісне живлення тягового обладнання від бортового ЄНЕ та контактної мережі

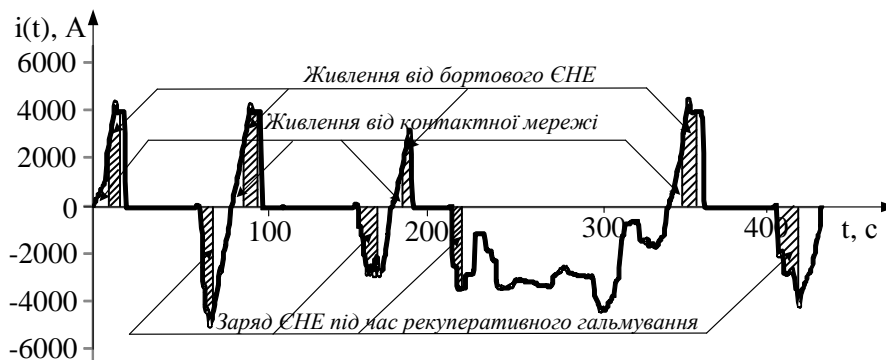


Рис. 11. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування четвертої концепції

Переваги застосування четвертої концепції:

простий варіант реалізації системи керування;

зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу;

зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;

підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу;

використання бортового ЄНЕ не залежить від інтенсивності розгону, що в цілому дозволяє досягти значного техніко-економічного ефекту та досягати стабільного протікання енергетичних процесів.

Недоліки застосування четвертої концепції:

низький коефіцієнт корисної дії енергетичних процесів за умов роботи бортового ЄНЕ при глибокому розряді;

необхідність обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від її правильного вибору буде залежати ефективність енергетичних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;

залежність використання енергії рекуперативного гальмування від інтенсивності розгону;

концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);

концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.

Концепція використання бортового ЄНЕ під час аварійного зняття напруги в контактній мережі (п'ята концепція) [24, 25]. Ця концепція направлена на підвищення безпеки перевізного процесу та можливості автономного ходу електрорухомого складу під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення. Концепція передбачає живлення тягового приводу від бортового ЄНЕ під час руху електрорухомого складу до найближчої станції. Концепцію використання бортового ЄНЕ під час аварійного зняття напруги в контактній мережі описано за допомогою графіків, які зображено на рис. 12, 13.

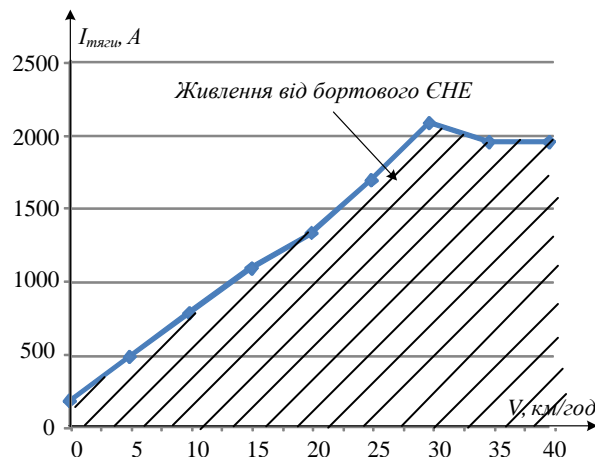


Рис. 12 . Струм споживання електрорухомим складом під час аварійного зняття живлення в контактній мережі

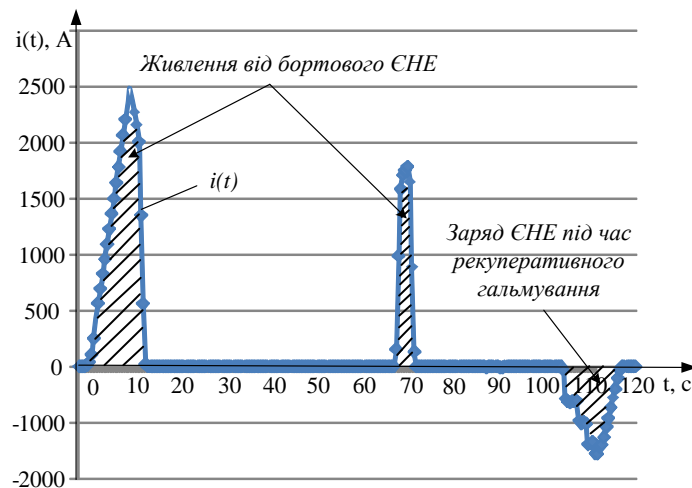


Рис. 13. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов його автономного ходу під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення

Головний недолік цієї концепції полягає у тому, що живлення тягових споживачів від бортового ЄНЕ забезпечуються тільки під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення. В штатному режимі роботи системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу живлення тягових споживачів забезпечується від контактної мережі. При цьому, як і для вищезазначених концепцій керування енергетичними процесами в штатних режимах роботи системи енергозабезпечення, необхідне обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ.

Таким чином, кожній із розглянутих концепцій керування енергообмінних процесів притаманні свої переваги і недоліки. Загальними перевагами кожної із розглянутих концепцій є простий варіант реалізації системи керування; зменшення споживання електроенергії з контактної мережі; зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання; підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу. Простий варіант реалізації системи керування полягає в тому, що підключення бортового ЄНЕ як джерела живлення виконується за одним показником (граничним струмом, швидкістю). Загальними недоліками кожної концепції є відсутня можливість врахування динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі, а також відсутня можливість одночасного функціонування бортового ЄНЕ як в штатних режимах роботи, так і аварійних, за умов зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда. Незалежно від обраної концепції необхідно виконувати окремі дослідження щодо вибору величини енергоємності бортового ЄНЕ, а також граничних величин струму для першої і другої концепцій та діапазону швидкості руху для четвертої концепції.

Висновки. Узагальнений порівняльний аналіз існуючих концепцій керування енергообмінними процесами дозволив встановити таке:

концепції з обмеженням струму або потужності споживання з контактної мережі дозволяють зменшити споживання електроенергії та встановлену потужність силового обладнання системи тягового енергозабезпечення, підвищити стабільність напруги контактної мережі, що в цілому підвищить пропускну здатність та підвищить ефективність перевізного процесу. При цьому темою окремих досліджень за умов застосування цих концепцій є визначення граничних значень струму або потужності, за яких відбувається живлення від бортового ЄНЕ та здійснюється ефективний енергообмін. Ці концепції не забезпечують автономне ведення електрорухомого складу під час аварійного відключення живлення контактної мережі;

концепція керування за критерієм максимального використання накопиченої енергії дозволяє максимально підвищити ефективність використання електроенергії рекуперативного

гальмування, обмежити споживання електроенергії під час розгону електрорухомого складу, підвищити пропускну здатність перегону та стабілізувати напругу в контактній мережі під час розгону. Однак дана концепція передбачає використання енергії бортового ЄНЕ на етапі початкового розгону та не дозволяє зменшити струм споживання з контактної мережі на високих швидкостях руху. Ця концепція також не враховує динаміку енергетичних процесів в контактній мережі та не забезпечує можливість автономного ведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного відключення живлення контактної мережі;

концепція споживання енергії від бортового ЄНЕ залежно від швидкості руху дозволяє зменшити споживання електроенергії з контактної мережі, підвищити пропускну здатність перегону, стабілізувати напругу в контактній мережі під час заданих швидкостей руху, за яких відбувається живлення від бортового ЄНЕ. Енергія, накопичена в бортовому ЄНЕ використовується на заданих швидкостях руху, незалежно від інтенсивності розгону. При цьому необхідне обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від її правильного вибору буде залежати ефективність енергетичних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень. Ефективність використання енергії рекуперативного гальмування залежить від інтенсивності розгону.

концепція використання бортового ЄНЕ під час аварійного зняття напруги в контактній мережі направлена на підвищення безпеки перевізного процесу та можливості автономного ходу електрорухомого складу під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення. Концепція передбачає живлення тягового приводу від бортового ЄНЕ під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення, тобто відсутня можливість його використання за штатної роботи системи живлення.

В подальшому необхідно розробити адаптивну концепцію керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Основна ідея цієї концепції керування має полягати у здійсненні ефективного енергообміну між тяговим обладнанням, бортовим ємнісним накопичувачем енергії, контактною мережею, як в штатних, так і аварійних режимах роботи системи тягового енергозабезпечення, за умов врахування динаміки енергетичних процесів в контактній мережі, що в цілому дозволить підвищити безпеку та енергоефективність перевізного процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Skea J., Anderson D., Green R., Gross R., Hep-tonstall P., Leach M. Intermittent renewable generation and maintaining power system reliability. IET Gener. Transm. Distrib., 2008, Vol. 2, No. 1, P.82-89.
2. Шевлюгин М.В., Жуматова А.А. Возможность использования возобновляемых источников энергии в системе тягового электроснабжения железных до-рог. НТТ – Наука и техника транспорта. 2008. № 4. С. 25–28.
3. Lee H., Song J., Lee H., Lee Ch., Jang G., Kim G. Capacity optimization of the supercapacitor energy storages on DC railway system using a railway powerflow algorithm. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, No. 5(B), P.2739–2753.
4. The Future of Rail Opportunities for energy and the environment. IEA Publications. France, 2019. 175 p.
5. Petrenko O., Liubarskiy B., Pliugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. Електротехніка і електромеханіка. 2017. № 6. P. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
6. Sulym, A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of On-board capacitive energy storage of the rolling stock. Naukovi Visnyk NHU. Dnipro, 2018. Iss. 5. P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
7. Муха А.М., Костін М.О., Куриленко О.Я., Ципля Г.В. Підвищення ефективності роботи електро-приводу постійного струму на основі використання суперконденсаторних накопичувачів електроенергії. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2017. № 5 (71). С. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624>
8. 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, P. 9–20.
9. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. TTS Technika Transportu szynowego. 2018. № 10. P. 39–43.
10. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as Wayside Energy Storage for Electric Rail Transit Systems. Inventions. 2019, 4, 62, P. 1–15.

11. Дибрін С.В. Вибір ємнісного накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів шахтного транспорту з індукційною передачею енергії. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2018. № 54. С. 300–310.
12. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. НТТ – Наука и техника транспорта. 2008. № 1. С. 15–20.
13. 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: 10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92.
14. Рябов Е.С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 6 (1115). С. 132–137
15. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyu-barskiy 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. P. 848–858.
16. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Sta-matin 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>
17. Kondo K. Recent energy saving technologies on railway traction systems. IEEJ Trans. 2010. № 5. P. 298–303.
18. Szênásy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. Acta Technica Jaurinensis. 2009. Vol. 2. № 1. P. 117–131.
19. 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.
20. Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. Computational problems of electrical engineering. 2019, Vol. 9, No. 1, P.44-52.
21. Рыбалко А.Я., Дыбрин С.В. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 356–361.
22. Волков В.А. Оптимизация электропотребления троллейбуса с тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2019. Вип. 1 (45). С. 8–24. doi: 10.30929/2072-2052.2019.1.45.8-24.
23. Мазнев А.С., Степанская О.А., Шатнев О.И. Системы рекуперации энергии торможения электроподвижного состава на городском транспорте Санкт-Петербурга. Известия ПГУПС. 2017. Вып. 1. С. 63–72.
24. Шевлюгин М.В. Система накопления энергии на вагоне метро для аварийного вывода поезда из туннеля. НТТ – Наука и техника транспорта. 2006. № 3. С. 29–32.
25. Донченко А.В., Сулим А.А. Определение энергоёмкости накопителя при возникновении аварийных ситуаций в системе энергообеспечения метрополитена. Educatio. Технические науки. 2014. Вып. 7. С. 79–83.

REFERENCES

1. Skea J., Anderson D., Green R., Gross R., Heptonstall P., Leach M. (2008). Intermittent renewable generation and maintaining power system reliability. IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 2, № 1, pp.82-89.
2. Shevliugin M.V., Zhumatova A.A. (2008). Vozmozhnost ispolzovaniia vozobnovliaemykh istochnikov enerhii v sistemie tiahovoho elektrosnabzheniia zheleznykh doroh [The possibility of using renewable energy sources in the traction power supply system of railways]. NTT – Nauka i tehnika transporta – NTT - Science and Transport Technik, No. 4, pp. 25–28. [in Russian].
3. Lee H., Song J., Lee H., Lee Ch., Jang G., Kim G. Capacity optimization of the supercapacitor energy storages on DC railway system using a railway powerflow algorithm. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, № 5(B), pp. 2739–2753.
4. The Future of Rail Opportunities for energy and the environment. IEA Publications. France, 2019. 175 p.
5. Petrenko O., Liubarskiy B., Pliugin V. (2017). Determination of optimal motion modes of the railway rolling stock. *Elektrotehnika i Electromechanika – Elektrotechnology and Elektromechanics*, №6, pp. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
6. Sulym, A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of onboard energy storage capacitors of the rolling stock. Naukovyi Visnyk NHU. Dnipro, Iss.5, pp. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
7. Mukha A.M., Kostin M.O., Kurylenko O.Ya., Tsyplia G.V. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty elektropryvodu postiinoho strumu na osnovi vykorystannia superkondensatornykh nakopychuvachiv elektroenerhii [Improving the efficiency of the DC electric drive based on the use of supercapacitor energy storage]. *Nauka ta prohres transport - Science and transport progress*. Bulletin of DNUZT V. Lazarian, 5 (71), pp. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624> [in Ukrainian].
8. Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. (2014). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. ET Electr. Syst. Transp., Vol. 4, № 1, p. 9–20.
9. N Wieczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. TTS Technika Transportuszynowego. 2018. № 10, pp.39–43.

10. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as Wayside Energy Storage for Electric Rail Transit Systems. *Inventions*. 2019, 4, 62, P. 1–15.
11. Dybrin S.V. (2018). Vybir iemnisnogo nakopychuvacha enerhii dlia zabezpechennia zbilshennia chysla eksploatovanykh na horyzonti elektrovoziv shakhtnoho transportu z induktsiinoiu peredacheiu enerhii [Selection of capacitive energy storage to increase the number of electric locomotives operated on the horizon of mine transport with induction energy transfer]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu - Collection of scientific works of the National Mining University*, 54, pp. 300–310. [in Ukrainian].
12. Shevlyugin M.V., Zheltov K.S. (2008). Snizheniie raskhoda eliektronerhii na dvizhienie poezdov v Moskovskom metropolitene pry yspolzovanny emkostnykh nakopytelei enerhyi. Reduction of electricity consumption for train movement in the Moscow metro by the use of capacitive energy storages. *NTT – Nauka i tekhnika transporta - NTT - Science and technology of transport*, 1, pp. 15–20 [in Russian].
13. Sulym A.O., Khozya P.O., Melnyk O.O. (2020) Snyzhenye raskhoda elektroenerhyi na dvyzhenye poezdov v Moskovskom metropolitene pry yspolzovanny emkostnykh nakopytelei enerhyi. Application of on-board capacitive storages of low power and capacitance on the metro rolling stock. *Bulletin of the East Ukrainian. Nat. Vladimir Dahl University*, №. 4 (260), pp. 87–92. doi: 10.33216 / 1998-7927-2020-260-4-87-92. [in Ukrainian].
14. Ryabov E.C. Determination of energy storage parameters for electric rolling stock with asynchronous traction drive in current limiting mode of the traction network. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". H. : NTU "KhPI"*, 2015. №6 (1115), pp. 132–137 [in Russian].
15. 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, № 2, pp. 848–858.
16. 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), pp. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
17. Kondo K. Recent energy saving technologies on railway traction systems. *IEEE J Trans*. 2010. № 5, pp. 298–303.
18. Szênâsy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. *Acta Technica Jaurinensis*. 2009. Vol. 2. № 1, pp. 117–131.
16. 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), pp. 2129–2140.
20. N Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational problems of electrical engineering*. 2019, Vol. 9, № 1, pp. 44–52.
21. Rybalko A. Ya., Dybrin S.V. (2008). Vybór yemkosti nakopyteliia enerhii dlia obespecheniia snyzheniia maksimuma potrebliaemoi moshchnosti [Selection of energy storage capacity to reduce the maximum power consumption]. *Hornyi informatsiino-analiticheskiy bulleten - Mining informational and analytical bulletin*, 8, pp. 356–361 [in Russian]
22. Volkov V.A. (2019). Optimizatsiia elektropotrebleniia trolleibusa s tiahovym chastotno-rehuliruiemym asynkhronnym dvigatelem i superkondensatornym nakopitelem heneriruiemoi enerhii [Optimization of trolley bus power consumption with traction frequency-regulated induction motor and supercapacitor storage of generated energy]. *Elektromekhanichni i erhozberihaiuchi systemy - Electromechanical and energy saving systems*, Issue 1 (45), pp. 8–24. doi: 10.30929 / 2072-2052.2019.1.45.8-24 [in Russian].
23. Maznev A.S., Stepanskai O.A., Shatnev O.I. (2017). Sistemy rekuperatsii enerhii tormozheniia eliektrpodvizhnoho sostava na horodskom transporte Sankt-Peterburha [Braking energy recovery systems for electric rolling stock in mass transit in St. Petersburg]. *Izvestia PGUPS [Bulletin PGUPS]*, Issue. 1, pp. 63–72 [in Russian].
24. Shevlyugin M.V. (2006). Sistiema nakopleniia enerhii na vahone metro dlia avariinoho vyvoda poiezda iz tunnelia. [Energy storage system on a metro car for emergency train withdrawal from the tunnel]. *NTT – Nauka i tekhnika transporta [NTT - Science and technology of transport]*, 3, pp. 29–32 [in Russian].
25. Donchenko A.V., Sulym A.A. (2014). Opriedieleniie enerhoemkosti nakopiteliia pri vozniknovenii avariinykh sytuatsii v sistemie enerhoobespecheniia met-ropolytenu [Determination of energy consumption of energy storage in case of emergencies in the metro power supply system]. *Education. Technicheskie nauki - Technical sciences*, Issue 7, pp. 79–83 [in Russian].

Andrii Sulym¹, Pavlo Khozia^{1*}

¹ State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute», 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

MANAGEMENT STRATEGIES FOR ENERGY PROCESSES IN ELECTRIC ROLLING STOCK WITH ON-BOARD ENERGY STORAGE DEVICES

The article deals with the main existing strategies for management strategy of energy exchange processes in the electric rolling stock with onboard capacitive energy storage devices. When considering strategies, it is assumed that the onboard capacitive storage has low power and capacitance. Therefore,

this capacitor storage is not able to accept the full amount of regenerative braking energy of the electric rolling stock. The purpose of the paper is to consider and analyze management strategies for energy exchange processes in the electric rolling stock with onboard capacitive energy storages; to define the advantages and disadvantages of each of the existing strategies and propose a concept for the effective management of energy exchange processes in the electric rolling stock. The block diagram of electric rolling stock with the onboard capacitive energy storage which is used for the analysis of management strategies for energy exchange processes is presented. The modes of operation of electric rolling stock with onboard capacitive energy storages are described. Five main strategies for management of energy exchange processes on the electric rolling stock with onboard capacitive energy storages are determined. The advantages and disadvantages of each strategy are set out taking into account the given conditions (characteristics of the electric rolling stock, conditions of the rolling stock motion, oscillograph charts, etc.). The general advantages and shortcomings of each strategy are defined, which allowed to propose the concept of creating an adaptive strategy for managing energy exchange processes in electric rolling stock with onboard capacitive energy storages. The main concept of this management strategy is to implement efficient energy exchange between the traction equipment, the onboard capacitive energy storage, the overhead contact system, both in normal and emergency modes of traction power supply, taking into account the dynamics of energy exchange processes in the overhead contact system, which will generally allow safety and energy efficiency of the transportation process. The obtained research results will contribute to the development and implementation of effective strategies for managing energy exchange processes in the electric rolling stock.

Keywords: *onboard capacitive energy storage, electric rolling stock, management, energy processes.*