

Д. О. Босий, докт. техн. наук, доцент,

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

ТЕХНОЛОГІЇ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРИСТРОЯХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

УДК 621.331

Впровадження інтелектуально керованих джерел альтернативної енергетики, в тому числі, і з приєднанням до тягових мереж, з одного боку викликає проблеми неузгодженості режимів їх роботи, а з іншого відкриває нові можливості у пошуку оптимальних розподілів потоків потужностей при живленні систем електричної тяги.

► Вступ

Транспортна інфраструктура будь-якої розвиненої країни відіграє важливу роль в економічному, соціальному та стратегічному значеннях. Українські залізниці мають в своєму розпорядженні близько 22 тис. км та здатні забезпечити до 80 % вантажних і до 50 % пасажирських перевезень. Перевезення залізничним транспортом в енергетичному балансі України займають частку споживання електроенергії на рівні 4 %, при цьому від 2,8 до 3,5 % загального балансу електроенергії безпосередньо витрачається на електричну тягу. За всю історію експлуатації залізничного транспорту в Україні частка електрифікованих залізниць із загальної експлуатаційної довжини залізничних колій постійно збільшується, складаючи на цей час близько 10 тис. км, що у відношенні до загальної експлуатаційної довжини складає 47 %. Постійне збільшення протяжності електрифікованих залізниць упродовж останніх років обумовлене перевагами, які полягають у тому, що питомі витрати електричної тяги менше від тепловозної у 1,8–2,2 рази.

За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись лише залізницям Китаю, Росії та Індії. При цьому, вантажонапруженість залізниць України в 3–5 разів перевищує відповідний показник розвинених

європейських країн. Історично так склалось, що в Україні застосовується два види електричної тяги — постійного та змінного струму, що створює технічні складності при експлуатації та перепони у широкому впровадженні високошвидкісного руху та збільшенні обсягів вантажних перевезень.

Перевезення електричним транспортом, незважаючи на вказані факти, в умовах нестійкої вартості енергоносіїв завжди виявляються найбільш рентабельними через закладену можливість диверсифікації виду первинних енергетичних ресурсів. Попри це, на всьому шляху транспортування електроенергії від джерела до кінцевого споживача будуть наявні втрати деякої її частини, що є технологічно необхідним для забезпечення загального процесу передачі. З урахуванням того, що з кожною наступною ланкою передачі електроенергії накопичується рівень її втрат, то найбільшій актуальності набуває проблема зниження втрат та підвищення ефективності безпосередньо для кінцевого споживача електроенергії, який для електрифікованого залізничного транспорту є просторово-розподіленим та постійно змінюється у часі.

Розпочата експлуатація на залізницях України сучасного швидкісного рухомого складу наочно показала проблеми та обмеження, які містяться в інфраструктурі залізниць. В частині режиму електро-

постачання це стосується технічних обмежень за величиною та постійною часу споживання тягової потужності. Окрім цього, поступове впровадження інтелектуально керованих джерел альтернативної енергетики, в тому числі, і з приєднанням до тягових мереж, з одного боку викликає проблеми неузгодженості режимів їх роботи, а з іншого відкриває нові можливості у пошуку оптимальних розподілів потоків потужностей при живленні систем електричної тяги.

Таким чином, забезпечення енергоефективних режимів електропостачання в сучасних умовах експлуатації електрифікованих залізниць є актуальною проблемою і потребує наукового вирішення.

► Підвищення ефективності електрифікованих залізниць змінного струму

Електрична тяга змінного струму є несиметричним, нелінійним споживачем зі змінним навантаженням, розподіленим у просторі, тому живлення тягових підстанцій неможливе від одного вузла енергосистеми. Електроенергетичні процеси в системі зовнішнього електропостачання взаємопов'язані з процесами в системі тягового електропостачання. Електрифіковані залізниці змінного струму є джерелами погіршення властивостей якості електроенергії: несинусоїдності та, особливо, несиметрії напруги. Значення коефіцієнта

несиметрії напруги в точках приєднання тягових підстанцій, як правило, перевищує гранично допустиме значення відповідно до ГОСТ 13109-97 та викликає додаткові втрати, які не враховуються діючими методиками розрахунку технологічних втрат в пристроях електропостачання. Одночасно зі зростанням показника несиметрії напруги на залізницях змінного струму, збільшуються перетікання реактивної електроенергії, середньорічні значення коефіцієнта реактивної потужності ($\text{tg } \varphi$) складають 0,63–0,74. Перетікання реактивної електроенергії збільшують основні втрати в пристроях електропостачання, та разом з додатковими втратами, знижують ефективність електропостачання систем електричної тяги змінного струму.

Через те, що тягові підстанції змінного струму можуть отримувати живлення від різних вузлів однієї або навіть декількох енергосистем, це призводить до того, що приведені зовнішні характеристики виходять різними та спостерігається відмінність у модулях та кутах зсуву фаз напруг в точках приєднання до вузлів енергосистем. Це призводить до виникнення транзитних перетікань потужності між вузлами живлення, які більш за все проявляються при відсутності чи відносно низьких навантаженнях в тяговій мережі.

В умовах лібералізації ринкових відносин, коли залізниці України стали ліцензіатами оптового ринку, разом з іншими суб'єктами ринку формуються відносини, які не передбачають оплати послуг за будь-які транзитні перетікання активної та реактивної потужностей.

Системі тягового електропостачання змінного струму для забезпечення заданих розмірів руху та пропускної спроможності технологічно необхідне одночасне живлення ділянок тягової мережі від двох суміжних тягових підстанцій, бо інакше спроектовані параметри ділянок електрифікованих залізниць не забезпечать нормований рівень на лімітуючих блок-ділянках.

Існуючі схемні рішення по симетруванню навантаження тягових підстанцій змінного струму мають ряд недоліків, а саме складність виготовлення електрообладнання і потребують значних капітальних витрат при модернізації тягових підстанцій. Впровадження пристроїв регульованої компенсації реактивної потужності дозволяє в темпі процесу вирішити низку оптимізаційних задач використання електричної енергії: створення заданого режиму напруги в тяговій мережі, фільтрація вищих гармонійних складових, поліпшення показників якості електричної енергії, забезпечення відсутності перекомпенсації (недокомпенсації) реактивної потужності. Реалізація цих завдань вимагає розробки системи управління регульованою компенсацією реактивної потужності, яка забезпечує оптимальність функціонування в умовах впливу випадкових факторів.

Несиметрія струмів тягової підстанції зумовлена схемою підключення тягового трансформатора до первинної та тягової мережі (рис. 1), що викликає несиметричне навантаження першої (рис. 2). Проте симетрична система векторів (рис. 3–4) може бути отримана у випадках відсутності перетікання реактивної потужності між системами зовнішнього та тягового електропостачання та їх наявності.

Розглядаючи окремо струми пристроїв компенсації в плечах живлення тягової підстанції, можна визначити їх співвідношення

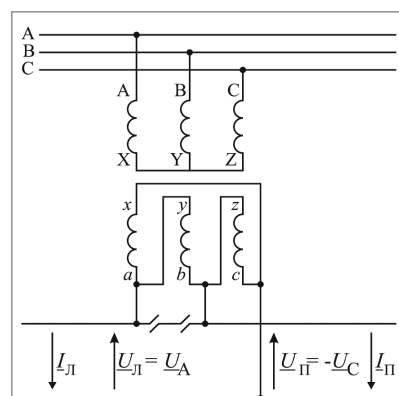


Рис. 1. Типова схема підключення трансформатора тягової підстанції змінного струму

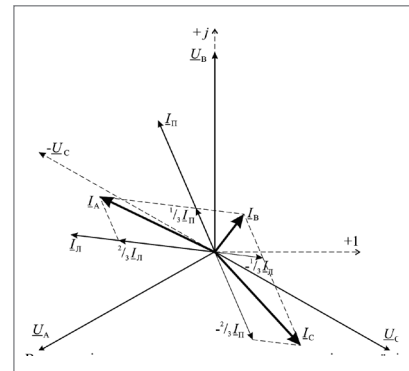


Рис. 2. Векторна діаграма несиметричних первинних струмів тягової підстанції

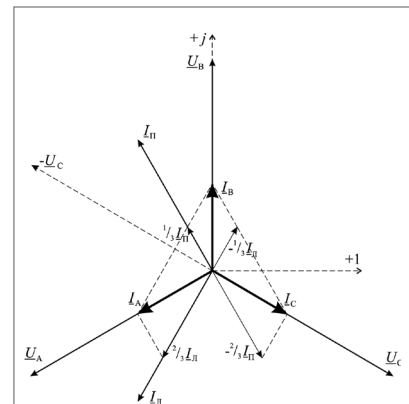


Рис. 3. Векторна діаграма симетричних первинних струмів тягової підстанції

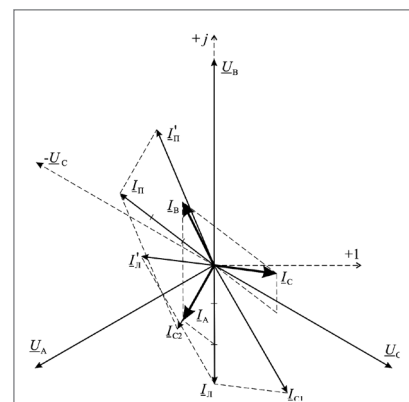


Рис. 4. Векторна діаграма симетричних первинних струмів за умови несиметричної компенсації реактивної потужності та різних струмів в плечах живлення

за яких рівень несиметрії струмів зворотної послідовності не буде перевищувати критичного значення. Графічно ця залежність на фазовій площині $I_{C2} = f(I_{C1})$ являє собою еліпс (рис. 5), математичний центр якого визначається струмами компенсації кінцевою формулою.

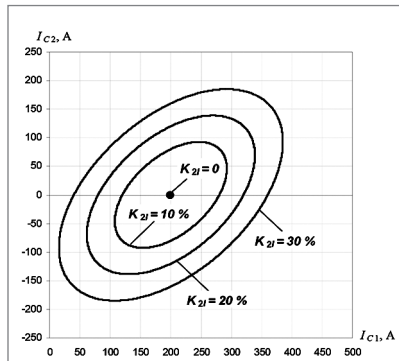


Рис. 5. Співвідношення струмів компенсації при різних рівнях несиметрії струмів та постійних струмах в плечах живлення

Для практичної реалізації на тяговій підстанції змінного струму необхідно застосувати регульовані пристрої компенсації реактивної потужності в обох плечах живлення (рис. 6) з удосконаленою системою автоматичного керування. В якості вхідних величин в системі керування виступають миттєві значення струмів та напруги плечей живлення і коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності районної мережі, який отримують на виході фільтра напруги зворотної послідовності (ФНОП).

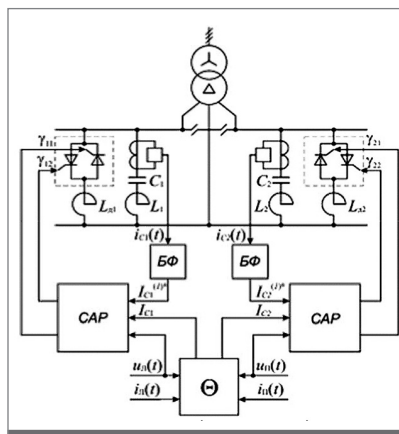


Рис. 6. Структурна схема системи управління компенсацією для зниження несиметрії напруги

Вихідними величинами є імпульси керування бітиристорними регуляторами γ_1, γ_2 , в колах декомпенсуючих реакторів. Імпульси керування формуються системою імпульсно-фазового керування синхронно з напругою відповідного плеча живлення $u(t)$ на основі чисельного значення кута керування γ ,

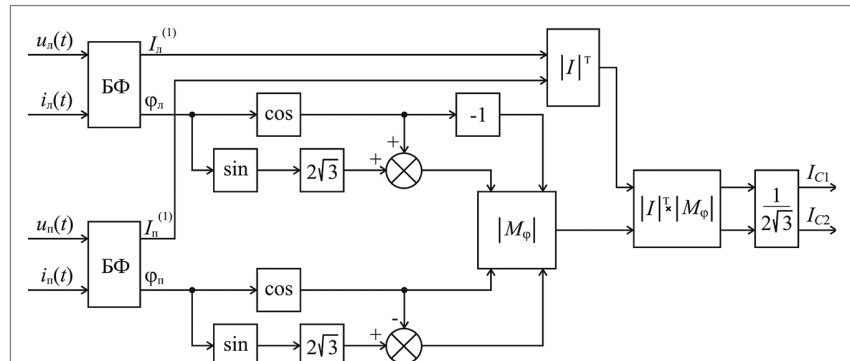


Рис. 7. Функціональна схема підсистеми струмів компенсації

яке в свою чергу отримується на виході PID-регулятора.

Струми компенсації в лівому та правому плечах живлення обчислюються спеціальною підсистемою Θ (рис. 7) за розробленою методикою та формулами.

Регулювання струмів компенсації в кожному плечі живлення дозволяє отримати квазісиметричну систему первинних струмів тягової підстанції за будь-яких співвідношень між струмами в плечах живлення та уникнути перетікань реактивної електроенергії.

На рис. 8 виконано порівняння характеристик двох варіантів роботи пристроїв регульованої компенсації реактивної потужності: до удосконалення системи керування та після. Як видно, за оптимального режиму керування значення коефіцієнта несиметрії напруги, яке відповідає інтегральній імовірності 95 %, знаходиться для оптимального режиму в межах нормально до-

пустимого ($1,78\% < 2\%$), тим самим суттєво зменшується у порівнянні з базовим варіантом та схемою з ефектом Скотта.

■ Стабілізація напруги та зниження втрат в системі постійного струму

Напруга в контактній мережі залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів — організації руху поїздів, режиму ведення кожного поїзду та режиму роботи пристроїв електропостачання. Значення швидкості руху поїзду в значній мірі залежить від напруги на струмоприймачеві електровозу, яка визначається параметрами системи електропостачання та поїзною ситуацією. Збільшення об'єму перевезень та організація руху швидкісних та високошвидкісних поїздів призводить до того, що пристрої тягового електропостачання обмежують пропускну спроможність ділянки

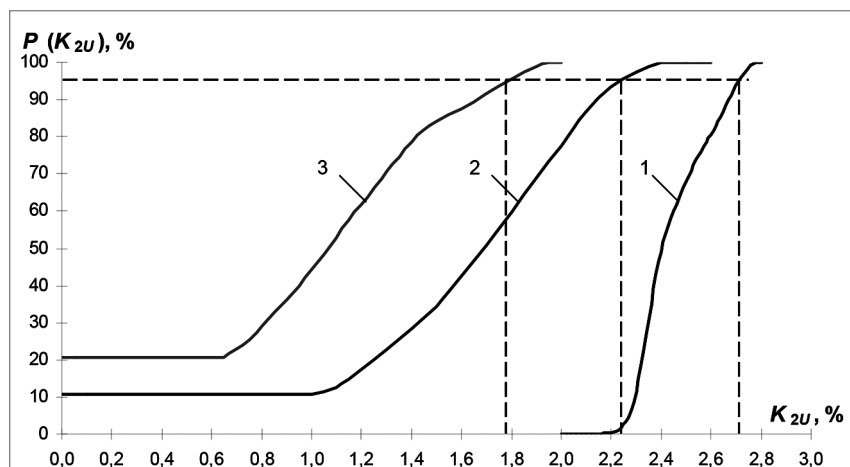


Рис. 8. Криві інтегральних функцій розподілів імовірностей несиметрії напруги: 1 - базовий варіант; 2 - схема з ефектом Скотта; 3 - регульована компенсація з оптимальним керуванням

електрифікованої залізниці внаслідок зниження напруги на струмоприймачі електрорухомого складу нижче нормованих значень. Як показав досвід експлуатації, відомі способи регулювання напруги на шинах тягових підстанцій не вирішили цю проблему повною мірою, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат. Тому, вирішується задача пошуку альтернативного способу забезпечення номінального рівня напруги за допомогою розширення інформативності режиму напруги в контактній мережі.

В загальному випадку, на основі неповної інформації про розташування навантажень та їх значення на міжпідстанційній зоні, з врахуванням режиму роботи системи зовнішнього електропостачання, вимагається визначити потужність, якої не вистачає для забезпечення кожній одиниці електрорухомого складу номінального рівня напруги. Нехай маємо деяку міжпідстанційну зону, на якій може знаходитись різна кількість навантажень (рис. 9). З врахуванням можливості різного рівня напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, необхідно визначити залежність струму пункту підсилення I_{RP} , який при зміні поїзної ситуації дозволить забезпечити на струмоприймачі кожного поїзду номінальний рівень напруги.

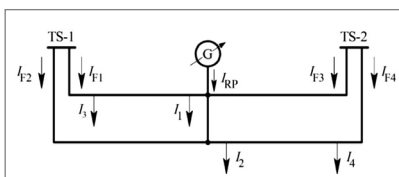


Рис. 9. Розрахункова схема міжпідстанційної зони з пунктом підсилення

Для вирішення поставленої задачі стабілізації напруги на струмоприймачеві застосовано розроблені підходи просторово-часового уявлення електричних величин до розрахунку систем тягового електропостачання.

Якщо вважати, що в кожен момент часу відомий розподіл спаду

напруги уздовж електрифікованої ділянки, можна скласти графічну інтерпретацію для виведення закону управління пунктом підсилення при його роботі у складі слідкуючої системи.

На рис. 10 уведені наступні позначення: U_{d1} , U_{d2} — точки, що відповідають рівню напруги на шинах першої та другої підстанції, В; $\Delta U'_k(I_{\text{вир}})$ — функція розподілу спаду напруги, що залежить від вирівнювального струму, В; $\Delta U_{\text{пп}}(I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}})$ — функція розподілу спаду напруги від струму підсилюючого пункту, В; $\Delta U_{\text{доп}}(U_d, I_{\text{вир}})$ — допустима втрата напруги для забезпечення стабілізованого рівня напруги, що визначається константою, $\Delta U_{\text{ст}}$, В.

Для розрахунку закону управління використано рівняння стабілізації напруги, в якому використовуються величини, що змінюються в часі і просторі. Для безпосереднього розрахунку розроблено алгоритм за допомогою якого можна визначити струм пункту підсилення. Алгоритм складається з трьох

частин — розрахунок, формування початкових даних та ітераційне визначення струмів підсилюючого пункту з урахуванням зміни поїзної ситуації. Результат роботи алгоритму та системи стабілізації наведено на рис. 11 у вигляді часових залежностей напруги на струмоприймачі кожного електровозу.

Для практичної реалізації розробленої системи стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму необхідно додатково виміряти розподіл напруги уздовж міжпідстанційної зони за допомогою пристроїв вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних через оптимально встановлену відстань в межах 1–3 км, після чого обчислити необхідну потужність та регулювати величину її генерації системою управління, враховуючи кількість підсилюючих пунктів, які розподілені уздовж електрифікованої залізниці постійного струму. На рис. 12 зображено схему електропостачання ділянки електрифі-

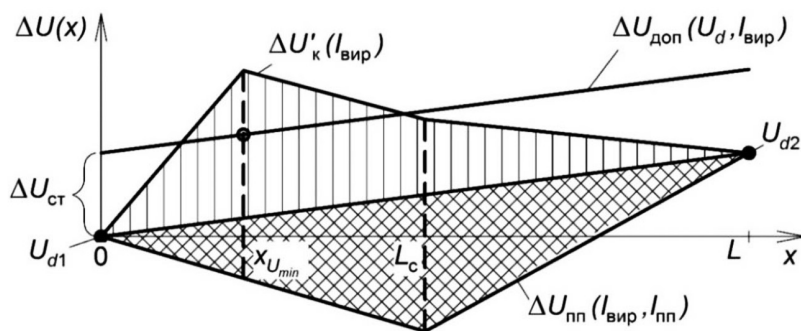


Рис. 10. Графіки функцій для визначення рівняння стабілізації напруги

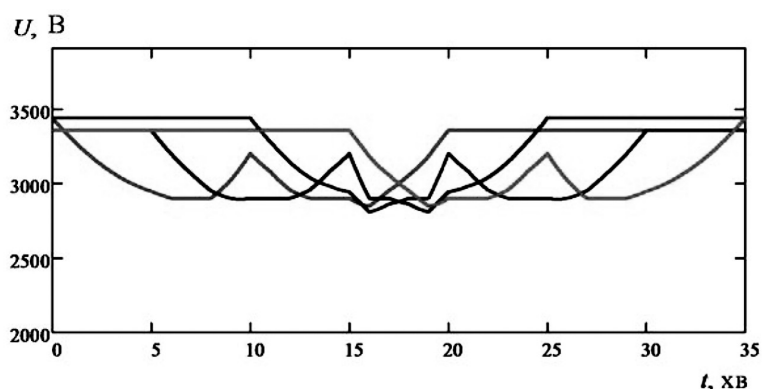


Рис. 11. Часові залежності напруги на струмоприймачі чотирьох електровозів при русі міжпідстанційною зоною зі стабілізацією напруги

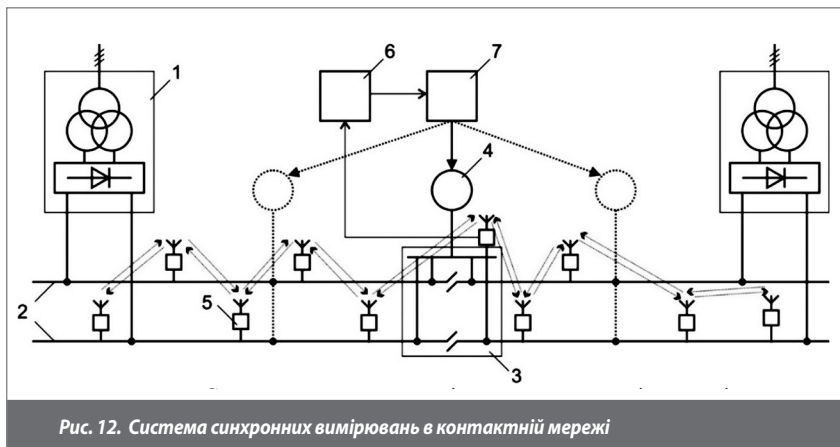


Рис. 12. Система синхронних вимірювань в контактній мережі

кованої залізниці з системою синхронних вимірювань.

Для вимірювання напруги в мережі постійного струму застосовується резистивний дільник напруги, до виходу якого підключений пристрій узгодження та мікроконтролер загального призначення типу Atmega128RFA1 (або аналогічний) з вбудованим багатоканальним аналогово-цифровим перетворювачем і високочастотним радіопередавачем. Для збільшення точності вимірювань в пристрої узгодження міститься чотириканальне джерело опорної напруги та каскад операційних підсилювачів, кожен з яких включений за схемою диференційного підсилення з первинним вимірювальним сигналом, а виходи цих операційних підсилювачів підключені до чотирьох різних входів аналогово-цифрового перетворювачі мікроконтролера. Зовнішній вигляд дослідних зразків розробленого приладу наведено на рис. 13.

Висновки

Наявний рівень технологічних втрат в системах тягового електро-

постачання для існуючих на даний час режимів електропостачання не задовольняє сучасним вимогам. В системах електричної тяги змінного струму, які характеризуються рівнем втрат 5-8 %, створюються умови для транзитних перетікань потужностей, які не правильно враховуються системою обліку та спричиняють додаткові витрати на закупівлю електроенергії. В системах постійного струму з рівнем втрат 14-17 % наявні відхилення напруги на струмоприймачах електрорухомого складу, які обмежують провізну і пропускну спроможності електрифікованих ділянок залізниць та, в цілому, ускладнюють виробничо-господарську діяльність.

Підвищення ефективності електропостачання системи електричної тяги змінного струму за рахунок отриманого виразу раціональних струмів компенсації в залежності від значень струмів плечей живлення тягової підстанції та коефіцієнтів, які визначаються кутами навантажень, дозволяє побудувати ефективну систему керування пристроями

регульованої компенсації, застосування якої знижує втрати активної електроенергії від перетікань реактивної електроенергії та від несиметрії струмів в обмотках трансформатора і первинній мережі на 1-2 %.

Підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму можна досягти шляхом застосування розробленої системи стабілізації напруги, яка має розподілену систему синхронних вимірювань та обчислювальний комплекс, в якому в режимі реального часу визначається керуюча послідовність впливів з подальшою передачею до підсилюючих пунктів на ділянці залізниці. Такий підхід дозволяє знизити втрати в тяговій мережі постійного струму з 14-17 % до 7-8,5 % від споживання електроенергії на тягу залежно від кількості поїздів, що одночасно перебувають на міжпідстанційній зоні. ☞

Список літератури

1. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Д.: Стандарт-Сервіс, 2015. — 340 с.
2. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // The archives of transport. — 2015. — Vol. 35, Iss. 3. — P. 63-70.
3. Bosiy D. O. Power quality complex estimation at alternating current traction substations / D. O. Bosiy // Наука та прогрес транспорту. — 2013. — № 4 (46). — P. 30-37.
4. Босий Д. О. Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму / Д. О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2010. — № 1. — С. 24-32.



Рис. 13. Зовнішній вигляд розробленого пристрою: для застосування на відкритому просторі (зліва) та в закритих розподільчих пристроях (справа)