

ПАЯНОК ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8139-4600>e-mail: oapayanok@gmail.com**БАБІЙ СЕРГІЙ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8043-0646>e-mail: babiy82sm@gmail.com**ПРОЦЕНКО ДМИТРО**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5611-7262>e-mail: procenko.d.p@vntu.edu.ua**ГРАНЯК ВАЛЕРІЙ**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>e-mail: titanxp2000@ukr.net

ВДОСКОНАЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ТА ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГАЛЬМУВАНЬ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

В роботі проведено аналіз режимів розподілу та використання енергії електричних (рекуперативних) гальмувань засобів рухомого складу міського електричного транспорту. Надані результати експериментального дослідження в контактній мережі міського електричного транспорту міста Вінниці. Проведено узагальнення та поширення отриманих результатів вимірювань на всю систему тягової електромережі. Встановлено, що значення випрямленої напруги на деяких тягових підстанціях міста Вінниці перевищують нормативне значення навіть за умови відсутності рекуперативних режимів роботи ЗРС. Запропоновано та узагальнено критерії оцінки енергоефективності режимів електричного гальмування з метою підвищення ефективності використання енергії електричних гальмувань.

Ключові слова: міський електричний транспорт, тягові підстанції, рекуперативне гальмування, контактна мережа, накопичувачі енергії, вимірювання, експериментальні дослідження.

PAYANOK OLEKSANDR, BABIY SERGIY, PROCENKO DMYTRO

Vinnytsia National Technical University

GRANYAK VALERY

Vinnytsia National Agrarian University

IMPROVEMENT OF OPTIMAL MANAGEMENT OF THE CITY ELECTRIC TRANSPORT ELECTRIC BRAKING ENERGY DISTRIBUTION AND USE

The paper presents the results of experimental measurements at the traction substations of the city electric transport ME "Vinnytsia Transport Company", an analysis of the electric (regenerative) braking energy distribution and use modes, generalization and distribution of the obtained measurement results to the entire system of the traction power network. During the research, it was confirmed the fact that the rectified voltage values at some traction substations in the city of Vinnytsia exceed the established normative value even in the recovery absence, which complicates the use of regenerative braking modes on individual sections of the contact network and requires the search for other options for the distribution and electric braking energy use. The implementation of regenerative braking modes in the conditions of power supply of urban electric transport depends on the peculiarities of its power system operation. It consists in the fact that traction networks and substations of urban ground electric transport operate under conditions significantly different from the conditions of stationary power electrical installations operation. Power supply systems of urban electric transport as a whole and especially individual feeder zones of contact network electrified sections are characterized by load unevenness. This is explained by: uneven power consumed by electric city transport (starting according to automatic characteristics, coasting, braking); different speeds of trams and trolleybuses, as a result, different consumed energy; the dependence of the traction substations feeders load location of electric transport on the power supply area; the number and variety of types of transport used in the electric economy; their traffic intensity and the nature of the traffic schedule; transport management technique and its type and other factors.

Criteria for evaluating the energy efficiency of electric braking modes have been formed and summarized in order to increase the efficiency of electric braking of the electrotechnical complex "power supply system - electric transport of the city" energy use. Further research is aimed at finding the most rational technical and organizational measures and their implementation in the city electric transport power supply system.

Key words: urban electric transport, traction substations, regenerative braking, contact network, energy storage, measurements, experimental studies.

Постановка проблеми

Беззаперечно актуальним питанням як світової енергетики, так і енергетичної системи нашої країни є помірковане зниження електроспоживання всіх електроприймачів. В складних реаліях сьогодення нашої країни, в умовах періодичних вимушених відключень ділянок енергосистеми та повсякчасного здорожчання енергоносіїв, вагому частку яких складає саме електрична енергія, питання пошуку та впровадження механізмів ощадливого, ефективного використання використаної електричної енергії та пошуку додаткових джерел електричної енергії набуває особливої гостроти.

Важливим та відповідальним споживачем електроенергії є міський електричний транспорт. Щороку в салони, наприклад, вінницького транспорту загального користування заходить понад 150 млн пасажирів, 70% з яких перевозить саме пасажирський електротранспорт [1]. Для господарства міського електричного транспорту, в якому енергетична складова в даний час складає 30–50 % від загальних витрат комунальних підприємств в цілому, питання зниження енерговитрат шляхом створення та вдосконалення високотехнологічних зразків транспортних засобів і впровадження енергоефективних режимів їх роботи ніколи не втрачало своєї актуальності.

Одним із основних напрямків зменшення споживання електроенергії міським електричним транспортом є, так би мовити, «вторинне» використання потенційно запасеної кінетичної енергії під час електричних гальмувань засобів рухомого складу шляхом повернення її в мережу або передачу в накопичувачі енергії (НЕ) [2]. При такому гальмуванні тролейбус/трамвай може повертати до 30% спожитої ним енергії із одночасним істотним зниженням зносу механічних гальмівних пристроїв.

Аналіз останніх джерел

Тривалий час проблема ефективності електропостачання електричного транспорту залишається предметом досліджень великого кола вчених та інженерів. Проблеми передачі енергії в тягову мережу у випадку електричного гальмування електротранспорту розглядалися неодноразово [3–6], проте до сьогодні вирішені частково. Відсутність можливості синхронізувати процеси регенерації електричної енергії та її умовно одночасне споживання різними засобами рухомого складу (ЗРС) потребує пошуку технічних та організаційних рішень щодо підвищення ефективності використання енергії електричних гальмувань. Серед існуючих праць за останній час, в яких пропонуються рішення вище згаданого питання, досить вагома частка досліджень присвячена саме ефективності електропостачання залізничного транспорту. Так, наприклад, в роботі [7] запропоновано результати досліджень щодо підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях постійного струму шляхом використання накопичувачів електричної енергії в системі тягового електропостачання та на ЗРС. В роботі [8] науковцями проведено аналіз експериментальних досліджень ефективності роботи інверторних підстанцій системи тягового електропостачання залізничного транспорту постійного струму в режимі рекуперації енергії і встановлено, що повернення надлишкової енергії рекуперації поїздів в мережу не забезпечує її оптимального розподілу та належного рівня напруги в тяговій мережі. В джерелі [9] запропоновано огляд методів розрахунку режимів тягових навантажень та рекуперативного гальмування міського електричного транспорту (МЕТ), які не позбавлені недоліків, оскільки не дають можливості враховувати ймовірність відхилень графіків руху засобів рухомого складу (ЗРС) та важкі умови роботи в системі електропостачання.

Метою роботи є проведення детального аналізу режимів рекуперативного гальмування ЗРС МЕТ, узагальнення та поширення отриманих експериментальних результатів вимірювань в системі електропостачання МЕТ КП «ВТК» міста Вінниці та розробка критеріїв оцінки енергоефективності режимів електричного гальмування електротехнічного комплексу «система тягового електропостачання – МЕТ».

Виклад основного матеріалу

Виходячи із закону збереження енергії, запасеної під час руху ЗРС, кінетичну енергію завжди можна перетворити на інший вид енергії. Реалізація режимів регенеративного гальмування в умовах електропостачання міського електричного транспорту залежить від особливостей експлуатації його. Тягові мережі та підстанції МЕТ працюють в суттєво відмінних умовах на відміну від стаціонарного силового електричного обладнання. Окремі фідерні ділянки та лінії контактної мережі системи електропостачання МЕТ характеризуються нерівномірністю навантажень. Причинами цього є:

- нерівномірність споживання потужностей МЕТ, обумовлена чергуванням режимів прискорення, вибігу та гальмування;
- різноманітність та зміна в широких межах швидкостей руху засобів рухомого складу, відповідно, зміна споживаної електричної енергії в широких межах;
- залежність навантажень тягових підстанцій від місця розташування ЗРС на ділянці контактної мережі;
- кількість та різноманітність типів ЗРС, які використовуються в комунальному підприємстві;
- одночасне суміщення на одній ділянці контактної мережі різних типів ЗРС (різні типи тролейбусів і трамваїв);
- інтенсивність руху ЗРС та характер графіку (розкладу) руху;
- техніка керування ЗРС та іншими факторами [10].

До вище вказаних особливостей варто додати, що в трамвайно-тролейбусному господарстві зокрема міста Вінниці одночасно експлуатується декілька типів ЗРС, кожен з яких характеризується своїми електричними та динамічними показниками.

Умови роботи пристроїв електропостачання при рекуперації, на відміну від режиму тяги, багато в чому залежать та визначаються рівнем напруги. В режимі тяги рівень напруги в контактній мережі впливає на швидкість ЗРС, пропускну здатність ділянки контактної мережі та інші показники. Тоді як в режимі рекуперативного гальмування відповідність значень випрямленої напруги необхідним експлуатаційним (нормованим) значенням визначає не лише економічні показники, але й саму можливість реалізації даного

виду електричного гальмування [11].

Крім того, слід пам'ятати, що значення випрямленої напруги на шинах тягових підстанцій напряму залежить від кількості ЗРС на ділянці контактної мережі. Коли тягове навантаження відсутнє, то напруга на вихідних шинах тягової підстанції визначається лише характеристиками загального режиму роботи енергосистеми, зокрема, залежить від навантажень інших тягових підстанцій. При зростанні тягового навантаження підстанції та незмінній напрузі холостого ходу напруга на її шинах зменшується рівномірно прикладеному навантаженню.

Істотне значення для реалізації режимів електричного гальмування має розподіл напруги вздовж контактної мережі (КМ). При відсутності рекуперації напруги на струмоприймачах ЗРС, що знаходяться в режимі тяги, завжди є нижчими значень U_{xx} тягових підстанцій, а у випадку рекуперації вона може бути вищою U_{xx} як на струмоприймачах ЗРС, так і на шинах тягових підстанцій, як це показано на рис. 1.

На рис. 1 наведені такі позначення: ТП – тягова підстанція МЕТ; КМ – контактна мережа; ΔU – допустиме падіння напруги в контактній мережі МЕТ; $U_{ш}$ – напруги на шинах тягової підстанції; U_m – напруги в контактній мережі МЕТ; U_1-U_8 – рівні напруг в контактній мережі МЕТ при появі ЗРС в режимі споживання електроенергії; $U_{p1}-U_{p2}$ – рівні напруг в контактній мережі МЕТ при появі ЗРС в режимі рекуперації електроенергії; $I_{зрс1}-I_{зрс8}$ – струми навантаження ЗРС; $I_{рзрс1}-I_{рзрс2}$ – струми рекуперації ЗРС.

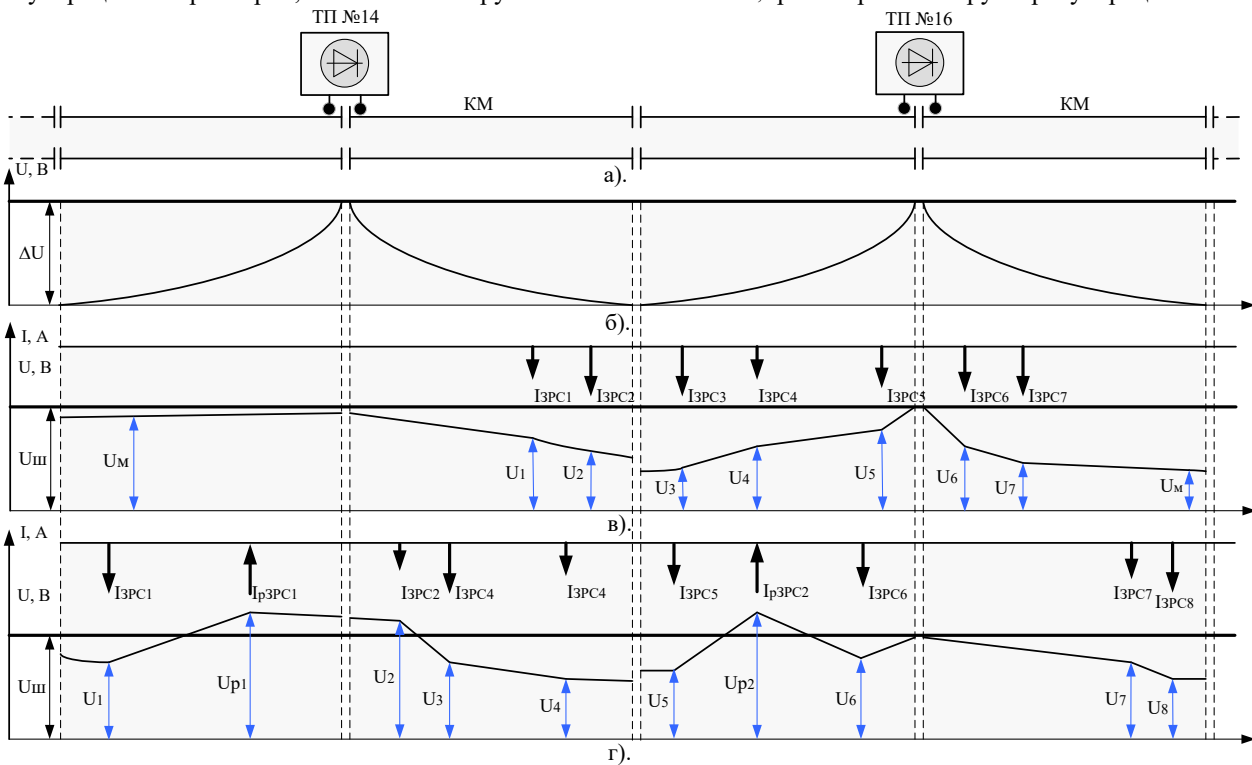


Рис. 1. Особливості розподілу напруги та струмів на ділянках КМ МЕТ: а) принципова схема живлення ділянок контактної мережі; б) характер зміни рівня напруги у випадку рівномірного розподілу навантажень; в) графік розподілу напруги та струмів в режимі споживання; г) графік розподілу напруги та струмів при поєднанні режимів споживання та рекуперації

Розподіл навантажень між паралельно працюючими підстанціями, втрати електроенергії в тяговій мережі, значення струмів короткого замикання та напруга на струмоприймачах ЗРС (особливо в режимі рекуперації) також залежать від напруги на шинах тягової підстанції (див. рис. 1). Нормовані значення напруги контактної мережі і трансформаторних підстанцій приведені в табл. 1 [11].

Таблиця 1

Нормовані значення напруги контактних мереж і тягових підстанцій МЕТ

Вид транспорту	Значення напруги, В				
	Тягова підстанція		Контактна мережа		
	$U_{ном.}$	$U_{xx.}$	$U_{ном.}$	$U_{min.}$	$U_{max.}$
Сумісне електропостачання трамваїв і тролейбусів	600	630	550	400	700; 720 (режим рекуперації)

Відповідно до нормованих значень напруга в тяговій мережі під час проведення рекуперативного гальмування не повинна перевищувати 720 В, що потребує підтвердження шляхом проведення натурних вимірювань.

Для забезпечення режиму рекуперативного гальмування допустиме значення напруги на струмоприймачі ЗРС не повинно перевищувати її максимального значення U_{max} :

$$U_{max} = U_{ш} + I_p \cdot R, \quad (1)$$

де $U_{ш}$ – напруга на шинах тягової підстанції, В; R – опір контактної мережі на ділянці між споживаючим та рекуперуючим ЗРС, Ом; I_p – максимально можливий струм рекуперації, А, який в свою чергу може бути визначений згідно з [9]:

$$I_p = I_{p,сеп.} \cdot n \cdot \left[\frac{z_p \cdot \sqrt{k_{эф.}^2 - 1}}{\sqrt{n}} - 1 \right], \quad (2)$$

де $I_{p,сеп.}$ – середнє значення струму ЗРС за час рекуперації, А; n – кількість ЗРС на ділянці контактної мережі; z_p – функція ймовірності $p_{дон.}$, яка визначається з таблиць інтегралів ймовірностей ($z_p = 3,1$ за $p_{дон.} = 10^{-3}$; $z_p = 4,3$ за $p_{дон.} = 10^{-5}$); $k_{эф.}$ – коефіцієнт ефективності струму ЗРС в режимі рекуперації.

Варто враховувати, що середнє значення струму ЗРС за час рекуперації $I_{p,сеп.}$ залежить від багатьох супутніх чинників, зокрема базового струму ЗРС (взимку, влітку), середнього струму власних потреб ЗРС (взимку, влітку), поправки на геометрію ділянки дорожнього полотна (підйоми, нахили, рівномірна горизонталь), врахування багатопускових режимів ЗРС в різних умовах руху, поправки на експлуатаційну швидкість ЗРС; врахування довжини перегону між зупинками.

Визначення кількості n ЗРС, які можуть працювати в режимі рекуперації, залежить від значення напруги на струмоприймачах. У випадку, коли напруга в режимі рекуперації має максимально допустиме значення, то враховуються тільки ЗРС, що знаходяться на конкретній ділянці. Якщо напруга в режимі рекуперації має значення нижче максимального, то можна враховувати всі ЗРС, які отримують живлення від окремої ТП.

Проведення точних розрахунків для забезпечення рекуперативного/регенеративного гальмування кожної окремої енергосистеми міста має бути пов'язане перш за все із врахуванням реальних рівнів напруги на тягових підстанціях та ЗРС. Саме тому в розрізі даного питання були проведені багаторазові експериментальні заміри напруг в контактній мережі тягових підстанцій КП «ВТК» міста Вінниці.

Спостереження різкозмінних навантажень тягових підстанцій міського електричного транспорту дозволили отримати підтвердження зміни випрямленої напруги різних ділянок контактної мережі в досить широких, а в окремих випадках, недопустимих межах. Приклад осцилограми форми кривої випрямленої напруги для однієї з досліджуваних ТП, за умови перебування на секціонованій ділянці контактної мережі одночасно декількох одиниць електричного транспорту, наведений на рис. 2.

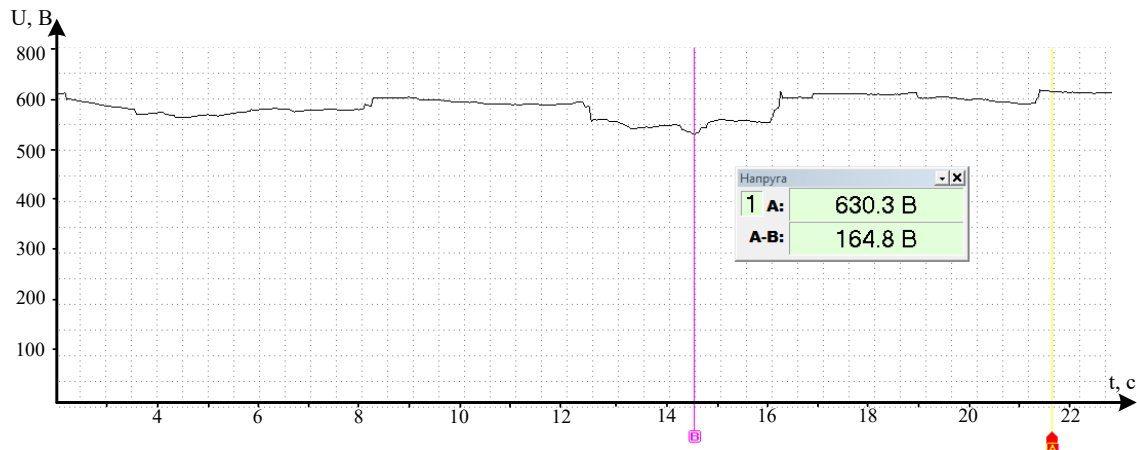


Рис. 2. Приклад осцилограми випрямленої напруги ТП

Приклад збільшення тягового навантаження та характер зміни при цьому випрямленої напруги в контактній мережі тягової підстанції приведений на рис. 3.

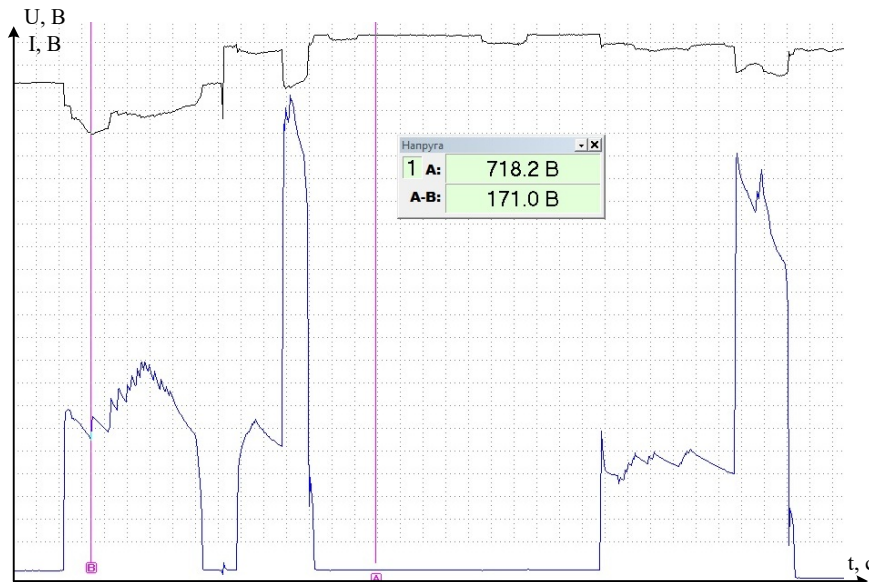


Рис. 3. Приклад осцилограми зміни навантаження та випрямленої напруги ТП

Під час вимірювань та аналізу отриманих даних використовувався метод практичного аналізу отриманих осцилограм та метод аналізу, заснований на застосуванні спеціальних приладів-аналізаторів [11]. Окремим та важливим етапом дослідження було проведення вимірювань вздовж ділянки контактної мережі шляхом розташування вимірювального обладнання безпосередньо на одному із ЗРС.

Аналізуючи приведені графіки перехідних процесів можна чітко простежити особливість системи електропостачання, яка характеризується неперервною зміною місць прикладення електричних навантажень у відповідності до руху ЗРС вздовж лінії. Вимірюваннями встановлено, що рівень випрямленої напруги в контактній мережі більшості ТП під час роботи в найбільш навантажені та «холості» години доби коливається в межах від 430 до 640 В.

Дослідженнями підтверджено, що значення випрямленої напруги на деяких тягових підстанціях КП «ВТК» міста Вінниці перевищують встановлене нормативне значення навіть за умов відсутності рекуперативних режимів роботи ЗРС і подекуди досягають 720-730 В. (рис. 4).

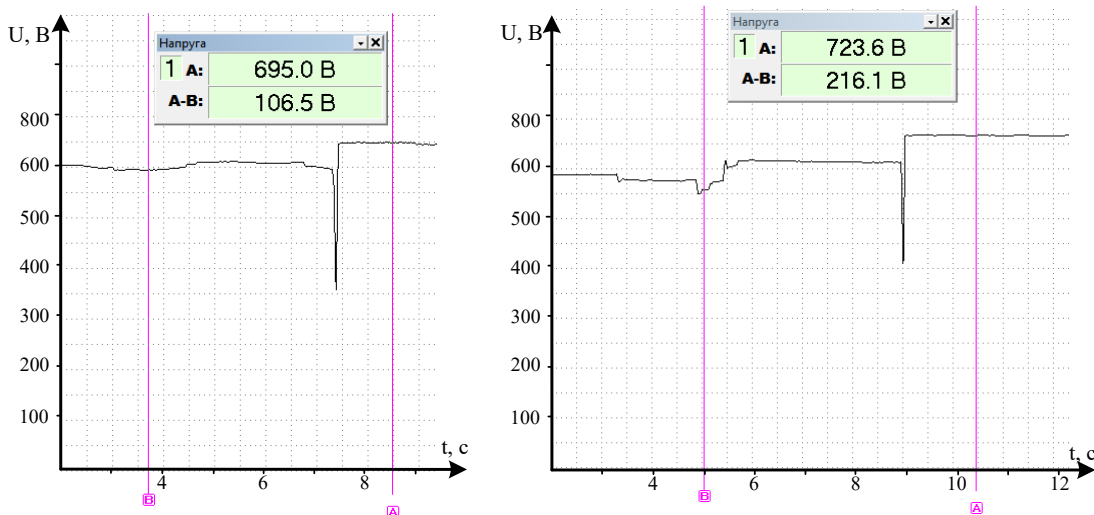


Рис. 4. Осцилограми зареєстрованих перевищень нормованих значень напруги ТП

Запропоновані графіки додатково ілюструють особливість побудови контактної мережі міського електричного транспорту, яка полягає в секціонуванні (розділенні) її ділянок за допомогою ізоляторів по всій довжині лінії. Слід відзначити, що в умовах КП «Вінницька транспортна компанія» серед множини існуючих підстанцій є такі, що виконують електропостачання тільки трамвайних або тролейбусних (одноагрегатні ТП) маршрутів та одночасно тролейбусних і трамвайних маршрутів МЕТ (дво- або трьохагрегатні ТП). Це, в свою чергу, накладає додаткові вимоги до розрахунку та проведення режимів рекуперативного/регенеративного гальмування за умов наявності на ділянках контактної мережі декількох різнотипних ЗРС.

Аналіз проведених досліджень показав, що зміни струмів навантаження ЗРС обумовлені переважно двома групами чинників: перша група викликає дискретні зміни, а друга – неперервні та випадкові. Перша

група включає в себе такі фактори як відстань між тяговими підстанціями, рельєф та профіль шляху, зміна ваги ЗРС (заповнення салону), чергування типу та потужності ЗРС. До другої групи слід віднести зміни кількості ЗРС та їх швидкісні режими руху на певній ділянці контактної мережі при заданій густині руху, напруга на шинах тягових підстанцій, реактивні опори в колах випрямлячів та режими роботи всієї групи ЗРС [11].

З огляду на можливі труднощі реалізації режиму рекуперативного гальмування найбільш оптимальним під час рекуперації є такий режим, при якому вся регенована ЗРС енергія передається в неподалік розташований накопичувач енергії, а в момент розряду НЕ – в максимально можливій мірі повертається найближчому ЗРС, що працює в режимі тяги або використовується для власних потреб цього ж ЗРС. Виходячи з цього принципу, найбільш оптимальним з точки зору зниження втрат, є розміщення НЕ поблизу зупинки (де завжди мають місце (найдовші) режими гальмування та тяги) або безпосередньо на ЗРС.

Зрештою, фундаментальною задачею системи керування розподілом та використанням енергії електричних гальмувань ЗРС є управління регенерацією електроенергії та її акумулюванням для максимальної ефективності всієї системи електропостачання за рахунок декомпозиції максимальної кількості позитивних сторін кожного з можливих варіантів використання енергії, що виробляється ЗРС в режимі електродинамічного гальмування, та вибору найбільш раціонального способу використання цієї енергії в складній електромеханічній системі «система електропостачання – електротранспорт міста» [12]. Розробка єдиної системи управління енергоспоживанням та миттєвою потужністю МЕТ під час електричних гальмувань потребує врахування та регулювання критеріїв енергоефективності режимів електричного гальмування, серед яких можна виділити такі:

- дотримання швидкісних діапазонів та режимів руху (величина сповільнення, час гальмування) ЗРС на перегонах між зупинками;
- контроль за якістю та стабільністю напруги контактної мережі, яка може змінюватись в широких межах (підтверджено вимірюваннями);
- забезпечення наявності споживача(ів) регенованої енергії (НЕ або ЗРС) для забезпечення можливості подальшого її розподілу та використання;
- оцінка ефективності енергообмінних процесів між структурними елементами енергосистеми ЗРС;
- забезпечення необхідних електричних характеристик накопичувачів енергії на основі їх функціонального призначення (оцінка енергоємності бортових НЕ, реалізація великих потужностей накопичення та повернення відносно великих енергій за відносно короткий час);
- врахування можливого споживання електроенергії на власні потреби під час гальмування.

Більш висока швидкість, інтенсивність сповільнення, час гальмування, вага ЗРС та менше допоміжне навантаження безпосередньо перед зупинкою збільшують величину енергії гальмування та можливість її подальшого розподілу і використання.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведено аналіз режимів розподілу та використання енергії електричних гальмувань ЗРС МЕТ, узагальнення та поширення отриманих результатів вимірювань на всю систему тягової електромережі. Під час досліджень отримано підтвердження того, що значення випрямленої напруги на деяких тягових підстанціях міста Вінниці перевищують встановлене нормативне значення навіть за умови відсутності рекуперативних режимів роботи ЗРС, що ускладнює використання режимів рекуперативного гальмування на окремих ділянках контактної мережі МЕТ. Сформовано та узагальнено критерії оцінки енергоефективності режимів електричного гальмування електротехнічного комплексу «система електропостачання – електротранспорт міста».

Література

1. КП «Вінницька транспортна компанія». Загальна інформація. URL: <https://2021.vmr.gov.ua/MunicipalEnterprise/Lists/KPVTK/Default.aspx>.
2. Паянок О.А. Використання накопичувачів енергії в системі тягового електропостачання / О.А. Паянок // Матеріали XLIX регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. – м. Вінниця, 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/9094/7495>.
3. Сопов В. И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава / В. И. Сопов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. URL: <http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43>.
4. Босий Д. О. Баланс електричної енергії тягової підстанції постійного струму за різних рівнів несиметрії напруги системи зовнішнього електропостачання / Д. О. Босий, Д. Р. Земський // Східно-Європейський журнал передових технологій. Енергосберегающие технологии и оборудование. – 2014. – № 2/8 (68). – С. 52–57.

5. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий ; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.
6. Саблін О. І. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – Вып. 38. – С. 186–189.
7. Пасько О. В. Розробка методів і засобів підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях постійного струму / О. В. Пасько, Р. Є. Тананян // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків, 2017. – Випуск 173. – С. 167–175.
8. Саблін О.І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О.І. Саблін, Д.О. Босий, В.Г. Кузнецов, М.О. Баб'як, С.М. Косарев, П.В. Губський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73–78.
9. Павленко Т. П. Електропостачання транспорту : навч. посібник / Т. П. Павленко, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 216 с. – ISBN 978-966-695-547-3.
10. Паянок О.А. Дослідження гармонічного складу напруг в контактній мережі постійного струму тягових підстанцій міста / О.А. Паянок // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 84–89.
11. Мокін Б.І. Регулювання спектра напруги тягових підстанцій електротранспорту : [монографія] / Б.І. Мокін, О.А. Паянок. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 116 с. – ISBN 978-966-641-691-2.
12. Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности гибридного локомотива / А.М. Евстафьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 6–10.

References

1. КР «Vinnytska transportna kompaniia». Zahalna informatsiia. URL: <https://2021.vmr.gov.ua/MunicipalEnreprise/Lists/KPVTK/Default.aspx>.
2. Paianok O.A. Vykorystannia nakopychuvachiv enerhii v systemi tiahovoho elektropostachannia / O.A. Paianok // Materialy KhLIX rehionalnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii profesorsko-vykladatskoho skladu, spivrobotnykiv ta studentiv universytetu z uchastiu pratsivnykiv naukovo-doslidnykh orhanizatsii ta inzhenerno-tekhnichnykh pratsivnykiv pidpriemstv m. Vinnytsi ta oblasti. – m. Vinnytsia, 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/9094/7495>.
3. Sopov V. I. Sposoby povysheniia jeffektivnosti ispol'zovaniia jenerhii jelektricheskogo tormozheniia podvizhnogo sostava / V. I. Sopov // Onlajn Jelektrik: Jelektrojenergetika. Novye tehnologii, 2012. URL: <http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43>.
4. Bosyi D. O. Balans elektrychnoi enerhii tiahovoi pidstantsii postiinoho strumu za riznykh rivniv nesymetrii napruhy systemy zovnishnoho elektropostachannia / D. O. Bosyi, D. R. Zemskiy // Skhidno-Yevropejskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. Enerhosberehaiushcheye tekhnolohyy y oborudovanye. – 2014. – № 2/8 (68). – С. 52–57.
5. Sychenko V. H. Yakist elektrychnoi enerhii u tiahovykh merezhakh elektryfikovanykh zaliznyts : monohrafiia / V. H. Sychenko, Yu. L. Saienko, D. O. Bosyi ; Dnipropetrovskiy natsionalnyi universytet zaliznychnoho transportu im. akademika V. Lazariana. – Dnipropetrovsk : Standart-Servis, 2015. – 344 s.
6. Sablin O. I. Analiz kachestva rekupeiruemoj jelektrojenerhii v sisteme jelektricheskogo transporta / O. I. Sablin // Vestnik NTU«ХПИ». – 2013. – Вып. 38. – С. 186–189.
7. Pasko O. V. Rozrobka metodiv i zasobiv pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannia rekupeatyvnoho halmuvannia na zaliznytsiakh postiinoho strumu / O. V. Pasko, R. Ye. Tananian // Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu. – Kharkiv, 2017. – Vypusk 173. – С. 167–175.
8. Sablin O.I. Efektyvnist rekuperatsii elektroenerhii v systemi elektrottransportu z invertornymy tiahovymy pidstantsiiamy postiinoho strumu / O.I. Sablin, D.O. Bosyi, V.H. Kuznetsov, M.O. Babiak, Ye.M. Kosariev, P.V. Hubskey // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2016. – № 2. – С. 73–78.
9. Pavlenko T. P. Elektropostachannia transportu : navch. posibnyk / T. P. Pavlenko, N. P. Lukashova ; Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. – Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2021. – 216 s. – ISBN 978-966-695-547-3.
10. Paianok O.A. Doslidzhennia harmonichnoho skladu napruh v kontaktii merezhi postiinoho strumu tiahovykh pidstantsii mista / O.A. Paianok // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2008. – № 1. – С. 84–89.
11. Mokin B.I. Rehuliuвання спектра напруги тягових підстанцій електротранспорту : [монографія] / Б.І. Мокін, О.А. Паіанок. – Вінниця : VNTU, 2017. – 116 с. – ISBN 978-966-641-691-2.
12. Evstaf'ev A.M. Povyszenie jenergeticheskoy jeffektivnosti gibridnogo lokomotiva / A.M. Evstaf'ev // Jelektronika i jelektrooborudovanie transporta. – 2015. – № 2. – С. 6–10.