

УДК 621.3:629.4:625.42

РОЗРОБКА ПІДХОДУ З ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ БОРТОВОГО ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Сулим А.О.

APPROACH DEVELOPMENT FOR PARAMETERS DETERMINATION THE OF ONBOARD ENERGY CAPACITIVE STORAGE OF METRO ROLLING STOCK

Sulym A.

У статті розглянуто подальший розвиток рухомого складу метрополітену, в частині підвищення його енерго-ефективності за рахунок застосування накопичувачів енергії. За результатами аналізу попередніх досліджень встановлено, що в метрополітені найбільш раціональним є впровадження бортових накопичувачів енергії ємнісного типу, зібраних з конденсаторних модулів (іоністорів). Розглянуто одне з актуальних питань – розробка підходу з визначення необхідних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для заданої ділянки експлуатації рухомого складу метрополітену. Основна ідея підходу полягає у визначенні параметрів для заданої умови ведення рухомого складу, що відповідає режиму максимального енергообміну. Підхід включає наступні етапи досліджень: вибір ділянки експлуатації, експериментальне дослідження під час експлуатації рухомого складу в режимі максимального енергообміну, обробка отриманих масивів даних, аналіз характеристик за результатами обробки масивів даних та безпосереднє визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії за запропонованими критеріями. З використанням розробленого підходу визначено параметри бортового ємнісного накопичувача енергії для заданої ділянки експлуатації рухомого складу метрополітену.

Ключові слова: рухомий склад метрополітену, система рекуперації, ємнісний накопичувач енергії, конденсаторний модуль, іоністор.

Постановка проблеми. На даний час метрополітени України не забезпечені необхідною кількістю вагонів, а існуючий парк рухомого складу має значну зношеність. В комунальному підприємстві (КП) «Київський метрополітен» станом на 2016 рік близько 35 % рухомого складу має термін експлуатації більший ніж встановлений заводом-виробником, насамперед це вагони метрополітену серії «Е». Тому перед метрополітенами України стоїть нагальна проблема оновлення парку тягового рухомого складу шляхом закупівлі вагонів нового покоління або проведенні модернізації існуючих.

Необхідність розв'язання вищезазначеної проблеми підтверджується основними положеннями Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 року № 1555-р та Комплексної програми оновлення рухомого складу України на 2008-2020 роки, яку затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2008 року № 1259.

Відповідно до сучасних вимог, одним з ключових питань при оновленні рухомого складу є зменшення енергетичних витрат на тягу за рахунок впровадження на ньому енергозберігаючих технологій та енергоефективних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що перші кроки в цьому напрямку вже зроблені. В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу, метрополітенами України поступово вводиться в експлуатацію новостворений та модернізований рухомий склад. Головними відмінностями даного рухомого складу є впровадження на ньому енергозберігаючого обладнання, насамперед систем рекуперації, мікропроцесорної системи управління, ефективного асинхронного приводу. За результатами досліджень [1] відомо, що модернізація існуючого рухомого складу у відношенні до п'ятивагонного зчепу дозволяє скоротити споживання електроенергії з мережі на рівні 40 %.

З аналізу багатьох досліджень відомо [2–5], що є можливість додаткового заощадження за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперації. За існуючої інфраструктури системи тягового енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперації має імовірнісний характер, як наслідок, існує проблема реалізації надлишкової електроенергії за відсутності споживачів в зоні рекуперації [2, 4, 6]. Одним з основних шляхів розв'язання зазначеної проблеми є впровадження систем накопичення енергії [2–6]. Серед існуючих

систем накопичення енергії найбільшу перспективу мають ємнісні накопичувачі енергії (ЄНЕ), зібрані з конденсаторних модулів (іоністорів) [3–9]. Основними перевагами використання ЄНЕ є відносно невисока ціна, надійність, значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, високий коефіцієнт повернення електроенергії, екологічність, не потребують технічного обслуговування. Серед додаткових переваг використання ЄНЕ є вібростійкість, низький внутрішній опір, відсутність небезпеки перегріву та зміни технічних характеристик при низьких і високих температурах.

З аналізу робіт [2–5, 8, 10] відомо, що ЄНЕ можна розміщати в різних місцях системи тягового енергозабезпечення метрополітену: на шинах тягових підстанцій, на ділянках контактної мережі, на зупинках (станціях), на рухомому складі. Аналіз робіт [3–5, 8, 9] дозволив встановити, що найбільш раціональним є бортове розміщення ЄНЕ на рухомому складі метрополітену. Основними перевагами бортового розміщення ЄНЕ є максимальна ефективність енергообміну (втрати електроенергії зводяться до мінімуму), підвищення пропускної здатності в «години пік» (стабілізація напруги контактної мережі), забезпечення автономного ведення рухомого складу під час аварійного відключення живлення контактної мережі. Отже в даній роботі розглядається підвищення ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування за рахунок розміщення ЄНЕ на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації.

Одним з ключових та маловивчених питань при цьому є визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ для заданої ділянки експлуатації рухомого складу метрополітену. В попередніх дослідженнях [6, 9] визначення параметрів ЄНЕ пропонується здійснювати за характеристикою кількості електроенергії рекуперації від швидкості початку гальмування. Даний підхід не враховує такі фактори, як профіль колії, наявність електропневматичного (комбінованого) гальмування, розподіл потужності та кількості електроенергії рекуперації під час експлуатації поїзда на заданій ділянці. Отже необхідна розробка іншого підходу, який дозволить врахувати вищевказані фактори.

Метою роботи полягає у розробці підходу щодо визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ для заданої ділянки експлуатації рухомого складу метрополітену.

Викладення основного матеріалу. Основна ідея запропонованого підходу полягає у визначенні параметрів бортового ЄНЕ шляхом аналізу характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперації для заданої умови експлуатації рухомого складу, що відповідає режиму максимального енергообміну. Під режимом максимального енергообміну мається на увазі заданий режим ведення рухомого складу метрополітену з максимальним завантаженням за умови дотримання «пікового» графіку руху. Запропонований підхід визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ включає наступні етапи:

1) вибір ділянки експлуатації рухомого складу метрополітену;

2) експериментальне дослідження енергетичних процесів під час експлуатації рухомого складу метрополітену в режимі максимального енергообміну;

3) обробка отриманих масивів даних;

4) аналіз характеристик за результатами обробки масивів даних;

5) безпосереднє визначення параметрів бортового ЄНЕ за запропонованими критеріями.

Перший етап полягає у виборі ділянки експлуатації рухомого складу метрополітену. З використанням зазначеного підходу визначення параметрів бортового ЄНЕ розглянуто на прикладі експлуатації рухомого складу метрополітену між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні.

Другий етап, який передбачає експериментальне дослідження під час експлуатації рухомого складу метрополітену в режимі максимального енергообміну, проведено з використанням дослідного комплексу. До складу комплексу входить вищезазначений поїзд та вимірювальна система, що встановлена на його борту. Вимірювальна система розроблена спеціалістами ДП «УкрНДІВ» для дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та поїздом в реальних умовах його експлуатації. До складу вимірювальної системи входять: персональний комп'ютер, аналого-цифровий перетворювач, блок комутації, блок узгодження та вимірювальні датчики. Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних, отриманих від вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному поїзді.

Осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху складу при його заданому режимі ведення з максимальним завантаженням між кінцевими станціями «Лісова–Академістечко–Лісова» Святошинсько-Броварської лінії за умов дотримання «пікового» графіку руху, приведені на рис. 1–2. Слід зазначити, що на осцилограмах (рис. 1–2) не показано час зупинки поїзда на станціях. В реальних умовах експлуатації згідно графіку руху час зупинки поїзда на станціях складає 30 секунд.

Третій етап передбачає обробку отриманих масивів даних. Обробка даних здійснюється на персональному комп'ютері за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО» [11]. За результатами обробки масивів даних визначено наступні показники для кожного режиму гальмування під час заданого режиму ведення поїзда між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії: швидкість початку гальмування ($V_{гал}$), середня та максимальна потужність гальмування ($P_{сер}$, P_{max}), а також кількість електроенергії рекуперації (A).

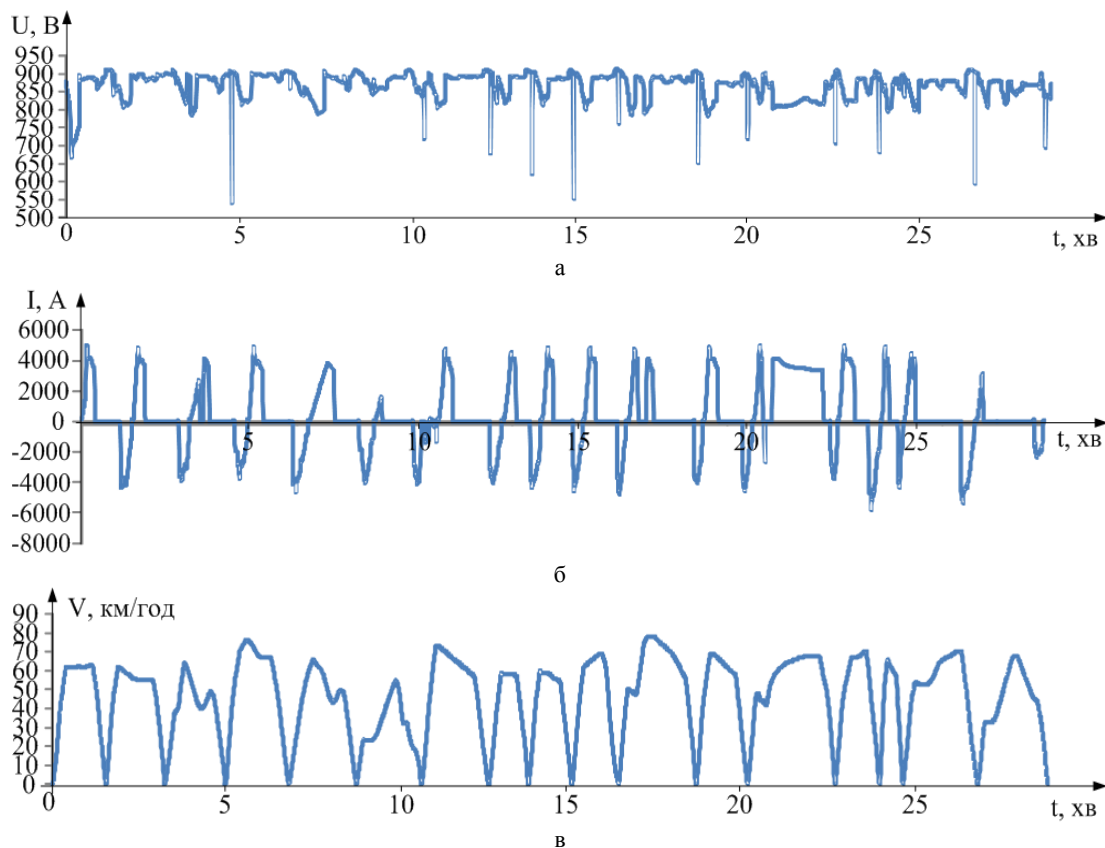


Рис. 1. Осцилограми під час експлуатації поїзда з системою рекуперації між станціями «Лісова–Академмістечко»:

а – напруга на струмоприймачі $U(t)$; б – струм поїзда $I(t)$; в – швидкість руху поїзда $V(t)$

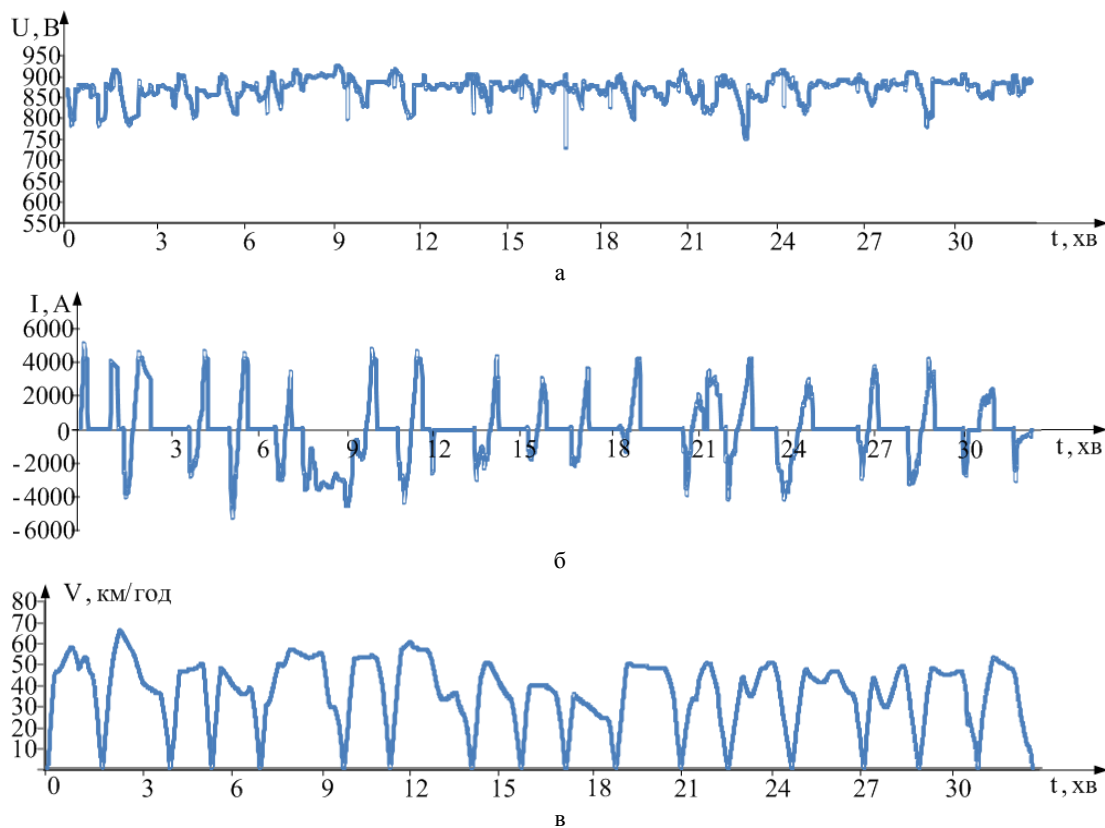


Рис. 2. Осцилограми під час експлуатації поїзда з системою рекуперації між станціями «Академмістечко–Лісова»:

а – напруга на струмоприймачі $U(t)$; б – струм поїзда $I(t)$; в – швидкість руху поїзда $V(t)$

Миттєва потужність рухомого складу для режиму рекуперативного гальмування визначається за виразом [12, 13]:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

Середня потужність електроенергії рекуперації визначається за виразом [13, 14]:

$$P_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N P_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k, \quad (2)$$

де N – загальна кількість інтервалів дискретизації в процесі досліджень; U_k , I_k – значення напруги та струму в момент часу t_k при дискретизації сигналів $u(t)$ і $i(t)$.

Кількість електроенергії рекуперації визначається за виразом [14, 15]:

$$A = \frac{\int_0^T P dt}{3,6 \cdot 10^6} = \frac{\sum_{k=1}^T U_k \cdot I_k \cdot \Delta t}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (3)$$

де T – час (період) досліджень; Δt – інтервал квантування обробки сигналів $u(t)$ і $i(t)$, що дорівнює в даній роботі 0,5 с.

Результати обробки масивів для заданих умов експлуатації поїзда, приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати обробки масивів даних

Досліджувана ділянка	$V_{\text{гал}}$, км/год	$P_{\text{сер}}$, кВт	P_{max} , кВт	A , кВт·год
Лісова–Чернігівська	63	1664	2496	9,17
Чернігівська–Дарниця	55	1419	2093	7,09
Дарниця–Лівобережна	49	1019	1969	6,64
Лівобережна–Гідропарк	67	1407	2719	10,81
Гідропарк–Дніпро	50	1191	2219	8,39
Дніпро–Арсенальна	55	1661	2364	6,39
Арсенальна–Хрещатик	32	465	945	2,13
Хрещатик–Театральна	57	1245	2208	7,21
Театральна–Університет	57	1541	2531	7,9
Університет–Вокзальна	54	1410	2733	6,85
Вокзальна–КПП	60	1519	3060	6,75
КПП–Шулявська	56	1462	2189	6,48
Шулявська–Берестейська	58	1555	2661	7,52
Берестейська–Нивки	51	1322	1904	4,98
Нивки–Святошино	70	2009	3713	11,91
Святошино–Житомирська	56	1383	2478	3,45
Житомирська–Академмістечко	70	1848	3437	12,26
Академмістечко–Житомирська	44	849	1299	3,78
Житомирська–Святошино	59	1397	2668	7,36
Житомирська–Святошино	59	1074	1843	4,16
Святошино–Нивки	43	1786	2565	7,93

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Нивки–Берестейська	57	1560	2901	9,08
Берестейська–Шулявська	66	1798	3835	42,48
Шулявська–КПП	37	784	1529	2,13
КПП–Вокзальна	67	1864	3376	10,12
Вокзальна–Університет	69	811	1285	1,92
Університет–Театральна	42	580	880	4,42
Театральна–Хрещатик	45	968	1819	4,02
Хрещатик–Арсенальна	45	925	1439	4,1
Арсенальна–Дніпро	49	1200	1888	5,65
Дніпро–Гідропарк	46	1061	1567	4,12
Гідропарк–Лівобережна	43	759	1629	3,78
Лівобережна–Дарниця	65	1436	3106	13,69
Дарниця–Чернігівська	53	1157	1961	5,94
Чернігівська–Лісова	61	929	1868	7,23
Лісова–Чернігівська	49	1388	2590	5,37
Чернігівська–Лісова	56	1322	3017	6,18

На четвертому етапі будуються та аналізуються характеристики за результатами обробки масивів. Встановлено, що кількість гальмувань для заданого режиму ведення рухомого складу з системами рекуперації складає 37 раз ($n=37$). За даними табл. 1 побудовано залежності середньої потужності гальмування та кількості електроенергії рекуперації від швидкості початку гальмування (рис. 3–4).

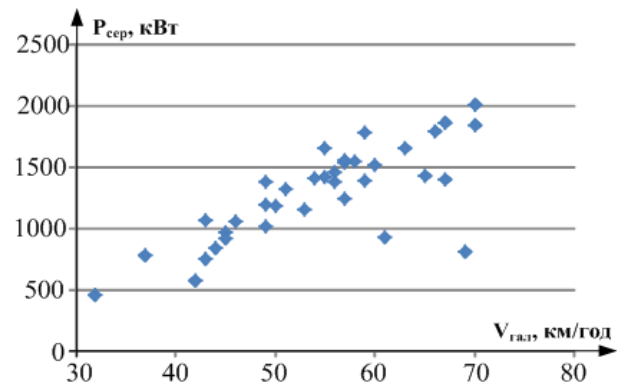


Рис. 3. Залежність середньої потужності від швидкості початку гальмування

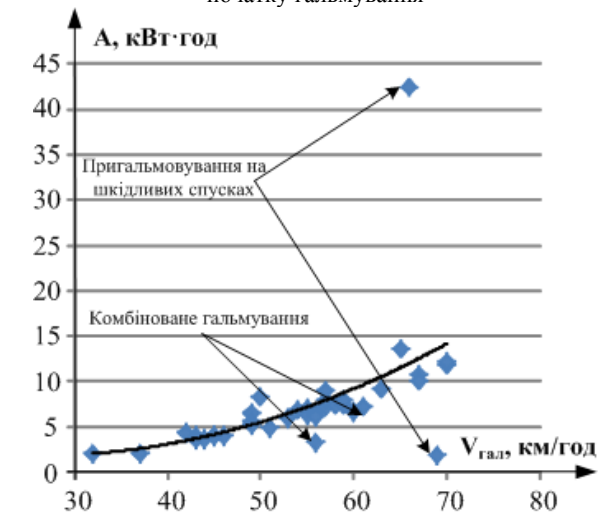


Рис. 4. Залежність кількості електроенергії рекуперації від швидкості початку гальмування

За результатами отриманих значень середньої потужності гальмування та кількості електроенергії рекуперації для кожного режиму гальмування визначається діапазон зміни даних величин. Отриманий діапазон розбивається на декілька піддіапазонів. Після чого для кожного піддіапазону визначається гістограма щільності розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації за формулою:

$$f = \frac{n_i}{n}, \quad (4)$$

де n_i – кількість гальмувань для досліджуваного піддіапазону.

Гістограми щільності розподілу середньої потужності гальмування та кількості електроенергії рекуперації зображено на рис. 5–6. Крім того, для кожного режиму гальмування (пригальмовування) за даними табл. 1 побудовано графіки максимальної потужності електроенергії гальмування (рис. 7).

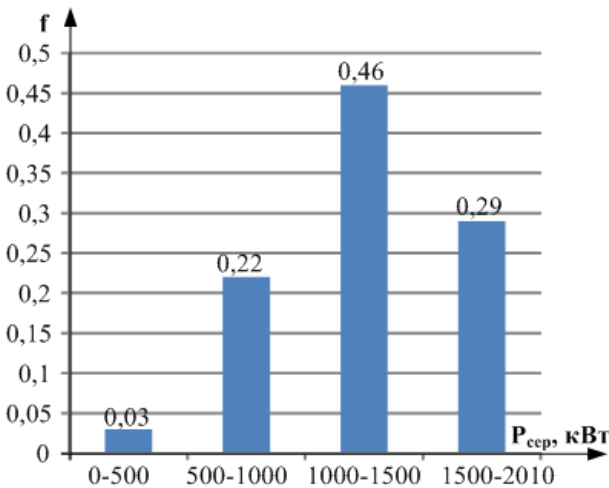


Рис. 5. Гістограми щільності розподілу середньої потужності електроенергії гальмування

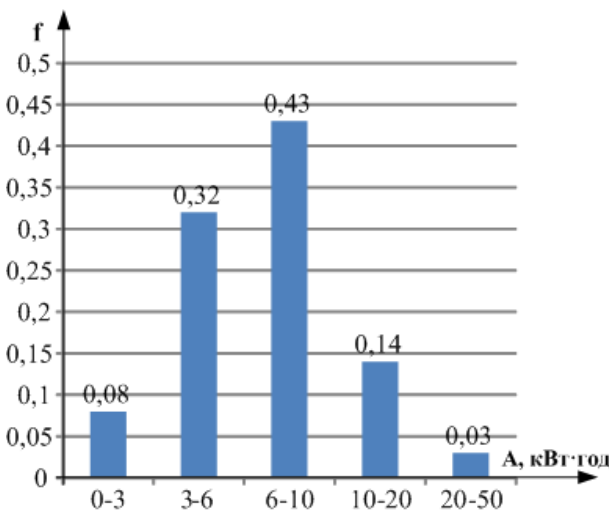


Рис. 6. Гістограми щільності розподілу кількості електроенергії рекуперації

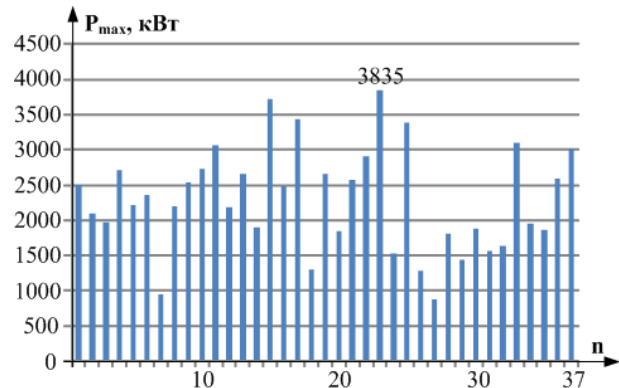


Рис. 7. Графіки максимальної потужності електроенергії гальмування

За результатами аналізу рис. 3–7 для заданих умов експлуатації рухомого складу встановлено наступне:

- середня потужність електроенергії гальмування знаходиться в діапазоні 465...2009 кВт; кількість електроенергії рекуперації – в діапазоні 1,92...44,61 кВт·год (рис. 3, 4);
- необхідна робоча енергоємність ЄНЕ для збереження повного об’єму електроенергії рекуперації при гальмуванні повинна складати не менше ніж 44,61 кВт·год (рис. 4);
- щільність розподілу середньої потужності гальмування та кількості електроенергії рекуперації змінюється за нормальним законом (рис. 5, 6);
- максимальна потужність електроенергії гальмування складає 3835 кВт (рис. 7).

П’ятий етап полягає у безпосередньому визначенні параметрів бортового накопичувача енергії за запропонованими критеріями. Критерії вибору параметрів бортового ЄНЕ запропоновано наступні:

- визначення номінальної потужності ЄНЕ здійснюється за середньою потужністю електроенергії гальмування поїзда на заданій ділянці;
- максимальна потужність ЄНЕ обирається за максимальним (піковим) значенням миттєвої потужності електроенергії рекуперативного гальмування;
- визначення робочої енергоємності ЄНЕ здійснюється в залежності від закону розподілу кількості електроенергії рекуперації: при рівномірному законі розподілу енергоємність визначається за максимальним значенням кількості електроенергії рекуперації (A_{max}) з n гальмувань, при інших законах – за середнім значенням ($A_{ср}$) з урахуванням середньоквадратичного відхилення (σ), тобто $A_{ср} + \sigma$. Знак «+» в критерії показує, що визначається одне значення енергоємності ЄНЕ, при якому враховується максимальна щільність розподілу кількості електроенергії. Середнє значення визначається для довірчого інтервалу вибірки рівного 0,95. Значення кількості електроенергії рекуперації, що не потрапляють в довірчий інтервал, вважаються промахом і при визначенні середнього значення не враховуються.

Алгоритм визначення параметрів бортового ЄНЕ з використанням запропонованого підходу зображено на рис. 8.

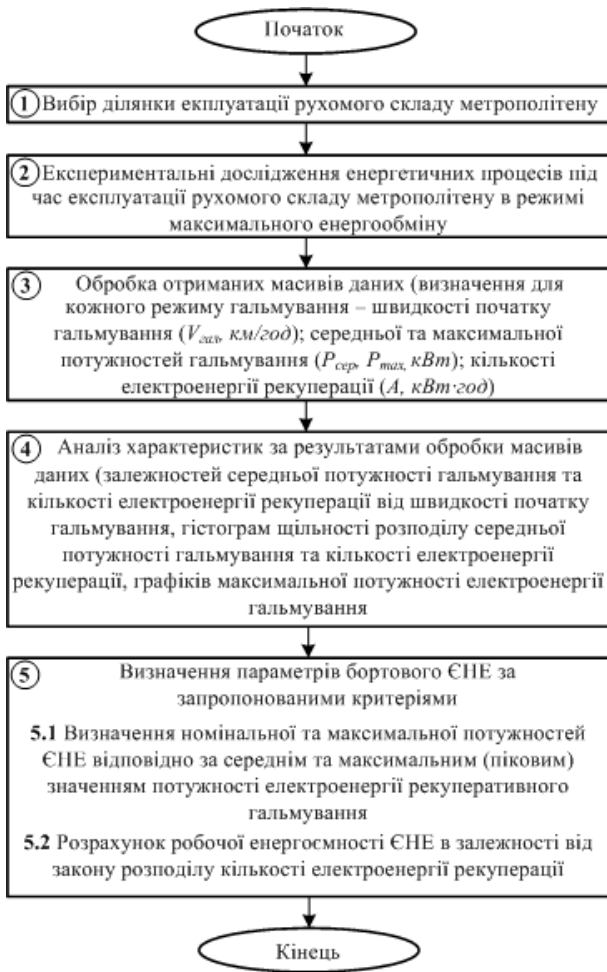


Рис. 8. Алгоритм визначення параметрів бортового емісійного накопичувача енергії

Результати розрахунків значень номінальної та максимальної потужності ЄНЕ для заданих умов ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації при використанні запропонованого підходу, приведено в табл. 2. Робочу енергоємність ЄНЕ визначено для довірчого інтервалу з урахуванням нормального закону розподілу, в якому виключається значення кількості електроенергії рекуперації, що дорівнює 42,48 кВт·год. За результатами досліджень встановлено, що для довірчого інтервалу $A_{ср}$ складає 6,58 кВт·год, σ – 2,82 кВт·год. Результати розрахунків робочої енергоємності ЄНЕ за розробленим підходом приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри бортового накопичувача

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	1314
Максимальна потужність, кВт	3835
Робоча енергоємність, кВт·год	9,4

Таким чином, величини номінальної та максимальної потужності, а також робочої енергоємності бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації поїзда за розробленим підходом повинні складати відповідно на рівні 1314 кВт; 3835 кВт; 9,4 кВт·год. Величина необхідної енергоємності для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації повинна складати не менше ніж 44,61 кВт·год.

Висновки. За результатами досліджень для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації встановлено наступне:

- середня потужність електроенергії рекуперації знаходиться в межах 465...2009 кВт; кількість електроенергії рекуперації – в межах 1,92...44,61 кВт·год;

- для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації потрібен ЄНЕ, енергоємність якого повинна складати не менше ніж 44,61 кВт·год;

- щільність розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації змінюється за нормальним законом;

- максимальна потужність електроенергії гальмування складає 3835 кВт.

На основі запропонованого підходу виконані дослідження, результати яких дозволили встановити, що для заданої ділянки експлуатації рухомого складу з системами рекуперації, номінальна потужність бортового ЄНЕ повинна складати на рівні 1314 кВт, максимальна потужність – 3835 кВт, робоча енергоємність – 9,4 кВт·год.

Література

1. Донченко А.В. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим, П. О. Хозя, О. О. Мельник // Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». – Кременчук, 2015. – Вип. 12. – С. 48–56.
2. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий: «Энергосберегающие технологии и оборудование». – Х., 2014. – Вип. 6/8 (72). – С. 9–13.
3. Шевлюгин М.В. Повышение энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения железных дорог с помощью накопителей энергии / М.В. Шевлюгин // журнал «Наука и техника транспорта». – Москва, 2007. – Вып. № 1. – С. 68–72.
4. Сулим А.А. Повышение эффективности энергообеспечения подвижного состава метрополитена с системами рекуперации путем применения емкостных накопителей энергии: дис. канд. техн. наук: 05.22.07. – Киев, 2015. – 188 с.
5. Жемеров Г.Г. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, Д.В. Тугай, О.И. Холод // научно-практический журнал «Электротехника і електромеханіка». – Харків, 2013. – № 1. – С. 41–49.
6. Щуров Н.И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н.И. Щуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2008. – Вып. № 1(51). – С. 99–104.

7. Устенко А.В. Использование накопителей энергии для улучшения параметров локомотивов / А.В. Устенко, О.В. Пасько // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків: Техностандарт, 2012. – № 10. – С. 4–6.
8. Черемисин В.Т. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности / В.Т. Черемисин, М.М. Никифоров, В.Л. Невезак // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – № 2 (6). – С. 48–52.
9. Васильев В.А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.07. – СПб., 2012. – 16 с.
10. Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта / А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов, М.В. Ярославцев // Транспорт Российской Федерации. – СПб., 2012. – № 3-4 (40-41). – С. 68–70.
11. Свідощо про реєстрацію авторського права на твір № 16669. Програмний комплекс для збору, відображення, запису та подальшої математичної обробки даних з аналого-цифрових перетворювачів у комп'ютеризованих вимірювальних комплексах («ЕЛЕКТРО») / Автор Сичов С.Д., авторські майнові права належать Сичов С.Д., ДП «УкрНДІВ», дата реєстрації 19.05.2006.
12. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том первый. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 534 с.
13. Костин Н.А. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока / Н.А. Костин, О.И. Саблин // науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка». – Харків, 2005. – № 1. – С. 97–100.
14. Костин Н.А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – К., 2014. – Вип. 3. – С. 15–23.
15. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др. – М.: Издательский центр «Академия». – 2006. – 464 с.
16. niya podvizhnogo sostava metropolitena s sistemami rekuperatsii putem primeneniya emkostnykh napokiteley energii Cand, Diss. [Improvement of power supply the effectiveness rolling stock equipped with recuperation system by using a capacitive energy storage]. Kyiv, 2015. 188 p.
17. Zhemerov G.G., Ilina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I. Sistemy elektrosnabzheniya metropolitena s sovremennymi poluprovodnikovymi preobrazovatelyami i napokiteleyami energii [The power supply systems of underground with modern semiconductor converters and energy storage]. Naukovo-praktychnyi zhurnal «Elektrotehnika i elektromekhanika» – Research and practice magazine «Electrical Engineering and electromechanics», 2013, no 1, pp. 41-49.
18. Shchurov N.I., Shcheglov K.V., Shtang, A.A. Primeneniye napokiteley energii v sistemakh elektricheskoy tyagi [The use of energy storage systems of electric traction]. Zbornik nauchnykh trudov NGTU [Proceedings of the NSTU], 2008, vol. 51, no. 1, pp. 99-104.
19. Ustenko A.V., Pasko O.V. Ispolzovanie napokiteley energii dlya uluchsheniya parametrov lokomotivov [The use of energy storage to improve the parameters of locomotives]. Lokomotiv-inform – Lokomotiv inform, 2012, no. 10, pp. 4-6.
20. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Nevezak V.L. Vybormest ustanovki napokiteley elektroenergii na poligone postoyannogo toka po kriteriyu energoeffektivnosti [The choice of installation sites of the drive power ground DC according to the criterion of efficiency]. Nauka i transport. Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta – Science and transport. Modernisation of railway transport, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 48-52.
21. Vasilyev V.A. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti elektropoyezdov postoyannogo toka Avtoreferat Diss. [Improving energy efficiency of electric trains DC]. Sankt-Peterburg, 2012. 16 p.
22. Shtang A.A., Spiridonov Ye. A., Yaroslavtsev M.V. Primeneniye napokiteley energii v sistemakh elektrosnabzheniya gorodskogo elektricheskogo transporta [The use of energy storage in power supply systems of urban electric transport]. Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport Russian Federation, 2012, vol. 40-41, no. 3-4, pp. 68-70.
23. Sychev S.D. Programnyi kompleks dlya zboru, vidobrazhennya, zapysu ta podalshoi matematychnoi obrobky danykh z analogo-tsyfrovykh peretvoriuvachiv u kompiuteryzovanykh vymiriuvalnykh kompleksakh («ELEKTRO») [The software package for collecting, displaying and subsequent mathematical processing of analog-digital converters in a computerized measuring complexes («ELECTRO»)]. The certificate of registration of copyright, no. 16669, 2006.
24. Neyman L.R., Demirchyan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Tom pervyy. [Theoretical bases of the electrical engineering. Tom first.]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 543 p.
25. Kostin N.A., Sablin O.I. Koeffitsiyent moshchnosti elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka [Power factor of the electric rolling stock DC]. Naukovo-praktychnyi zhurnal «Elektrotehnika i elektromekhanika» – Research and practice magazine «Electrical Engineering and electromechanics», 2005, no 1, pp. 97-100.
26. Kostin N.A., Nikitenko A.V. Avtonomnost rekuperativnogo tormozheniya – osnova nadezhnoy energoeffektivnoy rekuperatsii na elektropodvizhnom sostave postoyannogo toka [Autonomy of regenerative braking – the bases of reliable energy efficient recovery for electric roll-

References

ing DC]. Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine, 2014, issue 3, pp. 15-23.

15. Sleptsov M.A., Dolaberidze G.P., Prokopovich A.V. and other. Osnovy elektricheskogo transporta [Bases of electric transport]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 464 p.

Сулим А.А. Разработка подхода по определению параметров бортового емкостного накопителя энергии подвижного состава метрополитена

В статье рассмотрено дальнейшее развитие подвижного состава метрополитена в части повышения его энергоэффективности за счет применения накопителей энергии. По результатам анализа предыдущих исследований установлено, что в метрополитене наиболее рациональным является внедрение бортовых накопителей энергии емкостного типа, собранных из конденсаторных модулей (ионисторов). Рассмотрен один из актуальных вопросов – разработка подхода по определению необходимых параметров бортового емкостного накопителя энергии для заданного участка эксплуатации подвижного состава метрополитена. Основная идея подхода заключается в определении параметров для заданного условия ведения подвижного состава, который соответствует режиму максимального энергообмена. Подход состоит из следующих этапов исследований: выбор участка эксплуатации, экспериментальное исследование при эксплуатации подвижного состава в режиме максимального энергообмена, обработка полученных массивов данных, анализ характеристик по результатам обработки массивов и непосредственное определение параметров бортового емкостного накопителя энергии по предложенным критериям. С использованием разработанного подхода определены параметры бортового емкостного накопителя энергии для заданного участка эксплуатации подвижного состава метрополитена.

Ключевые слова: подвижной состав метрополитена, система рекуперации, емкостной накопитель энергии, конденсаторный модуль, ионистор.

Sulym A.O. Approach development for parameters determination of onboard energy capacitive storage of metro rolling stock.

In the article was considered further development of metro rolling stock concerning improvement of its energy efficiency as a result of capacitive storages use. According to previous researches results it was determined that installation of onboard capacitive storages assembled of capacitor units (supercapacitors) was the most reasonable for metro. One of current issued was considered – development of the approach for determination of the onboard capacitive storage necessary parameters for specified section of metro rolling stock operation. The main idea of the approach is to determine parameters for specified condition of the rolling stock operation that corresponds to the maximum energy exchange mode. Approach consists of the following stages of research: selection of a section, experimental research during the rolling stock operation in the maximum energy exchange mode, processing of the obtained data, analysis of the characteristics based on results of processed data and determination of the onboard capacitive storage parameters according to proposed criteria. According to the developed approach were determined parameters of the onboard energy capacitive storage for specified section of the rolling stock operation.

Key words: metro rolling stock, recuperation system, capacitive energy storage, capacitor unit, supercapacitor.

Сулим Андрій Олександрович – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування».

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 17.03.2017