

А.О. Сулим, П.О. Хозя, О.О. Мельник, О.С. Сіора, С.В. Шмаков

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ БОРТОВОГО ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ З УРАХУВАННЯМ ЗАДАНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В статті розглянуто подальший розвиток рухомого складу метрополітену в частині підвищення його енергоефективності за рахунок застосування сучасних енергозберігаючих електричних систем. Встановлено, що важливим напрямком з енергозбереження є впровадження систем накопичення енергії на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації. Аналіз існуючих систем накопичення дозволив встановити, що найбільшу перспективу мають ємнісні накопичувачі енергії, зібрані з конденсаторних модулів (іоністорів). Розглянуто одне з важливих питань – розробка підходу з визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії під час заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації протягом доби. Розроблено підхід, за яким визначено основні технічні параметри ємнісного накопичувача енергії: номінальна та максимальна потужність, необхідна енергоємність для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації, робоча енергоємність.

Вступ

Метрополітен забезпечує значну частину міських транспортних перевезень при високій безпеці та надійності руху [1–3]. На даний час в метрополітенах України перевезення пасажирів здійснюється, в основному, рухомих складом з колекторними двигунами постійного струму послідовного збудження та релейно-контакторними системами управління. Витрати електроенергії на тягу цього рухомого складу складають близько 70 % від загальних витрат електроенергії в метрополітені і є вагомим складовою собівартості пасажирських перевезень [1–3]. Значну частину цих витрат становлять втрати електроенергії у вигляді теплоти на гальмівних резисторах [1–4].

Тому подальший розвиток рухомого складу метрополітену, особливо в умовах поетапного підвищення тарифів на електроенергію, неможливий без пошуку нових ефективних технічних рішень, які дозволять істотно знизити втрати електроенергії під час експлуатації рухомого складу метрополітену.

Аналіз останніх досліджень

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 енергозберігаючого обладнання, насамперед, систем рекуперації. Проте, за існуючої інфраструктури системи тягового енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперації має імовірнісний характер та не перевищує 30 % [2, 4]. Таким чином, в даний час існує проблема реалізації надлишкової електроенергії за відсутності споживачів в зоні рекуперації.

Одним з перспективних шляхів додаткового зниження споживання електроенергії є застосування бортових ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації [1–3]. При цьому актуальним і маловивченим питанням є визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу [2, 5–7].

© А.О. Сулим, П.О. Хозя, О.О. Мельник, О.С. Сіора, С.В. Шмаков, 2016

В попередніх дослідженнях [2, 5–8] вибір параметрів бортового ЄНЕ пропонується здійснювати без урахування часового впливу різних умов експлуатації рухомого складу протягом доби (графік ведення, завантаженість вагонів, тощо). Отже необхідна розробка іншого підходу, який дозволить врахувати вищевказаний фактор.

Мета роботи

Розробка підходу щодо визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ з урахуванням заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації протягом доби.

Матеріал і результати досліджень

Основна ідея запропонованого підходу полягає у визначенні параметрів бортового ЄНЕ шляхом побудови характеристик щільності розподілу кількості та потужності електроенергії рекуперації для найчастішої умови експлуатації. Даний підхід складається з наступних етапів: визначення найчастішої умови експлуатації протягом доби, реєстрація енергообмінних процесів для визначеної умови експлуатації, обробка отриманих масивів даних, побудова характеристик щільності розподілу кількості і потужності електроенергії рекуперації та безпосередньо визначення параметрів бортового ЄНЕ за запропонованими критеріями.

Визначення параметрів бортового ЄНЕ з використанням зазначеного підходу розглянуто на прикладі експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації в умовах Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен» протягом доби. Рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні. Умови експлуатації поїзда прийнято наступні: два та чотири повних кола з дотриманням «непікового» графіку руху відповідно при номінальному та максимальному завантаженні; одне та три повних кола з дотриманням «пікового» графіку руху відповідно при номінальному та максимальному завантаженні. Таким чином, запропонований підхід передбачає виконання досліджень при відомих даних часового впливу значущих факторів протягом доби.

Основою *першого етапу* є визначення найчастішої умови експлуатації поїзда протягом доби. За результатами аналізу прийнятих умов експлуатації встановлено, що найчастішою умовою є експлуатація поїзда з дотриманням «непікового» графіку руху при номінальному завантаженні. За наявності декількох різних умов експлуатації з однаковою часовою дією подальші дослідження енергообмінних процесів здійснюються для кожної з цих умов з метою визначення загальної кількості електроенергії рекуперації.

Другий етап, який передбачає експериментальне дослідження енергообмінних процесів, проведено з використанням дослідного комплексу, до складу якого 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. Обробка даних на персональному комп'ютері здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО» [9]. 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–Академмістечко–Лісова»

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Святошинсько-Броварської лінії за умов дотримання «непікового» графіку руху, приведені на рис. 1–2. Слід зазначити, що осцилограми (рис. 1–2) приведено без урахування часу зупинки поїзда на станціях. Графік руху передбачає час зупинки поїзда на кожній станції 30 секунд.

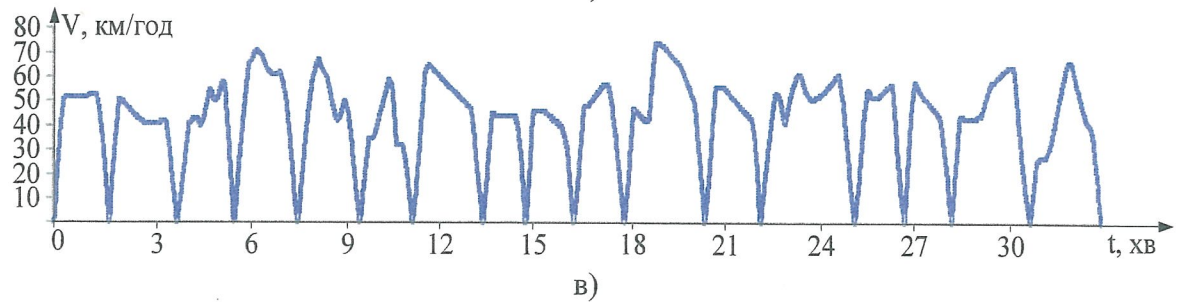
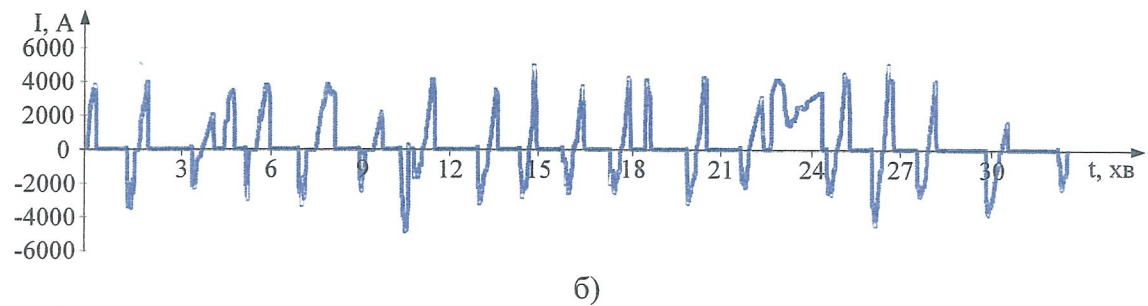
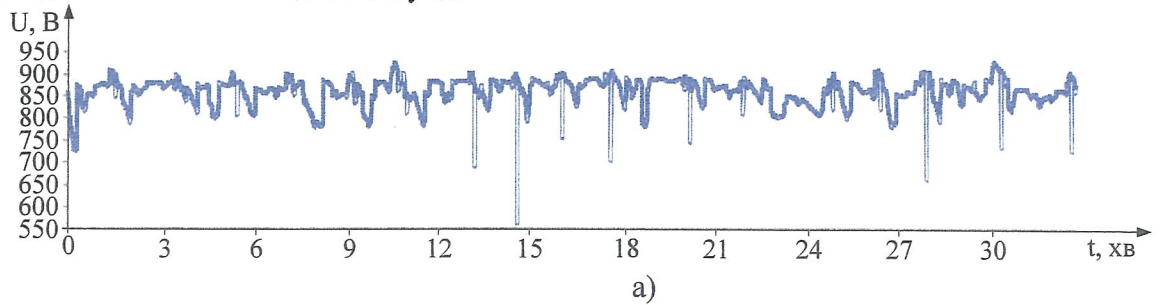
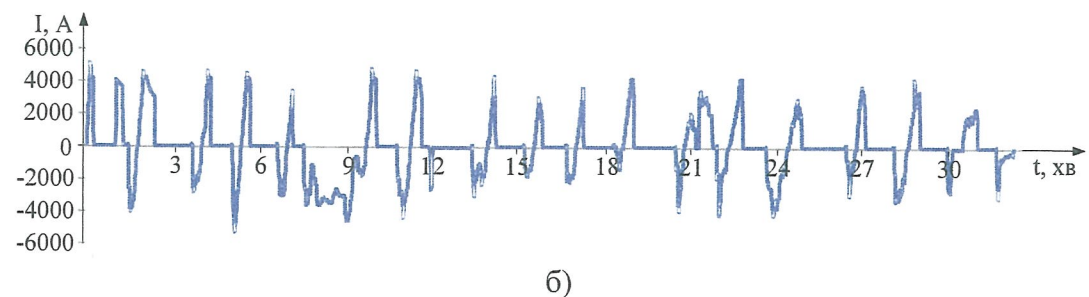
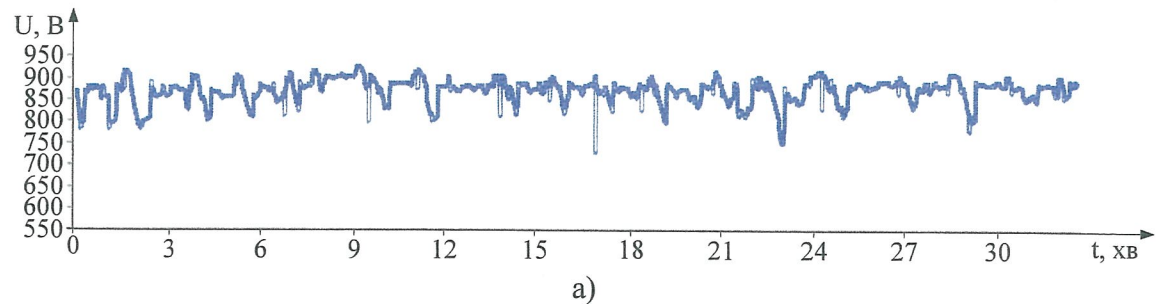


Рис. 1. Осцилограми під час експлуатації поїзда з системою рекуперації між станціями «Лісова–Академмістечко»: а) напруга на струмоприймачі $U(t)$; б) струм поїзда $I(t)$; в) швидкість руху поїзда $V(t)$



РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

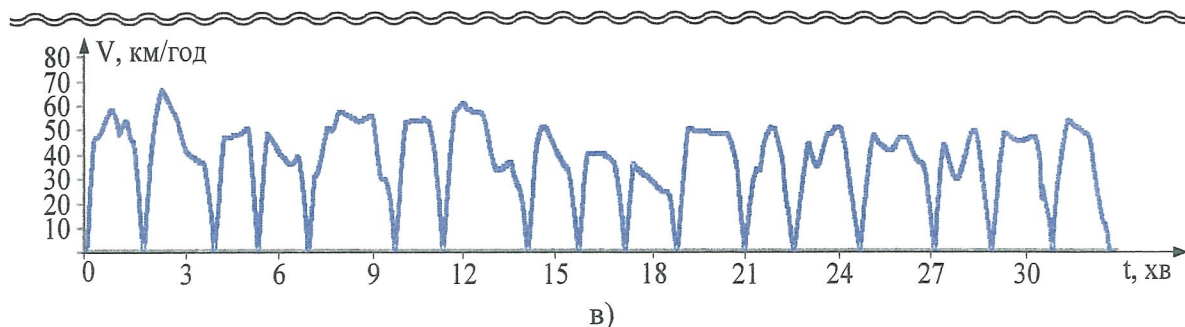


Рис. 2. Осцилограми під час експлуатації поїзда з системою рекуперації між станціями «Академмістечко–Лісова»: а) напруга на струмоприймачі $U(t)$; б) струм поїзда $I(t)$; в) швидкість руху поїзда $V(t)$

Третій етап передбачає обробку отриманих масивів даних. 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 електроенергії гальмування ($P_{сер}$, P_{max}), а також кількість електроенергії рекуперації (A).

Миттєва потужність рухомого складу для режиму рекуперативного гальмування визначається за виразом [10, 11]:

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

Середня потужність визначається за виразом [5, 11]:

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

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 [5, 12]:

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

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	$V_{гал}$, км/год	$P_{сер}$, кВт	P_{max} , кВт	A , кВт·год
Лісова–Чернігівська	53	1107	1798	4,76
Чернігівська–Дарниця	42	545	1240	2,7
Дарниця–Лівобережна	58	806	1422	1,23
Лівобережна–Гідропарк	62	1116	1665	4,18
Гідропарк–Дніпро	50	799	1248	2,43
Дніпро–Арсенальна	59	1914	3028	7,67
Арсенальна–Хрещатик	32	483	1248	2,08
Хрещатик–Театральна	47	857	1563	4,5
Театральна–Університет	43	936	1333	4,17
Університет–Вокзальна	39	624	1182	3,21
Вокзальна–Лісова	49	556	1147	3,01

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Кінець таблиці 1

1	2	3	4	5
Вокзальна–КПІ	49	1041	1790	4,76
КПІ–Шулявська	42	879	1451	3,41
Шулявська–Берестейська	48	866	1379	4,08
Берестейська–Нивки	57	1298	2508	7,16
Нивки–Святошино	43	640	1071	3,64
Святошино–Житомирська	64	1312	2798	9,75
Житомирська–Академмістечко	39	520	906	2,44
Академмістечко–Житомирська	52	1252	2023	5,54
Житомирська–Святошино	41	838	1261	3,94
Святошино–Нивки	58	1712	3112	8,04
Нивки–Берестейська	45	1087	1722	5,44
Берестейська–Шулявська	57	1486	2761	42,13
	34	527	817	2,27
Шулявська–КПІ	61	1184	2462	8,2
КПІ–Вокзальна	70	524	1076	0,87
	42	584	1294	4,52
Вокзальна–Університет	39	526	782	2,4
Університет–Театральна	42	679	986	3,21
Театральна–Хрещатик	27	326	545	0,95
Хрещатик–Арсенальна	45	791	1903	3,38
Арсенальна–Дніпро	48	808	2208	4,57
Дніпро–Гідропарк	58	1031	2168	11,83
Гідропарк–Лівобережна	41	590	1300	2,78
Лівобережна–Дарниця	56	838	1387	5,69
Дарниця–Чернігівська	54	716	1114	2,08
Чернігівська–Лісова	54	385	1384	2,72

На четвертому етапі будуються імовірнісні характеристики за результатами обробки масивів. За даними табл. 1 побудовано залежності середньої потужності гальмування та кількості електроенергії рекуперації від швидкості початку гальмування, а також гістограми щільності розподілу середньої потужності гальмування та кількості електроенергії рекуперації (рис. 3–6). Крім того, для кожного режиму гальмування (пригальмовування) за даними табл. 1 побудовано графіки максимальної потужності електроенергії гальмування (рис. 7).

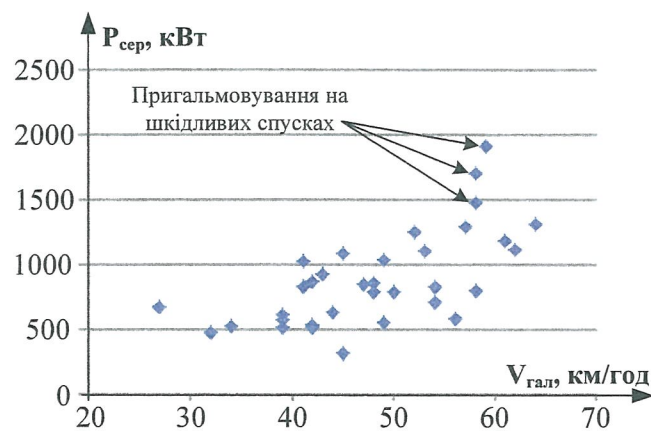


Рис. 3. Залежність середньої потужності від швидкості початку гальмування

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

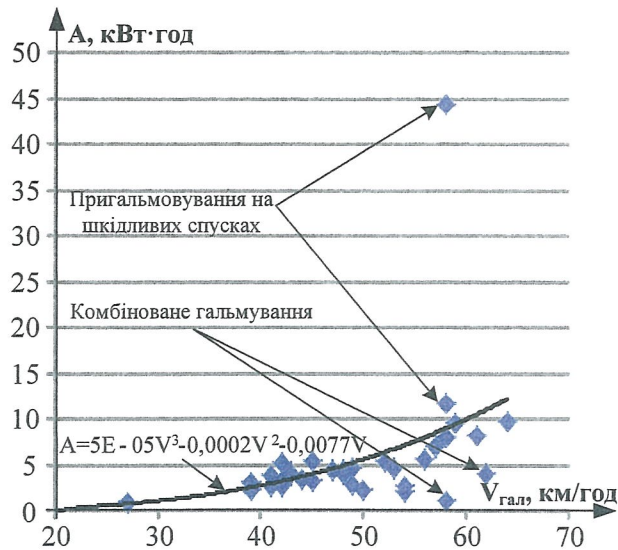


Рис. 4. Залежність кількості електроенергії рекуперації від швидкості початку гальмування

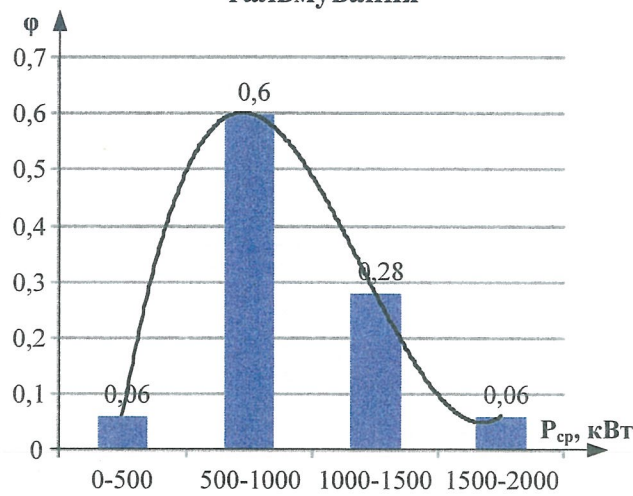


Рис. 5. Гістограми щільності розподілу середньої потужності електроенергії гальмування

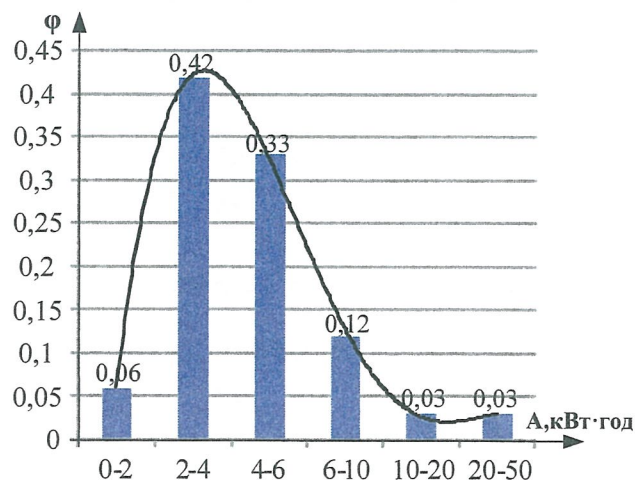


Рис. 6. Гістограми щільності розподілу кількості електроенергії рекуперації

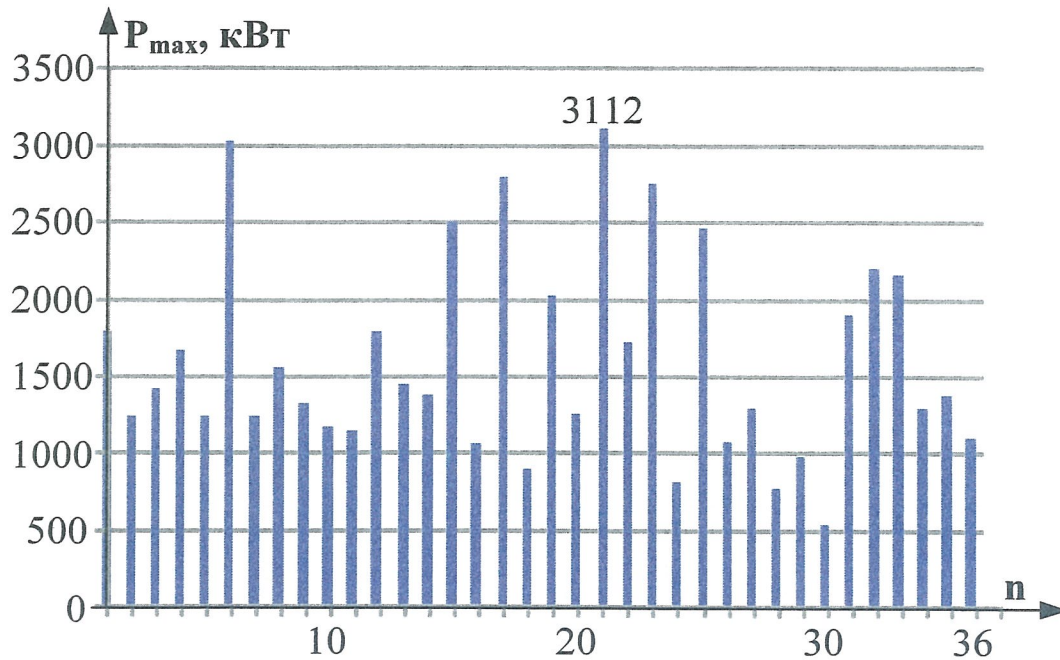


Рис. 7. Графіки максимальної потужності електроенергії гальмування

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

- середня потужність електроенергії гальмування знаходиться в діапазоні 326...1924 кВт; кількість електроенергії рекуперації – 0,95...44,4 кВт·год (рис. 3, 4);
- робоча енергоємність ЄНЕ для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації при гальмуванні повинна складати не менше ніж 44,4 кВт·год (рис. 4);
- щільність розподілу середньої потужності гальмування та кількості електроенергії рекуперації змінюється за нормальним законом (рис. 5, 6);
- максимальна потужність електроенергії рекуперації складає 3112 кВт (рис. 7).

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

- визначення номінальної потужності ЄНЕ здійснюється за середньою потужністю електроенергії рекуперації поїзда на заданій ділянці;
- максимальна потужність ЄНЕ обирається за максимальним (піковим) значенням миттєвої потужності електроенергії рекуперації гальмування;
- визначення робочої енергоємності ЄНЕ залежить від закону щільності розподілу кількості електроенергії рекуперації.

При рівномірному законі розподілу енергоємність визначається за максимальним значенням кількості електроенергії рекуперації (A_{\max}) для n гальмувань, при інших законах – за середнім значенням ($A_{\text{сеп}}$) з урахуванням середньоквадратичного відхилення (σ), тобто $A_{\text{сеп}} + \sigma$. Вибір критерію для визначення енергоємності бортових ЄНЕ з урахуванням σ ґрунтується на припущенні, що при різних умовах гальмування (швидкість початку гальмування, профіль колії) значення σ становить значну частину від $A_{\text{сеп}}$. 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.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Результати розрахунків значень номінальної та максимальної потужності ЄНЕ для заданих умов ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, 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 44,4 кВт·год. За результатами досліджень встановлено, що для довірчого інтервалу $A_{\text{сеп}}$ складає 4,58 кВт·год, σ – 2,75 кВт·год. Результати розрахунків робочої енергоємності ЄНЕ приведено в табл. 2.

Таблиця 2. Параметри ємнісного накопичувача енергії

Параметр	Отримані значення за результатами досліджень
Номінальна потужність, кВт	883
Максимальна потужність, кВт	3112
Необхідна енергоємність для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації, кВт·год	$\geq 44,4$
Робоча енергоємність, кВт·год	7,33

Таким чином, величини номінальної та максимальної потужності, а також робочої енергоємності ЄНЕ для заданих умов експлуатації поїзда за розробленим підходом повинні складати відповідно на рівні 883 кВт; 3112 кВт; 7,33 кВт·год. Величина необхідної енергоємності для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації повинна складати не менше ніж 44,4 кВт·год.

Висновки

Аналіз досліджень найчастішої умови експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації протягом доби для заданих умов його ведення дозволив встановити наступне:

- середня потужність електроенергії рекуперації знаходиться в діапазоні 326...1924 кВт; кількість електроенергії рекуперації – 0,95...44,4 кВт·год;
- робоча енергоємність ЄНЕ для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації при гальмуванні повинна складати не менше ніж 44,4 кВт·год;
- щільність розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації змінюється за нормальним законом;
- максимальна потужність електроенергії рекуперації складає 3112 кВт.

На основі запропонованого підходу виконані дослідження, результати яких дозволили встановити, що для заданого режиму ведення рухомого складу з системами рекуперації, номінальна потужність бортового ЄНЕ повинна складати на рівні 883 кВт, максимальна потужність – 3112 кВт, необхідна енергоємність для збереження повного об'єму електроенергії рекуперації – $\geq 44,4$ кВт·год; робоча енергоємність – 7,33 кВт·год.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Шевлюгин М.В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М.В. Шевлюгин, К.С. Желтов // Журнал «Наука и техника транспорта». – Москва, 2008. – Вып. № 1. – С. 15–20.

4. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий: «Энергосберегающие технологии и оборудование». – Харьков, 2014. – Вып. № 6/8 (72). – С. 9–13.
5. Костин Н.А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – Киев, 2014. – Вып. 3. – С. 15–23.
6. Васильев В.А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.07. – СПб., 2012. – 16 с.
7. Сулим А.О. Визначення енергоємності накопичувача для заданого режиму ведення рухомого складу метрополітену / А.О. Сулим, А.В. Донченко, П.О. Хозя // Збірник наукових праць XIV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 14–15 квітня 2016. – Кременчук, КрНУ, 2016. – С. 24–25.
8. Шуров Н.И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н.И. Шуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2008. – Вып. № 1 (51). – С. 99–104.
9. Свідोцтво 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.
10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том первый. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 534 с.
11. 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.
12. 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.