

УДК 621.3:629.4:625.42

ПАРАМЕТРИ БОРТОВОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАДАНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ**А. О. Сулим, П. О. Хозя**Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування»
вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. E-mail: sulim1.ua@gmail.com**О. В. Устенко**Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. E-mail: ustenko_av@mail.ru**А. І. Ломонос**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ai_lomonos@ukr.net

Розглянуто подальший розвиток рейкового міського транспорту, зокрема рухомого складу метрополітену, в частині підвищення його енергоефективності за рахунок застосування сучасних енергозберігаючих електричних систем. За результатами аналізу існуючих досліджень встановлено, що основними напрямками з енергозбереження на рухомому складі метрополітену є впровадження систем рекуперації та накопичувачів енергії. Встановлено, що найбільш перспективним є бортове розміщення ємнісних накопичувачів енергії на базі конденсаторних модулів (іоністорів). Розглянуто одне з важливих питань – розробка підходу з визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену із системами рекуперації. Запропоновано підхід, який складається з наступних етапів: дослідження енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу на заданій ділянці колії, обробка отриманих масивів даних, визначення методом планування експерименту значущих чинників впливу на параметри накопичувача з урахуванням їх часової дії, побудова й аналіз імовірнісних характеристик за результатами обробки масивів даних та безпосередньо визначення параметрів бортового накопичувача енергії за запропонованими критеріями. Виконано реєстрацію енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену із системами рекуперації на Святошинсько-Броварській лінії. За результатами вимірювань розраховано потужність та кількість електроенергії рекуперативного гальмування під час заданих штатних умов експлуатації потягу. Встановлено, що найбільш значущими чинниками, які впливають на вибір потужності та енергоємності бортового накопичувача, є відповідно завантаженість та графік руху потягу. Побудовано та проаналізовано ймовірнісні характеристики для найчастішої умови експлуатації рухомого складу протягом доби з урахуванням генерації максимальної кількості електроенергії рекуперативного гальмування. З використанням запропонованого підходу для заданих умов експлуатації потягу метрополітену визначено необхідні параметри бортового накопичувача: енергоємність, номінальну та максимальну потужності.

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

ПАРАМЕТРЫ БОРТОВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЗАДАНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА**А. А. Сулим, П. А. Хозя**Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
ул. И. Приходько, 33, г. Кременчуг, 39621, Украина. E-mail: sulim1.ua@gmail.com**А. В. Устенко**Украинский государственный университет железнодорожного транспорта
пл. Фейєрбаха, 7, г. Харьков, 61050, Украина. E-mail: ustenko_av@mail.ru**А. И. Ломонос**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: ai_lomonos@ukr.net

Рассмотрено дальнейшее развитие рельсового городского транспорта, в частности подвижного состава метрополитена, в части повышения его энергоэффективности за счет использования современных энергосберегающих электрических систем. По результатам анализа существующих исследований установлено, что основными направлениями по энергосбережению на подвижном составе метрополитена является внедрение систем рекуперации и накопителей энергии. Установлено, что наиболее перспективным является бортовое размещение емкостных накопителей энергии на базе конденсаторных модулей (ионисторов). Рассмотрен один из важных вопросов – разработка подхода по определению параметров бортового емкостного накопителя энергии для заданных условий эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации. Предложен подход, который состоит из следующих этапов: исследование энергообменных процессов при штатных условиях эксплуатации подвижного состава на заданном участке пути, обработка полученных массивов данных, определение методом планирования эксперимента значимых факторов влияния на параметры накопителя с учетом их временного действия, построение и анализ вероятностных характеристик по результатам обработки массивов данных и непосредственно определение параметров бортового накопителя энергии по предложенным критери-

ям. Выполнена регистрация энергообменных процессов при штатных условиях эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации на Святошинско-Броварской линии. По результатам измерений выполнен расчет мощности и количества электроэнергии рекуперативного торможения для заданных условий эксплуатации поезда. Установлено, что наиболее значимыми факторами, которые влияют на выбор мощности и энергоемкости бортового накопителя, является, соответственно, загрузка и график движения поезда. Построены и проанализированы вероятностные характеристики для наиболее частого условия эксплуатации подвижного состава на протяжении суток с учетом генерации максимального количества электроэнергии рекуперативного торможения. С использованием предложенного подхода для заданных условий эксплуатации поезда метрополитена определены необходимые параметры бортового накопителя: энергоемкость, номинальная и максимальная мощности.

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

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Метрополітен забезпечує значну частину транспортних перевезень при високій безпеці та надійності руху. Як наслідок, метрополітен є невід'ємною частиною транспортної системи сучасних великих міст-мегаполісів, який переважає за пасажиропотоком наземний муніципальний транспорт [1–3]. На даний час у метрополітенах України перевезення пасажирів здійснюються в основному рухомих складом із 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 та є вагомою складовою собівартості пасажирських перевезень (близько 30 %) [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.

З попередніх досліджень [1–9] відомо, що одним із перспективних способів економії електроенергії на тягу є впровадження на рухомому складі систем рекуперативної тяги. За результатами численних досліджень [2, 3, 7, 8] встановлено, що впровадження систем рекуперативної тяги на рухомому складі метрополітену дозволить скоротити до 40 % електроенергії, яка витрачається на тягу.

В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу, метрополітенами України поступово вводиться в експлуатацію новостворених та модернізованих рухомих складів. Головними відмінностями даного рухомого складу є впровадження енергозберігаючого обладнання та технологій, насамперед систем рекуперативної тяги. Проте за існуючої інфраструктури системи тягового енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперативної тяги має ймовірнісний характер та не перевищує 30 % [2, 4, 5]. Таким чином, у даний час існує проблема реалізації надлишкової електроенергії за відсутності споживачів у зоні рекуперативної тяги.

Аналіз досліджень [1–4, 7] показав можливість додаткового енергозбереження під час експлуатації рухомого складу метрополітену із системами реку-

перативної тяги за рахунок ефективного використання електроенергії гальмування шляхом застосування накопичувачів енергії. Відомо, що впровадження накопичувачів енергії дозволить додатково скоротити близько 10–30 % електроенергії, що витрачається на тягу [1, 2, 10]. В існуючих дослідженнях щодо застосування накопичувачів енергії на залізничному транспорті переважно обговорюються два питання: перше – необхідний тип накопичувача енергії та раціональне місце його розміщення; друге – визначення необхідних параметрів накопичувача енергії.

Аналіз численних робіт [1–3, 5, 6] по першому питанню свідчить, що найбільш перспективним є бортове розміщення емнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ), зібраних на базі конденсаторних модулів (іонисторів). Основними перевагами бортового розміщення ЄНЕ є максимальна ефективність енергообміну (втрати електроенергії зводяться до мінімуму), підвищення пропускної здатності в «годині пік» (стабілізація напруги контактної мережі), забезпечення автономного ведення рухомого складу під час аварійного відключення живлення контактної мережі.

У даній роботі більш детально розглянуто друге питання – визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. У попередніх дослідженнях [5, 7] вибір параметрів ЄНЕ пропонується здійснювати за характеристикою кількості електроенергії рекуперативної тяги від швидкості початку гальмування. Запропонований підхід дозволяє здійснювати вибір енергоємності ЄНЕ без визначення його потужності. Також даний підхід не враховує такі чинники, як профіль колії, наявність електропневматичного (комбінованого) гальмування, щільність розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування під час заданих умов експлуатації. Крім того, підхід передбачає визначення енергоємності ЄНЕ при максимальній силі гальмування, як наслідок, не враховується інтенсивність гальмування під час експлуатації потягу. У роботі [11] запропоновано інший підхід під час вибору параметрів ЄНЕ, в якому вищенаведені чинники враховано. Проте даний підхід не передбачає врахування зміни умов експлуатації рухомого складу протягом доби (графік ведення, завантаженість вагонів тощо).

Метою даного дослідження є розробка підходу щодо визначення параметрів бортового ЄНЕ для за-

даних умов експлуатації рухомого складу метрополітену із системами рекуперації.

Основна ідея запропонованого підходу полягає у визначенні параметрів бортового ЄНЕ (потужності, енергоємності) шляхом аналізу характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування для заданих умов експлуатації рухомого складу. Запропонований підхід складається з наступних етапів: дослідження енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації потягу на заданій ділянці, обробка отриманих масивів даних, визначення методами планування експерименту значущих чинників впливу на параметри накопичувача з урахуванням їх часової дії, аналіз імовірнісних характеристик за результатами обробки масивів даних, визначення параметрів бортового ЄНЕ за запропонованими критеріями. Далі розглянемо визначення параметрів ЄНЕ із застосуванням даного підходу при заданих умовах експлуатації потягу в КП «Київський метрополітен».

Перший етап, який передбачає експериментальне дослідження енергообмінних процесів, проведено з використанням дослідного комплексу, до складу якого входить рухомий склад метрополітену із системами рекуперації та вимірювальна система, що встановлена на його борту. Рухомий склад є п'ятивагонним модернізованим потягом з асинхронним тяговим приводом, в якому головні вагони безмоторні, проміжні – моторні. Вимірювальна система розроблена спеціалістами ДП «УкрНДІВ» для дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та потягом у реальних умовах його експлуатації. До складу вимірювальної системи

входять: персональний комп'ютер, аналогоцифровий перетворювач, блок комутації, блок узгодження та вимірювальні датчики. Обробка даних на персональному комп'ютері здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО». Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних, отриманих від вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному потязі.

Експериментальне дослідження енергообмінних процесів виконано на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» за різними штатними умовами експлуатації модернізованого потягу протягом доби. Дослідження проводились при заданих режимах ведення потягу метрополітену з різним завантаженням вагонів між кінцевими станціями «Лісова–Академмістечко–Лісова» з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху.

Осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху складу при його експлуатації з максимальним завантаженням між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії за умов дотримання «непікового» графіку руху приведені на рис. 1, 2. Аналогічним чином було отримано осцилограми для інших заданих умов ведення потягу (максимальне завантаження з дотриманням «пікового» графіка руху, номінальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху). Слід зазначити, що кожен зі штатних режимів експлуатації повторювався два рази, тобто загальна кількість заданих умов ведення потягу (експериментів) дорівнює восьми.

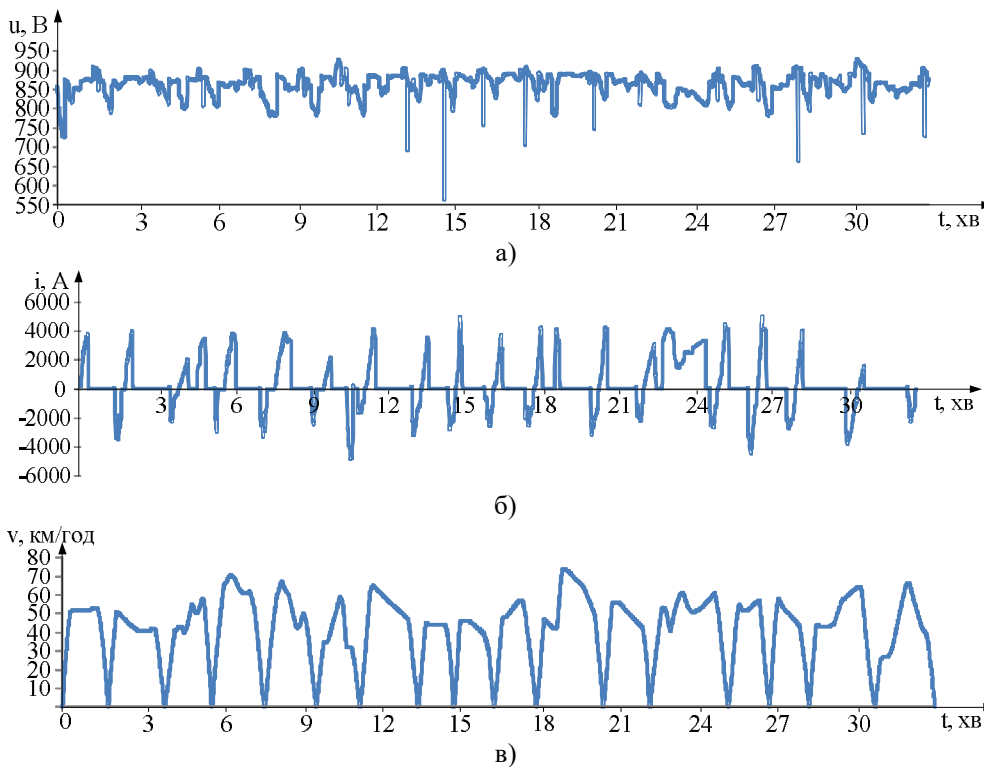


Рисунок 1 – Осцилограми під час експлуатації потягу із системами рекуперації між станціями «Лісова–Академмістечко»: а) напруга на струмоприймачі $U(t)$; б) струм потягу $I(t)$; в) швидкість руху потягу $V(t)$

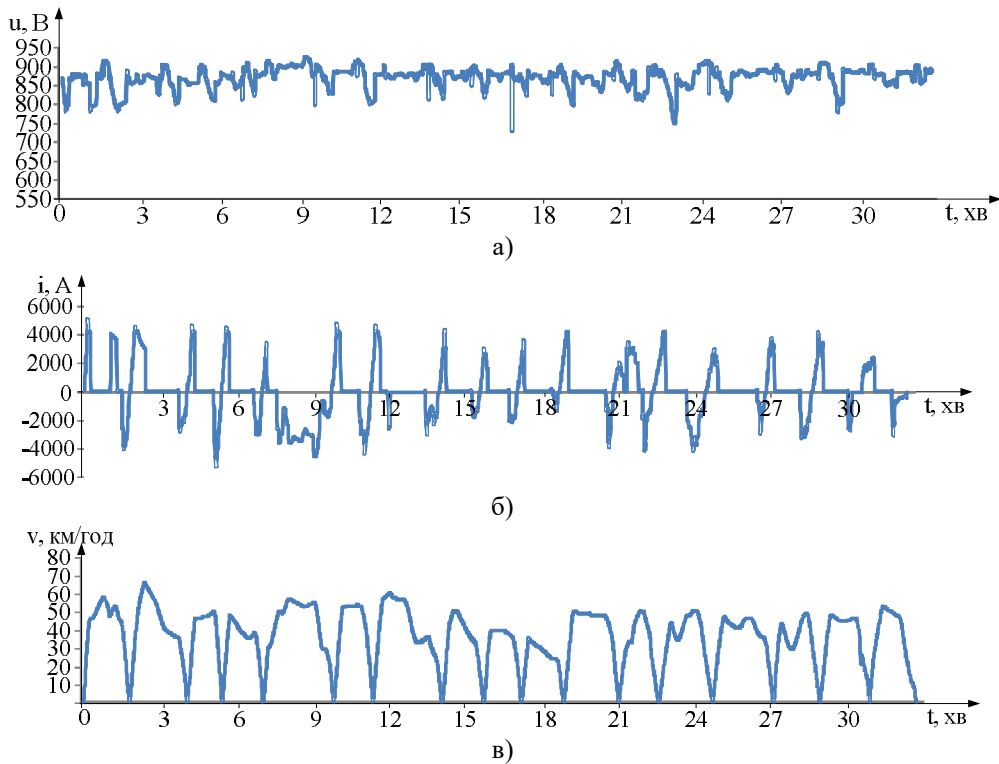


Рисунок 2 – Осцилограми під час експлуатації потягу із системами рекуперації між станціями «Академмістечко–Лісова»: а) напруга на струмоприймачі $U(t)$; б) струм потягу $I(t)$; в) швидкість руху потягу $V(t)$

Другий етап передбачає обробку масивів даних. За результатами обробки отриманих даних для режимів рекуперативного гальмування визначено наступні показники: швидкість початку гальмування ($V_{гал}$), середню та максимальну потужність рекуперативного гальмування ($P_{сер}, P_{max}$), а також кількість електроенергії рекуперації (A).

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

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

Середнє значення потужності енергії рекуперативного гальмування визначається за виразом [5, 13]

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

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

Величина кількості електроенергії рекуперативного гальмування визначається за виразом [5, 14]

$$A = \frac{\int_0^T p(t) dt}{3600 \cdot 1000} = \frac{\sum_{k=1}^T U_k I_k \Delta t}{3600 \cdot 1000}, \quad (3)$$

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

Результати обробки масивів даних для заданих умов експлуатації потягу приведено в табл. 1. Слід зазначити, що середні значення розрахованих величин приведено за результатами двох проїздів потягу

для кожного режиму його ведення.

Основою *третього етапу* є визначення найбільш значущого чинника впливу на параметри накопичувача. У роботі запропоновано визначити даний чинник за методом планування експерименту з урахуванням часової дії та кількості електроенергії рекуперативного гальмування. Спочатку визначається найбільш значущий чинник за допомогою вищевказаного методу, а потім за аналізом добового графіку руху враховується часовий вплив даного фактора. За наявності декількох умов експлуатації з однаковою часовою дією подальші дослідження здійснюються для умови з максимальною загальною кількістю електроенергії рекуперативного гальмування. Таким чином, запропонований підхід передбачає виконання досліджень за відомими умовами експлуатації потягу протягом доби.

Умови експлуатації потягу на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» протягом доби прийнято наступні: три та два 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.

Метод планування експерименту застосовано для побудови математичної моделі у вигляді регресійного рівняння, яке визначає вплив кожного чинника за допомогою коефіцієнтів регресії й встановлює взаємозв'язки між ними, а також дозволяє визначити найбільш значущий чинник.

Таблиця 1 – Результати обробки масивів даних

Досліджувана ділянка	Номінальне завантаження «непіковий» / «піковий» графік руху				Максимальне завантаження «непіковий» / «піковий» графік руху			
	$V_{гал}$ км/год	$P_{сер}$ кВт	P_{max} кВт	A , кВт·год	$V_{гал}$ км/год	$P_{сер}$ кВт	P_{max} кВт	A , кВт·год
Лісова–Чернігівська	53/63	1107/1722	1798/3879	4,76/8,74	49/63	1325/1664	2406/2496	5,33/9,17
Чернігівська–Дарниця	42/54	545/892	1240/2425	2,7/6,4	43/55	1284/1419	2120/2093	4,1/7,09
Дарниця–Лівобережна	58/51	806/846	1422/2442	1,23/6,19	40/49	961/1019	1662/1969	3,49/6,64
Лівобережна–Гідропарк	62/60	1116/1267	1665/2455	4,18/8,89	52/67	1475/1407	2701/2719	5,93/10,81
Гідропарк–Дніпро	50/53	799/1396	1248/2492	2,43/8,29	50/50	1519/1191	2102/2219	6,75/8,39
Дніпро–Арсенальна	59/57 32/30	1914/1782 483/672	3028/2367 1248/1085	7,67/6,89 2,08/1,83	59/55 32/32	2220/1661 671/465	3364/2364 1174/945	6,73/6,39 2,24/2,13
Арсенальна–Хрещатик	47/51	857/1022	1563/3050	4,5/4,83	48/57	1251/1245	2313/2208	4,88/7,21
Хрещатик–Театральна	43/51	936/1054	1333/1874	4,17/5,43	43/57	1191/1541	1740/2531	4,11/7,9
Театральна–Університет	39/42	624/794	1182/1178	3,21/3,64	43/54	1149/1410	2027/2733	4,14/6,85
Університет–Вокзальна	49/49	556/646	1147/1038	3,01/3,15	45/60	1216/1519	1743/3060	3,89/6,75
Вокзальна–КПІ	49/44	1041/649	1790/1127	4,76/3,24	48/56	1371/1462	2312/2189	4,74/6,48
КПІ–Шулявська	42/47	879/821	1451/1261	3,41/4,6	45/58	1322/1555	2058/2661	4,6/7,52
Шулявська–Берестейська	48/46	866/829	1379/1182	4,08/3,62	47/51	1146/1322	1675/1904	4,29/4,98
Берестейська–Нивки	57/59	1298/1194	2508/2145	7,16/7,36	64/70	1926/2009	3073/3713	9,04/11,91
Нивки–Святошино	43/42	640/673	1071/1071	3,64/3,36	42/56	1176/1383	1784/2478	3,76/3,45
Святошино–Житомирська	64/61	1312/864	2798/2177	9,75/8,67	61/70	1745/1848	2849/3437	8,69/12,26
Житомирська–Академмістечко	39/69 -/29	520/1517 -/237	906/1772 -/320	2,44/3,15 -/1,19	40/44	797/849	1097/1299	3,1/3,78
Академмістечко–Житомирська	52/56	1252/1403	2023/3050	5,54/6,74	44/59	946/1397	1677/2668	3,78/7,36
Житомирська–Святошино	41/40	838/620	1261/1242	3,94/3,53	40/43	926/1074	1729/1843	3,47/4,16
Святошино–Нивки	58/65	1712/1426	3112/2835	8,04/10,18	53/59	1501/1786	3041/2565	6,46/7,93
Нивки–Берестейська	45/52	1087/1177	1722/2352	5,44/7,16	50/57	1414/1560	2936/2901	6,48/9,08
Берестейська–Шулявська	57/60 34/31	1486/1543 527/359	2761/2136 817/567	42,13/42,86 2,27/1,75	64/66 32/37	1627/1798 441/784	3341/3835 912/1529	43,99/42,48 1,96/2,13
Шулявська–КПІ	61/49	1184/986	2462/1720	8,2/5,18	54/67	1398/1864	2934/3376	6,59/10,12
КПІ–Вокзальна	70/70 42/40	524/839 584/551	1076/1268 1294/977	0,87/0,58 4,52/4,43	44/69 36/42	729/811 716/580	1111/1285 1306/880	2,13/1,92 2,87/4,42
Вокзальна–Університет	39/38	526/489	782/720	2,4/2,15	38/45	631/968	914/1819	2,53/4,02
Університет–Театральна	42/40	679/458	986/764	3,21/2,36	38/45	610/925	811/1439	2,7/4,1
Театральна–Хрещатик	27/44	326/770	545/1436	0,95/4,14	33/49	532/1200	653/1888	2,14/5,65
Хрещатик–Арсенальна	45/49	791/513	1903/775	3,38/3,34	47/46	1097/1061	1815/1567	4,41/4,12
Арсенальна–Дніпро	48/45	808/978	2208/1400	4,57/4,34	46/43	1052/759	2478/1629	4,52/3,78
Дніпро–Гідропарк	58/65	1031/1595	2168/2757	11,83/11,43	59/65	1396/1436	2763/3106	9,87/13,69
Гідропарк–Лівобережна	41/41	590/549	1300/952	2,78/3,2	46/53	995/1157	1990/1961	4,66/5,94
Лівобережна–Дарниця	56/61	838/868	1387/1817	5,69/7,21	54/61	1060/929	2396/1868	5,42/7,23
Дарниця–Чернігівська	54/51	716/1158	1114/2024	2,08/5,91	51/49	1433/1388	2217/2590	6,15/5,37
Чернігівська–Лісова	54/56	385/894	1384/1512	2,72/6,3	41/56	790/1322	979/3017	3,4/6,18

Примітка. На деяких перегонах рекуперативне гальмування здійснюється два рази (у таблиці приведено два рядки з даними), що обумовлено наявністю «шкідливих» спусків на заданих ділянках

Дослідження за методом планування експерименту передбачає наступні етапи: встановлення значущих чинників, побудова матриці експерименту, проведення дослідів, обчислення дисперсії, перевірка адекватності дисперсій, визначення коефіцієнтів регресії й власне отримання рівнянь регресії. Як значущі чинники експерименту прийнято: завантаження потягу – x_1 ; графік руху – x_2 . Під час проведення експерименту обрано два рівні зміни параметрів: номінальне (+) та максимальне (–) завантаження, а також «непіковий» (+) та «піковий» (–) графіки руху. Відповідно до цього будується матриця експерименту для кожного перегону:

$$M = p^q = 2^2 = 4, \tag{4}$$

де p – кількість рівнів зміни параметрів; q – кількість значущих чинників.

Дисперсія в кожному досліді обчислюється за

виразом [15, 16]

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_n - \bar{y})^2}{k-1}, \tag{5}$$

де k – кількість повторень у досліді; n – порядковий номер досліді; \bar{y} – середнє значення контрольованого параметра.

Перевірка гіпотези щодо однорідності дисперсій здійснюється за критерієм Кохрена [15, 16]:

$$G_{max} = \frac{S_{max}^2}{\sum S^2}. \tag{6}$$

Визначається табличне значення критерію Кохрена залежно від числа ступенів вільності ($G_{табл}$). Якщо $G_{max} < G_{табл}$, то експеримент виконаний зі статично однаковою точністю й далі можна визначити коефіцієнти рівняння регресії.

Матрицю експерименту для перегону «Лісова–Чернігівська» зображено у вигляді табл. 2. Аналогічним чином побудовано матриці експерименту для

інших досліджуваних ділянок (перегонів) Святошинсько-Броварської лінії.

Таблиця 2 – Матриця експерименту

Досліджувана ділянка	x_1	x_2	$P_{сер}, \text{кВт}$			S^2	x_1	x_2	$A, \text{кВт}\cdot\text{год}$			S^2	
			y_1	y_2	\bar{y}				y_1	y_2	\bar{y}		
Лісова–Чернігівська	+	+	1098	1116	1107	162	+	+	5,01	4,51	4,76	0,125	
	+	–	1725	1719	1722	18	+	–	9,27	8,2	8,74	0,573	
	–	+	1300	1350	1325	1250	–	+	5,47	5,18	5,33	0,042	
	–	–	1646	1682	1664	648	–	–	9,03	9,31	9,17	0,039	
	Σ						2078	Σ					
G_{max}						0,602	G_{max}						0,736

Примітка. При числі ступенів вільності $f_1=k-1=1; f_2=M-4$ табличне значення критерію Кохрена дорівнює 0,91.

Вільний член рівняння регресії визначається як

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^M y_i}{M}, \quad (7)$$

де y_i – вихідні параметри для i -го впливу.

Коефіцієнти регресії, що характеризують вплив чинників, визначаються за виразом [15, 16]

$$a_{i,j} = \frac{\sum_{ij=1}^M x_{iq}x_{jq}\bar{y}_i}{M}. \quad (8)$$

Регресійне рівняння з урахуванням заданих чинників впливу має загальний вигляд [16]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2. \quad (9)$$

Результати розрахунку для заданих умов експлуатації потягу вищезазначеним методом, виконані за виразами (7), (8), приведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати досліджень методом планування експерименту

Досліджувана ділянка	$P_{сер}, \text{кВт}$		Найбільш вагомий чинник	$A, \text{кВт}\cdot\text{год}$	
	Регресійне рівняння			Регресійне рівняння	
1	2		3	4	
Лісова–Чернігівська	$1455-40 \cdot x_1-239 \cdot x_2-69 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_2	$7,00-0,25 \cdot x_1-1,96 \cdot x_2-0,04 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Чернігівська–Дарниця	$1035-317 \cdot x_1-121 \cdot x_2-53 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$5,07-0,52 \cdot x_1-1,67 \cdot x_2-0,18 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Дарниця–Лівобережна	$908-82 \cdot x_1-25 \cdot x_2+5 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$4,39-0,68 \cdot x_1-2,03 \cdot x_2-0,45 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Лівобережна–Гідропарк	$1316-125 \cdot x_1-21 \cdot x_2-55 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$7,45-0,92 \cdot x_1-2,40 \cdot x_2+0,04 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Гідропарк–Дніпро	$1226-129 \cdot x_1-67 \cdot x_2-231 \cdot x_1 \cdot x_2$		$x_1; x_2$	$6,47-1,11 \cdot x_1-1,88 \cdot x_2-1,06 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Дніпро–Арсенальна	$1894-46 \cdot x_1+173 \cdot x_2-107 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_2	$6,92+0,36 \cdot x_1+0,28 \cdot x_2+0,11 \cdot x_1 \cdot x_2$	
	$573+5 \cdot x_1+4 \cdot x_2-99 \cdot x_1 \cdot x_2$		$x_1; x_2$	$2,07-0,12 \cdot x_1+0,09 \cdot x_2+0,04 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Арсенальна–Хрещатик	$1094-154 \cdot x_1-40 \cdot x_2-43 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$5,36-0,69 \cdot x_1-0,67 \cdot x_2+0,50 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Хрещатик–Театральна	$1181-186 \cdot x_1-117 \cdot x_2+58 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$5,40-0,60 \cdot x_1-1,26 \cdot x_2+0,63 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Театральна–Університет	$994-285 \cdot x_1-108 \cdot x_2+23 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$4,46-1,04 \cdot x_1-0,79 \cdot x_2+0,57 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Університет–Вокзальна	$984-383 \cdot x_1-98 \cdot x_2+53 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$4,20-1,12 \cdot x_1-0,75 \cdot x_2+0,68 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Вокзальна–КПІ	$1343-498 \cdot x_1-137 \cdot x_2+333 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$4,81-0,81 \cdot x_1-0,06 \cdot x_2+0,82 \cdot x_1 \cdot x_2$	
КПІ–Шулявська	$1144-294 \cdot x_1-44 \cdot x_2+73 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$5,03-1,03 \cdot x_1-1,03 \cdot x_2+0,43 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Шулявська–Берестейська	$1041-193 \cdot x_1-35 \cdot x_2+53 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$4,24-0,39 \cdot x_1-0,06 \cdot x_2+0,29 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Берестейська–Нивки	$1607-361 \cdot x_1+5 \cdot x_2+47 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$8,87-1,61 \cdot x_1-0,77 \cdot x_2+0,67 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Нивки–Святошино	$968-312 \cdot x_1-60 \cdot x_2+44 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$3,55-0,05 \cdot x_1+0,15 \cdot x_2-0,01 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Святошино–Житомирська	$1442-354 \cdot x_1+86 \cdot x_2+138 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$9,84-0,63 \cdot x_1-0,62 \cdot x_2+1,16 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Житомирська–Академмістечко	$921+98 \cdot x_1-262 \cdot x_2-236 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_2	$3,42-0,03 \cdot x_1-0,65 \cdot x_2-0,31 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Академмістечко–Житомирська	$1250+78 \cdot x_1-151 \cdot x_2+75 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_2	$5,86+0,29 \cdot x_1-1,20 \cdot x_2+0,60 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Житомирська–Святошино	$865-136 \cdot x_1+18 \cdot x_2+92 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$3,78-0,04 \cdot x_1-0,07 \cdot x_2+0,28 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Святошино–Нивки	$1606-37 \cdot x_1+0,3 \cdot x_2+143 \cdot x_1 \cdot x_2$		$x_1; x_2$	$8,15+0,96 \cdot x_1-0,90 \cdot x_2-0,17 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Нивки–Берестейська	$1310-178 \cdot x_1-59 \cdot x_2+14 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$7,04-0,74 \cdot x_1-1,08 \cdot x_2+0,22 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Берестейська–Шулявська	$1614-99 \cdot x_1-57 \cdot x_2+29 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$42,87-0,37 \cdot x_1+0,20 \cdot x_2-0,56 \cdot x_1 \cdot x_2$	
	$528-85 \cdot x_1-44 \cdot x_2+128 \cdot x_1 \cdot x_2$		$x_1; x_2$	$2,03-0,02 \cdot x_1+0,09 \cdot x_2+0,17 \cdot x_1 \cdot x_2$	
Шулявська–КПІ	$1358-273 \cdot x_1-67 \cdot x_2+166 \cdot x_1 \cdot x_2$		x_1	$7,52-0,83 \cdot x_1-0,13 \cdot x_2+1,64 \cdot x_1 \cdot x_2$	

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
КПІ–Вокзальна	$726-44 \cdot x_1 - 99 \cdot x_2 - 58 \cdot x_1 \cdot x_2$ $608-40 \cdot x_1 + 42 \cdot x_2 - 26 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2 x_2	$1,38-0,65 \cdot x_1 + 0,13 \cdot x_2 + 0,02 \cdot x_1 \cdot x_2$ $4,06+0,42 \cdot x_1 - 0,37 \cdot x_2 + 0,41 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1 x_1
Вокзальна–Університет	$654-146 \cdot x_1 - 75 \cdot x_2 + 94 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1	$2,78-0,50 \cdot x_1 - 0,31 \cdot x_2 + 0,44 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1
Університет–Театральна	$668-100 \cdot x_1 - 24 \cdot x_2 + 134 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1	$3,10-0,31 \cdot x_1 - 0,14 \cdot x_2 + 0,56 \cdot x_1 \cdot x_2$	$x_1; x_2$
Театральна–Хрещатик	$707-159 \cdot x_1 - 278 \cdot x_2 + 56 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2	$3,22-0,68 \cdot x_1 - 1,68 \cdot x_2 + 0,08 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2
Хрещатик–Арсенальна	$866-214 \cdot x_1 + 79 \cdot x_2 + 61 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1	$3,81-0,45 \cdot x_1 + 0,08 \cdot x_2 - 0,06 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1
Арсенальна–Дніпро	$899-6 \cdot x_1 + 31 \cdot x_2 - 116 \cdot x_1 \cdot x_2$	$x_1; x_2$	$4,30+0,15 \cdot x_1 + 0,24 \cdot x_2 - 0,13 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2
Дніпро–Гідропарк	$1365-52 \cdot x_1 - 151 \cdot x_2 - 131 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2	$11,71-0,08 \cdot x_1 - 0,86 \cdot x_2 + 1,06 \cdot x_1 \cdot x_2$	$x_1; x_2$
Гідропарк–Лівобережна	$823-253 \cdot x_1 - 30 \cdot x_2 + 51 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1	$4,15-1,16 \cdot x_1 - 0,43 \cdot x_2 + 0,22 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1
Лівобережна–Дарниця	$924-71 \cdot x_1 + 25 \cdot x_2 - 40 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1	$6,39+0,06 \cdot x_1 - 0,83 \cdot x_2 + 0,07 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2
Дарниця–Чернігівська	$1174-237 \cdot x_1 - 99 \cdot x_2 - 122 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_1	$4,88-0,88 \cdot x_1 - 0,76 \cdot x_2 - 1,15 \cdot x_1 \cdot x_2$	$x_1; x_2$
Чернігівська–Лісова	$848-208 \cdot x_1 - 260 \cdot x_2 + 6 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2	$4,65-0,14 \cdot x_1 - 1,59 \cdot x_2 - 0,2 \cdot x_1 \cdot x_2$	x_2

За результатами досліджень методом планування експерименту отримано математичні моделі визначення середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації для кожної досліджуваної ділянки (табл. 3). Вплив чинників при визначенні середньої потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування розподілено наступним чином: $x_1 - 23$ (13); $x_2 - 9$ (14); $x_1 x_2 - 5$ (10). Отже встановлено, що найбільш значущим чинником впливу на середню потужність електроенергії рекуперативного гальмування є завантаження потягу; на кількість електроенергії рекуперації – графік руху. Проте в першому випадку характер значущого впливу є явно вираженим, у другому – неявним із рівномірним характером розподілу значущих чинників.

Встановлено дві умови експлуатації з найдовшими часовими діями протягом доби – з дотриманням «непікового» графіку руху при номінальному завантаженні та з дотриманням «пікового» графіку руху при максимальному завантаженні. Для зазначених умов експлуатації визначено загальну кількість електроенергії рекуперації для одного повного кола за виразом

$$A_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^l A_i, \quad (10)$$

де A_i – значення кількості електроенергії рекуперації для i -го гальмування; l – кількість гальмувань.

За виразом (10) визначено, що загальна кількість електроенергії рекуперації для заданих умов експлуатації рухомого складу з дотриманням «непікового» графіку при номінальному завантаженні складає 195,74 кВт·год; з дотриманням «пікового» графіка при максимальному завантаженні – 279,39 кВт·год. Тому побудова ймовірнісних характеристик здійснюється для умов експлуатації з дотриманням «пікового» графіка при максимальному завантаженні потягу.

На четвертому етапі за даними табл. 1 побудовано ймовірнісні характеристики у вигляді залежностей середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації від швидкості початку гальмування, а також гістограми щільності розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації (рис. 3–6).

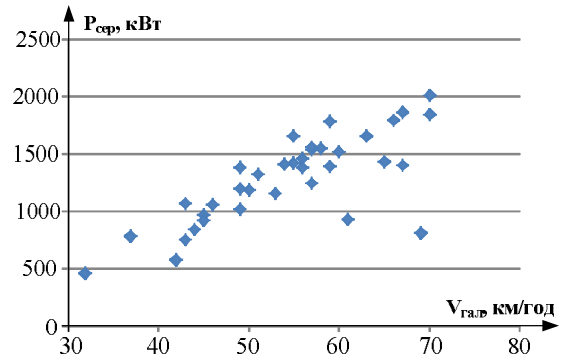


Рисунок 3 – Залежність середньої потужності від швидкості початку гальмування

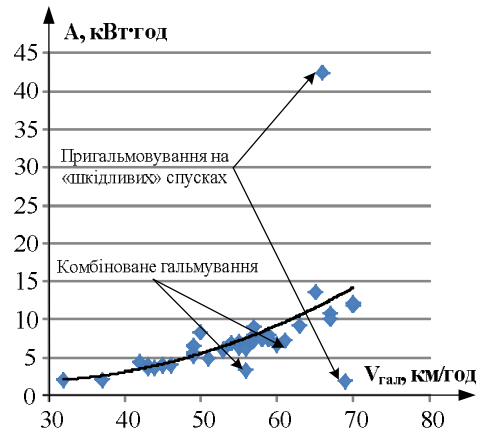


Рисунок 4 – Залежність кількості електроенергії рекуперації від швидкості початку гальмування

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

$$f = \frac{l_i}{l}, \quad (11)$$

де l_i – кількість гальмувань для досліджуваного піддіапазону.

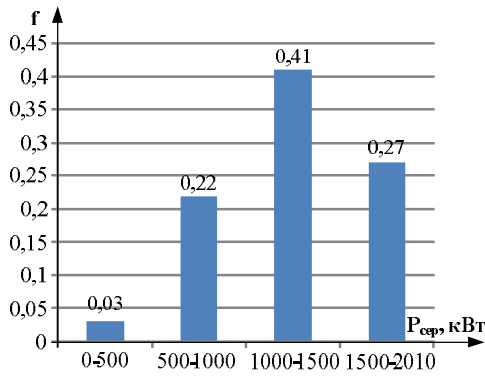


Рисунок 5 – Гістограми щільності розподілу середньої потужності

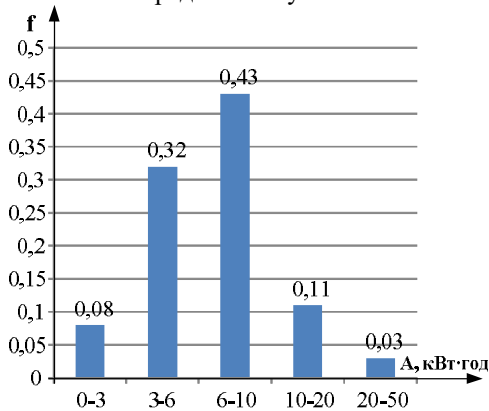


Рисунок 6 – Гістограми щільності розподілу кількості електроенергії рекуперації

Крім того, для кожного режиму гальмування (пригальмування на шкідливих спусках) побудовано графіки максимальної потужності електроенергії рекуперативного гальмування (рис. 7).

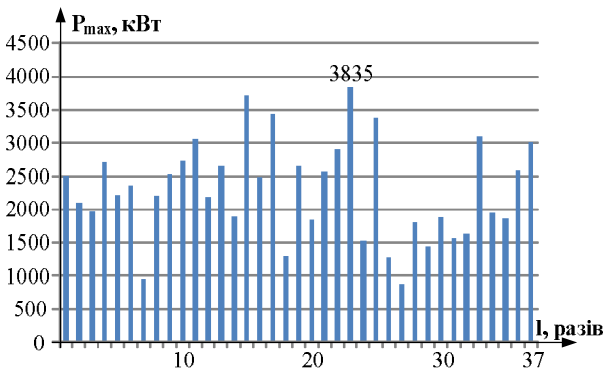


Рисунок 7 – Максимальна потужність електроенергії рекуперації для кожного гальмування

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

- середня потужність електроенергії рекуперації знаходиться в діапазоні 465–2009 кВт; кількість електроенергії – в діапазоні 1,92–42,48 кВт·год (рис. 3, 4);
- необхідна енергоємність ЄНЕ для збереження повного об’єму електроенергії рекуперативного гальмування повинна складати не менше ніж 44,61 кВт·год (рис. 4);

- щільність розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації змінюється за нормальним законом (рис. 5, 6);

- максимальна потужність електроенергії рекуперації складає 3835 кВт (рис. 7).

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

- визначення номінальної потужності здійснюється за середньою потужністю електроенергії рекуперативного гальмування потягу на заданій ділянці;

- максимальна потужність ЄНЕ обирається за максимальним (піковим) значенням миттєвої потужності електроенергії рекуперативного гальмування;

- визначення робочої енергоємності ЄНЕ здійснюється залежно від закону розподілу кількості електроенергії рекуперації: при рівномірному законі розподілу енергоємність визначається за максимальним значенням кількості електроенергії рекуперації (A_{max}), при інших типових законах (трикутний, нормальний, експонентний тощо) – за середнім значенням ($A_{ср}$) з урахуванням середньоквадратичного відхилення (σ), тобто $A_{ср} + \sigma$. Знак «+» у критерії показує, що визначається одне значення енергоємності ЄНЕ, при якому враховується максимальна щільність розподілу кількості електроенергії.

Середні значення визначаються для довірчого інтервалу вибірки, що прийнято 0,95. Значення, що не потрапляють до довірчого інтервалу, вважаються промахом і при визначенні середнього значення не враховуються.

Виходячи з вищенаведеного, визначено довірчі інтервали для середнього значення потужності та кількості електроенергії рекуперації, в яких відповідно виключено значення 465 кВт та 42,48 кВт·год. За результатами досліджень встановлено, що середнє значення кількості електроенергії рекуперації ($A_{ср}$) складає 6,58 кВт·год, середньоквадратичне відхилення (σ) – 2,82 кВт·год.

Результати розрахунків значень номінальної потужності та необхідної енергоємності ЄНЕ для заданих умов ведення рухомого складу метрополітену із системами рекуперації при використанні запропонованого підходу приведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Параметри накопичувача

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

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

ВИСНОВКИ. Аналіз досліджень для заданих умов ведення рухомого складу із системами рекуперації дозволив встановити наступне:

– найбільш значущим чинником впливу на середню потужність електроенергії рекуперативного гальмування є завантаження поїзду, на кількість електроенергії рекуперації – графік руху;

– середня потужність електроенергії рекуперативного гальмування знаходиться в діапазоні 465–2009 кВт; кількість електроенергії рекуперації – в діапазоні 1,92–42,48 кВт·год;

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

– щільність розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації змінюється за нормальним законом.

На основі запропонованого підходу виконано дослідження, результати яких дозволили встановити, що для заданого режиму ведення рухомого складу із системами рекуперації номінальна потужність бортового СНЕ повинна складати близько 1314 кВт, енергоємність – 9,4 кВт·год, максимальна потужність – 3835 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии // *Электротехника і електромеханіка*. – 2013. – Вып. 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. – К., 2015. – 188 с.

3. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии // *Наука и техника транспорта*. – 2008. – Вып. 1. – С. 15–20.

4. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – Вып. 6/8 (72). – С. 9–13.

5. Костин Н.А., Никитенко А.В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электропод-

вижном составе постоянного тока // *Залізничний транспорт України*. – 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. Щуров Н.И., Щеглов К.В., Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги // *Сборник научных трудов НГТУ*. – Новосибирск, 2008. – Вып. 1 (51). – С. 99–104.

8. Улитин В.Г. Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте // *Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов»*. – Харьков, ХГАГХ, 2009. – Вып. 88. – С. 266–271.

9. Li X., Lo H.K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations // *Transportation Research Part B*. – 2014. – Iss. 64. – PP. 73–89.

10. Омеляненко В.И., Бондаренко В.Е., Омеляненко Г.В., Оверьянова Л.В. Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог // *Локомотив-інформ*. – 2011. – Вып. 4. – С. 4–9.

11. Сулим А.А., Донченко А.В., Гончаров А.М. и др. Определение параметров бортового накопителя электроэнергии при заданном режиме ведения подвижного состава метрополитена // *Залізничний транспорт України*. – 2016. – Вып. 3–4. – С. 73–84.

12. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – Т. 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 534 с.

13. Костин Н.А., Саблин О.И. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – Вып. 1. – С. 97–100.

14. Слепцов М.А., Долаберидзе Г.П., Прокопович А.В. и др. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. Заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.

15. Говорин Е.В. Статистические методы планирования эксперимента в металлургии. – М.: Металлургия, 1992. – 350 с.

16. Пальоха К.К. Организация і проведення експерименту: навч. посібник для студентів спеціальності «Композиційні та порошкові матеріали, покриття». – К.: ІЗИН, 1996. – 136 с.

PARAMETERS ONBOARD ENERGY STORAGE FOR A GIVEN OPERATING CONDITIONS METRO ROLLING STOCK

A. Sulim, P. Khozya

State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car-Building Institute»
vul. I. Prykhodka, 33, Kremenchuk, 39621, Ukraine. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

O. Ustenko

Ukrainian State University of Railway Transport
pl. Feiyezbakha, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. E-mail: ustenko_av@mail.ru

A. Lomonos

Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenechuk, 39600, Ukraine. E-mail: ai_lomonos@ukr.net

Purpose. The article deals with the further development of rail public transportation, including the metro rolling stock, namely of improving its energy efficiency through the use of modern energy-efficient electrical systems. The analysis of existing research found that the main directions of energy efficiency in metro rolling stock are implementing

recovery systems and energy storage. Found that the most promising is the on-board accommodation of capacitive energy storage based on condenser modules (supercapacitor). Considered one of the important issues – the approach development of the onboard energy storage parameters determination for given conditions of metro rolling stock with recovery system. **Methodology.** The approach is offered, which consists of the following stages: research energy-exchange processes in the operating conditions of the rolling stock on a given section of track, processing of data sets, determining by experiment planning significant impacts on storage options based on their time-action, construction and analysis of the probability characteristics of the results of processing data sets and immediately determine the parameters of onboard energy storage for the proposed criteria. **Results.** Energy-exchange processes in the operating conditions of the metro rolling stock with the recovery systems at Svyatoshynsko-Brovarska line are registered. The results of measurements calculated amount of electric power and regenerative braking during a given operating conditions of the train. Found that the most significant factors that influence the choice of onboard power and power consumption of the drive is under load and schedule of the train. Probabilistic characteristics of rolling stock for often operating conditions during the day, taking into account the maximum amount of electricity generating regenerative braking are constructed and analyzed. **Originality.** For the first time necessary parameters of onboard storage, power consumption, nominal and maximum power are determined using the proposed approach for the given conditions of the metro car. **Practical value.** Results of the research can be used during building a new rolling stock or modernization of existing metro rolling stock. References 16, tables 4, figures 7.

Key words: metro rolling stock, recovery system, capacitive energy storage, capacitor module, supercapacitor.

REFERENCES

- Zhemerov, G.G., Ilyina, N.A., Tugay, D.V. and Kholod, O.I. (2013), "Underground power systems with modern semiconductor converters and energy storage", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, no. 1, pp. 41–49. (in Russian)
- Sulim, A.A. (2015), "Improvement of power supply effectiveness of the metro rolling stock equipped with recuperation system by using a capacitive storage", Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.22.07, State enterprise "State scientific research center of railway transport of Ukraine", Kyiv. (in Russian)
- Shevlyugin, M.V. and Zheltov, K.S. (2008), "The reduction of power consumption for the movement of trains in the Moscow metro when using capacitive energy storage", *Nauka i tekhnika transporta*, no. 1, pp. 15–20. (in Russian)
- Sablin, O.I. (2014), "Research recovery efficiency of the electricity in underground conditions", *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, Vol. 6/8, no. 72, pp. 9–13. (in Ukrainian)
- Kostin, N.A. and Nikitenko, A.V. (2014), "Autonomy of regenerative braking – the bases of reliable energy efficient recovery for electric rolling DC", *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, no. 3, pp. 15–23. (in Russian)
- Vasilyev, V.A. (2012), "Improving energy efficiency of electric trains DC", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.22.07, Petersburg State University of Railway Engineering, St. Petersburg. (in Russian)
- Shchurov, N.I., Shcheglov, K.V. and Shtang, A.A. (2008), "The use of energy storage systems of electric traction", *Zbirnyk naukovykh prats NGTU*, Vol. 1, no. 51, pp. 99–104. (in Russian)
- Ulitin, V.G. (2009), "The problem of using the excess power on the urban electric transport", *Nauchno-tekhnicheskii sbornik "Komunalnoe hozyaystvo gorodov"*, no. 88, pp. 266–271. (in Russian)
- Li, X. and Lo, H.K. (2014), "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations", *Transportation Research Part B*, no. 64, pp. 73–89.
- Omelyanenko, V.I., Bondarenko, V.E., Omelyanenko, G.V. and Overyanova, L.V. (2011), "Storage of energy – a promising technology for railways", *Lokomotiv-inform*, no. 4, pp. 4–9. (in Russian)
- Sulim, A.A., Donchenko, A.V., Goncharov, A.M. et al. (2016), "Definition onboard electric drive parameters for a given mode of conducting rolling stock subway", *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, no. 3, 4, pp. 73–84. (in Russian)
- Neyman, L.R. and Demirchyan, K.S. (1981), *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Tom pervyy. [Theoretical bases of the electrical engineering, Vol. 1]*, Energoizdat, Leningrad. (in Russian)
- Kostin, N.A. and Sablin, O.I. (2005), "Power factor of the electric rolling stock DC", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, no. 1, pp. 97–100. (in Russian)
- Sleptsov, M.A., Dolaberidze, G.P., Prokopovich, A.V. et al. (2006), *Osnovy elektricheskogo transporta [Bases of electric transport]*, Akademiya, Moscow. (in Russian)
- Govorin, V.Ye. (1992), *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v metallurgii [Statistical methods of planning the experiment in metallurgy]*, Metallurgiya, Moscow. (in Russian)
- Palokha, K.K. (1996), *Organizatsiya i provedeniya eksperymentu [Organization and experiment]*, Institute of content and teaching methods, Kyiv. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 31.08.2016.