

УДК 621.33:629.432

*А.В. Донченко, С.О. Мужичук, А.О. Сулим, П.О. Хозя, О.О. Мельник*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗОВАНОГО ПОЇЗДА  
МЕТРОПОЛІТЕНУ ВИРОБНИЦТВА ПАТ «КВБЗ»**

*В статті приведені результати експериментальних досліджень енергопроцесів між контактною мережею та модернізованим поїздом метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» під час його експлуатації на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен». Встановлено, що в режимі рекуперативного гальмування під час заданих умов експлуатації модернізованого поїзда до мережі генерується близько 20 % та утилізується близько 17 % електроенергії, витраченої на тягу. Також встановлено, що шляхом модернізації існуючого рухомого складу його енергоефективність підвищується більш ніж на 40 %.*

**Вступ**

Відомо, що вітчизняні метрополітени є потужними та енергоємними споживачами електроенергії [1–3]. Близько 70 % від загального споживання електроенергії у вітчизняному метрополітені – це споживання електроенергії на тягу рухомих складом метрополітену [1, 2]. За результатами виконаних досліджень на КП «Київський метрополітен» встановлено, що за останні роки витрати на електроенергію збільшились [1]. Тому в умовах постійного подорожчання вартості енергоресурсів проблема енергозбереження та енергоефективності на рухомому складі стає все більш актуальною [3, 4].

З метою скорочення витрат електроенергії на тягу поїздів співробітниками ПАТ «КВБЗ» спільно з іншими вітчизняними та іноземними підприємствами за фондом Зелених Інвестицій модернізовано існуючий рухомий склад. Даний проект передбачає модернізацію вагонів експлуатуючого парку поїздів Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен», термін експлуатації яких більший ніж встановлений заводом виробником. Модернізація даних вагонів передбачає заміну двигуна постійного струму на асинхронний, релейно-контакторної системи управління на мікропроцесорну, а також можливість реалізації рекуперативного гальмування. Як наслідок, за рахунок модернізації електричного обладнання вагонів прогнозується скорочення витрат на тягу поїздів до 35 %. Тому актуальним питанням є дослідження енергоефективності модернізованого поїзда під час його експлуатації.

**Мета роботи** – експериментальне дослідження енергопроцесів між контактною мережею та модернізованим поїздом для визначення показників його енергоефективності.

**Матеріал і результати досліджень**

Експериментальні дослідження виконані за допомогою випробувального комплексу, в склад якого входять модернізований дослідний поїзд та вимірювальна система, що встановлена на його борту (рис. 1).

*© А.В. Донченко, С.О. Мужичук, А.О. Сулим, П.О. Хозя, О.О. Мельник, 2015 р.*

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За результатами отриманих даних (рис. 3) виконані розрахунки відношення рекуперованої в мережу до споживаної електроенергії ( $\gamma$ , %) та відношення надлишкової до споживаної електроенергії ( $\psi$  %) модернізованим поїздом метрополітену під час його експлуатації між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії за формулами:

$$\gamma = \left| \frac{A_{\text{сер.рек}}}{A_{\text{сер.тяги}}} \right| \cdot 100; \quad (4)$$

$$\psi = \left| \frac{A_{\text{сер.надл.рек}}}{A_{\text{сер.тяги}}} \right| \cdot 100. \quad (5)$$

Результати розрахунків, виконані за формулами (4) та (5), приведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків відношення кількості електроенергії

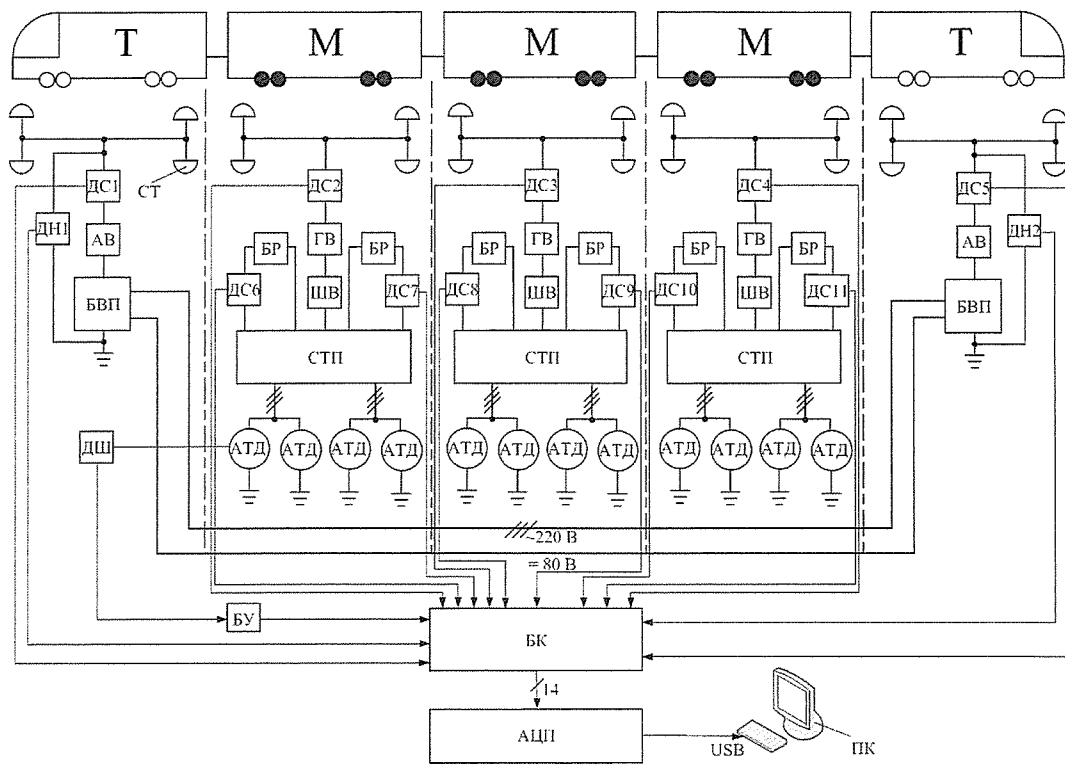
Досліджувана ділянка	Відношення кількості електроенергії, %	
	$\gamma$	$\psi$
Лісова–Академмістечко	15,31	13,4
Академмістечко–Лісова	24,96	21,64
Лісова–Академмістечко–Лісова	19,87	17,29

Результати експериментальних досліджень (табл. 1) свідчать, що реалізація рекуперативного гальмування під час заданих умов експлуатації модернізованого поїзда між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії дозволяє зберегти близько 20 % електроенергії, витраченої на тягу. Крім того, існує значний резерв енергозбереження за рахунок використання надлишкової електроенергії, який складає близько 17 % електроенергії, витраченої на тягу.

Таким чином, отримані дані дають можливість визначити підвищення енергоефективності за рахунок реалізації рекуперативного гальмування на модернізованому поїзді. Проте в цілому на підвищення енергоефективності модернізованого поїзда, окрім застосування рекуперативного гальмування, впливає також впровадження на ньому асинхронного приводу та мікропроцесорної системи управління, які є більш ефективними. Отже отримані дані не дають повну оцінку підвищення енергоефективності модернізованого поїзда.

Для повної оцінки підвищення енергоефективності модернізованого поїзда за рахунок впровадження вищевказаних заходів виконано додаткові експериментальні дослідження з визначення показника питомих витрат електроенергії на тягу. Даний показник визначається під час руху поїзда з максимальним завантаженням на прямолінійних ділянках колії (ухил не більше ніж 3 %) довжиною 1700 м з швидкістю сполучення 42 км/год. Більш детально умови проведення досліджень даного показника описані в методиках [7, 8]. Експериментальні дослідження питомих витрат електроенергії модернізованого поїзда виконані на ділянці «Хрещатик – Арсенальна – Хрещатик», яка відповідає основним вимогам, встановленим в методиках [7, 8].

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



**Рис. 1. Блок-схема випробувального комплексу**

Дослідний модернізований поїзд складається з п'яти вагонів, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні (комплектація 3М + 2Т).

Головні вагони укомплектовані блоками власних потреб (БВП), які з'єднані з струмоприймачами (СТ) через автоматичні вимикачі (АВ). Встановлені БВП забезпечують живленням нетягове електрообладнання поїзда. Основними функціями АВ є підключення кола живлення нетягового електрообладнання до контактної мережі та його захист під час виникнення аварійних ситуацій. Встановлені на головних вагонах СТ забезпечують споживання електроенергії з мережі на власні потреби.

Проміжні вагони укомплектовані асинхронними тяговими двигунами (АТД) типу МВ-5149-А на кожній колісній парі з наступними номінальними параметрами:  $P_n = 150 \text{ кВт}$ ;  $U_n = 610 \text{ В}$ ;  $I_n = 185 \text{ А}$ ;  $f_n = 65 \text{ Гц}$ ;  $\eta_n = 0,91$ ;  $n_n = 1900 \text{ об/хв}$ ;  $s_n = 2,4 \%$ .

Асинхронні ТД обмоторених вагонів отримують живлення від статичного тягового перетворювача (СТП), який складається з двох інверторів та має блочно-модульну конструкцію. Інвертори забезпечують регулювання вихідної напруги та частоти від нуля до максимального значення. Один інвертор забезпечує плавне управління двома АТД. Конструкція інвертора також передбачає рекупераційне гальмування за наявності споживача електроенергії в мережі та реостатне гальмування за допомогою блоків резисторів (БР) за їх відсутності. Силкові тягові перетворювачі з'єднані з СТ через швидкодіючий вимикач (ШВ) та головний вимикач (ГВ).

Вимикачі (ШВ, ГВ) встановлені на кожному проміжному обмотореному вагоні з метою підключення силового електрообладнання (СТП, АТД) до контактної мережі та його захисту під час виникнення аварійних ситуацій в силовому колі. Встановлені на проміжних обмоторених вагонах СТ, забезпечують енергообмін між мережею і вагонами в режимах споживання та рекуперації.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

Вимірювальна система розроблена провідними 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 (ПК), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), блок комутації (БК), блок узгодження (БУ) та вимірювальні датчики.

В якості вимірювальних датчиків використовуються: одинадцять датчиків струму (ДС1-ДС11), два датчики напруги (ДН1-ДН2) та датчик швидкості (ДШ). Контроль спожитого струму на власні потреби здійснюється ДС1 і ДС5, контроль загального струму споживання на тягу та рекуперацію виконуються ДС2-ДС4, контроль струму при реостатному гальмуванні відповідно ДС6-ДС11. Контроль напруги контактної мережі здійснюється за допомогою ДН1 та ДН2. Вимірювання швидкості поїзда здійснюється за допомогою штатного ДШ.

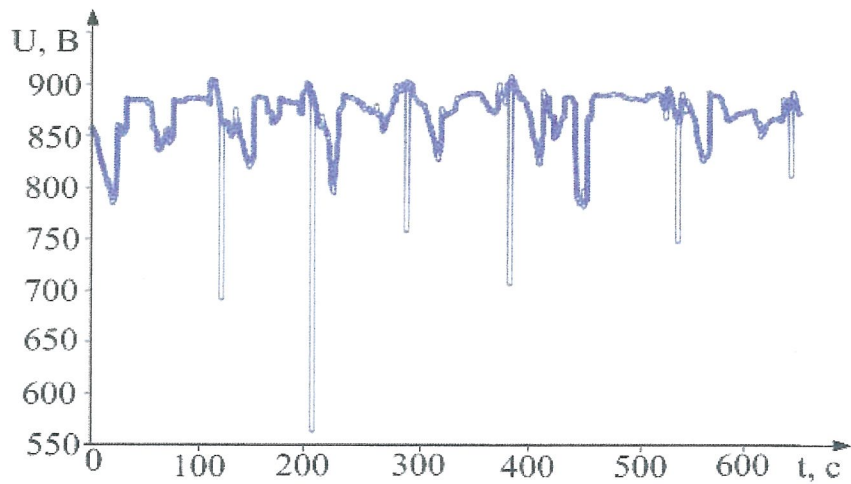
Для узгодження типу та рівня вихідного сигналу ДШ з вхідним каналом АЦП використовується БУ. Сигнали з виходів вимірювальних датчиків через БК надходять на вхідні канали АЦП, який виконує функцію перетворення аналогових сигналів в цифрову форму для подальшої обробки на ПК.

Обробка даних на ПК здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО», розробленого спеціалістами ДП «УкрНДІВ» [5, 6]. Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних, отриманих від вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному поїзді. Слід зазначити, що дана система універсальна, оскільки може застосовуватись для дослідження енергопроцесів практично на всіх типах електрорухомого складу.

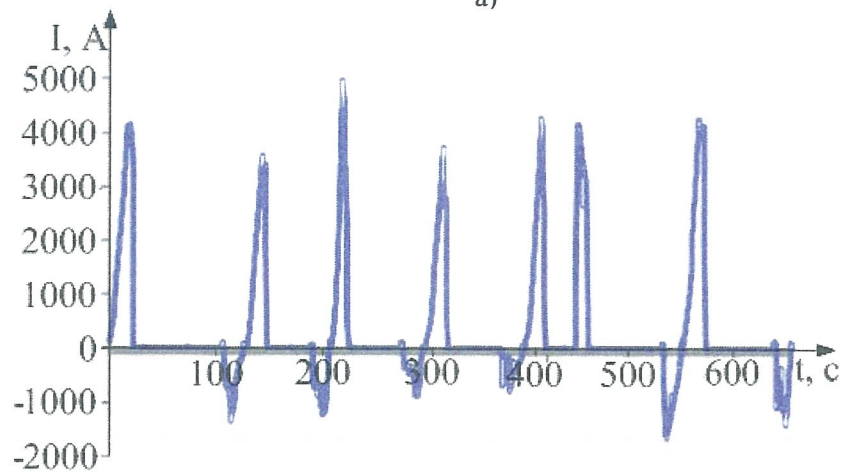
Експериментальні дослідження енергопроцесів між контактною мережею та модернізованим поїздом виконано на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» під час руху поїздів в штатному режимі по «непіковому» графіку. Експерименти здійснювались при номінальному завантаженні вагонів модернізованого поїзда. Режим ведення дослідного поїзда відповідав дотриманню «непікового» графіку руху.

На рис. 2 представлено одну з реалізацій енергопроцесів між контактною мережею та поїздом під час його руху на ділянці «Арсенальна – Політехнічний інститут».

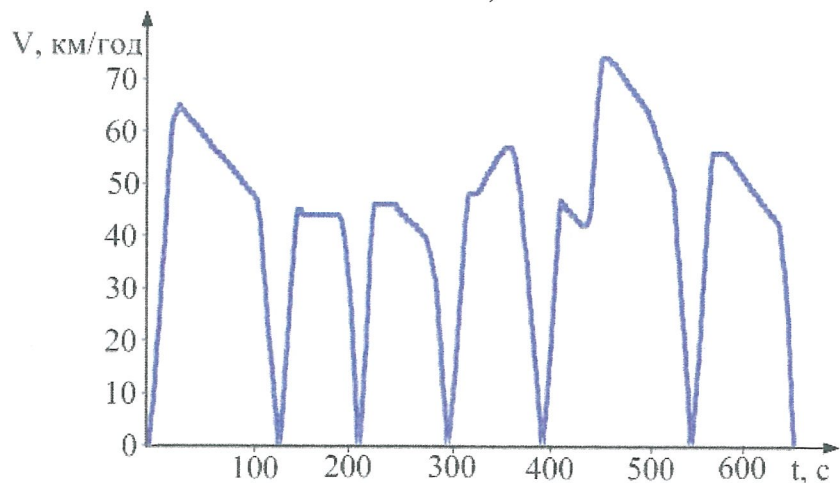
## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



а)



б)



в)

Рис. 2. Досліджувані параметри під час руху поїзда метрополітену:  
а) напруга на струмоприймачі  $U(t)$ ; б) споживаний (рекуперований) струм поїзда  $I(t)$ ;  
в) швидкість руху поїзда  $V(t)$

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Під час заданих умов експлуатації поїзда між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії виконано ряд реалізацій. Для кожної реалізації отримані значення кількості споживаної ( $A_{\text{тяги}}$ , кВт·год), рекуперованої до мережі ( $A_{\text{рек}}$ , кВт·год) та надлишкової електроенергії ( $A_{\text{надл.рек}}$ , кВт·год) за формулами:

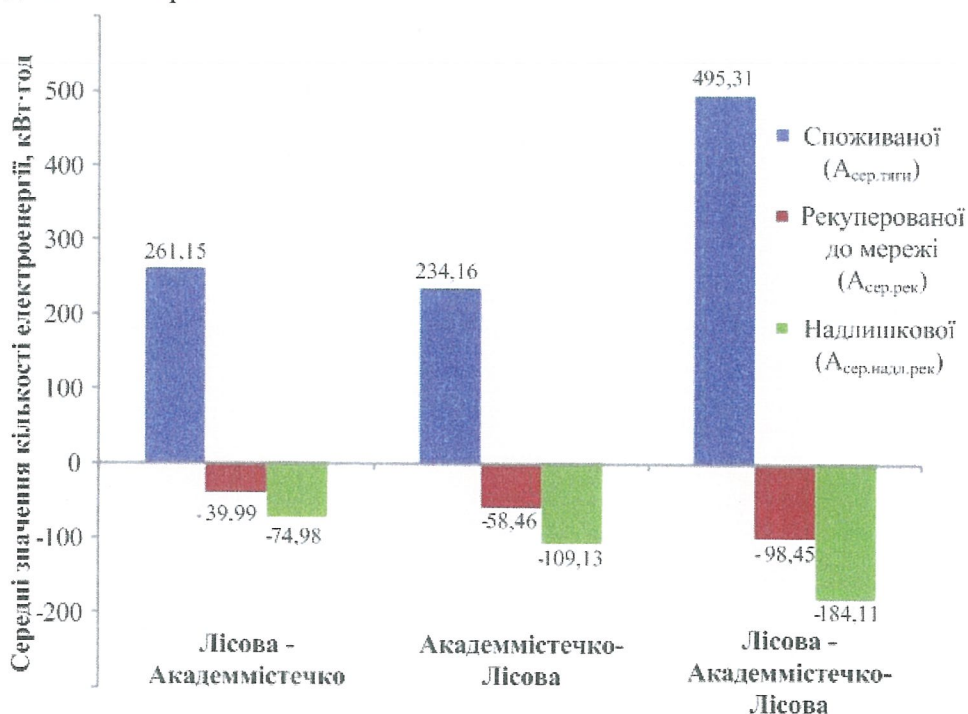
$$A_{\text{тяги}} = \frac{I_{\text{сер.тяги}} \cdot U_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000}; \quad (1)$$

$$A_{\text{рек}} = \frac{I_{\text{сер.рек}} \cdot U_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}; \quad (2)$$

$$A_{\text{надл.рек}} = \frac{I_{\text{сер.гал}} \cdot U_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}; \quad (3)$$

де  $I_{\text{сер.тяги}}$  – середнє значення струму в режимі тяги, А;  $U_{\text{сер.тяги}}$  – середнє значення напруги в режимі тяги, В;  $t_{\text{тяги}}$  – тривалість режиму тяги, с;  $I_{\text{сер.рек}}$  – середнє значення струму, що повертається в мережу в режимі рекуперативного гальмування, А;  $U_{\text{сер.рек}}$  – середнє значення напруги в режимі рекуперативного гальмування, В;  $t_{\text{рек}}$  – тривалість режиму рекуперативного гальмування, с;  $I_{\text{сер.гал}}$  – середнє значення струму на гальмівних резисторах в режимі рекуперативного гальмування, А.

Середні значення кількості споживаної ( $A_{\text{сер.тяги}}$ ), рекуперованої до мережі ( $A_{\text{сер.рек}}$ ) та надлишкової ( $A_{\text{сер.надл.рек}}$ ) електроенергії під час заданих умов експлуатації модернізованого поїзда між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії представлені на рис. 3.



**Рис. 3. Кількість споживаної, рекуперованої до мережі та надлишкової електроенергії під час заданих умов експлуатації поїзда**

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Відомо, що питомі витрати електроенергії на тягу існуючого не модернізованого поїзда становлять близько  $50 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{т} \cdot \text{км}$  [9]. Дане значення питомих витрат прийнято як базове для визначення енергоефективності модернізованого поїзда.

На рис. 4 представлено одну з реалізацій енергопроцесів між контактною мережею та поїздом під час його руху на ділянці «Арсенальна – Хрещатик».

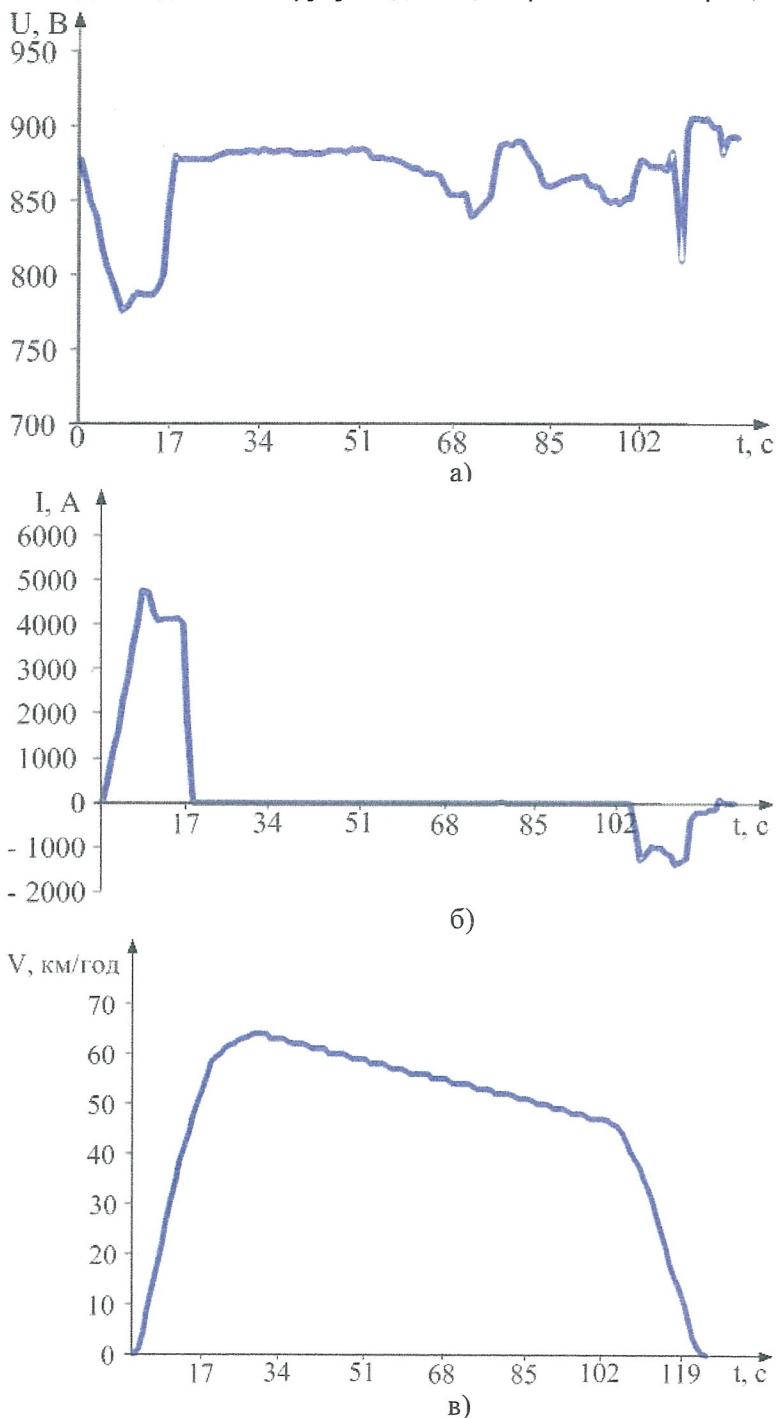


Рис. 4. Досліджувані параметри під час руху поїзда метрополітену:  
а) напруга на струмоприймачі  $U(t)$ ; б) споживаний (рекуперований) струм поїзда  $I(t)$ ;  
в) швидкість руху поїзда  $V(t)$



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Згідно вимог методик [7, 8] під час заданих умов експлуатації поїзда на ділянці «Хрещатик – Арсенальна – Хрещатик» виконано ряд реалізацій. Для кожної реалізації отримані значення питомих витрат електроенергії без урахування ( $a_{\text{пит}} \cdot \text{Вт} \cdot \text{год} / \text{т} \cdot \text{км}$ ) та з урахуванням генерації до мережі електроенергії ( $a_{\text{пит.рек}} \cdot \text{Вт} \cdot \text{год} / \text{т} \cdot \text{км}$ ) за формулами [7]:

$$a_{\text{пит}} = \frac{I_{\text{сер.тяги}} \cdot U_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{m \cdot L}; \quad (6)$$

$$a_{\text{пит.рек}} = \frac{I_{\text{сер.тяги}} \cdot U_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}} - I_{\text{сер.рек}} \cdot U_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{m \cdot L}; \quad (7)$$

де  $m$  – маса завантаженого поїзда;  $L$  – довжина досліджуваної ділянки

Результати експериментальних досліджень визначення питомих витрат електроенергії на тягу за формулами (6) та (7) приведені в табл. 2.

**Таблиця 2. Результати визначення питомих витрат електроенергії на тягу**

Номер реалізації	$U_{\text{сер.тяги}}$ В	$I_{\text{сер.тяги}}$ А	$t_{\text{тяги}}$ с	$U_{\text{сер.рек}}$ В	$I_{\text{сер.рек}}$ А	$t_{\text{рек}}$ с	$a_{\text{пит}}$ Вт·год/т·км	$a_{\text{пит.рек}}$ Вт·год/т·км
Запис 1	817,5	2815	21	885,7	791	16	30,14	23,15
Запис 2	819,9	2781	22	891,1	821	16	31,29	23,99
Запис 3	805,6	2655	29	872,6	949	17	38,68	29,9
Запис 4	809,1	3325	20	876,1	638	16	33,56	27,98
Запис 5	816,4	3440	18	898,4	182	16	31,53	29,73
Запис 6	809,3	3510	17	881,1	825	16	30,12	22,87
Запис 7	828,4	3241	18	891,7	272	17	30,14	27,57
Запис 8	830,9	3327	17	885,2	464	17	29,31	24,96
Запис 9	812,2	3064	20	872,8	822	17	31,04	23,43
Запис 10	820,7	3116	19	890,4	360	17	30,3	26,9
Запис 11	825,1	3021	18	874,5	761	16	27,98	21,34
Запис 12	817,8	3261	19	872,3	492	17	31,6	27,05
Запис 13	815,5	3004	18	876,7	261	16	27,5	24,62
Середнє значення							31,0	25,7

Енергоєфективність модернізованого поїзда визначено за формулою:

$$\alpha = 100 - \left( \frac{a_{\text{пит.модерн.}}}{a_{\text{пит.немодерн.}}} \cdot 100 \right); \quad (8)$$

де  $a_{\text{пит.модерн.}}$ ,  $a_{\text{пит.немодерн.}}$  – питомі витрати на електроенергію відповідно модернізованого та немодернізованого поїзда.



## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Результати визначення енергоефективності модернізованого поїзда представлено в табл. 3.

Таблиця 3. Результати визначення енергоефективності модернізованого поїзда

Показник	Без урахування генерації електроенергії до мережі	З урахуванням генерації електроенергії до мережі
Енергоефективність, %	38	48,6

За результатами отриманих даних (табл. 3) встановлено, що шляхом модернізації існуючого рухомого складу його енергоефективність без урахування та з урахуванням генерації електроенергії до мережі підвищується на 38 % та 48,6 % відповідно.

### Висновки

За результатами даних експериментальних досліджень встановлено наступне:

- реалізація рекуперативного гальмування під час заданих умов експлуатації модернізованого поїзда між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії дозволяє зберегти близько 20 % електроенергії, витраченої на тягу;
- існує значний резерв енергозбереження за рахунок використання надлишкової електроенергії, яка за відсутності споживачів виділяється у вигляді тепла на резисторах та складає близько 15 % електроенергії, витраченої на тягу;
- шляхом модернізації існуючого рухомого складу його енергоефективність підвищується більш ніж на 40 %.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Донченко А.В. До питання витрат електроенергії на тягу вагонів метрополітену КП «Київський метрополітен» / А.В. Донченко, А.О. Сулим // Збірник наукових праць ДЕУТ: «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕУТ, 2013. – Вип. № 22. – С. 5–8.
2. 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. – Вип. № 1. – С. 15–20.
3. Донченко А.В. Экспериментальные исследования электроэнергии рекуперации электропоездами метрополитена в условиях КП «Киевский метрополитен» / А.В. Донченко, А.А. Сулим, П.А. Хозя, В.В. Федоров // Залізничний транспорт України – К., 2015. – Вип. 2. – С. 51 – 55.
4. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперативного гальмування 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.
5. Сычев С.Д. Разработка программного обеспечения для измерительных комплексов на базе персонального компьютера / С.Д. Сычев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. № 15. – С. 131 – 134.
6. Свідчення 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.
7. ТМ 6.5.00442 – 2011 Електрорухомий склад. Типова методика тягово-енергетичних випробувань.
8. ТМ 6.5.00618 – 2013 Вагони для метрополітену модернізовані типів Е-КМ-ГБ, Е-КМ-ПМ і Е-КМ-ПМ-01. Методика попередніх випробувань електрообладнання, тягово-енергетичних випробувань та випробувань на електромагнітну сумісність з пристроями сигналізації та зв'язку.
9. Технічні вимоги на виконання робіт «Комплексна модернізація вагонів типу «Е» та його модифікації з впровадженням асинхронного тягового приводу на КП «Київський метрополітен».