

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>

УДК 621.33:629.423:629.431/.432

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ТА ОЦІНКА РІВНЯ ЇХ ВПЛИВУ НА ПОКАЗНИК ПИТОМИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ

Сулим А.О., Мельник О.О., Бялобржеський О.В., Ломонос А.І.

### INVESTIGATION OF FACTORS AND EVALUATION OF THE LEVEL OF THEIR INFLUENCE ON THE INDICATE OF SPECIFIC ELECTRICITY CONSUMPTION OF ROLLING STOCK

Sulym A.O., Melnyk O.O., Bialobrzheskyi O.V., Lomonos A.I.

*В статті встановлено, що одним із актуальних питань залишається зниження експлуатаційних витрат та вартості життєвого циклу електрорухомого складу за рахунок підвищення його енергоефективності. Мета роботи – аналіз наявних факторів і дослідження рівня їх впливу на значення показника питомих витрат електроенергії на етапі розробки і виготовлення інноваційного електрорухомого складу з використанням спеціалізованого атестованого програмного забезпечення. Визначено основні фактори, що здійснюють вплив на значення показника питомих витрат електроенергії на тягу рухомого складу. Оцінено рівень впливу кожного фактору на значення питомих витрат електроенергії для рухомого складу метрополітену за результатами моделювання його динаміки руху та енергетичних процесів в спеціалізованому атестованому програмному забезпеченні. За результатами аналізу розрахунків встановлено, що для заданих умов найбільший вплив на значення питомих витрат електроенергії рухомого складу здійснює характеристика коефіцієнта корисної дії тягового приводу. Визначено, що такі характеристики та показники як сила тяги і гальмування, маса, основний опір руху, коефіцієнт інерції обертових мас рухомого складу у порівнянні з характеристикою коефіцієнта корисної дії тягового приводу, здійснюють значно менший вплив на значення питомих витрат електроенергії. Виконано розрахунки можливих резервів заощаджень енергоресурсів для заданих умов за рахунок експлуатації рухомого складу метрополітену з покращеними характеристиками тягового приводу. Встановлено, що впровадження в експлуатацію рухомого складу метрополітену з покращеними характеристиками тягового приводу дозволить заощадити до 22,7 % електроенергії. Визначено термін окупності тягового приводу з покращеними характеристиками для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену завдяки зменшенню експлуатаційних витрат перевізного процесу та за рахунок підвищення енергоефективності його рухомого складу.*

**Ключові слова:** тяговий двигун, електрорухомий склад, коефіцієнт корисної дії, метрополітен, питомі витрати електроенергії на тягу, тяговий привод.

**Вступ та постановка проблеми.** В Україні енергозбереження на сьогоднішній день визнано одним із пріоритетних напрямків економічного розвитку держави. Особливо це стосується транспортної галузі. Підприємства транспортної галузі, що мають та експлуатують електрорухомий склад (ЕРС), є потужними споживачами електроенергії у масштабах цілої держави. Близько 70-80 % електроенергії, що споживається цими підприємствами, витрачається на тягові потреби ЕРС [1–3].

Основним напрямком розвитку теорії проектування ЕРС є зниження витрат його життєвого циклу. Витрати життєвого циклу складаються з витрат на розробку ЕРС (розробка нормативно-технічної документації, випробування, сертифікація та освоєння виробництва), витрат на виробництво, витрат на експлуатацію, витрат на утилізацію. Зважаючи на тривалий цикл експлуатації ЕРС, витрати на його розробку, виробництво і утилізацію незрівнянно нижчі за витрати на експлуатацію. Тому сучасні тенденції розвитку та виробництва ЕРС базуються на зниженні витрат на їх експлуатацію.

Витрати на експлуатацію ЕРС складаються з витрат на енергоресурси, а також витрат на технічне обслуговування та ремонт. Слід зазначити, що протягом останнього часу спостерігається збільшення частки витрат на енергоресурси за відношенням до загальних експлуатаційних витрат. Це явище можливо пояснити суттєвою динамікою зростання вартості електроенергії за останні декілька років [3]. Тому, зменшення витрат на енергоресурси та зниження вартості життєвого циклу ЕРС є досить нагальним питанням, яке потребує якнайшвидшого вирішення.

**Аналіз останніх досліджень.** Останнім часом питанням зниження витрат енергоресурсів під час експлуатації ЕРС присвячено чимало робіт як вітчиз-

зняних вчених, так і закордонних вчених. В своїх дослідженнях [4–7] авторами розглянуто сучасні тенденції розвитку тягового приводу та його впровадження на інноваційному електрорухомому складі. В роботах [1, 2, 8–10] запропоновано активно впроваджувати на електрорухомому складі системи рекуперації та накопичення енергії. Ще одним перспективним напрямком економії енергоресурсів є розробка та впровадження систем раціонального ведення рухомого складу [11–13]. В роботах [14, 15, 16] запропоновано вдосконалювати допоміжні системи та впроваджувати інноваційні системи, які здатні покращити енергоефективність за рахунок ефективного використання режимів тяги і рекуперації. В дослідженнях [17, 18, 19] запропоновано застосовувати системи і технології, що засновані на використанні відновлювальних джерел енергії.

Проте, аналіз зазначених досліджень та ряду інших робіт дозволив встановити, що питання зниження витрат енергоресурсів під час експлуатації ЕРС залишається невирішеним в повному обсязі та потребує проведення подальших досліджень в цьому напрямку. Зокрема, недостатньо приділено уваги питанню аналізу впливу факторів на значення показника питомих витрат на електроенергію. Враховуючи зазначене, в цій статті запропоновано розглянути це питання більш детально та за результатами проведених досліджень надати рекомендації щодо основних напрямків і резервів зниження витрат електроенергії на тягу в процесі експлуатації ЕРС.

**Мета** – аналіз наявних факторів і дослідження рівня їх впливу на величину показника питомих витрат електроенергії на етапі розробки інноваційного електрорухомого складу з використанням спеціалізованого атестованого програмного забезпечення.

**Матеріал та результати досліджень.** Основними показниками, які характеризують витрати електроенергії на тягу ЕРС, є кількість електроенергії, витраченої на тягу, та питомі витрати електроенергії на тягу. Слід зазначити, що показник питомих витрат електроенергії на тягу є більш універсальним і дозволяє комплексно визначати ефективність ЕРС.

Показник питомих витрат електроенергії  $a_{\text{пит.тяги}}$ , Вт·год/т·км, на тягу ЕРС у загальному вигляді визначають за формулою [20, 21]:

$$a_{\text{пит.тяги}} = \frac{\sum \bar{U} \cdot \bar{I} \cdot \Delta t}{m \cdot L \cdot 3600}, \quad (1)$$

де  $\bar{U}$  – середнє значення напруги на струмоприймачі, В;  $\bar{I}$  – середнє значення струму споживання поїзда за час  $\Delta t$ , А;  $\Delta t$  – час руху, с;  $m$  – маса поїзда метрополітену, т;  $L$  – довжина перегону, км.

З формули (1) видно, що на показник питомих витрат електроенергії на тягу здійснює вплив кількість електроенергії споживання, маса поїзда та довжина перегону. Проте, насправді, факторів впливу

значно більше, ніж описано математично в формулі (1). На кількість споживання електроенергії рухомого складу під час експлуатації, окрім явно виражених факторів описаних формулою (1), здійснюють наступні фактори: коефіцієнт корисної дії тягового приводу, характеристика сили тяги (гальмування) (налаштування системи керування), основний опір руху, коефіцієнт інерції обертових мас (конфігурація поїзда). Зазначені факти відомі за результатами аналізу літературних джерел [20, 21] та практики проведення тягово-енергетичних випробувань ЕРС.

Цей показник згідно діючих типових методик [20–22] визначається за умов максимального завантаження рухомого складу як в режимі руху з середньою швидкістю сполучення на перегоні, що вказана в технічній документації на рухомий склад, так і під час розгону до максимальної експлуатаційної швидкості руху з послідовним рухом в режимах вибігу та гальмування. При цьому довжина перегону задається в нормативній або технічній документації залежно від типу електрорухомого складу.

В цій роботі запропоновано дослідити рівень впливу зазначених факторів на значення показника питомих витрат електроенергії на прикладі рухомого складу метрополітену. Слід зазначити, що в Україні метрополітен є досить перспективним видом транспорту. На даний час мережа вітчизняних метрополітенів постійно розвивається та розширюється. Так, в Києві будуються та вводяться в експлуатацію нові станції на вже діючих лініях метрополітену, а також активно триває будівництво Подільсько-Вигурівської лінії. Аналогічна ситуація в інших вітчизняних містах-мегаполісах. В Харкові та Дніпрі також будуються нові станції на вже діючих лініях метрополітену. Разом з тим, витрати на електроенергію в метрополітені постійно зростають.

В подальших дослідженнях для оцінки зазначених факторів впливу на значення показника питомих витрат електроенергії використано спеціалізоване атестоване програмне забезпечення (комп'ютерна програма «Rational trajectory»). Інтерфейс КП «Rational trajectory» представлений на рис. 1.

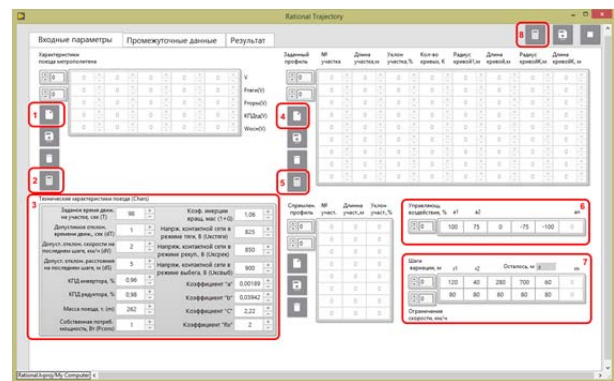


Рис. 1. Графічний інтерфейс КП «Rational trajectory».

З використанням програмного забезпечення виконано моделювання розгону, вибігу та гальмування під час руху поїзда на прямолінійному перегоні загальної довжини 1700 м без ухилів за умов реалізації середньої швидкості сполучення на перегоні 42 км/год та максимальної експлуатаційної швидкості руху 80 км/год (рис. 2).

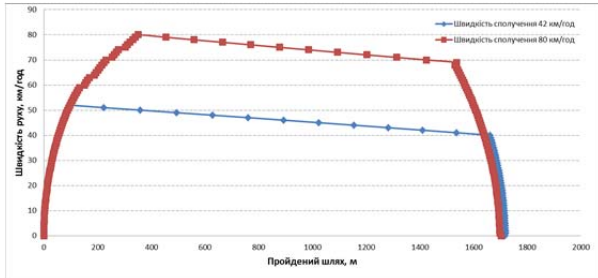


Рис. 2. Графіки руху поїзда за умов реалізації середньої швидкості сполучення на перегоні 42 км/год та максимальної експлуатаційної швидкості руху 80 км/год

В спеціалізованому програмному забезпеченні, за допомогою якого здійснювалось моделювання, прийнятні наступні припущення: поїзд розглядається як матеріальна точка з центром тяжіння по середині; напруга контактної мережі для заданих режимів тяги, вибігу, рекуперативного гальмування є величиною незмінною. При цьому математична модель дозволяє враховувати конструктивні та технічні особливості поїзда, зміну ККД тягового двигуна залежно від швидкості руху в режимах тяги та гальмування, а також досліджувати енергетичні процеси в режимі рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену.

З урахуванням вищезазначеного, показник питомих витрат електроенергії на тягу є досить універсальним і дозволяє одночасно в комплексі враховувати декілька факторів впливу. Тому, в рамках цієї роботи в подальшому запропоновано дослідити рівень впливу кожного з зазначених вище факторів на значення питомих витрат електроенергії шляхом застосування спеціалізованого атестованого програмного забезпечення для моделювання динаміки руху поїзда.

**Вплив коефіцієнта корисної дії тягового приводу.** Дослідження впливу цього фактору запропоновано здійснити шляхом проведення трьох окремих тестів за умов застосування асинхронного тягового приводу від різних фірм-виробників. Під час проведення кожного з цих трьох тестів залежності коефіцієнта корисної дії є різними, а інші показники (характеристики) – незмінними. Аналогічним чином під час подальших тестів досліджуваний фактор впливу є величиною змінною, інші показники впливу – постійними.

Залежності зміни коефіцієнтів корисної дії асинхронного приводу від трьох різних фірм-виробників представлено на рис. 3.

Слід зазначити, що залежності коефіцієнта корисної дії (рис. 3) отримано експериментально під

час стендових випробувань тягового приводу виробником або в процесі проведення тягово-енергетичних поїзних випробувань рухомого складу метрополітену.

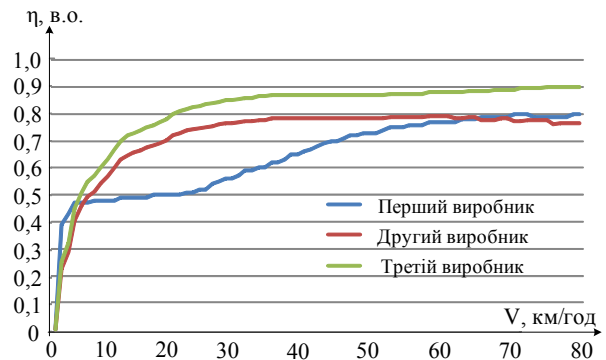


Рис. 3. Залежності коефіцієнта корисної дії тягового приводу від різних виробників

Інші характеристики та показники, які є незмінними, під час дослідження ступеню впливу коефіцієнта корисної дії тягового приводу, отримано за результатами експериментальних досліджень модернізованого рухомого складу метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ», який складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01. При цьому маса рухомого складу в максимально завантаженому стані складає 262 тони, коефіцієнт інерції обертових мас – 1,06. Графіки залежностей сили тяги та гальмування від швидкості цього рухомого складу зображено на рис. 4. Залежність основного опору руху поїзда від швидкості наведено на рис. 5.

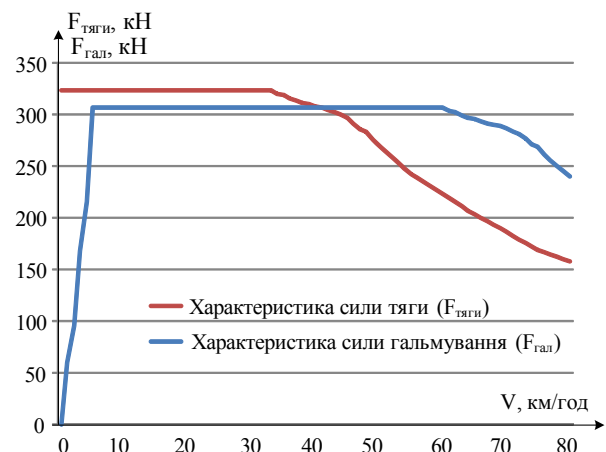


Рис. 4. Графіки залежностей сили тяги та гальмування від швидкості руху

Залежність основного опору руху поїзда від швидкості отримано експериментально під час проведення тягово-енергетичних випробувань.

Результати визначення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда метрополітену за проведеним моделюванням динаміки руху розраховано за формулою (1), наведено в табл. 1.

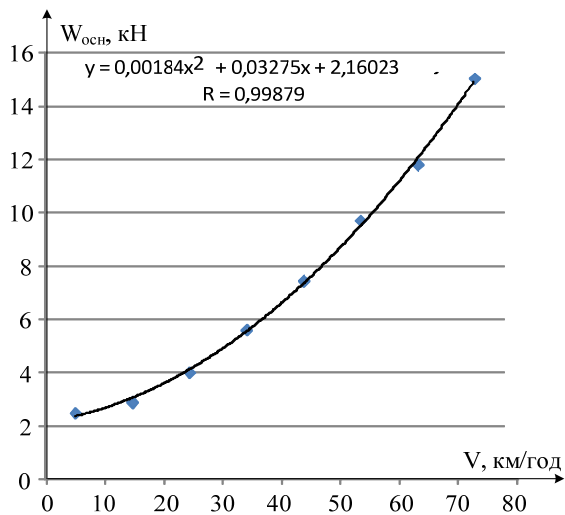


Рис. 5. Залежність основного опору руху поїзда метрополітену від швидкості

Таблиця 1

Результати розрахунків значень питомих витрат

Виробник АТД	Значення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда, Вт·год/т·км	
	Швидкість сполучення 42 км/год	Розгін до 80 км/год – вибіг – гальмування
Перший виробник	32,05	68,25
Другий виробник	26,51	62,94
Третій виробник	23,92	55,78
Різниця між найбільшим і найменшим значенням, %	25,4	18,3

Аналіз результатів розрахунків (табл. 1) дозволив встановити, що для заданих умов значення питомих витрат електроенергії залежно від обраного виробника тягового приводу змінюється в межах до 25,4 % та 18,3 % відповідно для середньої швидкості на перегоні 42 км/год та під час розгону до 80 км/год.

**Вплив налаштування системи керування (вибір характеристик сил тяги та гальмування).** Дослідження впливу цього фактору запропоновано здійснити шляхом проведення трьох окремих тестів за умов застосування тягового приводу від одного виробника, проте з різним налаштуванням системи керування тяговим і гальмівним обладнанням. Під час цих тестів змінними є характеристики сил тяги та гальмування.

Характеристики сил тяги та гальмування для трьох тестів, зображено на рис. 6, 7. Ці характеристики було обрано таким чином, щоб вони забезпечували необхідні вимоги за динамікою розгону (гальмування) та темпу прискорення (сповільнення) поїзда із зазначеними раніше параметрами. Тому, для виконання цих умов, обрані тягові (гальмівні) характеристики забезпечують максимальні значення прискорення в межах від 1,2 до 1,4 м/с<sup>2</sup> та сповільнення в межах від 1,15 до 1,35 м/с<sup>2</sup> під час номіналь-

ного завантаження. Також ці характеристики обрано з урахування обмежень сил тяги (гальмування) за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками.

Як тяговий привод обрано привод від третього виробника (рис. 3), коефіцієнт корисної дії якого є вищим у порівнянні з іншими виробниками. Характеристика основного опору руху під час виконання досліджень відповідає експериментально отриманій залежності, що зображена на рис. 5.

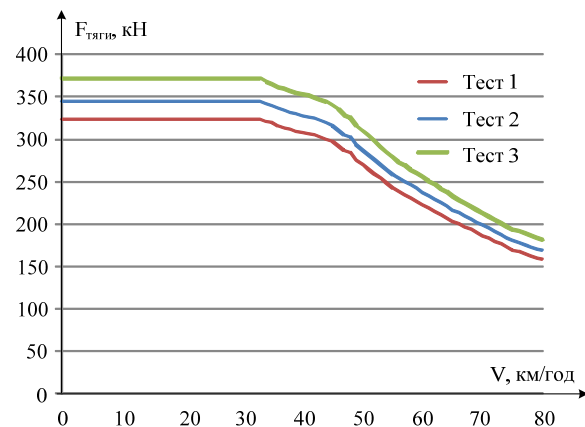


Рис. 6. Характеристики сил тяги рухомого складу

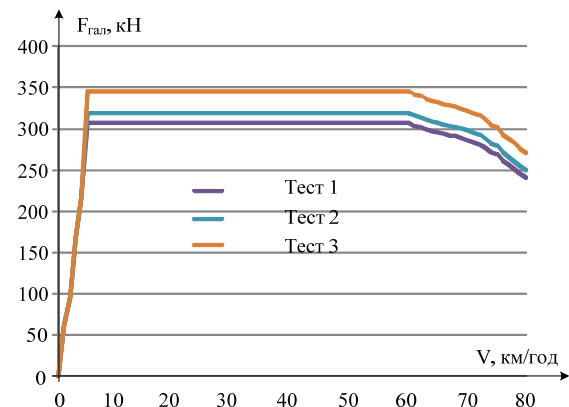


Рис. 7. Характеристики сил гальмування рухомого складу

Результати досліджень впливу налаштування системи керування на значення питомих витрат електроенергії на тягу, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків значень питомих витрат

Характеристика сил тяги та гальмування АТД	Значення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда, Вт·год/т·км	
	Швидкість сполучення 42 км/год	Розгін до 80 км/год – вибіг – гальмування
Характеристика 1	23,92	55,78
Характеристика 2	23,83	55,61
Характеристика 3	23,8	55,43
Різниця між найбільшим і найменшим значенням, %	0,5	0,6

Аналіз результатів розрахунків показує, що для заданих умов налаштування системи керування у порівнянні з характеристикою ККД тягового приводу здійснює незначний вплив на значення питомих витрат електроенергії. Цей вплив оцінюється в межах 0,5 % та 0,6 % відповідно для середньої швидкості на перегоні 42 км/год та під час розгону до 80 км/год.

**Вплив маси рухомого складу.** Аналіз технічних характеристик інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним тяговим приводом, який введено в експлуатацію останнім часом, дозволив встановити, що маса такого складу при максимальному завантаженні (10 пас/м<sup>2</sup>) знаходиться в межах від 227,5 т до 278,2 т. Зазначену масу рухомого складу наведено в розрахунку на п'ятивагонний зчеп. Виходячи з наведених меж, під час досліджень впливу маси рухомого складу на питомі витрати електроенергії, виконано три тести, в яких масу прийнято 227,5 т; 262,0 т; 278,2 т відповідно.

Під час виконання досліджень залежність ККД обрано максимально ефективну (тяговий привод від третього виробника (рис. 3)); коефіцієнт інерції обертових мас складає 1,06; характеристики сил тяги та гальмування відповідають залежностям, наведеним на рис. 4; характеристика основного опору відповідає залежності, зображеній на рис. 5. Обрані характеристики сил тяги та гальмування забезпечують необхідні значення динаміки руху складу і враховують обмеження за зчіпною вагою (зчеплення коліс з рейками).

Результати досліджень з впливу маси рухомого складу на значення питомих витрат електроенергії на тягу, наведено в табл. 3.

Таблиця 3

#### Результати розрахунків значень питомих витрат

Маса рухомого складу	Значення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда, Вт·год/т·км	
	Швидкість сполучення 42 км/год	Розгін до 80 км/год – вибіг – гальмування
Мінімальна (227,5 т)	24,75	55,78
Середня (262,0 т)	23,92	55,78
Максимальна (278,2 т)	23,86	55,78
Різниця між найбільшим і найменшим значенням, %	3,6	-

Аналіз результатів розрахунків дозволив встановити, що для заданих умов питомі витрати електроенергії залежно від маси змінюється в межах 3,6 % для середньої швидкості на перегоні 42 км/год. Під час розгону поїзда до експлуатаційної швидкості 80 км/год значення питомих витрат залишаються незмінними незалежно від його маси.

**Вплив характеристики основного опору руху.** Дослідження з впливу характеристики основного

опору руху на питомі витрати електроенергії на тягу виконано шляхом проведення трьох окремих тестів. Характеристики основного опору руху, які використано під час досліджень, зображено на рис. 8.

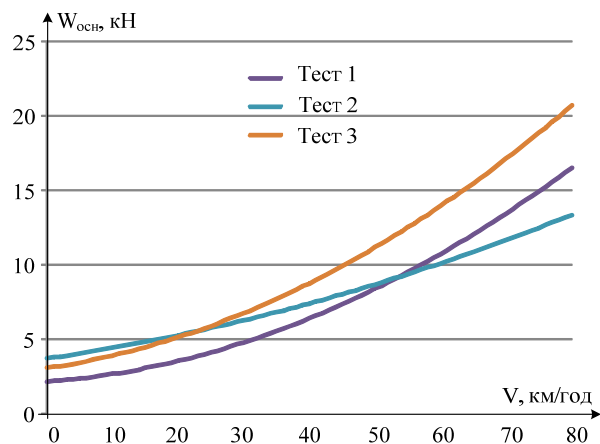


Рис. 8. Характеристики основного опору руху складу

Слід зазначити, що під час першого та другого тестів використано характеристики основного опору руху, отримані експериментально; під час третього тесту характеристику отримано розрахунковим шляхом на основі загальновідомої формули, яку наведено в роботі [23].

Під час виконання досліджень з впливу характеристики основного опору руху складу на питомі витрати електроенергії прийнято наступне: маса поїзда складає 262 т; коефіцієнт інерції обертових мас дорівнює 1,06; застосовано тяговий привод від третього виробника (рис. 3); тягова та гальмівна характеристики відповідають залежностям, наведеним на рис. 4.

Результати визначення значень питомих витрат електроенергії на тягу поїзда метрополітену з урахуванням різних характеристик основного опору руху, наведено в табл. 4.

Таблиця 4

#### Результати розрахунків значень питомих витрат

Характеристика основного опору руху	Значення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда, Вт·год/т·км	
	Швидкість сполучення 42 км/год	Розгін до 80 км/год – вибіг – гальмування
Характеристика 1	24,84	55,78
Характеристика 2	23,92	55,58
Характеристика 3	26,8	56,61
Різниця між найбільшим і найменшим значенням, %	10,7	1,8

Аналіз результатів розрахунків (табл. 4) показав, що для заданих умов характеристика основного опору руху здійснює вплив на значення питомих витрат електроенергії на тягу в межах 10,7 % та 1,8 %

відповідно для середньої швидкості на перегоні 42 км/год та під час розгону до 80 км/год.

**Вплив коефіцієнта інерції обертових мас.**

Коефіцієнт інерції обертових мас визначається експериментально під час проведення тягово-енергетичних випробувань або розрахунковим методом. Цей показник показує відношення маси обертових частин до загальної маси рухомого складу. Аналіз технічних характеристик інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним тяговим приводом, який введено в експлуатацію останнім часом, дозволив встановити, що коефіцієнт інерції обертових мас такого складу при максимальному завантаженні (10 пас/м<sup>2</sup>) знаходиться в межах від 1,04 до 1,08. Виходячи з наведених меж, під час досліджень впливу коефіцієнта інерції обертових мас рухомого складу на значення питомих витрат електроенергії, виконано три тести, в яких значення цього показника прийнято 1,04; 1,06; 1,08 відповідно.

Інші показники під час досліджень впливу показника коефіцієнта інерції обертових мас залишаються незмінними: характеристика ККД тягового приводу від третього виробника (рис. 3); графіки залежностей сил тяги та гальмування відповідають характеристикам наведеним на рис. 4; маса рухомого складу дорівнює 262 т; характеристику основного опору наведено на рис. 5.

Результати досліджень з впливу коефіцієнта інерції обертових мас рухомого складу на значення питомих витрат електроенергії на тягу, наведено в табл. 5.

Таблиця 5

**Результати розрахунків значень питомих витрат**

Коефіцієнт інерції обертових мас	Значення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда, Вт·год/т·км	
	Швидкість сполучення 42 км/год	Розгін до 80 км/год – вибіг – гальмування
Мінімальний (1,04)	23,9	54,73
Середній (1,06)	23,92	55,78
Максимальний (1,08)	23,93	56,83
Різниця між найбільшим і найменшим значенням, %	0,1	3,7

Аналіз результатів розрахунків (табл. 5) дозволив встановити, що для заданих умов питомі витрати електроенергії залежно від коефіцієнта інерції обертових мас змінюється в межах 0,1 % та 3,7 % відповідно для середньої швидкості на перегоні 42 км/год та під час розгону до 80 км/год.

Рівень впливу перелічених факторів на значення показника питомих витрат електроенергії на тягу для заданих умов, зображено у вигляді діаграм на рис. 9, 10. За аналізом результатів розрахунків встановлено, що для заданих умов найбільший вплив на значення питомих витрат електроенергії на тягу здійснює ККД тягового приводу (рис. 9, 10), інші

характеристики (показники) мають значно менший вплив.



Рис. 9. Рівень впливу факторів на значення питомих витрат електроенергії для середньої швидкості на перегоні 42 км/год

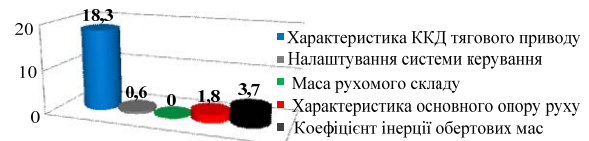


Рис. 10. Рівень впливу факторів на значення питомих витрат електроенергії під час розгону до швидкості 80 км/год

Слід зазначити, що сумарний вплив таких характеристик (показників) як сила тяги та гальмування, маса, основний опір руху, коефіцієнт інерції обертових мас порівняно із впливом ККД тягового приводу менший на 10,5 % та на 12,2 % відповідно для середньої швидкості на перегоні 42 км/год та під час розгону до 80 км/год.

Тому, запропоновано виконати оцінку заощаджень від зменшення витрат на енергоресурси саме за рахунок впровадження ефективного економічного асинхронного тягового приводу для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену.

Як дослідну ділянку під час розрахунків обрано Святошинсько-Броварську лінію КП «Київський метрополітен». Дослідний рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації. Прийнято, що поїзд протягом доби експлуатується наступним чином:

- у робочі дні (5 днів на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку руху (2 кола з мінімальним завантаженням та 5 кіл з номінальним завантаженням) та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку руху з максимальним завантаженням;

- у вихідні дні (2 дні на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку руху (1 коло з мінімальним завантаженням та 6 кіл з номінальним завантаженням).

Протягом року поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

Як тяговий привод використано асинхронний привод від трьох різних фірм-виробників з характеристиками ККД (рис. 3). Моделювання динаміки руху поїзда та енергетичних процесів на заданій ділянці здійснено за допомогою атестованого спеціалізованого програмного забезпечення (рис. 1).

Під час досліджень прийнято, що ККД редуктора є незмінною величиною, яка становить 0,98.

Підсумкові значення кількості споживання електроенергії на тягу рухомих складом за результатами обробки даних моделювання за допомогою атестованого спеціалізованого програмного забезпечення залежно від типу обраного асинхронного тягового приводу, наведено в табл. 6.

Таблиця 6

**Результати розрахунків кількості споживання електроенергії на тягу рухомих складом**

Завантаження поїзда	Значення кількості споживання електроенергії на тягу поїзда, кВт·год		
	Академістечко-Лісова	Лісова-Академістечко	Повне коло
<b>Тяговий привод від першого виробника</b>			
Мінімальне	183,3	198,6	381,9
Номинальне	279,7	295,9	575,6
Максимальне	338,4	363,7	702,1
<b>Тяговий привод від другого виробника</b>			
Мінімальне	154,9	163,8	318,7
Номинальне	234,2	261,1	495,3
Максимальне	285,2	315,2	600,4
<b>Тяговий привод від третього виробника</b>			
Мінімальне	140,2	149,3	289,5
Номинальне	215,9	230,7	446,6
Максимальне	262,5	282,1	544,6

Кількість спожитої електроенергії за один день визначається за формулою [24]:

$$E_d = m_1 \cdot E_{k1} + m_2 \cdot E_{k2} + \dots + m_n \cdot E_{kn}, \quad (2)$$

де  $m$  – кількість кіл за день для типової умови експлуатації поїзда;  $n$  – кількість типових умов експлуатації поїзда.

Кількість спожитої електроенергії за рік визначається за формулою [24]:

$$E_r = l_1 \cdot E_{d1} + l_2 \cdot E_{d2}. \quad (3)$$

де  $l_1, l_2$  – кількість робочих і вихідних днів на рік;  $E_{d1}, E_{d2}$  – кількість спожитої електроенергії у робочий та вихідний дні відповідно.

Результати кількості споживання електроенергії за рік залежно від типу впровадженого тягового приводу для заданих умов експлуатації поїзда, наведено в табл. 7.

Таблиця 7

**Результати розрахунків кількості споживання електроенергії поїздом на тягу за рік**

Виробник тягового приводу	Значення кількості споживання електроенергії на тягу поїзда, кВт·год			Економічний ефект, %
	У робочий день	У вихідний день	За рік	
Перший	5046	3836	1480545	-
Другий	4315	3291	1266953	14,4
Третій	3901	2969	1144989	22,7

Розрахунок терміну окупності виконується за різницею вартості тягового приводу за проектним та базовим варіантами. Базовий варіант представляє впровадження тягового приводу з найбільшою кількістю споживання електроенергії на тягу (в нашому випадку тяговий привод від першого виробника), проектні варіанти – впровадження тягового приводу від другого та третього виробників. В розрахунках прийнято вартість одного комплексу тягового приводу від першого виробника 560 тис. грн.; від другого – 700 тис. грн.; від третього – 840 тис. грн. Відповідно для п'ятивагонного поїзда з трьома моторними вагонами вартість тягового приводу від першого виробника становить 6720 тис. грн., від другого – 8400 тис. грн.; від третього – 10080 тис. грн.

Величина терміну окупності визначається за відношенням вартості від впровадження тягового приводу залежно від виробника до вартості заощадженої електроенергії цим приводом за рік [24]:

$$T_{ok} = \frac{Q}{T_e \cdot E_r}, \quad (4)$$

де  $Q$  – вартість тягового приводу;  $T_e$  – тариф на електроенергію ( $T_e = 2,27371$  грн./кВт·год).

Енергоефективність від впровадження проектних варіантів розраховується за формулою:

$$E = \frac{A_n}{A_b}, \quad (5)$$

де  $A_n$  – споживання за проектним варіантом;  $A_b$  – споживання за базовим варіантом.

Результати досліджень терміну окупності тягового приводу наведено у вигляді графіків на рис. 11.

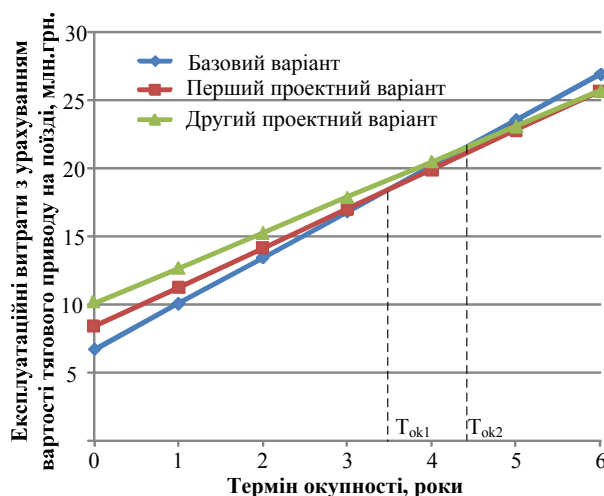


Рис. 11. Термін окупності тягового приводу для проектних варіантів

На підставі виконаних розрахунків (табл. 7, рис. 11) визначено річний економічний ефект та термін окупності від впровадження тягового приводу

за проектними варіантами для заданих умов руху поїзда метрополітену. Встановлено, що завдяки впровадженню ефективного тягового приводу з покращеними енергетичними характеристиками, можливо досягти заощаджень енергоресурсів до 22,7 %. При цьому щорічний економічний ефект від впровадження ефективного тягового приводу буде становити на рівні 490–763 тис. грн., а термін окупності – 3,5–4,4 роки.

### Висновки.

1. Визначено фактори та рівень їх впливу на показник питомих витрат електроенергії на тягу рухомого складу. Встановлено, що вплив на показник питомих витрат здійснюють наступні фактори: коефіцієнт корисної дії тягового приводу, налаштування системи керування тяговим і гальмівним обладнанням, основний опір руху, коефіцієнт інерції обертових мас (схема формування поїзда). За аналізом результатів розрахунків встановлено, що для заданих умов найбільший вплив на значення питомих витрат електроенергії на тягу здійснює ККД тягового приводу, інші характеристики (показники) мають значно менший вплив. Для заданих умов сумарний вплив таких характеристик (показників) як сила тяги та гальмування, маса, основний опір руху, коефіцієнт інерції обертових мас у порівнянні з впливом ККД тягового приводу менший на 10,5 % та на 12,2 % відповідно для середньої швидкості на перегоні 42 км/год та під час розгону до 80 км/год.

2. Результати досліджень засвідчили, що завдяки впровадженню ефективного тягового приводу з покращеними енергетичними характеристиками, можливо досягти заощаджень енергоресурсів до 22,7 %.

3. Результати досліджень показали, що впровадження ефективного тягового приводу з покращеними характеристиками, дозволить досягти щорічного економічного ефекту на рівні 490–763 тис. грн. При цьому термін окупності такого тягового приводу становить 3,5–4,4 роки.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці комплексного критерію для вибору раціональних параметрів тягового приводу для інноваційного рухомого складу на етапі його проектування з метою мінімізації експлуатаційних витрат та здешевлення перевізного процесу, що в цілому дозволить зменшити вартість життєвого циклу рухомого складу.

### Література

1. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. НТТ – Наука и техника транспорта. 2008. Вып. № 1. С. 15–20.
2. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskiy B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. International journal of renewable energy research. Vol. 9. No. 2. P. 848–858.
3. Донченко А.В., Сулим А.О., Сіора О.С., Мельник О.О., Федоров В.В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп. 2016. № 3(63). С. 108–119. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74732>.
4. Устенко О.В., Пасько О.В. Тенденции развития тяговых двигателей подвижного состава. Електротехніка і електромеханіка. 2013. № 1. С. 65–68.
5. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю. Сычуглов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1. Транспорт Российской Федерации. 2018. № 6 (79). С. 40–44.
6. Хворост М.В., Шпіка М.І., Бесараб А.І. Тяговий асинхронний електропривод для міського електротранспорту. Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2012. № 3. С. 7–10.
7. Воронов Р.В. Дослідження тягової електромеханічної системи з двома синхронними двигунами з постійними магнітами, що живляться від одного інвертора. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2020. № 1 (49). С. 8–19. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2020.1.49.8-19>.
8. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Вип. 8 (72) /том 6/. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>.
9. Костин Н.А., Никитенко А.В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока. Залізничний транспорт України. 2014. № 3. С. 15–23.
10. Sulym A., Lomonos A., Bialobrzeskiy O., Safronov O., Khozia P. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychoho Universytetu. 2020. № 3. P. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>.
11. Petrenko O., Liubarskiy B., Pliugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. Електротехніка і електромеханіка. 2017. № 6. P. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>.
12. Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелешин И.С., Чинь Л.М. Оптимизация управления движением поездов / под ред. доктора технических наук Л.А. Баранова. – М.: МИИТ, 2011. – 164 с.
13. Кислий Д. М. Визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп. 2016. № 1(61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>.
14. Khodaparastan M., Ahmad A. Mohamed, Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20, Issue 8, P. 2831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>.
15. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. TTS Technika Transportu szynowego. 2018. № 10. P. 39–43.
16. Hetman H.K., Marikutsa S.L. Selection of rational parameters of the nominal mode electric trains with asynchronous traction drive. Science and Transport



- Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. 2017. Issue 3 (69). P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104767>.
17. Шевлюгин М.В., Жуматова А.А. Возможность использования возобновляемых источников энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог. НТТ – Наука и техника транспорта. 2008. Вып. № 4. С. 25–28.
  18. Сокол Е.И., Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Силовая электроника и концепция энергетики «SMART GRID». Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2013. Спец. выпуск т.1, № 8 (114). С. 7–16.
  19. Гольденберг В. Возобновляемая энергия на железнодорожном транспорте. Мир транспорта. 2017. Том 15. № 1. С. 64–74.
  20. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров : Под ред. И.П. Исаева. М.: Транспорт, 1995. 294 с.
  21. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др. М.: Издательский центр «Академия». 2006. 464 с.
  22. М 6.5.00684 Електрорухомий склад. Методика тягово-енергетичних випробувань. Кременчук, ДП "УкрНДІВ". 2016. 27 с.
  23. Байрыева Л.С. Теория электрической тяги. Методическое пособие / Л.С. Байрыева, А.В. Прокопович. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 40 с.
  24. Sulym A. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train / A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, O. Palant, V. Stamatii // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Issue 3 (102). – P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
- ### References
1. Shevlyugin M.V., Zheltov K.S. On reduction of electric power consumption in Moscow underground by application of capacitive energy storage devices. STT – Science and Technology in Transport. 2008. Vol. 1. P. 15–20.
  2. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskiy B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. International journal of renewable energy research. Vol. 9. No. 2. P. 848–858.
  3. Donchenko A.V., Sulym A.O., Siora A.S., Melnyk A.A., Fedorov V.V. Analysis of energy saving and energy efficiency issues during operation of the metro rolling stock. Scientific and Technical Library Dnipro National University of Railway Transport. 2016. No. 3(63). P. 108–119. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74732>.
  4. Ustenko A.V., Pasko O.V. Development trends for rolling stock traction motors. Electrical Engineering & Electromechanics. 2013. No. 1. P. 65–68.
  5. Titova T.S., Evstaf'ev A.M., Izvarin M.Iu., Sychugov A.N. Prospects for development of traction rolling stock. Part 1. Transport of the Russian Federation. 2018 No. 6(79). P. 40–44.
  6. Hovorost M.V., Shpika M.I., Besarab A.I. Hauling asynchronous drive is for city elektrotransportu. Energy saving. Power engineering. Energy audit. 2012. No. 3. P. 7–10.
  7. Voronov R. Research of tractive electromechanical system with two synchronous motors with permanent magnets powering from by one inverter. Electromechanical and energy saving systems. 2020. No. 1 (49). P. 8–19. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2020.1.49.8-19>.
  8. Sablin O. Study of the efficiency of the process of electricity recovery in the subway. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Pub. 8 (72) /Vol. 6/ P. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>.
  9. Kostin M., Nikitenko A. Recuperative braking autonomy is a basis of reliable and efficient energy recuperation in DC electric rolling stock. Railway Transport of Ukraine. 2014. №3. P. 15–23.
  10. Sulym A., Lomonos A., Bialobrzheskiy O., Safronov O., Khozia P. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychoho Universytetu. 2020. № 3. P. 59-66. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>.
  11. Petrenko O., Liubarskiy B., Pliugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. Електро-техніка і електромеханіка. 2017. № 6. P. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>.
  12. Baranov L.A., Yerofeyev Ye.V., Meleshin I.S., Chin L.M. Optimizatsiya upravleniya dvizheniyem poyezdov [Optimization of train traffic control]. Moscow, MIIT Publ., 2011. 164 p.
  13. Kyslyi D.M. Energy Saving Modes Definition of Trains Handling. Scientific and Technical Library Dnipro National University of Railway Transport. 2016. No. 1 (61). P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>.
  14. Khodaparastan M., Ahmad A. Mohamed, Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20, Issue 8, P. 2831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>.
  15. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umozliwiajacy przejazd tramwaju przez skrzyzowanie bez uzycia sieci trakcyjnej. TTS Technika Transportu szynowego. 2018. № 10. P. 39–43.
  16. Hetman H.K., Marikutsa S.L. Selection of rational parameters of the nominal mode electric trains with asynchronous traction drive. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. 2017. Issue 3 (69). P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104767>.
  17. Shevlyugin M.V., Zhumatova A.A. Application possibility of perpetual energy sources in the traction electric supply system on railways. STT – Science and Technology in Transport. 2008. Vol. 4. P. 25–28.
  18. Sokol E. I., Zhemerov G. G., Tugay D.V. Power electronics and energy development concept «SMART GRID». Energy saving. Power engineering. Energy audit. 2013. Special pub. Vol. 1 No. 8 (114). P. 7–16.
  19. Goldenberg V. Renewable Energy in Railway Transport. World of transport and transportation, Vol. 15, Iss. 1, pp. 64–74 (2017).
  20. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N., Ozerov M.I.: Ed. I.P. Isaeva. Teoriya elektricheskoy tyagi [Theory of electric traction]. Moscow, Transport, 1995. 294 p.
  21. Slepcov M.A., Dolabaridze G.P., Prokopovich A.V. Osnovy elektricheskogo transporta [Fundamentals of electric transport]. Moscow, Academy Publishing Center, 2006. 464 p.
  22. М 6.5.00684 Електрорухомий склад. Методика тягово-енергетичних випробувань. [Electric rolling stock.

- Methods of traction and energy tests]. Kremenchuk, SE "UkrNDIV", 2016, 27 p.
23. Bayryeva L.S., Prokopovich A.V. Teoriya elektricheskoy tyagi. Metodicheskoye posobie [Theory of electric traction. Toolkit]. Moscow, MEI Publ., 2004. 40 p.
24. Sulym A. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train / A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, O. Palant, V. Stamatina // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Issue 3 (102). – P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>.

**Sulym A.O., Melnyk O.O., Bialobrzheskyi O.V., Lomonos A.I. Investigation of factors and evaluation of the level of their influence on the indicate of specific electricity consumption of rolling stock**

*The article deals with the scientific research aimed at reducing energy consumption during the operation of electric rolling stock. The main areas of focus concerning energy savings in the electric rolling stock are determined. It is found out that one of the urgent issues is to reduce operating costs and the life cycle cost of the electric rolling stock by increasing its energy efficiency. The purpose of the paper is to analyze the available factors and study the intensity of their effect on the value of the electricity specific consumption at the stage of development and manufacture of innovative electric rolling stock using an application-specific simulation model. The main factors influencing the value of the specific electricity consumption of the rolling stock traction are identified. The level of influence of each factor on the value of specific electricity consumption for the metro rolling stock is estimated based on the results of modeling its traffic dynamics and energy processes using specific licensed software. Relying on the calculations analysis it is established that under the given conditions the efficiency of the traction drive has the highest influence on value of specific consumption of the electric power by a rolling stock. It is determined that such characteristics and indicators as traction and braking force, mass, running resistance to motion, rotational inertia coefficient of the rolling stock have a much lower influence on the value of specific electrici-*

*ty consumption in comparison with the characteristic of the efficiency of the traction drive (among above-mentioned characteristics (indicators) the characteristics of the resistance to motion exercise the maximum influence on the specific consumption). The calculations of possible energy savings for the given conditions due to the operation of the metro rolling stock with the efficient characteristics of the traction drive are performed. It is established that the commissioning of metro rolling stock with improved traction drive characteristics will save up to 22.7% of electrical energy by reducing the operating transportation costs and by increasing the energy efficiency of its rolling stock. The payback period of the traction drive with improved characteristics for the given operating conditions of the metro rolling stock is determined.*

**Keywords:** traction engine, electric rolling stock, efficiency factor, metro, specific electric energy consumption for traction mode, traction drive.

**Сулим А.О.** – к.т.н., заступник директора з наукової роботи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», e-mail: [sulim1.ua@gmail.com](mailto:sulim1.ua@gmail.com).

**Мельник О.О.** – завідувач науково-дослідної групи науково-дослідної лабораторії досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», e-mail: [om.oleksandrmelnyk@gmail.com](mailto:om.oleksandrmelnyk@gmail.com).

**Бялобржеський О.В.** – к.т.н., доцент, виконуючий обов'язки завідувача кафедри «Систем електроспоживання та енергетичного менеджменту», Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: [bialobrzheski@ukr.net](mailto:bialobrzheski@ukr.net)

**Ломонос А.І.** – к.т.н., доцент кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій», Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: [ai\\_lomonos@ukr.net](mailto:ai_lomonos@ukr.net)

Стаття подана 23.05.2021.