

А.О. Сулим

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536660354, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

П.О. Хозя

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380504410342, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

С.О. Столетов

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +30673674043, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-2534>

В.В. Федоров

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавська обл., 39621, Україна
Телефон: +380536661384, E-mail: f.vladimir.ua@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0963-7265>

ВИКОНАННЯ ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В статті розглянуто наявні дослідження за напрямком виконання та удосконалення тягових розрахунків для електрорухомого складу. Встановлено, що виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування є актуальною задачею. Визначено, що до виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену висуваються специфічні вимоги в силу особливостей експлуатації цього типу міського транспорту. Виконано тягові розрахунки для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування. Обґрунтовано раціональні режими ведення поїзда метрополітену для заданого перегону (ділянки експлуатації). Визначено витрати та питомі витрати електроенергії як на тягу, так і загальні з урахуванням витрат на власні потреби, для заданих умов експлуатації. Побудовано графіки сил тяги (гальмування), потужності, струму, швидкості руху, споживання електроенергії на тягу залежно від пройденого шляху та часу для заданої ділянки експлуатації.

© Сулим А.О., Хозя П.О., Столетов С.О., Федоров В.В., 2025

Виконано тепловий розрахунок, який підтвердив можливість застосування обраного типу асинхронного двигуна за критерієм відсутності перевищення граничного значення температури обмоток двигуна.

Ключові слова: асинхронний тяговий привод, метрополітен, рухомий склад, питомі витрати електроенергії на тягу, система керування, тяговий розрахунок.

Вступ. Одним з важливих етапів під час проєктування нового та модернізації існуючого тягового електрорухомого складу є виконання тягових розрахунків. Під тяговими розрахунками мають на увазі вирішення групи наступних завдань [1, 2]:

- попереднє визначення маси поїзда стосовно заданої ділянки сполучення, тобто за умови заданого типу тягового електрорухомого складу та профілю залізничної колії;

- аналіз можливих режимів ведення поїзда на заданій ділянці та основних показників його роботи на ділянці (швидкості руху, витрат електроенергії, нагріву електрообладнання та інше);

- заключний вибір маси поїзда, раціонального режиму ведення та основних показників його роботи – швидкості руху та витрат електроенергії на тягу поїздів.

За ґрунтового виконання тягових розрахунків існує можливість вибору раціонального тягового обладнання, раціональних режимів ведення, зменшення експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу тягового електрорухомого складу.

Аналіз останніх досліджень. Чинні правила [3] визначають порядок та методику тягових розрахунків для поїзної роботи локомотивів та моторвагонного рухомого складу на залізницях. Враховуючи сучасні тенденції розвитку силового тягового електрообладнання та систем керування поїздами, існує необхідність постійного удосконалення цих правил тягових розрахунків.

Так, у працях [4, 5] запропоновано моделювати тягово-енергетичні процеси у системі електричної тяги. Роботи [6, 7] направлені на удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового електрорухомого складу шляхом застосування оптимізаційних моделей та автоматизованої системи комп'ютерного моделювання. Роботи [8–15] направлені на пошук енергооптимальних режимів ведення тягового електрорухомого складу. У попередніх дослідженнях [16, 17] особливу увагу було акцентовано на процедурах вибору пускової сили тяги поїзда метрополітену, а також асинхронному електроприводу для рухомого складу метрополітену. При цьому у жодній з наведених робіт деталізовано процедурі виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування уваги не приділялось.

У цій роботі запропоновано продовжити дослідження для такого типу електрорухомого складу як поїзд метрополітену з регульованим асинхронним приводом та мікропроцесорної системи керування, який має специфічні особливості експлуатації у порівнянні з іншими видами електрорухомого складу, за напрямком виконання тягових розрахунків.

Мета статті – описати процедуру виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування з урахуванням заданої ділянки експлуатації.

Матеріал та результати досліджень. У попередніх дослідженнях [16, 17] запропоновано внести зміни до виконання окремих етапів тягових розрахунків в частині вибору пускової сили тяги та ефективного асинхронного тягового електроприводу. У цій роботі пропонується навести деталізовано процедуру виконання тяго-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

вих розрахунків для рухомого складу метрополітену на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування з урахуванням заданої ділянки експлуатації на етапі його проектування.

Режими навантажень асинхронних тягових двигунів (АТД) для рухомого складу метрополітену визначаються умовами їх експлуатації. Слід зазначити, що для рухомого складу метрополітену притаманні специфічні умови експлуатації (обмеження потужності, часті прискорення і гальмування, незначна відстань між станціями, часто змінюваний профіль колії тощо), які обов'язково необхідно враховувати під час виконання тягових розрахунків. До рухомого складу метрополітену застосовуються специфічні вимоги за потужністю. В тяговому режимі пускова потужність P_n , кВт зазвичай обмежена пропускну здатністю пристроїв енергозабезпечення (максимальним струмом споживання на один вагон). Це обумовлює відношення швидкостей $V_{\max}/V_{\text{ном}}=2,5-3,5$. В режимі електричного гальмування відсутні жорсткі обмеження за пристроями енергозабезпечення, оскільки згенерована електроенергія використовується іншими споживачами або розсіюється у вигляді теплової енергії. Крім того, бажано забезпечити інтенсивне гальмування на високих швидкостях з тим, щоб гранично зменшити час руху на перегоні (потужність АТД в гальмівному режимі має перевищувати пускову потужність тягового режиму). При цьому швидкість початку інтенсивного гальмування зазвичай перевищує швидкість виходу на пускову потужність у тяговому режимі, оскільки граничні тягові та гальмівні зусилля мають бути приблизно однаковими. За швидкості $V_{\max}$ іноді може знадобитись зниження потужності в тяговому та гальмівному режимах за умовою статичної стійкості АТД. Таким чином, під час проектування рухомого складу метрополітену з АТД та мікропроцесорною системою керування перелічені особливості мають бути враховані.

Наведені на рис. 1 криві дають уявлення про навантаження АТД рухомого складу метрополітену в штатному режимі експлуатації.

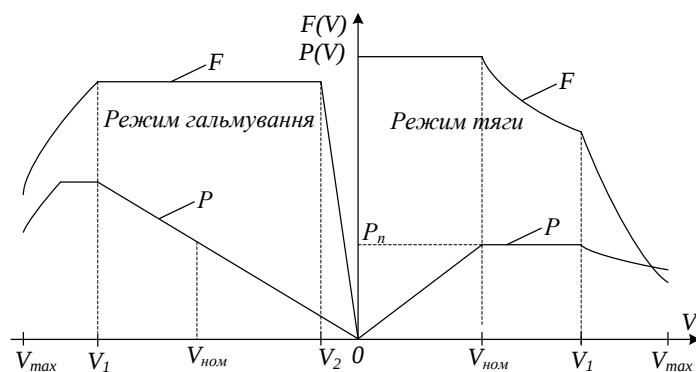


Рис. 1. Характерні криві потужності та сили тяги для рухомого складу метрополітену

На рис. 1 прийнято наступні позначення: P — потужність; F — сила тяги; $V_{\text{ном}}$ — номінальна швидкість руху; $V_{\max}$ — максимальна швидкість руху; V_1 — швидкість руху, за якої відбувається зміна характеру кривих потужності та сили тяги

(гальмування); V_2 – швидкість руху, за якої відбувається заміна електричного гальмування пневматичним.

Крім вищенаведених обмежень, мають бути враховані нормативні вимоги за умовами темпу розгону та гальмування рухомого складу з метою забезпечення високої пропускної здатності на перегонах та комфортності перебування пасажирів у салоні. При цьому під час проєктування та виконання тягових розрахунків враховуються маса рухомого складу за різного завантаження та накладаються певні обмеження на реалізацію максимальної сили тяги (гальмування) за зчепленням та максимальним пусковим моментом тягового двигуна.

З урахуванням вищенаведеного, на рис. 2 в загальному вигляді представлено процедуру виконання тягових розрахунків для рухомого складу метрополітену на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування.

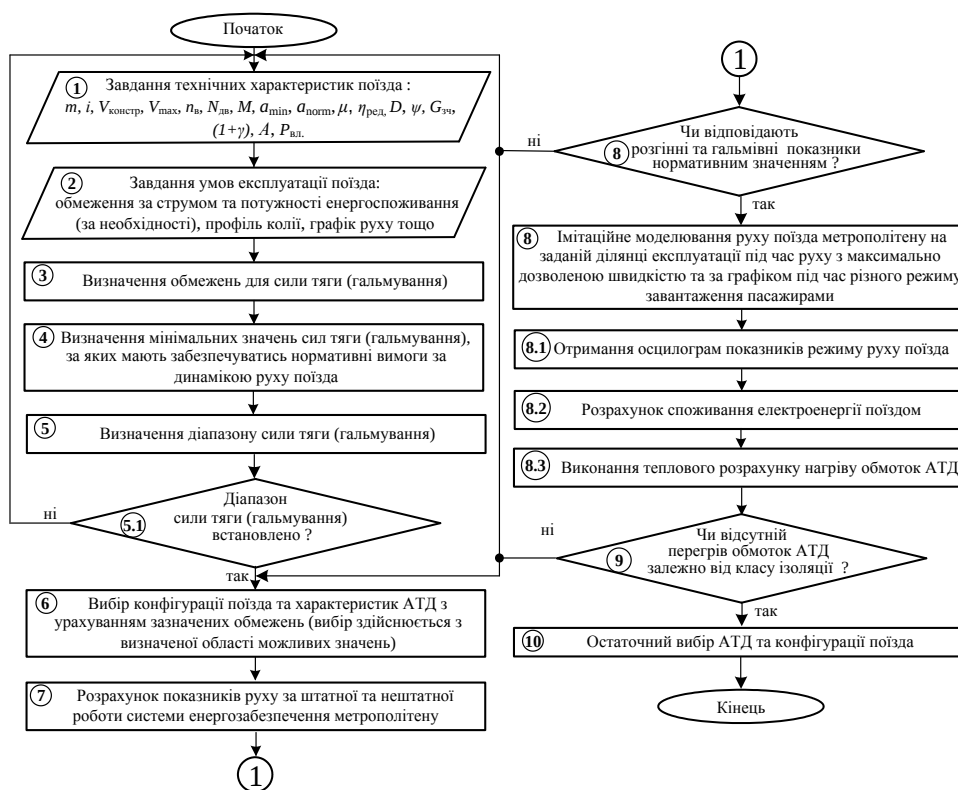


Рис. 2. Процедура виконання тягових розрахунків для інноваційного рухомого складу метрополітену у вигляді алгоритмічних блок-схем

Перший етап (завдання характеристик поїзда). На першому етапі для виконання тягових розрахунків задаються такі вхідні дані: маса поїзда (порожній, номінальний та максимальний завантаження) – m , т; максимальний ухил – i , %; конструкційна швидкість поїзда – $V_{\text{констр}}$, км/год; експлуатаційна швидкість – V_{max} , км/год; кількість вагонів у поїзді – n_v , шт; кількість моторних осей у поїзді – $N_{\text{дв}}$, шт; максимальний крутний момент двигуна у режимах тяги та гальмування – M , кН·м; мінімальне значення прискорення – a_{min} , м/с²; необхідне значення прискорення (сповіль-

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

нення) до заданої швидкості руху – $a_{\text{погм}}$, м/с²; передаточне число редуктора – μ ; коефіцієнт корисної дії редуктора – $\eta_{\text{ред}}$; діаметр колеса – D , м; розрахункове значення коефіцієнта зчеплення – ψ ; зчіпна вага поїзда – $G_{\text{зч}}$, кН; коефіцієнт інерції обертових мас поїзда – $(I+\gamma)$; площа передньої частини поїзда – A , м²; споживання електроенергії поїзда на власні потреби – $P_{\text{вл}}$, кВт.

Другий етап (завдання умов експлуатації поїзда). Задаються обмеження за струмом та потужністю енергоспоживання поїзда (за наявності), профіль колії, графік руху тощо.

Третій етап (розрахунок обмежувальної сили тяги (гальмування) за переважними можливостями моменту на валу двигуна та зчепленням коліс з рейками). Значення тягових та гальмівних зусиль обираються з визначеного діапазону, виходячи з обмеження за крутним моментом тягового двигуна, за зчепленням колеса з рейкою.

Розрахунок максимальної сили тяги (гальмування) поїзда за граничним крутним моментом тягового двигуна виконують за формулою [1]:

$$F_{\text{max}} \leq \frac{2 \cdot M \cdot \mu \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot N_{\text{дв}}}{D}, \quad (1)$$

Максимально допустиму силу тяги (гальмування) за умовою зчеплення колеса з рейкою розраховують за формулою [1, 2]:

$$F_{\text{max}} \leq G_{\text{зч}} \cdot \psi. \quad (2)$$

Четвертий етап (розрахунок мінімально необхідної сили тяги (гальмування)).

Розрахунок мінімально необхідної пускової сили тяги (гальмування), виходячи з вимог реалізації значень середнього прискорення (сповільнення), виконують за формулою [1, 2]:

$$F_{\text{min}} \geq m \cdot (1+\gamma) \cdot a + W, \quad (3)$$

де W – основний опір руху поїзда, кН.

Основний опір руху поїзда визначають за модифікованим рівнянням Девіса:

$$W = 6,4M + 130n_e + 0,14MV + [0,046 + 0,0065(N_{\text{дв}} - 1)]A \cdot V^2, \quad (4)$$

де V – швидкість руху поїзда, км/год; n_e

A – площа передньої частини головного вагона, м².

П'ятий етап (визначення діапазону сили тяги (гальмування)).

Визначають діапазон максимальної сили тяги (гальмування) для різних варіантів завантаження поїзда згідно рівнянь (1), (2), (3). За умови відсутності вимог до динаміки розгону за певного режиму завантаження діапазон максимальної сили тяги (гальмування) обираються згідно рівнянь (1), (2).

У випадку, якщо діапазон пускової сили тяги не визначено, тоді необхідно виконати коригування вхідних даних виконання тягових розрахунків (збільшити кількість моторних осей поїзда, обрати тягові двигуни з іншими параметрами тощо).

Шостий етап (вибір тягової та гальмівної характеристики поїзда). На цьому етапі з розрахункового діапазону обираються значення максимальної сили тяги (гальмування), які має забезпечувати обраний тип АТД. Алгоритми вибору АТД детально розглянуто в роботі [14], тому зупинятись на цьому питанні не варто. Таким чином, за підсумками цього етапу обирається тип АТД, а також будуються тягова та гальмівна характеристики поїзда.

Сьомий етап (розрахунок показників руху за штатної та нештатної роботи системи енергозабезпечення метрополітену). На цьому етапі визначають значення прискорень (сповільнень) та порівнюють їх з нормованими значеннями.

Прискорення (сповільнення) поїзда на прямолінійній ділянці колії визначають за формулою [1, 2]:

$$a = \frac{F - W}{m(1 + \gamma)}, \quad (5)$$

Визначення прискорення на ухилі здійснюють за формулою [1, 2]:

$$a_i = \frac{F - W - W_i - R_i}{m(1 + \gamma)}, \quad (6)$$

де W_i – додатковий опір руху на ухилі, кН;

R_i – додатковий опір руху на ухилі в момент зрушення поїзда, кН.

Додатковий опір руху на ухилі визначають за формулою [1, 2]:

$$W_i = m \cdot g \cdot i, \quad (7)$$

де g – значення прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

i – значення ухилу колії, ‰.

Додатковий опір руху на ухилі в момент зрушення поїзда визначають за формулою [1, 2]:

$$R_i = m \cdot g \cdot r_i, \quad (8)$$

де r_i – початковий опір руху, який прийнято 4 кН/т .

Якщо значення розрахованих прискорень (сповільнень) задовольняють встановленим вимогам, то в подальшому виконується моделювання руху поїзда метрополітену для заданих умов його експлуатації. В іншому випадку потрібно вносити корективи у обрану тягову та/або гальмівну характеристики.

Восьмий етап передбачає імітаційне моделювання руху поїзда метрополітену. Імітаційне моделювання включає такі дослідження: отримання осцилограм (залежностей) за результатами моделювання руху поїзда для заданих умов експлуатації для обраних керуючих впливів; розрахунок споживання електроенергії на тягу та власні потреби для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену; виконання теплового розрахунку за максимального завантаження поїзда під час повторюваного циклу короточасного прискорення і гальмування.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Імітаційне моделювання, як правило, здійснюється за максимального завантаження вагонів за максимальної сили тяги (гальмування) під час руху та за номінального завантаження під час графікового руху, з метою оцінки показників руху поїзда.

Визначення витрат електроенергії, як правило, виконується для заданого перегону з встановленою експлуатаційною швидкістю руху. Розрахунок витрат електроенергії поїзда метрополітену здійснюють через відомі середні значення напруги та струму, час руху, масу поїзда метрополітену у завантаженому стані та довжину перегону. За цими даними розраховують сумарне значення спожитої енергії та розраховують значення питомих витрат на тягу.

Витрати електроенергії на тягу, $A_{тяги}$, та витрати на власні потреби визначають за формулами (9), (10):

$$A_{тяги} = \frac{\bar{U} \cdot \bar{I} \cdot \Delta t}{3600 \cdot 1000}, \quad (9)$$

$$A_{власн.} = \frac{P_{вл} \cdot \Delta t \cdot K_{вик}}{3600}, \quad (10)$$

де:

$\bar{U}$ – середнє значення напруги, В;

$\bar{I}$ – середнє значення сили струму, А;

Δt – час руху на перегоні, с;

$P_{вл}$ – потужність споживання на власні потреби, кВт;

$K_{вик}$ – коефіцієнт використання потужності електрообладнання власних потреб.

Питомі витрати електроенергії на тягу поїзда метрополітену a_{num} , Вт·год/т·км, розраховують за формулою (11):

$$a_{num} = \frac{\bar{U} \cdot \bar{I} \cdot \Delta t}{m \cdot L \cdot 3600}, \quad (11)$$

де: L – довжина перегону, км.

Загальні витрати електроенергії визначають як суму витрат споживання на тягу та витрат на власні потреби.

Тепловий розрахунок за нагріванням тягових двигунів виконують за результатами імітаційного моделювання поїзда метрополітену для найбільш навантаженого режиму (максимальне завантаження, напруга контактної мережі в режимі тяги 750 В та 900 В під час гальмування).

Далі з використанням запропонованої процедури здійснено виконання тягових розрахунків для п'ятивагонного рухомого складу метрополітену зі схемою формування Мс+Т+М+Т+Мс на базі асинхронного приводу та мікропроцесорної системи керування для заданих умов його експлуатації.

Вимоги до характеристик поїзда та дані для виконання тягового розрахунку, наведено в табл. 1.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. –Основні параметри для виконання тягового розрахунку

№ п/п	Параметр	Значення
1	Маса тари поїзда, т	158,42
2	Маса поїзда в завантаженому стані EL10 (10 чол/м ²), т	275,11
3	Маса поїзда в завантаженому стані 75%EL4 (3 чол/м ²), т	203,64
4	Максимальний ухил, ‰	45
5	Конструкційна швидкість, км/год	90
6	Експлуатаційна швидкість, км/год	80
7	Кількість вагонів у поїзді	5
8	Кількість моторних осей у поїзді	12
9	Максимальний крутний момент двигуна в режимі тяги, Н·м	1765
10	Максимальний крутний момент двигуна в режимі гальмування, Н·м	1490
11	Мінімальне значення прискорення, м/с ²	0,01
12	Нормативне значення прискорення до 33 км/год за порожнього режиму та номінального завантаження, м/с ²	≥1,2
13	Нормативне значення прискорення до 33 км/год за максимального завантаження, м/с ²	≥1,08
14	Передаточне число редуктора	7,918
15	Коефіцієнт корисної дії редуктора	0,98
16	Діаметр колеса, мм	0,86
17	Значення коефіцієнта зчеплення у режимі тяги	0,22
18	Значення коефіцієнта зчеплення у режимі гальмування	0,21
19	Зчіпна вага поїзда у порожньому стані EL0, кН	981
20	Зчіпна вага поїзда за номінального завантаження 75%EL4, кН	1243
21	Зчіпна вага поїзда за максимального завантаження EL10, кН	1660
22	Коефіцієнт інерції обертових мас у порожньому стані	1,1
23	Коефіцієнт інерції обертових мас у завантаженому стані	1,08
24	Площа передньої частини поїзда, м ²	7,02
25	Споживання електроенергії поїзда на власні потреби	72,6

Експлуатаційні показники для моделювання згідно даних специфікації наступні:

- протяжність маршруту – 10 км;
- середня відстань між станціями – 1 км;
- зупинка на 9 станціях;
- час зупинки на станціях – 1 хв;
- максимальна швидкість – 80 км/год;
- плоский градієнт (рівна прямолінійна площадка без ухилів);
- відсутність зворотного гальмування (без урахування рекуперативного гальмування);
- завантаження поїзда - EL10;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

- середня експлуатаційна швидкість – 35 км/год;

- мінімальний інтервал руху – 2 хв.

Результати розрахунків, виконаних за формулами (1)–(4), наведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2. – Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Показник, характеристика	Значення для тягового обладнання		
	порожній режим	завантаження, що становить 75% від завантаження EL4	максимальне завантаження
Режим тяги			
$F_{\max}$, кН	≤ 378	≤ 378	≤ 378
$F_{\max \psi}$, кН	≤ 216	≤ 273	≤ 365
$F_{\min}$, кН	≥ 212	≥ 267	≥ 322
Режим гальмування			
$F_{\max}$, кН	≤ 319	≤ 319	≤ 319
$F_{\max \psi}$, кН	≤ 206	≤ 261	≤ 349
$F_{\min}$, кН	≥ 200	≥ 250	≥ 315

Таблиця 3. – Основний опір руху поїзда

Швидкість	Порожній (EL0)	Номінальне заванта- ження (75%EL4)	Максимальне заванта- ження (EL10)
5	3,737	4,058	4,566
10	3,886	4,239	4,796
15	4,060	4,445	5,052
20	4,260	4,676	5,333
25	4,484	4,932	5,639
30	4,734	5,213	5,971
35	5,009	5,520	6,328
40	5,310	5,852	6,710
45	5,635	6,210	7,117
50	5,986	6,592	7,550
55	6,363	7,000	8,008
60	6,764	7,433	8,491
65	7,191	7,892	9,000
70	7,643	8,376	9,533
75	8,120	8,885	10,092
80	8,623	9,419	10,677
85	9,151	9,978	11,286
90	9,704	10,563	11,921

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

У разі розрахункової схеми формування поїзда $Mc+T+M+T+Mc$ за умов вибору даного тягового приводу пускова сила тяги складає (212 – 216) кН для порожнього режиму, (267 – 273) кН – для завантаження, що становить 75% від завантаження EL4 та (322 – 365) кН для максимального завантаження поїзда; діапазон гальмівного зусилля складає (200 – 206) кН для порожнього режиму, (250 – 261) кН – для завантаження, що становить 75% від завантаження EL4 та (315 – 319) кН для максимального завантаження поїзда (у разі використання комбінованого гальмування).

Обрані тягові і гальмівні характеристики, а також залежності прискорення (сповільнення) від швидкості поїзда, за порожнього режиму, завантаження, що становить 75% від завантаження EL4 та режиму з максимальним завантаженням поїзда для схеми формування поїзда $Mc+T+M+T+Mc$, наведено на рис. 3–8.

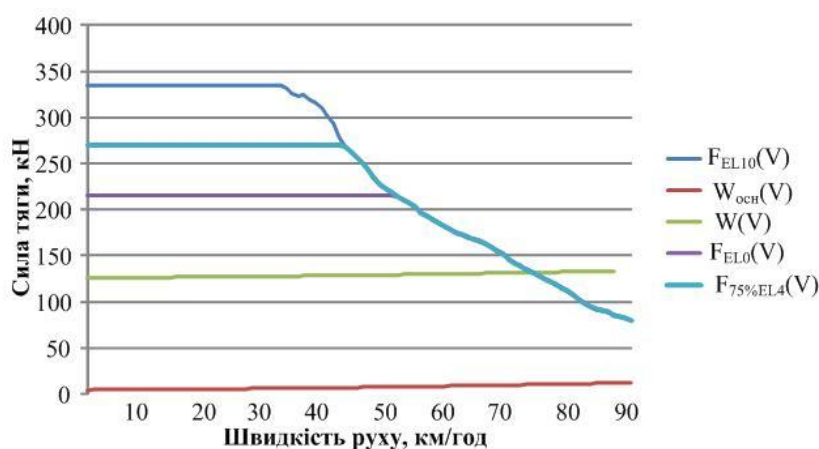


Рис. 3. Тягова характеристика поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10), характеристики основного опору руху $W_{очн}(V)$ та загального опору руху $W(V)$

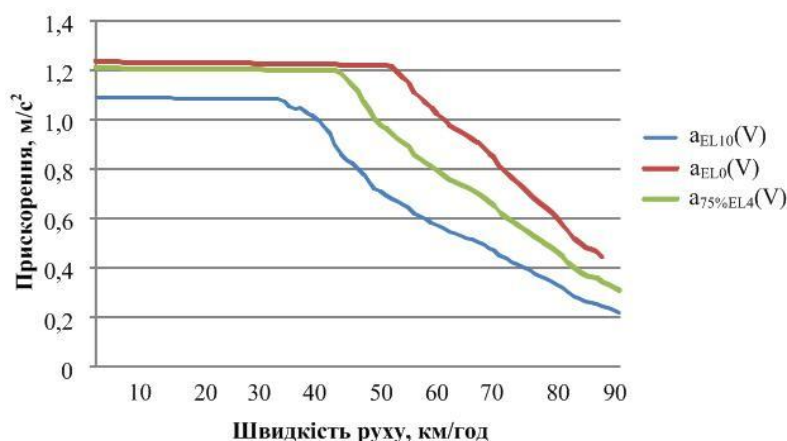


Рис. 4. Прискорення поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

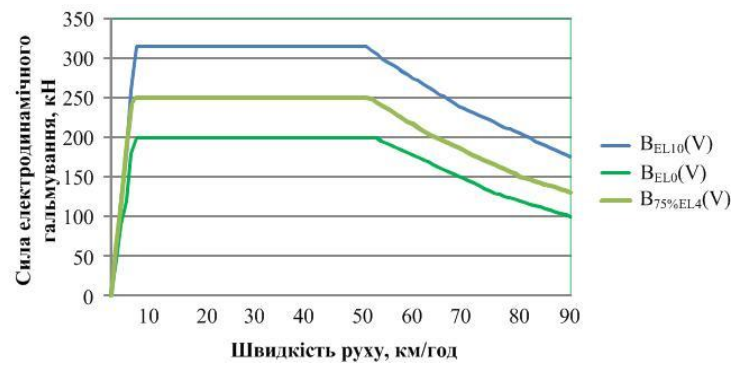


Рис. 5. Гальмівна характеристика поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) під час застосування електродинамічного гальмування

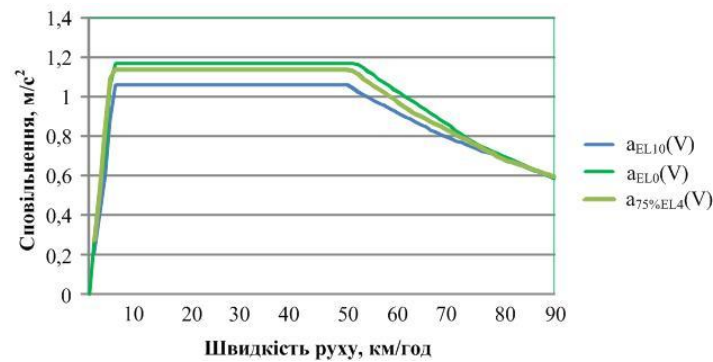


Рис. 6. Сповільнення поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) під час застосування електродинамічного гальмування

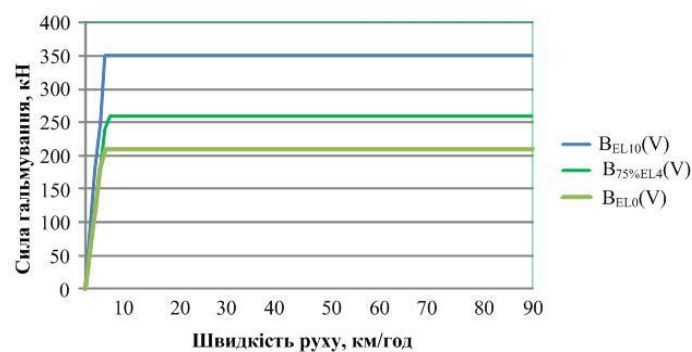


Рис. 7. Гальмівна характеристика поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) (електродинамічне + пневматичне гальмування)

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

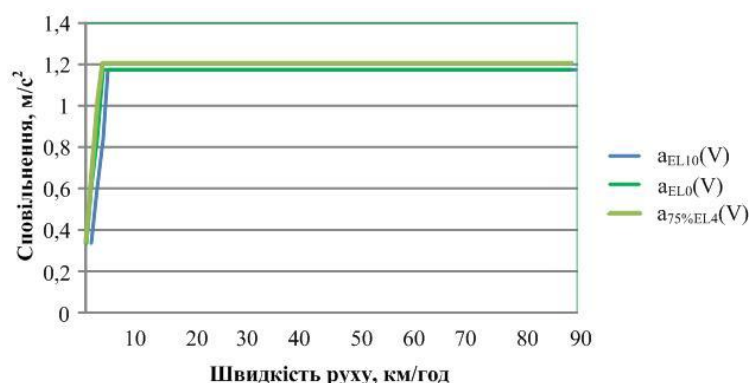


Рис. 8. Сповільнення поїзда за порожнього режиму (EL0), номінального (75% EL4) та максимального завантаження (EL10) (електродинамічне + пневматичне гальмування)

Таким чином, обрано тип АТД технічні характеристики якого наведено в табл. 4.

Таблиця 4. – Основні характеристики тягового двигуна

№ п/п	Характеристика	Показник
1	Номінальна потужність, кВт	180
2	Номінальна напруга, В	530
3	Номінальний струм, А	234
4	Номінальна частота, Гц	80
5	Номінальна частота обертання, об/хв	2363
6	Номінальне значення ККД, %	93,2
7	Крутний момент, Н·м	728
8	Пусковий момент в режимі тяги, Н·м	1765
9	Максимальний крутний момент під час гальмування, Н·м	1490
10	Маса, кг	540
11	Клас ізоляції	220
12	Умови навколишнього середовища, °С	від -40 до 40

Розраховані значення прискорень за штатного та нештатних режимів (у разі відмови тягового обладнання на одному моторному вагоні; у разі пониженого коефіцієнта зчеплення; у разі евакуації іншим поїздом на ухилі 45 ‰) за формулами (5)–(8), наведені в таблиці 5. При цьому максимальне значення пускової сили тяги було обрано пропорційно меншим відповідно до умов штатного режиму роботи тягового обладнання. Значення коефіцієнта зчеплення під час виконання тягових розрахунків за несприятливих умов експлуатації поїзда прийнято 0,133.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 5. – Розраховані значення прискорень за штатного та нештатних режимів експлуатації поїзда

Розраховане значення прискорень за штатного режиму руху			
	EL0	75%EL4	EL10
Рівна площадка	1,215	1,212	1,116
Ухил 45 ‰	0,797	0,783	0,682
Розраховане значення прискорень за нештатного режиму руху (вихід з ладу тягового перетворювача)			
Рівна площадка	1,000	0,998	0,918
Ухил 45 ‰	0,591	0,578	0,494
Розраховане значення прискорень за нештатного режиму руху (понижений коефіцієнт зчеплення)			
Рівна площадка	0,725	0,718	0,712
Ухил 45 ‰	0,401	0,397	0,389
Розраховане значення прискорень за нештатного режиму руху (евакуація поїзда іншим поїздом на максимальному ухилі 45 ‰)			
EL0	0,180	0,103	0,014
75%EL4	0,241	0,169	0,102
EL10	0,265	0,203	0,160

За результатами аналізу розрахованих значень прискорень (табл. 5) помітно, що обраний тип АТД та схема формування забезпечують можливість руху поїзда з прискоренням під час штатного режиму руху, виникнення аварійних режимів в тяговому обладнанні, зниженого коефіцієнта зчеплення, евакуації несправного поїзда метрополітену з різним рівнем завантаження пасажирів.

Результати розрахунків витрат електроенергії на тягу, витрат на власні потреби, питомих витрат електроенергії на тягу п'ятивагонного поїзда метрополітену, який складається з двох головних моторних вагонів, двох проміжних немоторних вагонів та одного проміжного моторного вагона, наведено в табл. 6.

Таблиця 6. – Результати розрахунків споживання електроенергії поїздом

Завантаження	V експл., км/год	Споживання на тягу, кВт·год	Питомі витрати на тягу, Вт·год/т·км	Споживання на власні потреби, кВт·год	Загальне енергоспоживання, кВт·год	Питомі витрати, Вт·год/т·км
EL10	53,28	26,76	97,26	0,68	27,45	99,73
EL10	35,73	8,02	29,16	1,02	9,04	32,87
75%EL4	35,08	5,94	29,18	1,03	6,97	34,25

Результати моделювання руху поїзда за максимального завантаження EL10 під час повторюваного циклу короточасного прискорення і гальмування для заданих умов його експлуатації (повний оберт для заданої ділянки колії) наведено на рис. 9 та рис. 10. На рис. 9 зображено осцилограми (залежності), за середньої швидкості сполучення на перегоні 53 км/год, на рис. 10 – за середньої швидкості на перегоні 35 км/год.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

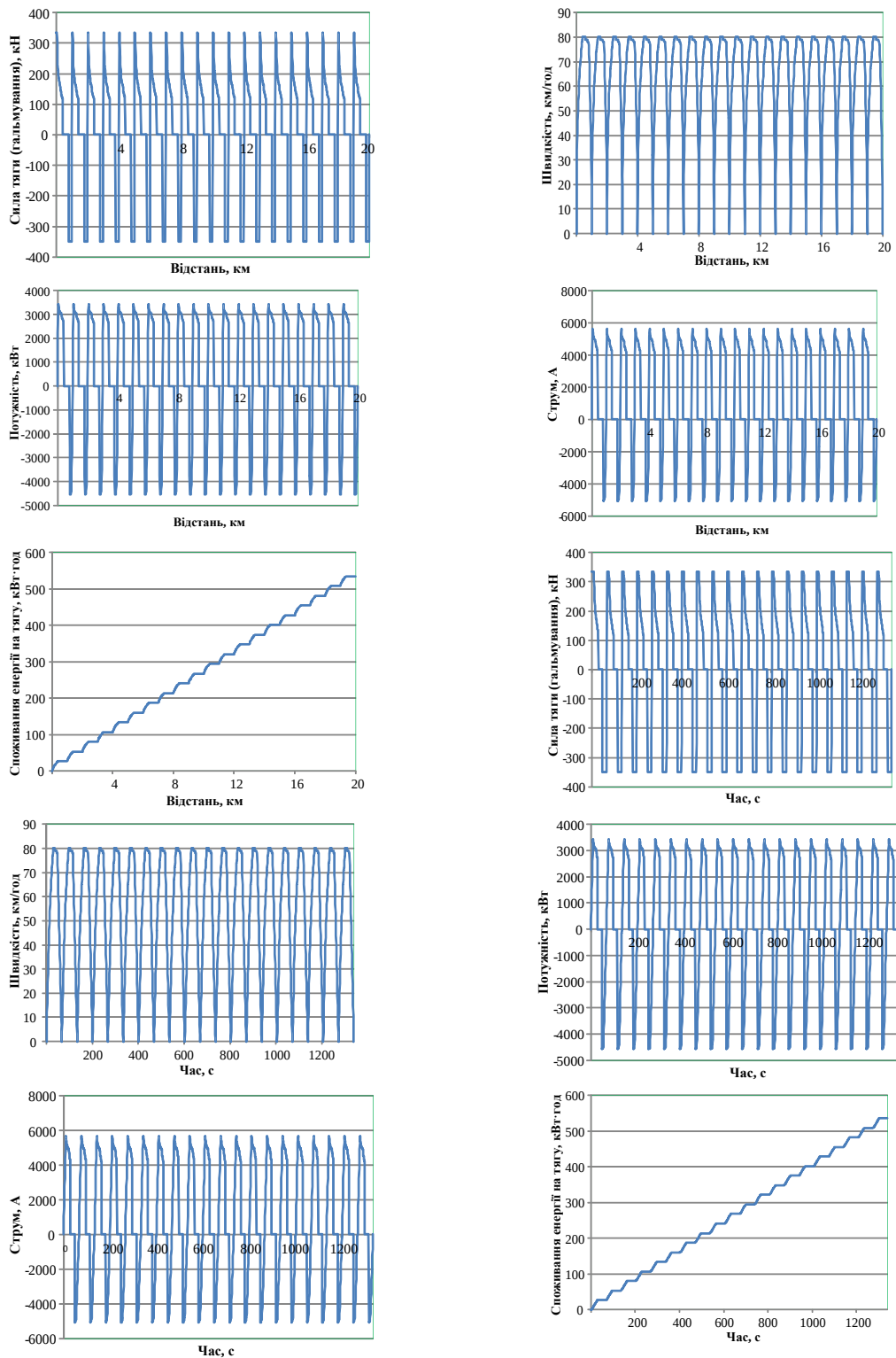


Рис. 9. Осцилограми моделювання руху поїзда метрополітену з максимальним завантаженням EL10 та середньої швидкості сполучення на перегоні 53 км/год

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

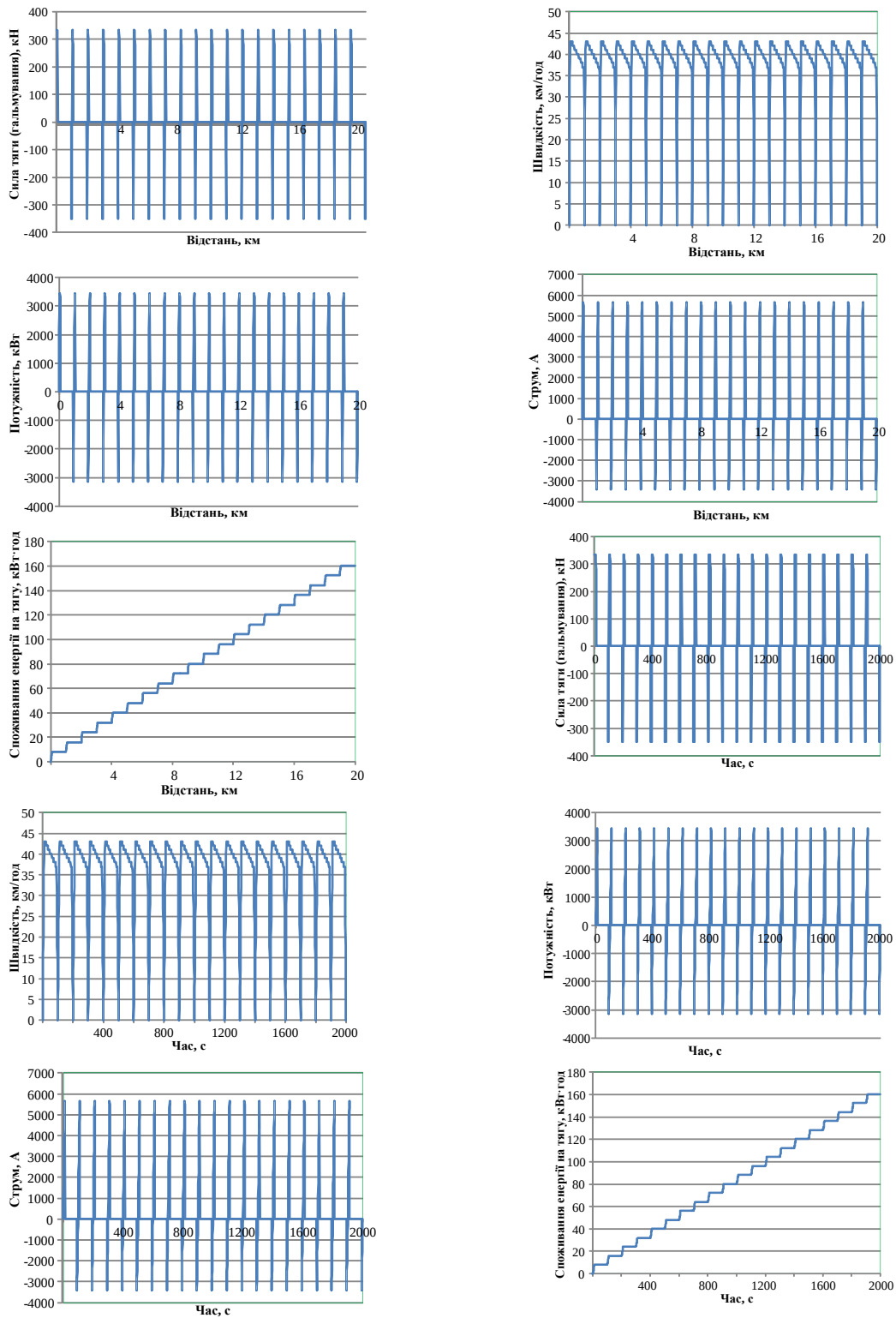


Рис. 10. Осцилограми моделювання руху поїзда метрополітену з максимальним завантаженням EL10 та середньої швидкості сполучення на перегоні 35 км/год

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

За результатами моделювання встановлено, що для заданих умов експлуатації середньоквадратичне значення струму тягового двигуна становить 232 А, що не перевищує значення номінального струму 234 А, тому підвищення температури обмотки тягового двигуна знаходиться в межах допустимого граничного значення.

Висновки.

1. Наведено та описано процедуру виконання тягових розрахунків для інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування, яка базується на застосуванні методу імітаційного комп'ютерного моделювання та враховує сучасні вимоги до таких розрахунків.

2. Запропонована процедура виконання тягових розрахунків дозволить на етапі проєктування інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом та мікропроцесорною системою керування здійснювати ефективний вибір тягового обладнання з урахуванням умов експлуатації на заданій ділянці колії та підвищити точність виконання тягових розрахунків.

3. Наведено приклад виконання тягових розрахунків для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену, за результатами якого побудовано тягову та гальмівну характеристики залежно від завантаження пасажирями, обрано тягове обладнання для поїзда, розраховано показники споживання електроенергії поїздом, побудовано осцилограми (залежності) для різних умов руху поїзда, перевірено ступінь нагрівання обраних асинхронних тягових двигунів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Далека В.Х., Пушков П.М., Андрійченко В.П., Мінеєва Ю.В.: навч. посібник. Основи електричної тяги; Харк. нац. Акад. міськ. госп-ва. Х.: ХНАМГ, 2012. 312 с.
2. Теорія електричної тяги: Монографія: в 2 т. (переклад р. м.). / Г.К. Гетьман. Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. Т 2. 361 с.
3. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи (переклад р. м.). М.: Транспорт, 1985. 287 с.
4. Сидоренко А.М. Моделювання тягово-енергетичних процесів у системі електричної тяги. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. Вип. 35. С. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-10>
5. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Ya., Sidorenko A., Lyubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Issue 1 (97). P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>
6. Барибів М.А., Фалендиш А.П., Клецька О.В., Іванченко Д.А., Кіріцева О.В. Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2021. № 5 (95). С. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550>
7. Фалендиш А.П., Гатченко В.О., Возненко С.В., Клецька О.В., Барибін М.А. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. Вип. 35. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
8. Кислий Д.М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2016. № 1 (61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
9. Petrenko O., Liubarskiy B., Pluigin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. Electrical Engineering & Electromechanics. 2017. № 6. P. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
10. Пригула М.Г., Пасечник О.А. Оптимізаційні тягові задачі на залізничній мережі. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна 2019. №3(81). С.44-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/171774>
11. Палант О.Ю., Стаматін В.В. Огляд наявних і перспективних систем автоведення поїздів метрополітену. Проблеми економіки. 2019. № 2(40). С. 119-125. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125>

12. Любарський Б.Г. Рациональні швидкісні режими руху приміського електропоїзду з асинхронними тяговими двигунами. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 18 (1127). С. 86–92.
13. Питула М.Г., Пасечник О.А. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2018. №6(78). С. 82–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
14. Coman F.A., Meng L. Review of Online Dynamic Models and Algorithms for Railway Traffic Management. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. Iss. 3. P. 1274–1284 DOI: <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2358392>
15. Gholamian S.A. A discrete-event optimization framework for mixed-speed train timetabling problem. Journal of Industrial Engineering and Management Studies. 2017. Vol. 4. No. 2 – P. 64–84.
16. Сулим А.О., Сичов С.Д., Распопін В.Р., Мельник О.О., Федоров В.В. Розробка алгоритму для розрахунку пускової сили тяги поїзда метрополітену (переклад р.м.). Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». Кременчук, 2012. Вип. 6. С. 20–23.
17. Сулим А.О., Устенко О.В., Мельник О.О., Ломонос А.І., Мужичук С.О., Соловей В.С. Процедура вибору асинхронного тягового електроприводу для інноваційного рухомого складу метрополітену. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2021. Вип. 37. С. 97–118. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-11>

A.O. Sulym

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380536660354, E-mail: sulim1.ua@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

P.O. Khozia

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380504410342, E-mail: pavlo.khozia@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

S.O. Stoletov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel.: +380673674043, E-mail: stoletoff.s.a@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8964-4790>

V.V. Fedorov

State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute»,
33 I. Prykhodka St., Kremenichuk, 39621, Ukraine
Tel: +380536661384, E-mail: f.vladimir.ua@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0963-7265>

EXECUTION OF TRACTION CALCULATIONS FOR METRO ROLLING STOCK

The article reviews existing research on the execution and improvement of traction calculations for electric rolling stock. It has been established that performing traction calculations for metro rolling stock with asynchronous drives and microprocessor control systems is a topical issue. It has been determined that specific requirements are imposed on the performance of traction calculations for metro rolling stock due to the pe-

cularities of operating this type of urban transport. Traction calculations have been performed for the specified operating conditions of metro rolling stock with asynchronous drive and microprocessor control system. Rational modes of metro train operation for a given section (operating section) have been substantiated. The consumption and specific consumption of electricity for both traction and general purposes, taking into account consumption for own needs, have been determined for the specified operating conditions. Graphs of traction (braking) forces, power, current, speed, and electricity consumption for traction depending on the distance travelled and time for a given operating section have been plotted.

A thermal calculation which confirmed the possibility of using the selected type of asynchronous motor based on the criterion of not exceeding the maximum temperature of the motor windings has been executed.

Keywords: asynchronous traction drive, metro, rolling stock, specific traction power consumption, control system, traction calculation.

REFERENCES

1. Daleka, V. Kh., Pushkov, P. M., Andriichenko, V. P., & Minieieva, Yu. V. Fundamentals of Electric Traction: Study Guide. Kharkiv National Academy of Municipal Economy. Kharkiv: KhNAMG, 2012. 312 p.
2. Getman, G.K. (2010). Teoriya elektricheskoy tyagi [Theory of Electric Traction]. Monograph. Dnipro: Izdatelstvo Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V.Lazaryana - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian. (Vols.2).
3. *Pravila tyagovyih raschetov dlya poezdnoy raboty [Rules for Traction Calculations for Train Operation]* (1985). Moscow: Transport
4. Sydorenko, A.M. (2020). Modeliuvannya tiahovo-enerhetychnykh protsesiv u systemi elektrychnoi tiahiv [Modelling of traction and energy processes in electric traction systems]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific papers by DUIT. Series: Transport Systems and Technologies*, 35, 89–101. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-10> [in Ukrainian].
5. Yatsko, S., Sytnik, B., Vashchenko, Ya., Sidorenko, A., Lyubarskyi, B., Veretennikov, I., & Glebova, M. (2019). Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(97), 48–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520> [in Ukrainian]
6. Barybiv, M.A., Falendysh, A.P., Kletska, O.V., Ivanchenko, D.A., & Kiritseva, O.V. (2021). Udoshkonalennia tiahovykh rozrakhunkiv ta rezhymiv vedennia tiahovoho rukhomoho skladu [Improvement of traction calculations and traction rolling stock operating modes]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT im. V. Lazariana - Collection of scientific works of DUIT. Series 'Transport systems and technologies'*, 5(95), 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550> [in Ukrainian].
7. Falendysh, A.P., Hachenko, V.O., Voznenko, S.V., Kletska, O.V., & Barybin, M.A. (2020). Matematychni modeliuvannya osnovnykh parametriv u tiahovykh rozrakhunkakh [Mathematical modelling of key parameters in traction calculations]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific works of the State University of Information Technologies. Series 'Transport Systems and Technologies'*, 35, 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11> [in Ukrainian]
8. Kyslyi, D.M. (2016). Vyznachennia enerhozaoshchadzhuiuchykh rezhymiv vedennia poizdiv [Determination of energy-saving modes of train operation]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT im. V. Lazariana. Science and progress in transport - Bulletin of the V. Lazarian Dnipro National University of Railway Transport*, 1(61), 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983> [in Ukrainian]
9. Petrenko, O., Liubarskiy, B., & Pliugin, V. (2017). Determination of railway rolling stock optimal movement modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 6, 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
10. Prytula, M.G. & Pasechnyk, O.A. (2019). Optimization traction tasks on the railway network. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT im. V. Lazariana. Science and progress in transport - Bulletin of the V. Lazarian Dnipro National University of Railway Transport*, 3(81), 44-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/171774>

11. Palant, O.Iu., & Stamatina, V.V. (2019). Ohliad naiavnykh i perspektyvnykh system avtovedennia poizdiv metropolitenu [Review of existing and promising automatic metro train control systems]. *Problemy ekonomiky - Problems of Economics*, 2(40), 119-125. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125> [in Ukrainian]
12. Liubarskyi, B.H. (2015). Ratsionalni shvydkisni rezhymy rukhu prymiskoho elektropoizdu z asynkronny-my tiahovymy dvyhunamy [Rational speed modes of suburban electric trains with asynchronous traction motors]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» - Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'*, 18 (1127), 86–92. Kharkiv: NTU «KhPI».
13. Prytula, M. H., & Pasechnykh, O. A. (2018) Development of algorithms for forming energy-optimal train operating modes. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 6(78), 82–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
14. Coman, F.A., & Meng, L. (2015) Review of Online Dynamic Models and Algorithms for Railway Traffic Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 16(3), 1274-1284 DOI: <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2358392>
15. Gholamian, S.A. (2017) A discrete-event optimization framework for mixed-speed train timetabling problem. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 4(2), 64-84.
16. Sulym, A.A., Sychev, S.D., Raspopin, V.R., Melnyk, A.A., & Fedorov, V.V. (2012). Razrabotka algoritma dlya rascheta puskovoy sily tyagi poezda metropolitena [Development of an algorithm for calculating the starting traction force of a metro train]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reykovy ruhomiy sklad» - Collection of scientific works 'Railboundrolling stock'*, 6, 20–23.
17. Sulym, A.O., Ustenko, O.V., Melnyk, O.O., Lomonos, A.I., Muzhychuk, S.O., & Solovei, V.S. (2021). Protseduura vyboru asynkronnoho tiahovoho elektropryvodu dlia innovatsiinoho rukhomoho skladu metropolitenu [Procedure for selecting an asynchronous traction electric drive for innovative metro rolling stock]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific works of DUIT. Series 'Transport Systems and Technologies'*, 37, 97–118. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-11> [in Ukrainian].