

Андрій Сулим^{1*}, Олександр Устенко², Олександр Мельник³, Андрій Ломонос⁴, Сергій Мужичук⁵, Валерій Соловей⁶

¹ Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

² Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3071-0332>

³ Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-7128>

⁴ Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5001-1280>

⁵ Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2653-1622>

⁶ Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, м. Кременчук, 39621, Україна.

* Автор, відповідальний за листування: sulim1.ua@gmail.com

ПРОЦЕДУРА ВИБОРУ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В статті обґрунтовано необхідність використання асинхронного тягового електроприводу на рухомому складі метрополітену. Сформульовано переваги використання асинхронного тягового електроприводу у порівнянні з колекторним на базі двигунів постійного струму. Проаналізовано характеристики сучасного інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним тяговим електроприводом вітчизняного та закордонного виробництва. Сформульовано особливості вибору асинхронного тягового електроприводу з частотно-регульованим керуванням для інноваційного рухомого складу та наведено існуючий типовий алгоритм здійснення такого вибору. Розглянуто основні причини нераціонального вибору тягового асинхронного електроприводу для рухомого складу метрополітену та проаналізовано наслідки такого вибору. Запропоновано удосконалити процедуру вибору тягового асинхронного електроприводу з частотно-регульованим керуванням для рухомого складу метрополітену в частині врахування такого важливого експлуатаційного показника як питомі витрати електроенергії на тягу. Виконано вибір раціональних параметрів асинхронного тягового електроприводу з частотно-регульованим керуванням за запропонованою процедурою для заданих характеристик рухомого складу метрополітену. Визначено резерви економії енергоресурсів для заданих умов за рахунок впровадження на інноваційному рухомому складі асинхронного тягового електроприводу з раціональними параметрами. Встановлено, що характеристика коефіцієнта корисної дії тягового асинхронного двигуна в значній мірі впливає на показник питомих витрат електроенергії на тягу рухомого складу метрополітену та експлуатаційні витрати.

Ключові слова: асинхронний тяговий електропривод, вагон, метрополітен, рухомий склад, питомі витрати електроенергії на тягу, частотно-регульоване керування.

Вступ та постановка проблеми. Метрополітен є досить важливим видом громадського транспорту в містах-мегаполісах, на який припадає значна частина пасажирських перевезень (наприклад, в Києві близько 60 % від загального обсягу міських перевезень

забезпечує метрополітен). На даний час в Україні діє три метрополітени (Київський, Харківський, Дніпровський), які постійно розвиваються та розширюють свою мережу. Тому, в Україні розвиток метрополітенів є досить актуальною та пріоритетною задачею.

Однак, у вітчизняних метрополітенах залишається достатньо питань, які потребують нагального вирішення. Перш за все, це питання розвитку та оновлення вагонів метрополітену, підвищення енергоефективності рухомого складу під час експлуатації, покращення ресурсозбереження на рухомому складі.

Аналіз останніх досліджень. В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу, метрополітенами України поступово вводиться в експлуатацію як новостворений, так і модернізований рухомий склад. Найбільше оновлення рухомого складу здійснено у 2014–2015 рр. в КП "Київський метрополітен" в рамках виконання робіт з комплексної модернізації вагонів типу Є та їх модифікацій шляхом заміни колекторного тягового двигуна постійного струму на асинхронний електропривод. Ці роботи виконано на ПАТ "КВБЗ" за участі як вітчизняних, так і іноземних компаній (TOSHU, KNORR-BREMSE, Fuji-Electric, Mitsubishi electric Co., НВП "Хартрон-Експрес ЛТД" та інших). На даний час за цим проектом модернізовано та експлуатується 135 вагонів [1].

Головними відмінностями даного рухомого складу є покращений інтер'єр та екстер'єр, створення умов для перевезення осіб з особливими потребами, впровадження на ньому енергозберігаючого обладнання, насамперед систем рекуперації, мікропроцесорної системи керування, ефективного асинхронного приводу.

В цій роботі пропонується більш детально зупинитись саме на застосуванні ефективного асинхронного електроприводу з частотним керуванням. Для цього спираючись на досвід експлуатації колекторних та асинхронних двигунів в складі тягового рухомого складу виконано їх порівняльний аналіз.

За результатами порівняльного аналізу встановлено наступне [2–4]:

тангенціальна сила, віднесена до одиниці площі поверхні ротора, для асинхронного тягового двигуна (АТД) в 1,5-2 рази більше;

потужність, віднесена до одиниці площі поверхні ротора, для АТД в 1,5-2 рази більше;

лінійна швидкість ротора АТД може досягати 80-90 м/с, що перевищує допустимі значення лінійної швидкості для колекторних машин;

при збереженні частоти обертання ротора АТД на рівні частоти обертання якоря колекторного двигуна можливе збільшення моменту АТД на рівні 50 %;

за питомою потужністю АТД в 2,5-3 рази перевищує колекторні тягові двигуни, а його коефіцієнт корисної дії на 1,5-2 % вище колекторних.

Серед основних недоліків застосування колекторних двигунів слід зазначити:

низька надійність колекторного вузла та щіткового апарату;

обмеження за умовами комутації та механічної міцності потужності у відведених габаритах;

значні витрати на технічне обслуговування і ремонт під час експлуатації;

підвищена маса двигуна за умов низьких значень обертового моменту, що обмежує використання опорно-осьового підвішування двигуна;

підвищені витрати кольорових металів та активних матеріалів.

За умов застосування АТД на рухомому складі метрополітену можливо реалізувати наступні переваги:

1) значне спрощення тягового двигуна та підвищення надійності у порівнянні з колекторним (відсутня необхідність щоденного огляду колекторно-щіткового вузла);

2) підвищення надійності кузовного електричного обладнання внаслідок застосування безконтактних пристроїв перетворення потужності;

3) покращення тягових властивостей рухомого складу метрополітену завдяки використанню жорсткої тягової характеристики під час боксування. Існують дослідні результати, які показують збільшення коефіцієнту зчеплення на 20-40 % [2, 5];

4) збільшення потужності та моменту тягового двигуна за умов однакових габаритних розмірів (відсутній колектор, обмотки додаткових полюсів та компенсаційна обмотка);

5) підвищення продуктивності та експлуатаційних характеристик внаслідок реалізації переваг за попередніми пунктами.

Перелічені переваги не залишають сумніву в доцільності впровадження АТД на залізничному рухомому складі, зокрема вагонах метрополітену. Цьому питанню присвячено чимало робіт як вітчизняних, так і закордонних вчених [2–19]. Такі дослідження виконувались за участю Гетьмана Г.К., Євстаф'єва А.М., Курбасова А.С., Любарського Б.Г., Мнацаканова В.А., Ротанова Н.А., Хвороста М.В., Ishikawa K., Asada T., Ortega D. та інших вчених. Аналіз цих досліджень дозволив встановити, що в сучасних умовах розвитку інноваційного залізничного транспорту існує тенденція активного впровадження АТД з частотно-регульованим керуванням як на рухомому складі метрополітену, так і на іншому типі електрорухомого складу.

За умов активного впровадження АТД на рухомому складі метрополітену, в цій роботі пропонується розглянути технічні характеристики існуючого інноваційного рухомого складу з АТД та більш детально зосередити увагу на особливостях здійснення вибору параметрів АТД на етапі його проектування. Це питання є досить актуальним, оскільки завдяки правильному вибору параметрів електроприводу з частотно-регульованим керуванням буде забезпечуватись ефективна експлуатація рухомого складу метрополітену завдяки підвищенню його енергоефективності та мінімізації витрат перевізного процесу.

Мета – проаналізувати технічні характеристики сучасного інноваційного рухомого складу з АТД та частотно-регульованим керуванням; розробити процедуру раціонального вибору параметрів АТД на етапі проектування рухомого складу.

Матеріал та результати досліджень. Аналіз сучасного інноваційного рухомого складу метрополітену з АТД, який виготовляється на підприємствах країн СНД, дозволив встановити основні моделі вагонів з яких формується цей рухомий склад. Аналіз виконано за результатами розгляду технічної документації на моделі вагонів, науково-технічних статей та відкритих джерел [16, 17, 20–23]. Результати проведення цього аналізу та основні технічні характеристики рухомого складу метрополітену з АТД, наведено в табл. 1. Зовнішній вигляд зазначених поїздів метрополітену з АТД зображено на рис. 1-5.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом

Назва показників	П'ятивагонний поїзд виробництва ПАТ «КВБЗ»	Модернізований поїзд за проектом Фонду Зелених інвестицій	Чотиривагонний поїзд «Русич»	Шестивагонний рухомий склад «Нева»	П'ятивагонний поїзд «Stadler»
1	2	3	4	5	6
Конструктивні показники рухомого складу					
Моделі вагонів, з яких сформовано рухомий склад	81-7036 81-7037	81-7080 81-7081 81-7081-01	81-740 81-741	81-556 81-557 81-558	M110, M111
Схема формування зчепу	Гм+Пм+Пм+ +Пм+Гм	Гн+Пм+Пм+ +Пм+Гн	Двосекційний	Гм+Пм+Пн+ +Пн+Пм+Мг	Гм+2Пм+Гм

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Продовження таблиці 1

Підприємство-виробник	ПАТ «КВБЗ»	ПАТ «КВБЗ»	ВАТ «Метровагонмаш»	ЗАТ «Вагонмаш» спільно з «Skoda Transportation s.r.o.»	ЗАТ «Штадлер Мінськ»
Середня маса тари вагона, т	32,1	29,2	48,2	26,8	36,5
Маса тари рухомого складу, т	160,7	146,1	192,8	160,8	182,5
Маса рухомого складу при максимальному завантаженні, т	278,2	262,0	344,6	273,0	213,8
Максимальний струм споживання вагона, А	1475	1620	1000	1350	–
Відсоток моторних вагонів	100	60	67	67	100
Місткість рухомого складу, пасажирів	1658	1651	1428	1594	–
Маса тари на одного пасажиря, кг	96,9	88,5	135	101	–
Конструкційна швидкість, км/год	90	90	90	90	90
Час розгону поїзда до швидкості, с: 30 км/год 60 км/год 80 км/год	6,5 13,7 21,2	7,1 18,1 32,9	11,0 24,0 39,0	8,0 18,0 29,0	– – –
Прискорення до швидкості 33 км/год, м/с ²	1,36	1,22	0,92	1,35	1,2
Сповільнення зі швидкості 90 км/год, м/с ²	1,19	1,1	1,1	1,4	1,3
Показники АТД					
Тип АТД	STDa280-4B	MB-5149-A	4-EFA18-32B	MLU3839K/4	–
Фірма виробник АТД, країна	EMIT S.A., Польща	Mitsubishi Electric Co, Японія	Alstom, Франція	Skoda Transportation s.r.o., Чехія	Starler Rail Group, Швейцарія
Номінальна потужність АТД, кВт	180	150	160	167	120
Маса АТД, кг	590	513	730	577	–
Питома потужність споживання на одиницю маси в номінальному режимі роботи АТД, кВт/т	305	294	219	289	–
Показники тягового інвертору					
Тип тягового інвертору, фірма-виробник	FT 350-750, MEDCOM, Польща	MAP-154-75V-256 Mitsubishi Electric Co, Японія	–	8MKM-1,2	Starler Rail Group, Швейцарія
Маса тягового інвертора, кг	1300	780	–	2100	–
Експлуатаційні показники рухомого складу					
Питомі витрати електроенергії на тягу, Вт·год/т·км	36,8*)	31,0*)	41,0**)	58,0***)	49,4****)

Рік початку виробництва	2012	2013	2002	2011	2019
Рік введення в експлуатацію	2015	2015	2003	2013	2020
Країна, в якій експлуатується рухомий склад	Україна	Україна	Росія, Болгарія	Росія	Білорусь
Термін служби, років	31	20	–	–	50

Примітка. Позначка «—» означає про відсутність значення показника у відкритих джерелах інформації.

*¹) Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 42 км/год під час максимального завантаження 10 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення без урахування часу зупинки на станції).

**²) Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 42 км/год під час завантаження 6,6 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення з урахуванням часу зупинки на станції 25 с).

***³) Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 48 км/год під час максимального завантаження 10 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення з урахуванням часу зупинки на станції 25 с).

****⁴) Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 48 км/год під час максимального завантаження 10 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення без урахування часу зупинки на станції).



Рис. 1. Загальний вигляд поїзда, що складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037



Рис. 2. Загальний вигляд поїздів, що складаються з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01



Рис. 3. Загальний вигляд поїзда «Русич», що складається з вагонів моделей 81-740, 81-741



Рис. 4. Загальний вигляд поїзда «Нева», що складається з вагонів моделей 81-556, 81-557, 81-558



Рис. 5. Загальний вигляд поїзда «Stadler», що складається з вагонів моделей M110, M111

Аналіз технічних характеристик наведеного рухомого складу метрополітену з АТД дозволив встановити, що середня маса тари вагонів знаходиться в межах від 26,8 т до 46,8 т; максимальний струм споживання вагона – від 1000 А до 1620 А; маса тари на одного пасажера – від 88,5 кг до 135,0 кг; пускове прискорення – від $0,92 \text{ м/с}^2$ до $1,36 \text{ м/с}^2$; сповільнення під час гальмування – від $1,1 \text{ м/с}^2$ до $1,4 \text{ м/с}^2$. За результатами аналізу технічних характеристик АТД, встановлено, що їх номінальна потужність знаходиться в межах від 120 кВт до 180 кВт; маса АТД – від 513 кг до 730 кг; питома потужність споживання на одиницю маси в номінальному режимі роботи АТД – від 219 кВт/т до 305 кВт/т.

Режими навантажень 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 вибору параметрів АТД. До рухомого складу метрополітену застосовуються специфічні вимоги за потужністю. В тяговому режимі пускова потужність P_n , кВт зазвичай обмежена пропускною здатністю пристроїв енергозабезпечення (максимальним струмом споживання на один вагон). Це обумовлює відношення швидкостей $V_{max}/V_{ном}=2,5-3,5$. В режимі електричного гальмування відсутні жорсткі обмеження за пристроями енергозабезпечення, оскільки рекуперована 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 тяги рухомого складу метрополітену перелічені особливості мають бути враховані.

Наведені на рис. 6 криві дають уявлення про навантаження АТД рухомого складу метрополітену в штатному режимі експлуатації.

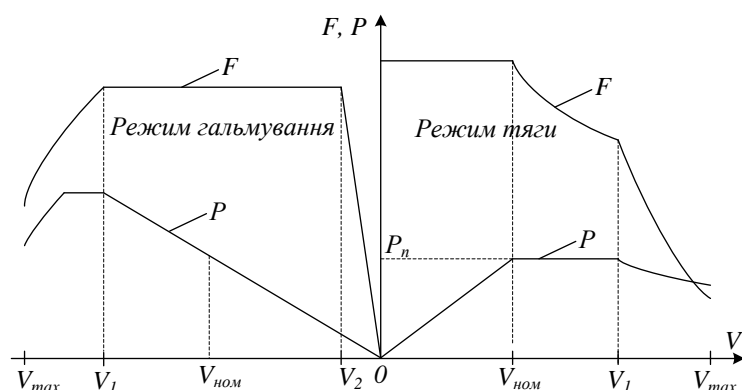


Рис. 6. Характерні криві потужності та сили тяги для рухомого складу метрополітену

На рис. 6 прийнято такі позначення: P – потужність; F – сила тяги; $V_{ном}$ – номінальна швидкість руху; $V_{ном}$ – 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 проектування та здійснення вибору АТД враховуються маса рухомого складу при різному завантаженні та накладаються певні обмеження на реалізацію максимальної сили тяги за зчепленням та максимальним пусковим моментом тягового двигуна.

З урахуванням вищенаведеного, на рис. 7 представлено в загальному вигляді існуючий типовий алгоритм вибору асинхронного тягового електроприводу для поїзда метрополітену.

Однак під час застосування типового підходу із множини можливих рішень можливе здійснення нераціонального вибору АТД. Як правило, під час застосування типового підходу для виробника рухомого складу головним критерієм є мінімальна ціна АТД за умов забезпечення встановлених обмежень. Далі розглянемо основні фактори, які призводять до нераціонального вибору АТД та можливі наслідки такого вибору під час застосування типового підходу.

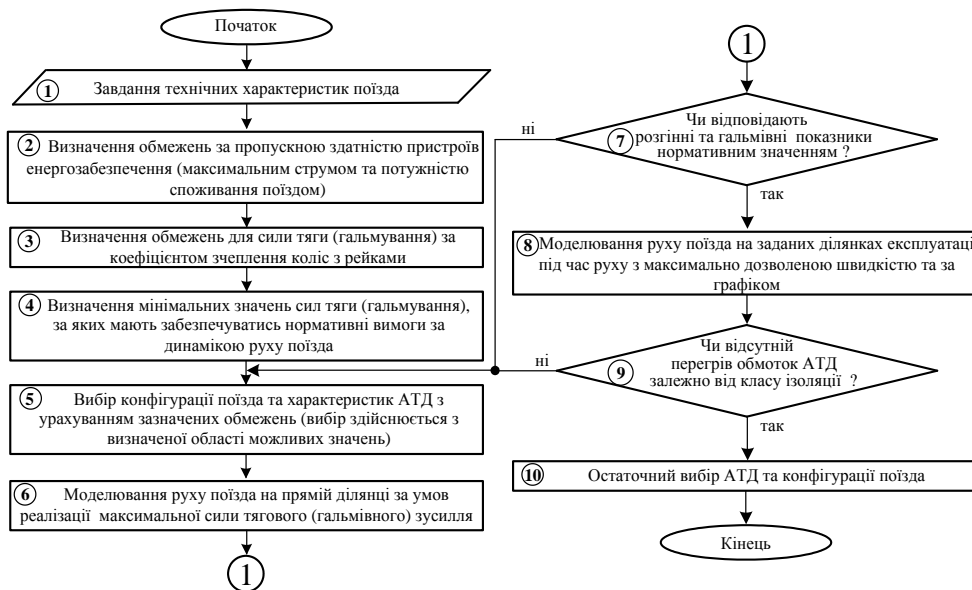


Рис. 7. Типовий алгоритм вибору АТД для поїзда метрополітену

Вибір АТД зі значною потужністю та пусковим моментом. Типовий алгоритм виключає можливість вибору АТД з недостатньою потужністю та направлений на недопущення цього факту. Як правило, відбувається вибір АТД зі значним запасом за потужністю та силою тяги (гальмування). На практиці вибір АТД зі значним запасом досить розповсюджене явище. Основними негативними наслідками такого вибору є: завищена маса рухомого складу; нераціональне використання ресурсу тягового двигуна; низька ефективність його роботи внаслідок зниження ККД, оскільки він не працює в номінальному режимі, підвищена кількість споживання енергії.

Вибір АТД з характеристиками коефіцієнта корисної дії та $\cos\phi$ низької ефективності. Цей випадок зазвичай притаманний, коли обирається АТД минулого покоління. При проектуванні інноваційного рухомого складу потрібно обирати АТД останнього покоління, який виготовляється за сучасними технологіями та має інноваційні рішення, внаслідок чого покращуються його техніко-економічні характеристики у порівнянні з попередніми поколіннями. За умов реалізації однакової механічної енергії на валу АТД останнього та попередніх поколінь, у останніх спостерігається більші масогабаритні показники, підвищена електрична потужність та кількість спожитої електроенергії з мережі. Результатом вибору АТД з характеристиками низької

ефективності є завищення маси рухомого складу, значні втрати в тяговому двигуні, внаслідок чого підвищується кількість споживання електроенергії.

Характер зміни характеристик коефіцієнта корисної дії та $\cos\phi$ залежно від швидкості. Характер зміни цих характеристик може здійснювати значний вплив на кількість спожитої електроенергії з мережі. За однакової механічної потужності на валу двигунів та рівних значеннях коефіцієнтів корисної дії і $\cos\phi$ в номінальному режимі роботи АТД перевага має надаватись тим характеристикам, які виходять на високі значення ефективності і $\cos\phi$ на якомога менших швидкостях руху і зберігають підвищені значення до максимальної швидкості руху поїзда метрополітену. Основним недоліком вибору АТД з незадовільним характером зміни характеристик ККД і $\cos\phi$ є підвищення кількості споживання електроенергії з мережі та, як наслідок, збільшення експлуатаційних витрат.

Реалії сьогодення такі, що під час вибору АТД потрібно враховувати експлуатаційні витрати на поїзд протягом його життєвого циклу. Тому в цій роботі пропонується інший алгоритм вибору АТД, який дозволить враховувати перелічені фактори та виключить можливість вибору неефективного асинхронного тягового електроприводу, що дозволить на етапі проектування рухомого складу метрополітену покращити характеристики поїзда.

Вибір раціональних параметрів АТД запропоновано за процедурою, в основі якої покладено вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію.

Узагальнений математичний опис цільової функції запропонованого критерію з визначення раціонального АТД можна представити у наступному вигляді:

$$F(\bar{X}) \rightarrow \text{extremum}, \bar{X} \in D_1 \dots D_k, \quad (1)$$

де $F(\bar{X})$ – головний критерій раціональності; D – область можливих рішень, яка визначається межами відповідних значень (параметричні обмеження); k – кількість прийнятих обмежень для пошуку раціонального рішення.

Як головний критерій обрано мінімальне значення показника питомих витрат електроенергії на тягу, на інші критерії встановлено обмеження – максимальні значення струму та потужності споживання поїзда, реалізація максимального коефіцієнта зчеплення коліс з рейками, забезпечення необхідної динаміки руху поїзда. З урахуванням обраного критерію формулювання задачі раціоналізації: знайти такі параметри АТД, за яких забезпечаться нормативні вимоги за динамікою розгону поїзда та мінімальні питомі витрати електроенергії в процесі експлуатації:

$$a_{\text{пит.тягу}} = F(P, I, F_{\text{тягу}}, F_{\text{гал}}, k_{\psi}, b, I_{\text{эф}}) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Питомі витрати електроенергії $a_{\text{пит.тягу}}$, Вт·год/т·км, на тягу поїзда метрополітену визначають за формулою [24, 25]:

$$a_{\text{пит.тягу}} = \frac{\sum \bar{U} \cdot \bar{I} \cdot \Delta t}{m \cdot L \cdot 3600}, \quad (3)$$

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

Причому для цільової функції встановлені граничні значення параметрів: $P \in [0 \dots P_{\max}]$; $I \in [0 \dots I_{\max}]$; $F_{\min} \leq F_{\text{тяги}} \leq F_{\psi_{\max}}$; $F_{\min} \leq F_{\text{зал}} \leq F_{\psi_{\max}}$; $\psi \in [0 \dots \psi_{\max}]$, $\psi \rightarrow \psi_{\max}$; $b \in [0 \dots b_{\max}]$; $I_{\text{еф}} \in [0 \dots I_{\text{еф}_{\max}}]$,

де P_{\max} , I_{\max} – максимальні значення потужності та струму споживання поїздом відповідно; F_{\min} – мінімальне необхідне значення сили тяги (гальмування), виходячи з вимог нормативної документації щодо значень середнього прискорення (сповільнення); $F_{\text{тяги}}$ ($F_{\text{зал}}$) – сила тяги (гальмування) поїзда; $F_{\psi_{\max}}$ – максимальне значення сили тяги (гальмування) поїзда за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками; ψ_{\max} – максимальне значення коефіцієнта зчеплення коліс з рейками за нормальних умов; b_{\max} – максимальне значення темпу прискорення (сповільнення) під час руху поїзда в режимах тяги (гальмування); $I_{\text{еф}_{\max}}$ – максимальне ефективне значення струму тягового двигуна.

За умов, якщо цільова функція має декілька екстремальних (мінімальних) значень питомих витрат електроенергії на тягу, то обирається АТД з найменшою вартістю.

Алгоритм вибору АТД, в якому запропоновано здійснювати відбір методом головного критерію, яким обрано критерій мінімальних питомих витрат електроенергії на тягу рухомого складу, зображено на рис. 8.

Перший етап (завдання характеристик поїзда). З використанням запропонованого алгоритму далі виконано вибір АТД з частотно-регульованим керуванням для заданих показників рухомого складу метрополітену (табл. 2).

Другий етап (обмеження за енергозабезпеченням). Прийнято, що за пропускну здатністю системи енергозабезпечення метрополітену поїзд має обмеження за струмом споживання 9000 А та за потужністю 7000 кВт.

Третій етап (обмеження сили тяги (гальмування) за зчепленням коліс з рейками. Обмеження для сили тяги (гальмування) за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками визначено за формулою:

$$F_{\psi_{\max}} = G_{\text{зч}} \cdot \psi \cdot N \quad (4)$$

$G_{\text{зч}}$ – сила тяжіння (зчіпна вага), яка припадає на моторний вагон поїзда, кН;

ψ – розрахункове значення коефіцієнта зчеплення за нормальних умов;

N – кількість моторних вагонів в поїзді, шт.

Примітка. Розрахункове значення коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою для поїзда метрополітену з асинхронним тяговим приводом за нормальних умов обирається для режиму тяги на рівні 0,22; для режиму гальмування – 0,2 [24, 25].

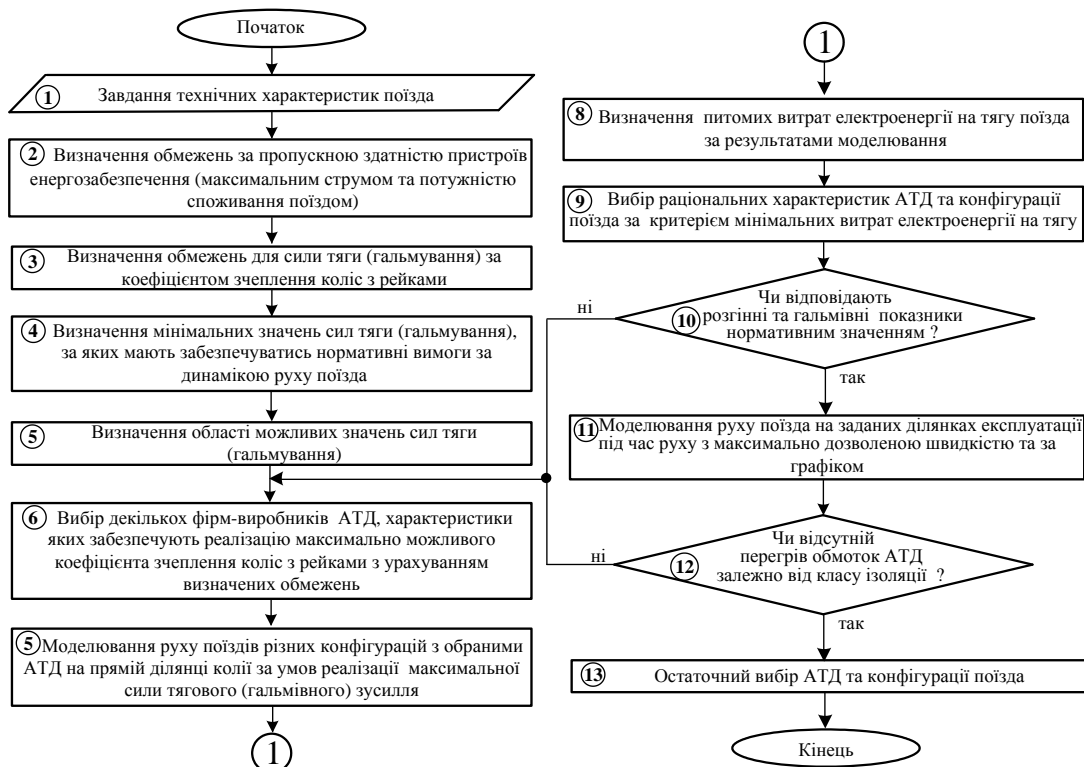


Рис. 8. Алгоритм вибору АТД для поїзда метрополітену методом прийнятого головного критерію

Таблиця 2. Технічні характеристики поїзда метрополітену

№ п/п	Параметр	Значення
1	Маса поїзда метрополітену (m, т)	
	– в порожньому стані;	155,3
	– за номінального завантаження;	246,9
	– за максимального завантаження	262
2	Зчїпна вага моторного вагона ($G_{зч}$, кН)	
	– в порожньому стані;	312,0
	– за номінального завантаження;	494,4
	– за максимального завантаження	543,5
3	Кількість вагонів (Q, шт)	5
4	Конструкційна швидкість (V_k , км/год)	90
5	Максимальна експлуатаційна швидкість (V, км/год)	80
6	Діаметр колеса (D_k , м)	0,825
7	Напруга на струмоприймачі вагона ($U_{ст}$, В)	
	– в режимі тяги;	825
	– в режимі вибігу;	875
	– в режимі гальмування;	908
8	Коефіцієнт інерції обертових мас ($1+\gamma$)	
	– в порожньому стані;	1,1
	– за номінального завантаження;	1,08
	– за максимального завантаження;	1,06
9	Передаточне число редуктора (μ)	6,95
10	Коефіцієнт корисної дії редуктора ($\eta_{ред}$, %)	98
11	Коефіцієнт корисної дії інвертора ($\eta_{інв}$, %)	96
12	Маса АТД, не більше ($m_{ав}$, кг)	700

Результати розрахунків максимально можливої сили тяги (гальмування) за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками для різних модифікацій поїзда, виконаних за формулою (4), наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Максимальне значення сили тяги (гальмування) поїзда, кН			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	343	544	598
4М+1П	275	435	478
3М+2П	206	326	359
Режим гальмування			
5М	312	494	544
4М+1П	250	396	435
3М+2П	187	297	326

За отриманими даними (табл. 3) встановлено, що максимальна сила тяги за зчепленням в розрахунку на один АТД повинна становити: для порожнього стану – 17,2 кН; номінального завантаження – 27,2 кН; максимального завантаження – 29,9 кН; сила гальмування для порожнього стану – 15,6 кН; номінального завантаження – 24,7 кН; максимального завантаження – 27,2 кН.

Четвертий етап (визначення мінімальних значень сил тяги (гальмування) для забезпечення необхідної динаміки руху). Діючим нормативним документом [26] встановлено вимоги до динаміки розгону (гальмування) поїзда метрополітену. Згідно цього документу під час розгону поїзда від 0 до 33 км/год повинно забезпечуватись середнє прискорення не менше ніж 1,2 м/с², а також при гальмуванні поїзда зі швидкості 90 км/год до 0 – середнє сповільнення не менше ніж 1,15 м/с² за умов його номінального завантаження. З урахуванням зазначеного, потрібно визначити мінімально допустиму силу тяги (гальмування), за яких мають відповідати значення прискорення та сповільнення нормативним вимогам. Розрахунок необхідної мінімальної сили тяги (гальмування), виходячи з вимог нормативної документації щодо значень середнього прискорення (сповільнення), виконується за формулою [24, 25]:

$$F_{\min} = m \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W, \quad (5)$$

де m – маса поїзда, т;

$(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертювих мас поїзда;

a – нормоване значення прискорення (сповільнення), м/с²;

W – основний опір руху поїзда, кН.

Основний опір руху поїзда розраховано за формулою модифікованого рівняння Девіса:

$$W = 6,4 \cdot m + 130 \cdot n + 0,14 \cdot m \cdot V + (0,046 + 0,0065(Q - 1)) \cdot A \cdot V^2, \quad (6)$$

де n – загальна кількість осей на поїзді, шт;

V – швидкість руху поїзда, км/год;

A – площа передньої поверхні, м² (прийнято, що вона дорівнює 10 м²).

Примітка. Прийнято, що основний опір руху в режимі гальмування поїзда дорівнює нулю.

Результати розрахунку мінімально необхідної сили тяги (гальмування) для забезпечення необхідної динаміки руху поїзда, представлено в табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Мінімально потрібне значення сили тяги (гальмування) поїзда, кН			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	210	332	352
4М+1П	206	326	346
3М+2П	203	320	340
Режим гальмування			
5М	196	312	331
4М+1П	193	307	325
3М+2П	189	301	319

За отриманими даними (табл. 4) встановлено, що мінімально необхідна сила для забезпечення вимог щодо динаміки руху в розрахунку на один АТД повинна становити залежно від конфігурації поїзда:

- а) для режиму тяги:
 - в порожньому стані – 10,5...16,9 кН;
 - за номінального завантаження – 16,6...26,7 кН;
 - за максимального завантаження – 17,6...28,3 кН;
- б) для режиму гальмування:
 - в порожньому стані – 9,8...15,8 кН;
 - за номінального завантаження – 15,6...25,1 кН;
 - за максимального завантаження – 16,6...26,6 кН.

П'ятий етап (визначення області можливих значень сил тяги (гальмування) для вибору АТД). Область можливих значень сил тяги (гальмування), яку має забезпечувати АТД, знаходиться між максимально можливим значенням сили за зчепленням та мінімально необхідним значенням за умов забезпечення вимог щодо динаміки руху. Вибір АТД необхідно виконувати з урахування можливості реалізації максимально можливого розрахункового коефіцієнта зчеплення коліс з рейками та обмежень за темпом прискорення (сповільнення). За темпом прискорення в режимі тяги та сповільнення в режимі гальмування необхідно, щоб виконувалась умова $b \leq 0,6 \text{ м/с}^3$ [26]. Як показує практика, для виконання цієї умови потрібно, щоб максимальне значення прискорення (сповільнення) не перевищувало $1,5 \text{ м/с}^2$. Таким чином, потрібно встановити граничне значення сили тяги (сповільнення) додатково за цим показником.

Середнє прискорення (сповільнення) для різних конфігурацій поїзда розраховується за формулою [24, 25]:

$$a = \frac{F_{\max} - W}{m(1 + \gamma)} \quad (7)$$

Результати розрахунків значень прискорень (сповільнень) для різних модифікацій поїзда, виконаних за формулою (7), наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Результати розрахунків прискорень (сповільнень)

Значення прискорення (сповільнення) поїзда, м/с ²			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	1,98	1,98	2,05
4М+1П	1,61	1,61	1,67
3М+2П	1,22	1,22	1,27
Режим гальмування			
5М	1,83	1,82	1,89
4М+1П	1,49	1,48	1,54
3М+2П	1,14	1,13	1,17

Уточнені максимальні значення сили тяги (гальмування) з урахуванням додаткової перевірки за темпом прискорення (сповільнення), представлено в табл. 6.

Таблиця 6. Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Максимальне значення сили тяги (гальмування) поїзда, кН			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	261	413	439
4М+1П	257	406	431
3М+2П	206	326	359
Режим гальмування			
5М	256	407	432
4М+1П	250	396	424
3М+2П	187	297	326

Таким чином, за результатами аналізу результатів розрахунків встановлено, що для реалізації прискорення 1,5 м/с² за конфігурації поїзда 5М обраний АТД має забезпечувати силу тяги на ободі колеса рівну 21,2 кН; для 4М+1П – 26,4 кН; для 3М+2П – 29,9 кН.

Шостий етап (вибір АТД з раціональними характеристиками). В даному випадку для аналізу та подальшого вибору АТД пропонується розглянути характеристики від трьох різних фірм-виробників (кількість АТД для розгляду та аналізу їх характеристик алгоритмом не обмежується). Технічні характеристики обраних для аналізу АТД, представлено в табл. 7–9. Залежності загального коефіцієнта корисної дії обраних тягових двигунів залежно від їх завантаження наведено на рис. 9, 10. Слід зазначити, що залежності коефіцієнта корисної дії АТД від другого та третього виробників ідентичні.

Таблиця 7. Технічні характеристики АТД від першого виробника

№ п/п	Параметр	Значення
1	2	3
1	Номінальна потужність, (P _н , кВт)	180
2	Номінальна напруга живлення, (U _н , В)	500±5%
3	Номінальна частота (f _н , Гц)	63±2%
4	Номінальний струм (I _н , А)	264
5	Номінальна частота обертання (n _н , об/хв)	1854
6	Максимальна частота обертання (n _{тах} , об/хв)	4200
7	Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,84
8	Коефіцієнт корисної дії (η, %)	94
9	Номінальний момент (M _н , Н·м)	927
10	Максимальний пусковий крутний момент в режимі тяги, (M _п , Н·м)	1510

Закінчення таблиці 7

11	Максимальний крутний момент в режимі гальмування, (Мг, Н·м)	1380
12	Клас ізоляції	Н
13	Робоча температура, °С	-40...+50
14	Маса, кг	590

Таблиця 8. Технічні характеристики АТД від другого виробника

№ п/п	Параметр	Значення
1	Номінальна потужність, (Рн, кВт)	150
2	Номінальна напруга живлення, (Un, В)	610
3	Номінальна частота (fn, Гц)	50
4	Номінальний струм (In, А)	178
5	Номінальна частота обертання (пн, об/хв)	1480
6	Максимальна частота обертання (пmax, об/хв)	4200
7	Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,92
8	Коефіцієнт корисної дії (η, %)	94
9	Номінальний момент (Мн, Н·м)	968
10	Максимальний пусковий крутний момент в режимі тяги, (Мп, Н·м)	1940
11	Максимальний крутний момент в режимі гальмування, (Мг, Н·м)	1570
12	Клас ізоляції	Н
13	Робоча температура, °С	-35...+40
14	Маса, кг	650

Таблиця 9. Технічні характеристики АТД від третього виробника

№ п/п	Параметр	Значення
1	Номінальна потужність, (Рн, кВт)	150
2	Номінальна напруга живлення, (Un, В)	610
3	Номінальна частота (fn, Гц)	65
4	Номінальний струм (In, А)	185
5	Номінальна частота обертання (пн, об/хв)	1900
6	Максимальна частота обертання (пmax, об/хв)	4200
7	Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,9
8	Коефіцієнт корисної дії (η, %)	92
9	Номінальний момент (Мн, Н·м)	930
10	Максимальний пусковий крутний момент в режимі тяги, (Мп, Н·м)	1633
11	Максимальний крутний момент в режимі гальмування, (Мг, Н·м)	1520
12	Клас ізоляції	Н
13	Робоча температура, °С	-35...+40
14	Маса, кг	560

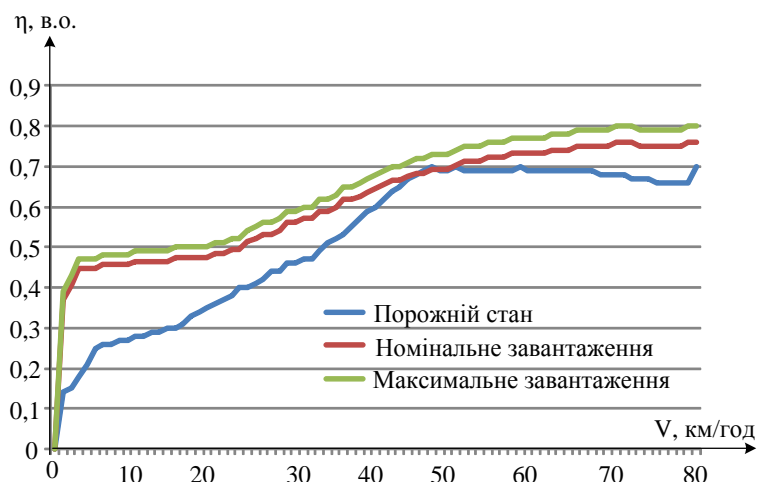


Рис. 9. Залежності коефіцієнта корисної дії АТД від першого виробника

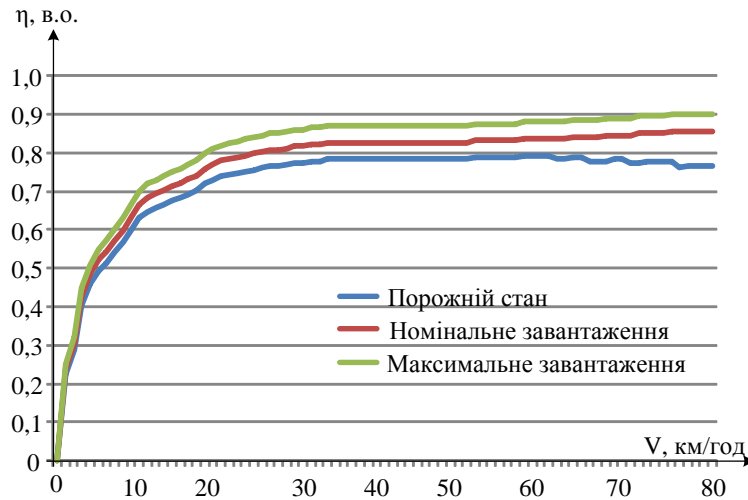


Рис. 10. Залежності коефіцієнта корисної дії АТД від другого та третього виробників

Після вибору характеристик АТД виконано перевірку їх можливості реалізовувати максимально розраховану силу тяги на ободі колеса. Для цього визначається пускова сила тяги двигуна за формулою:

$$F_{n \max} = \frac{2 \cdot M_n \cdot \mu \cdot \eta_{ред}}{D}, \quad (8)$$

За результатами розрахунків визначено, що за своїми характеристиками АТД від першого виробника може реалізувати максимальне значення пускового моменту, яке дорівнює 24,9 кН; від другого виробника – 32,0 кН; від третього виробника – 27,0 кН. В подальшому при виконанні моделювання та розрахунків цей факт потрібно враховувати.

За результатами уточнених розрахунків встановлено, що для конфігурації поїзда 3М+2П за умов застосування АТД від першого виробника не виконуються вимоги за динамікою розгону і гальмування, тому цей варіант в подальшому виключається з досліджень. Для конфігурації поїзда 3М+2П за умов застосування АТД від другого або третього виробників з метою виконання вимог за динамікою гальмування потрібно впроваджувати комбіноване гальмування. В подальших дослідженнях, зокрема під час моделювання руху поїзда, в зазначеній конфігурації це враховано.

Сьомий етап (моделювання руху поїздів різних модифікацій з обраними АТД). Моделювання руху поїзда на прямій ділянці колії виконувалось за допомогою спеціалізованого атестованого програмного забезпечення за умов реалізації розрахункових максимальних тягових (гальмівних) зусиль для двох випадків:

- розгін до конструкційної швидкості та гальмування до повної зупинки поїзда на прямолінійному перегоні без ухилів;
- розгін, вибіг та гальмування під час руху на прямолінійному перегоні загальної довжини 1700 м без ухилів за умов реалізації середньої швидкості сполучення на перегоні 42 км/год.

В програмному забезпеченні, за допомогою якого здійснювалось моделювання, прийнято 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, а також досліджувати енергетичні процеси в режимі рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену.

За результатами моделювання визначено динамічні та енергетичні характеристики руху поїзда.

Восьмий етап (визначення питомих витрат електроенергії на тягу за результатами моделювання). Результати обробки змодельованих режимів руху поїздів різних конфігурацій, за яких визначено питомі витрати електроенергії на тягу, подано в табл. 10.

Таблиця 10. Результати розрахунків питомих витрат

Значення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда, м/с ²				
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження	Економічний ефект, %
АТД від першого виробника				
5М	43,5	33,8	32,1	–
4М+1П	43,9	32,7	31,6	–
3М+2П	–	–	–	–
АТД від другого виробника				
5М	28,6	25,0	23,8	34,3
4М+1П	29,1	24,6	23,4	33,7
3М+2П	28,7	24,2	23,0	34,6
АТД від третього виробника				
5М	28,6	25,0	23,8	34,3
4М+1П	29,1	24,6	23,4	33,7
3М+2П	28,7	25,2	23,9	34,6

Дев'ятий етап (визначення раціональних характеристик АТД та конфігурації поїзда). За результатами аналізу отриманих значень питомих витрат електроенергії на тягу встановлено, що найбільш раціональним є конфігурація поїзда 3М+2П за умов використання АТД від другого виробника.

Десятий етап (перевірка відповідності встановленим нормативним показникам динаміки руху). Згідно технічних вимог рухомий склад метрополітену має забезпечувати в номінальному режимі завантаження наступне:

- розгін до швидкості 30 км/год: не більше 12 с;
- розгін до швидкості 60 км/год: не більше 26 с;
- розгін до швидкості 80 км/год: не більше 35 с.

За результатами аналізу отриманих значень часу розгону поїзда до зазначених швидкостей в процесі моделювання встановлено, що поїзд конфігурації 3М+2П з АТД від другого виробника відповідає встановленим технічним вимогам (забезпечується розгін поїзда до швидкості 30 км/год за 6,8 с; до швидкості 60 км/год – 14,8 с; до швидкості 80 км/год – 23,1 с).

Одинадцятий етап передбачає моделювання руху поїзда на заданих ділянках експлуатації за умов руху з максимально дозволеною швидкістю та в режимі графікового руху під час максимального завантаження з метою перевірки дотримання умов за нагріванням обмоток АТД. Моделювання виконано з урахуванням реального профілю колії. Як дослідну ділянку для розрахунків обрано Святошинсько-Броварську лінію КП "Київський метрополітен", яка має часто змінюваний профіль з численними "шкідливими" підйомами та спусками.

За результатами моделювання визначається ефективне значення струму на тяговому двигуні за формулою (перевірка потужності за методом еквівалентного струму) [24, 25]:

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i}, \quad (9)$$

де T – загальний час руху на дослідній ділянці; I_i – середній струм під час руху в режимах тяги або гальмування; Δt_i – час руху в режимах тяги або гальмування; n – кількість включень контролера машиніста в режим тяги та гальмування.

Після чого, отримане значення порівнюється з номінальним значенням струму АТД. Якщо отримане значення ефективного струму менше за номінальне значення струму АТД, то умова по нагріву АТД виконується і його можна обирати.

Результати розрахунку ефективного значення струму двигуна за результатами моделювання поїзда метрополітену конфігурації 3М+2П з АТД від другого виробника, зображено в табл. 11.

Таблиця 11. Результати розрахунків значень ефективного струму

Конфігурація поїзда	Дослідна ділянка	Загальний час руху (Т, хв)	Значення ефективного струму (I_{ef})
Моделювання зі швидкістю за графіком руху			
3М+2П	Академмістечко – Лісова	38,47	146
	Лісова – Академмістечко	38,4	141
	Академмістечко – Лісова – Академмістечко	76,87	144
Моделювання руху з максимально дозволеною швидкістю			
3М+2П	Академмістечко – Лісова	31,55	178
	Лісова – Академмістечко	31,37	174
	Академмістечко – Лісова – Академмістечко	62,92	176

Дванадцятий етап (перевірка умови за нагрівом обмоток АТД). За результатами аналізу отриманих даних видно, що умова за нагрівом виконується, тому обраний АТД від другого виробника для конфігурації поїзда 3М+2П можна застосовувати.

За результатами моделювання руху поїздів метрополітену для заданих умов встановлено, що тільки за рахунок визначення раціональної конфігурації поїзда та вибору раціональних параметрів АТД можливо досягти економії електроенергії до 34,6 %. При цьому за даними табл. 10 помітно, що основним фактором впливу на показник питомих витрат електроенергії на тягу є параметри обраних АТД. Конфігурація поїзда також здійснює вплив на показник питомих витрат електроенергії на тягу, проте цей вплив незначний (на рівні 1,0-3,4 %). Таким чином, вибір раціональної конфігурації поїзда метрополітену та застосування на ньому АТД з раціональними параметрами дозволить досягти значного економічного ефекту за рахунок зменшення кількості моторних вагонів, підвищення енергоефективності та енергозбереження на рухомому складі, зменшення витрат на технічне обслуговування та ремонт, що в цілому сприятиме зменшенню витрат як під час виготовлення поїзда, так і зменшенню експлуатаційних витрат протягом його життєвого циклу.

Висновки

1. За результатами аналізу встановлено основні характеристики сучасного інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним тяговим електроприводом вітчизняного та закордонного виробництва.

2. Запропоновано та розроблено процедуру вибору раціонального асинхронного тягового двигуна та конфігурації поїзда, в основі якої покладено вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію. Як головний критерій обрано мінімальне значення показника питомих витрат електроенергії на тягу, на інші критерії встановлено обмеження – максимальні значення струму та потужності споживання поїзда, реалізація максимального коефіцієнта зчеплення коліс з рейками, забезпечення необхідної динаміки руху поїзда.

3. Здійснено вибір раціонального типу АТД за запропонованою процедурою, який дозволив встановити, що для заданих умов раціональною є конфігурація поїзда 3М+2П з використанням АТД від другого виробника.

4. Результати досліджень свідчать, що за рахунок впровадження оптимальної конфігурації поїзда та раціонального вибору АТД можливо зекономити до 34,6 % електроенергії, що витрачається на тягу, та в цілому зменшити експлуатаційні витрати в метрополітені під час перевезення пасажирів.

5. Рівень впливу на показник питомих витрат електроенергії на тягу в значній мірі здійснює залежність коефіцієнта корисної дії обраного АТД порівняно з обраною конфігурацією поїзда.

Подальші дослідження необхідно зосередити на визначенні резервів зменшення експлуатаційних витрат за рахунок впровадження поїзда оптимальної конфігурації з раціональними параметрами АТД, а також проаналізувати фактори впливу на показник питомих витрат електроенергії на тягу та визначити рівень такого впливу кожного з факторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сулим А.О., Мужичук С.О., Хозя П.О., Павленко Ю.С., Єжов Ю.В. Сучасний стан та перспективи розвитку парку рухомого складу метрополітену в Україні. Залізничний транспорт України. 2019. №3/2019. С. 14-20
2. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко : Под ред. Н.А. Ротанова. М.: Транспорт. 1991. 336 с.
3. Калинин В.К. Электровозы и электропоезда. М.: Транспорт. 480 с.
4. Амелин В.М. Электропоезда. Механическая часть, тяговые двигатели и вспомогательные машины. Системы обслуживания и ремонта / В.М. Амелин, Ю.М. Иньков, М.И. Озеров, В.Н. Ротанов, А.А. Рубцов, Е.К. Рыбников, Я.И. Шур / Под общ. ред. В.М. Амелина, Ю.М. Инькова. М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2000. 200 с.
5. Хворост М.В., Шпіка М.І., Бесараб А.І. Тяговий асинхронний електропривод для міського електротранспорту. Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2012. № 3. С. 7-10.
6. Устенко О.В., Пасько О.В. Тенденции развития тяговых двигателей подвижного состава. Електротехніка і електромеханіка. 2013. № 1. С. 65-68.
7. Любарський Б.Г. Раціональні швидкісні режими руху приміського електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами. Вісник НТУ «ХП». 2015. № 8 (1127). С. 86-92.
8. Курбасов А.С. Асинхронный привод электровоза: эффективность перевозок, технологичность производства. Транспорт Российской Федерации. 2008. № 6 (19). С. 51-53.
9. 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>
10. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1. Транспорт Российской Федерации. 2018. № 6 (79). С. 40-44.
11. Petrenko O., Liubarskiy V., 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. Ле Суан Хонг. Перспективы внедрения асинхронных тяговых двигателей на тяговом подвижном составе. VII Всероссийская конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов». 2014 С. 256-258.
13. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarsky 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 1/9 (97). P. 48–57. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
14. Terasawa K., Ishikawa K., Asada T., Koneko T., Endo M., Yoshida T. Development of lightweight traction systems to reduce energy consumption. 2018. Vol 67. No. 7. P. 38-43.
15. Abouzeid A.F., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control strategies for induction motors in railway traction applications. Energies. 2020. 13 (3), 700. P. 1-22. <https://doi.org/10.3390/en13030700>
16. Мнацаканов В.А. К истории отечественного метровагоностроения. Метро и тоннели. 2015. № 3. С. 28-33.
17. Мнацаканов В.А. Инновационный метропоезд «Нева». Тягово-энергетические испытания. Метро и тоннели. 2014. № 1. С. 30-34.
18. Goolak S., Sapronova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Issue 6/5 (108), p. 38–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>.
19. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. Transport. 2020. 35(6), 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.
20. 556.00.00.000-01 РЭ. Вагоны метрополитена моделей 81-556, 81-557, 81-558. Руководство по эксплуатации. 86 с.
21. Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагонів метрополітену моделей 81-7036 та 81-7037, обладнаних асинхронним приводом Том 4. Випробування електрообладнання, випробування на електромагнітну сумісність з пристроями сигналізації та зв'язку, тягово-енергетичні випробування, випробування системи автоматичного регулювання швидкості, систем вентиляції, випробування з визначення параметрів мікроклімату в кабіні керування та рівнів шуму й інфразвуку вагонів метро моделей 81-7036 і 81-7037 / ДП «УкрНДІВ»; керівник Ольгард Леонід Семенович; викон. Донченко А.В., Ільчишин В.В., Распопін В.Р. [та ін.]. Кременчук. 2012. 105 с. ДР 0112U006006. Інв. № 1325.
22. Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагонів метро, виготовлених в рамках комплексної модернізації для Комунального підприємства «Київський метрополітен». Випробування електрообладнання, випробування на електромагнітну сумісність з пристроями сигналізації та зв'язку, тягово-енергетичні випробування, випробування системи автоматичного регулювання швидкості, випробування з визначення параметрів мікроклімату в кабіні управління та рівнів шуму й інфразвуку вагонів метро / ДП «УкрНДІВ»; керівник Хозя Павло Олександрович; викон. Донченко А.В., Речкалов С.Д., Шмаков С.В. [та ін.]. Кременчук. 2014. 154 с. ДР 0114U006350. Інв. № 1501.
23. Stadler M110/M111 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Stadler_M110/M111. Назва з екрану.
24. Байрыева Л.С. Теория электрической тяги. Методическое пособие / Л.С. Байрыева, А.В. Прокопович. М.: Издательство МЭИ. 2004. 40 с.
25. 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.
26. СОУ МПП 45.060-253:2008 Вагоны метрополитену. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-01-01] Вид. офіц. Київ: Міністерство промислової політики України. 2008. 29 с.

REFERENCES

1. Sulym, A.O., Muzhychuk, S.O., Khozia, P.O., Pavlenko, Yu.S., & Yezhov, Yu.V. (2019). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku rukhomoho skladu metropolitenu v Ukraini [Current state and prospects of metro rolling stock development in Ukraine]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 3, 14-20 [in Ukrainian]
2. Rotanov, N.A., Kurbasov, A.S., Byikov, Yu.G., & Litovchenko, V.V. (1991). Elektropodvizhnoy sostav s asinhronnymi tiagovymi dvigateliami [Electric rolling stock with asynchronous traction motors]. N.A. Rotanov (Ed.). М. : Transport, p. 336 [in Russian].
3. Kalinin, V.K. Elektrovozy i elektropoezda [Electric locomotives and electric trains]. М. : Transport [in Russian].
4. Amelin, V.M., Inkov, Yu.M., Ozerov, M.I., Rotanov, V.N., Rubtsov, A.A., Rybnikov, E.K. et al. (2000). Elektropoezda. Mehanicheskaia chast, tiagovyie dvigateli i vspomogatelnye mashyny. Sistemy obsluzhivaniia i remonta [Electric trains. Mechanical part, traction motors and auxiliary machines. Maintenance and repair systems]. V.M. Amelin, Yu.M. Inkov (Ed.), 200 [in Russian].
5. Hvorost M.V., Shpika M.I., Besarab A.I. (2012). Tiagovyi asinhronnyi elektroprivod dlia miskogo elektrotransportu [Traction asynchronous electric drive for urban electric transport]. *Energoberezhnie. Energetika. Enerhoaudit - Energy saving. Energy. Energy audit*, 3, 7-10
6. Ustenko O.V., Pasko O.V. (2013). Tendencii razvitiia tiagovykh dvigatelej podvizhnogo sostava. [Development trends for the development of traction motors of rolling stock]. *Elektrotehnika i elektromekhanika - Electrical engineering and electromechanics*, 1, 65-68 [in Russian].

7. Liubarskyi B.G. (2015). Ratsionalni shvydkisni rezhymy rukhu prymiskogo elektrovozida z asinkhronnymy tiagovymy dvygunamy [Rational speed modes of metro electric train with asynchronous traction motors], *Visnyk NTU «KhPI» - Bulletin of the NTU "KhPI"*, 8 (1127), 86-92 [in Ukrainian]
8. Kurbasov A.S. (2008). Asinkhronnyi privod elektrovoza: effektivnost perevozok, tekhnologichnost proizvodstva [Asynchronous electric locomotive drive: traffic efficiency, manufacturability], *Transport Rossiiskoi Federacii - Transport of the Russian Federation*, (19), 51-53 [in Russian].
9. Hetman H.K., Marikutsa S.L. (2017). 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. Issue 3 (69), 56–65. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104767>
10. Titova T.S., Evstafiev A.M., Izvarin M.YU., Sychugov A.N. (2018). Perspektivy razvitiia tiahovogo podvizhnogo sostava. Chast 1 [Prospects for the development of traction rolling stock.]. *Transport Rossiiskoi Federacii - Transport of the Russian Federation*, 6 (79), 40-44 [in Russian]
11. Petrenko O., Liubarskiy B., Plugin V. (2017). Determination of railway rolling stock optimal movement modes, *Elektrotehnika i elektromekhanika - Electrical engineering and electromechanics*, 6, 27-31. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
12. Le Suan Khong. (2014). Perspektivy vnedreniia asinkhronnykh tiagovykh dvigateliei na tiahovom podvizhnom sostavie. [Prospects for the introduction of asynchronous traction motors on traction rolling stock]. VII Vserossiiskaia konferencia «Nauchnaya iniciativa inostrannykh studentov i aspirantov rossiiskikh vuzov» - VII All-Russian Conference "Scientific Initiative of Foreign Students and Postgraduates of Russian Universities". (pp. 256-258).
13. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarsky 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*. Issue 1/9 (97), p. 48–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>.
14. Terasawa K., Ishikawa K., Asada T., Koneko T., Endo M., Yoshida T. (2018). Development of lightweight traction systems to reduce energy consumption. Vol 67. No. 7. p. 38-43.
15. Abouzeid A.F., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. (2020). Control strategies for induction motors in railway traction applications. *Energies*. 13 (3), 700. p. 1-22. <https://doi.org/10.3390/en13030700>
16. Mnatsakanov V.A. (2015). K istorii otechestvennogo metrovagonostroeniia [Concerning the history of domestic metro car building]. *Metro i tonneli - Metro and tunnels*, 3, 28-33 [in Russian]
17. Mnatsakanov V.A. (2014). Innovacionnyi metropolezd «Neva». Tiahovo-enerheticheskie ispytaniia [Innovative metro train "Neva". Traction and energy tests]. *Metro i tonneli - Metro and tunnels*, 1, 30-34 [in Russian]
18. Goolak S., Saprova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. (2020). Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Issue 6/5 (108), p. 38–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>.
19. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. (2020). Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 35(6), 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.
20. Rukovodstvo po ekspluatatsii 556.00.00.000-01. Vagony metropolitena modelei 81-556, 81-557, 81-558 [Metro car models 81-556, 81-557, 81-558. Manual], 86 [in Russian].
21. Olhard L.S., Donchenko A.V., Ilchyshyn V.V., Raspopin V.R et.al. (2012). Naukovo-eksperimentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vagoniv metropolitenu modelei 81-7036 ta 81-7037, obladnanykh asinkhronnym pryvodom. Vyprovuvannia elektroobladnannia, vyprovuvannia na elektromagnitnu sumisnist z prystroiamy syhnalizatsii ta zviazku, tiahovo-enerhetychni vyprovuvannia, vyprovuvannia systemy avtomatichnogo rehuliuвання shvydkosti, system ventyliatsii, vyprovuvannia z vyznachennia parametriv mikroklimatu v kabini keruvannia ta rivniv shumu i infrazvuku vagoniv metro modelei 81-7036 i 81-7037 [Scientific and experimental studies of technical characteristics of metro cars of models 81-7036 and 81-7037, equipped with asynchronous drive. Vol. 4. Tests of electrical equipment, tests for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices, traction and energy tests, tests of automatic speed control system, ventilation systems, tests to determine the parameters of the microclimate in the drive cabin and noise and infrasound levels of metro cars models 81-7036 and 81-7037. Olhard L.S. (Eds.). Kremenchuk: DP «UkrNDIV», 105 [in Ukrainian].
22. Khozia P. O., Donchenko A.V., Rechkalov S.D., Shmakov S.V. et al. (2014). Naukovo-eksperimentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vagoniv metro, vyhotovlenykh v ramkakh kompleksnoi modernizatsii dlia Komunalnogo pidpriemstva «Kiiivskii metropoliten». Vyprovuvannia elektroobladnannia, vyprovuvannia na elektromagnitnu sumisnist z prystroiamy syhnalizatsii ta zviazku, tiahovo-enerhetychni vyprovuvannia, vyprovuvannia systemy avtomatichnogo rehuliuвання shvydkosti, vyprovuvannia z vyznachennia parametriv mikroklimatu v kabini upravlinnia ta rivniv shumu i infrazvuku vagoniv metro [Scientific and experimental studies of technical characteristics of metro cars manufactured as part of a comprehensive modernization for the Municipal Enterprise "Kyiv Metro". Tests of electrical equipment, tests for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices, traction and energy tests, tests of the automatic speed control system, tests to determine the parameters of the microclimate in the control cabin and noise and infrasound levels of metro cars. Khozia P. O. (Eds.). Kremenchuk: DP «UkrNDIV», 154 [in Ukrainian]
23. Stadler M110/M111. Retrieved from https://ru.wikipedia.org/wiki/Stadler_M110/M111.
24. Bairyeva L.S., Prokopovich A.V. (2004) *Teoriia elektricheskoi tiahii [Theory of electric traction]*. M.: Izdatelstvo MEI, 40.
25. Rozenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N., Ozerov M.I. (1995). *Teoriia elektricheskoi tiahii [Theory of electric traction]*. M.: Transport, 294.

26. *Vagoni metropolitenu. Zahalni tekhnichni vimogi. [Metro cars. General technical requirements]* (2008). SOU MPP 45.060-253:2008. Kyiv: Ministerstvo promyslovoi polityky Ukrainy, 29.

Andrii Sulym^{1*}, Oleksandr Ustenko², Oleksandr Melnyk¹, Andrii Lomonos³, Serhii Muzhychuk⁴, Valerii Solovey⁴

¹ State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

² Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

³ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva St., Kremenchuk, 39600, Ukraine

⁴ Public Joint Stock Company "Kryukovsky Railway Car Building Works", 139, I. Prikhodko St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

A METHODOLOGY TO SELECT ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC DRIVE FOR INNOVATIVE METRO ROLLING STOCK

The paper deals with the justification of the need to use an asynchronous traction electric drive on the metro rolling stock. The advantages of using an asynchronous traction electric drive in comparison with a DC commutator motor drive are formulated. The characteristics of modern innovative metro rolling stock with asynchronous traction electric drive of domestic and foreign production are analyzed. Aspects of the choice of a variable frequency asynchronous traction electric drive for innovative rolling stock are formulated and the existing typical algorithm of such choice is given. The main reasons for the irrational choice of traction asynchronous electric drive for the metro rolling stock are considered and the consequences of such a choice are analyzed. It is proposed to improve the methodology for selecting a variable frequency traction asynchronous electric drive for the metro rolling stock in terms of such an important operational factor as the specific cost of electrical energy for traction. The rational parameters of the variable frequency asynchronous traction electric drive according to the proposed procedure for the specified characteristics of the metro rolling stock are specified. The reserves of energy savings for the given conditions due to the introduction of an asynchronous traction electric drive with rational parameters on the innovative rolling stock are determined. It is established that the efficiency factor of the asynchronous traction motor significantly affects the specific electric energy consumption for the metro rolling stock traction and operating costs.

Keywords: asynchronous traction electric drive, car, metro, rolling stock, specific electricity consumption for traction, variable frequency.