

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра _____ Електрорухомий склад залізниць _____
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

Гетьман Г.К.
(підпис) (ПІБ)

20 ____ р. ____ « ____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань _____ 14 Електрична інженерія _____
(шифр) (назва)

Спеціальність _____ 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка _____
(код) (повна назва)

Спеціалізація _____ Електричний транспорт _____
(повна назва)

Тема «Вибір конструктивних параметрів енергоефективного тягового приводу
для поїздів метрополітену»

Theme Selection of design parameters of energy-efficient traction drive for subway train

Керівник дипломної роботи проф. _____ Саблін О.І.
(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер проф. _____ Саблін О.І.
(посада) (підпис) (ПІБ)

Студент групи ЕТ1826 _____ Підлубний А.С.
(група) (підпис) (ПІБ)

Student _____ Pidlubnyi Andrii
(Family name)

Дніпро
2020

Вступ

Актуальність теми. Асинхронний привід набуває все більшого поширення на рейковому транспорті за рахунок простої конструкції і високої надійності асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. При цьому виникає величезний інтерес з боку оператора в придбанні недорогих і ефективних тягових приводів рухомого складу.

Активне використання рухомого складу (РС) з уже типовим асинхронним тяговим приводом, в який входить частотний перетворювач, асинхронний двигун і редуктор, безсумнівно, допомагає знизити рівень енергоспоживання в силу ряду причин і, отже, знизити частку в загальних витратах на електроенергію, а також зменшити рівень експлуатаційних витрат на обслуговування тягового приводу в порівнянні з колекторним приводом. Але як бути, якщо активне використання асинхронного приводу як і раніше ставить завдання знизити рівень споживання електроенергії на ще більш низький рівень, при цьому, не збільшуючи статтю експлуатаційних витрат?

Можливість застосувати одного типу приводу на великій кількості ділянок експлуатації явно дає зрозуміти, що за різних профілів шляху привод може бути як недовикористаний, так і наближатися до граничних або бустерних умов експлуатації, що веде до підвищеного енергоспоживання за рахунок роботи в режимі далекому від номінального. Крім того, недовикористання потужностей на деяких ділянках призводить до наявності постійно недовикористовує резервів приводу, які можуть бути «вилучені» заводом-виробником. Гнучка система проектування, що дозволяє оптимізувати конструкційні параметри приводу під будь-яку ділянку експлуатації, дозволить спростити пошуки оптимальних параметрів приводу і його способів управління, тим самим скорочуючи наявні резерви потужності і проектуючи привід на експлуатацію в більшій мірі в номінальному режимі його роботи. В результаті цього можливий перехід на більш низьку потужність інвертора, що пов'язане з відповідною

зміною матеріальної бази двигуна. Це спричинить поліпшення енергоефективності приводу, зміна його вартості і, тим самим, може привести до зниження капітальних вкладень замовника.

Таким чином, розробка методики визначення найкращих величин основних конструкційних параметрів за критерієм енергоефективності обумовлює актуальність роботи, ставить подальші цілі і завдання.

Метою роботи є розробка методики вибору найкращого конструкційного поєднання робочих параметрів приводу вагонів метрополітену за критерієм енергоспоживання для заданих умов експлуатації.

Завдання роботи:

- проаналізовані фактори, що впливають на енергоспоживання рухомої одиниці, і виконано моделювання мінливості завантаження вагона метрополітену в залежності від станції, її віддаленості від центру, часу і напрямки;
- визначені параметри для приводу вагонів метрополітену за критерієм найменшого енергоспоживання, а саме: передавального відношення редуктора, числа витків обмотки статора, довжини активної частини ротора, максимальної частоти модуляції інвертора, потужності перетворювача, потужності двигуна;.

Наукова новизна роботи полягає у розробці методики вибору найкращого поєднання параметрів системи «тяговий перетворювач - асинхронний двигун» за критерієм енергоефективності за заданими умовами експлуатації вагонів метрополітену.

Практичне значення роботи полягає у можливості вибрати необхідну і достатню потужність перетворювача, виходячи з необхідної величини його життєвого циклу, і, тим самим, знизити вартість перетворювача і всього приводу в цілому.

1 ІСНУЮЧІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ РУХОМОГО СКЛАДУ

1.1 Сучасний стан асинхронного приводу метрополітену

Питаннями загальної теорії електроприводу займається значна кількість вчених та інженерів [1-3, 6, 13-16]. При цьому кожен конкретний електропривод може бути функціонально показаний за допомогою наступної блок-схеми (рисунок 1.1) його процесів.

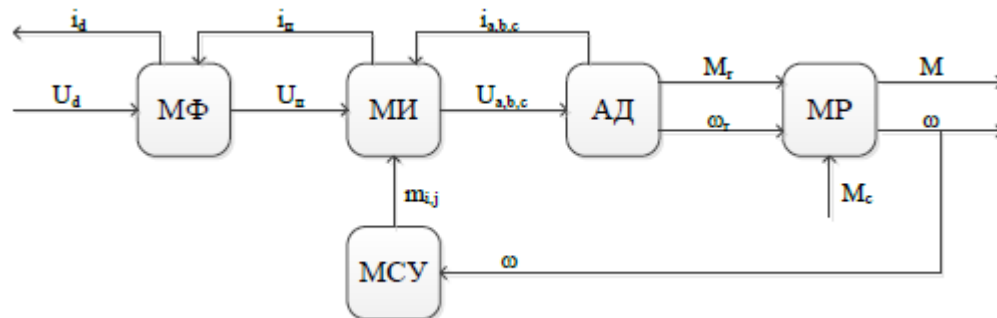


Рисунок 1.1 – Блок-схема функціонування асинхронного привода

Блок-схема показує послідовне розташування функціональних елементів асинхронного приводу, до яких відносять перетворювач частоти ПЧ (що складається з інверторами і фільтра МФ), асинхронний двигун (АД), редуктор (МР) і систему управління (МСУ) з необхідним набором датчиків. Так вхідний (заданий) параметр-швидкість або переміщення безперервно порівнюється з фактичним її значенням, що зчитується датчиком швидкості або переміщення, формуючи при цьому необхідний електромагнітний момент АД. Останній в свою чергу порівнюється з реалізованим тяговим моментом на основі лічених векторів струмів і потокозчеплень обмоток фаз двигуна, а також швидкості або переміщення, формуючи заданий вектор напруги або струму статора для ПЧ. Перетворювач, відпрацьовуючи отримані сигнали, формує вектори напруги статора або струму статора машини. Далі електромагнітний момент двигуна через механічне передавальне повідомлення (муфта і/або редуктор) передається на об'єкт управління (колісна пара).

Процеси зміни кутового переміщення ротора двигуна пов'язані основним законом електроприводу

$$M_{el.t} - M_r = J_t \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (1.1)$$

де J_t – сумарний момент інерції обертових частин приводу, Н·м²;

ω_r – кутова частота обертання ротора, рад/с.

Для формування пари "швидкість-момент" в рамках заданої тягової характеристики в залежності від використовуваного алгоритму в МСУ відбувається регулювання приводу, що особливо характерно для тягових машин рухомого складу (підтримання сталості швидкості). Для допоміжних приводів з асинхронним двигуном можуть бути реалізовані дещо інші способи управління, що дозволяють змінювати момент і швидкість по заздалегідь відомим характеристикам (наприклад, для роботи компресора або вентиляторів охолодження).

При формуванні заданих векторів напруги або струму статора АТ в залежності від призначення приводу в ПЧ використовуються два способи регулювання: скалярне і векторне. Перший застосовується в допоміжних машинах, останній знайшов активне застосування в тягових машинах і заснований на зміні модуля векторів потокозчеплення статора, основного потокозчеплення, потокозчеплення ротора, струму статора і їх взаємного розташування [3].

Частотні перетворювачі для асинхронних електроприводів можуть бути різні за схемним рішенням, елементній базі і формованому напрузі. На транспорті, в основному, поширені перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, оскільки крім зростання вимог до якості перетворення електроенергії для потреб електроприводу, стає актуальним питання про їх вплив на контактну мережу.

Головним чином, зміни схемного характеру стали причиною переходу на наступні "ключі": біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT), польові транзистори (MOSFET), тиристори, що запираються (IGCT, GTO).

В системах електроприводів транспортних засобів залізниць поширене використання перетворювачів частоти з ланкою постійного струму і автономними інверторами напруги (АІН) або автономними інверторами струму (АІТ)

з широтно-імпульсною модуляцією ключів на базі IGBT. Між ланкою постійного струму і мережею встановлюється вхідний фільтр. Здатність рекуперації енергії приводів с АД є постійною вимогою, що надається в технічних завданнях операторів рухомого складу.

Зовнішній вигляд структурних схем частотного тягового регульованого електроприводу з асинхронним двигуном і короткозамкненим ротором представлений на рисунку 1.2 і 1.3.

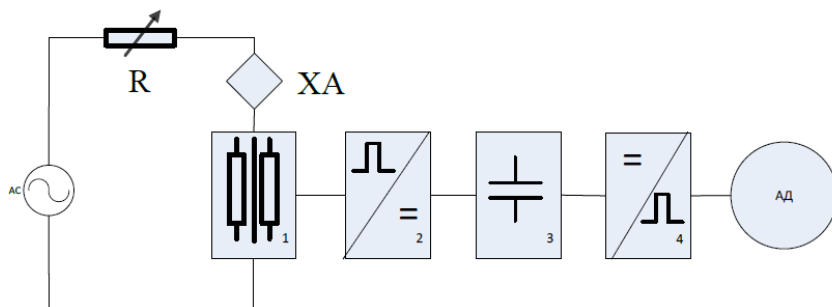


Рисунок 1.2 – Структурна схема електричної частини асинхронного приво-
ду на змінному струмі: 1 – тяговий трансформатор; 2 – чотириквadrантний
перетворювач; 3 – фільтр; 4 - інвертор; АД - асинхронний двигун

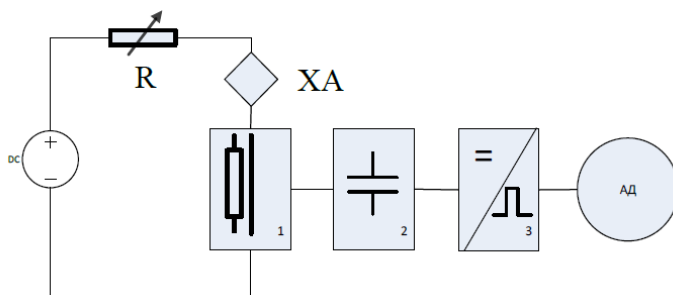


Рисунок 1.3 – Структурна схема електричної частини асинхронного при-
воду на постійному струмі: 1 - реактор; 2 - фільтр; 3 - інвертор; АД - асинхрон-
ний двигун

Можливість отримання практично будь-якої форми вихідної напруги, у тому числі і синусоїдального, дозволяє скоротити загальну кількість вищих га-

рмонік приводу. Отримання синусоїдальної кривої напруги перетворювача частоти пов'язане з його низькою ефективністю через лінійний режим роботи при синусоїдальному сигналі управління. Зазначений факт змушує використовувати різні режими перемикання ключів, для підвищення ККД перетворювача, що визначає прямокутну форму напруги [1-3].

Перемикання ключів автономних інверторів часто здійснюється за 120- або 180 градусним законом комутації і реалізується через трифазну мостову схему з шістьма ключами і зворотними діодами.

Основним недоліком використовуваного способу управління ключами є несинусоїдальність вихідної напруги перетворювача, що пов'язане з наявністю безлічі вищих гармонік напруги. Синтез полів двигуна, створюваних основною і вищими гармоніками напруги інвертора і полів від власних гармонік двигуна, призводить до величезної величини втрат машини за рахунок нерівномірності поля в повітряному зазорі. Використання алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) дозволяє скоротити величину вищих гармонік напруги інвертора і тим самим підвищити ефективність всього приводу.

Основними виробниками перетворювальної і приводної техніки являються ABB (Швейцарія і Швеція), Alstom (Франція), Bombardier Transportation (Канада), Delta Electronics (КНР), Hitachi (Японія), Mitsubishi Electric (Японія), Schneider Electric (Франція), Siemens (Німеччина), Toshiba (Японія) та ін.

Зазначені фірми володіють технологіями регулювання швидкості засобом реалізації скалярного або векторного управління моментом, завдання величини вихідної напруги інвертора від частоти основної гармоніки напруги $U_1 = f(f_b)$, а також ступеня зміни швидкості при розгоні і гальмування при налаштуванні ПД-регулятора. На карті ефективності (рисунок 1.3) представлена залежність ефективності частотного перетворювача на базі IGBT від швидкості руху і величини сили тяги. Як можна помітити, велика область діаграми має ефективність 94-97,7% [7].

В якості основних напрямків розвитку частотних перетворювачів можуть служити зростання потужності транзисторів і тиристорів, уніфікація елементів

частотних перетворювачів і їх модульна побудова, розробка систем управління, що реалізують знижене енергоспоживання, зростання частоти перемикачів, ефективне використання охолодження і реалізація частотних перетворювачів AC-DC і DC-DC на загальній основі. Такий підхід в проектуванні нових перетворювачів безумовно спрямований на зниження їх вартісних і підвищення експлуатаційних показників, а також до спрощення обслуговування таких перетворювачів в процесі життєвого циклу. При цьому варто звернути увагу на наступні показники якості частотних перетворювачів:

- надійність роботи електронних мікросхем;
- габарити реалізації;
- повітряний потік і габарити радіатора охолодження;
- статичні і динамічні характеристики (здатність конкурувати з приводом постійного струму);
- реалізація систем самодіагностики та захисту;
- зручність обслуговування.

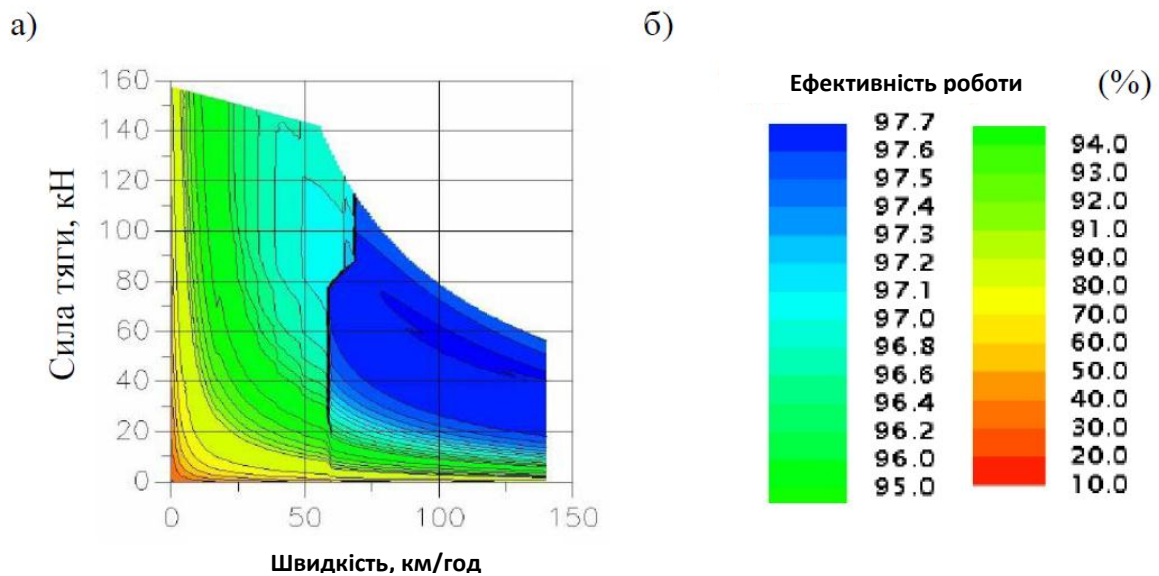


Рисунок 1.4 – Карта ефективності частотного перетворювача локомотива Bombardier Transportation BR 185 серії TRAXX: а) область роботи; б) ефективність роботи

З усього різноманіття видів асинхронних двигунів найбільшого поширення в приводній техніці залізниць отримав трифазний двигун з короткозамкненим ротором. При експлуатації цієї машини безперервно відбувається стеження за станом двигуна і режимом його роботи за рахунок наявності великої кількості датчиків (швидкості, температури, вібрації і т.д.). Такі заходи дозволяють не допускати зниження надійності через втручання зовнішніх факторів [8]. У сучасних приводах з векторним управлінням число датчиків машини зведено до мінімуму. Наприклад, для регулювання швидкості і моменту трифазного АД необхідно і досить використовувати два датчика струму навіть в умовах частої експлуатації в граничних режимах.

Залежно від цілей проектування в приводній техніці ЖД використовуються різні по виконанню механічні передачі і Редуктори (або не використовуються зовсім), що дозволяє з одного боку підвищити надійність, енергоефективність (ККД) і якісні показники системи управління при відсутності механічних передач, з іншого боку знизити масогабаритні показники. Аналізуючи вищесказане, стає помітно, що асинхронний привід являє собою складну нелінійну електромеханічну систему, сов-місцева робота якої з мікропроцесорними системами управління дозволяє вирішувати завдання на високому рівні надійності та ефективності.

До вимог до приводу сучасного рухомого складу відносяться в першу чергу економічність і невисока величина первинних інвестицій і капітальних вкладень, оскільки компанії-оператори звертають особливу увагу на вартість життєвого циклу рухомої одиниці, яка визначається, в тому числі, і тяговим приводом. Для задоволення вище позначений-ним вимогам необхідна мінімізація таких параметрів, як маса і обсяг елементів приводу при збереженні або збільшенні прискорення і уповільнення в більшому діапазоні зміни швидкостей тягової характеристики. При зниженні габаритів електропривод також повинен зберегти або зменшити величину створюваного шумового навантаження. Важливим фактором є при цьому надійність і коефіцієнт технічної готовності, а також зручність обслуговування [9, 10].

У зв'язку з цим для кожного з компонентів приводу визначаються власні граничні величини, на які звертається увага при проектуванні.

Для тягового перетворювача такого роду обмеженнями можуть стати температура ключів інвертора (не більше 125 °C для IGBT-транзисторів) і його життєвий цикл (визначається технічним завданням і порівнюємо з життєвим циклом всій рухомої одиниці), а також величина повітряного потоку вентилятора охолодження інвертора, який повинен бути достатнім для охолодження частотного перетворювача, але при цьому шумове навантаження, що створюється вентилятором, повинне залишатися в межах прийнятих норм.

Тяговий двигун, незважаючи на простоту своєї конструкції в порівнянні з інвертором, має наступні обмеження:

- температура обмоток двигуна повинна відповідати класу ізоляції;
- життєвий цикл повинен відповідати вимозі технічного завдання;
- перекидаючий момент повинен перевищувати величини необхідного мо-мента при максимальній швидкості на резервну величину;
- щільність струму провідника повинна бути порівнянна з температурними обмеженнями класу обмотки;
- щільність потоку в муздромтеатрі не повинна перевищувати значення, що призводить до електромагнітної несумісності;
- рівень шумового навантаження (самовентильована машина) повинен відповідати технічному завданню;
- допустимість вписування в візок і колісну пару за габаритними розмірами.

Редуктор тягової передачі обмежений:

- допустимістю вписування у візок по габаритам;
- достатністю кліренсу між нижньою точкою корпусу редуктора і головою рейки, що визначається технічним завданням за умови рівномірності зносу зубчастих коліс.

1.2 Оптимізація асинхронних приводів рухомого складу

Сучасні вимоги в розробці нових приводів рухомого складу змушують звертати увагу на параметри енергоспоживання, що обумовлено високими експлуатаційними витратами, трендами ринку. При цьому в якості енергоспоживання виступає величина, що відображає кількість спожитої енергії за проміжок часу і використовується для визначення параметра енергоефективності.

Низький рівень енергоспоживання може бути досягнутий при параметрах приводу, отриманих за допомогою функції якості і подальшої її мінімізації (або максимізації) в залежності від критеріїв пошуку.

$$Q = f(a, b, c \dots x), \quad (1.2)$$

де $a, b, c \dots x$ – критерії пошуку.

У зв'язку з цим уявити високоефективний тяговий привід, досить складно без компонентної оптимізації окремих частин приводу і подальшого його синтезу. Покомпонентна оптимізація дозволяє визначити максимально можливий досяжний рівень ефективності елемента приводу, а загальна картина розподілу втрат (у разі оптимізації по енергоспоживанню) допоможе вибрати основний об'єкт оптимізації. Оптимізація, як правило, здійснюється за окремими, заздалегідь відомими критеріями і може переслідувати як одну, так і кілька цілей.

До першого етапу оптимізації приводу відносять параметричну оптимізацію конструктивних параметрів, матеріалів, параметрів обмотки і магнітної частини двигуна, передавального відношення редуктора з метою зниження загального енергоспоживання і всіх видів втрат, а також маси, обсягу і кінцевої вартості.

Особливе місце займають механічні передачі приводу і аналіз їх ефективності в тому випадку, якщо привід працює з частою зміною швидкості і моменту.

Підвищення ефективності роботи редуктора без поліпшення якості матеріалів можна домогтися за рахунок параметричної оптимізації шестерень. При

оптимізації можуть бути порушені наступні параметри редуктора: розподіл передавального відношення при багатоступінчастості, модуль зачеплення, число зубів колеса, відношення ширини зубця до діаметру шестерні (зрозуміло, при наявності обмежень).

З огляду на обмеженість використовуваного простору для установки багатоступінчастого редуктора на транспортних засобах залізниць, завдання оптимізації розподілу передавального числа може бути вирішено декількома способами.

Таким чином, для вирішення завдань першого етапу передбачено використання узагальнених фізичних величин комплексного типу з урахуванням ряду обмежень, що накладаються на об'єкт оптимізації.

На другому етапі зачіпається перетворювач частоти, а також його система управління і охолодження. Оптимізується частота модуляції ключів інвертора буде форма кривої напруги і її спектральний аналіз, застосовувані моделі перемикання ключів, оптимізується характеристика частоти модуляції від основної частоти напруги ($f_p = f(f_b)$), маса і габарити індуктивності фільтра ланки постійного струму.

Рішення задач другого етапу вже вимагає аналізу функції декількох аргументів (1.2) і може бути отримано за допомогою математичних моделей. При цьому для отримання результату необхідний пошук абсолютного екстремуму при позначенні конкретного критерію пошуку і обліку необхідних обмежень. Для цього можуть бути використані методи оптимізації, такі як: генетичний алгоритм, метод рою частинок та ін.

На третьому етапі аналізується режим роботи приводу, звертається увага на ступінь і швидкість мінливості пари «момент-швидкість», проводиться аналіз необхідності використання конкретної величини потужності, аналізуються нормальний і граничний режими експлуатації.

На четвертому етапі проводиться пошук оптимального управління струмами асинхронної машини при вже відомій парі моменту і швидкості обертання. Пошук оптимального стану завершують, коли потужність втрат всієї

системи мінімальна, в разі оптимізації, наприклад, за критерієм енергоспоживання.

Рішення на четвертому етапі досягається при вирішенні функцій і рівнянь Лагранжа, рівнянь динамічного програмування.

Останній, п'ятий етап, передбачає оптимальне управління моментом і швидкістю при постійній зміні останньої. Тут може бути оптимізований магнітний потік машини в залежності від швидкості і моменту.

Завдання п'ятого етапу підлягають вирішенню методами інтерполяції та математичного програмування.

Необхідно звернути увагу на те, що поділ є умовним, і між усіма етапами існує тісний зв'язок. При сталості накладаються обмежень режим роботи приводу і комбінація моменту і швидкості сильно впливають на конструктивні параметри, що визначаються протягом першого і другого етапів оптимізації. Надалі габарити приводу при обчислених конструктивних параметрах впливають на динаміку електроприводу і змінюють результати наступних етапів.

Таким чином, поділ на етапи є відносним і, в кінцевому підсумку, для отримання загального оптимуму повинні бути послідовно розглянуті всі кроки з необхідною кількістю обмежень при відомих критеріях пошуку. Важливим залишається той факт, що, крім електромеханічних і електромагнітних процесів, важливо розглядати і термодинамічні процеси системи, оскільки саме вони часто задають одне з обмежень при проектуванні.

1.3 Математична модель двигуна з урахуванням окремих ефектів

Математична модель, що дозволяє коректно описати досліджуваний процес, є основним засобом у вивченні електромеханічних, електромагнітних, термодинамічних і ін. процесів, що проходять в приводі. Так, при дослідженні процесів підвищення енергоефективності тягового асинхронного електроприводу особливо значущими стають математичні моделі як частотного перетворювача, так і АД з редуктором.

Сучасний опис електромеханічних процесів приводу базується на трьох різних методах математичного опису явищ:

- за допомогою теорії електричних ланцюгів, основою яких виступають рівняння Кірхгофа;

- за допомогою теорії полів, основою яких виступають рівняння Максвелла

- комбінований підхід, основою якого є як рівняння Кірхгофа.

Останній підхід є найбільш перспективним, оскільки здатний більш точно описувати процеси перетворення енергії в системі приводу з АТ. Основою методу є розгляд магнітного поля в повітряному зазорі двигуна, після чого за допомогою диференціальних рівнянь описується баланс напруг статора і ротора. Рішення цих диференціальних рівнянь дозволяє отримати величини поточкозчеплення і струмів електродвигуна. При цьому величину електромагнітного моменту отримують після визначення струмів або поточкозчеплення за відомою формулою.

Залежно від мети розв'язуваної задачі в подальшому за допомогою виразу (1.1) описують динаміку електроприводу або розраховують по вже заздалегідь відомій залежності необхідного моменту від швидкості величину втрат в приводі.

Питання динаміки електроприводу детально розглянуті в роботах [23, 26, 33] і описуються рівняннями електромеханічного перетворення енергії в трифазних осях. Зважаючи на наявність непостійних членів в рівняннях балансу напруги статора і ротора і наявності струмів як залежних членів рівняння електромагнітного моменту система диференціальних рівнянь буде нелінійною [26]. Нелінійність системи рівнянь призводить до відсутності точного рішення, але завдяки чисельним методам рішення може бути отримано, причому з достатньою точністю для дослідницької діяльності.

Для аналізу електромагнітних процесів і створення систем управління АД при чисельному моделюванні використовуються методи перетворення координат [8], за допомогою яких можна спростити диференціальні рівняння в трифазних осях зі змінними членами і привести їх до системи диференціальних рівнянь в двофазних нерухомих або обертових осях.

Збереження величини результуючої МДС, магнітного потоку на полюс і фазу, також як і числа витків обмотки статора при перетворенні координат дозволить надалі, апроксимуючи рівняння, враховувати нелінійність насичення муздрамтеатру електродвигуна. Облік нелінійності насичення муздрамтеатру дає можливість створювати більш коректні математичні моделі, які необхідні при дослідженні задач енергоефективності приводу і пошуку оптимального стану.

При перетворенні координат часто використовують допущення, які знижують якість моделювання. Такими при перетворенні парку є відсутність насичення муздрамтеатру і втрат в сталі машини.

Для обліку ефекту насичення осердя двигуна в статичних і динамічних процесах використовують такі методи: метод статичних індуктивностей і метод динамічних індуктивностей. Математичний апарат останнього помітно відрізняється від першого і не знаходить належного поширення.

Загальні втрати АД складаються з багатьох складових, однією з яких виступають втрати в сталі, які в подальшому поділяються на втрати на гістерезис і втрати на вихрові струми. Частка втрат в сталі в загальних втратах тягової машини МВРС може становити до 18 %, що вимагає звернути на них увагу при дослідженні питань енергозбереження та оптимізації.

Існують різні підходи в обліку впливу вихрових струмів на величину втрат електричних машин. Так, в [11, 15, 16] вихрові струми враховуються за рахунок введення двох інтегральних контурів в схему заміщення. Параметри введених інтегральних контурів, як правило, отримують в результаті експерименту, що досить важко виконати, оскільки можливо визначити тільки загальний параметр сердечника як статора, так і ротора машини без можливості подальшого поділу.

З метою визначення ефективності роботи була розроблена модель, що дозволяє враховувати втрати асинхронної машини, що працює в динамічному режимі. Ефективність машини була покращена завдяки технікам оптимізації з використанням контролерів з нечіткою логікою.

Іншим методом обліку втрат в сталі є розширення класичної "Т"-подібної схеми заміщення АД за рахунок додаткового паралельного або послідовного приєднання до ланцюга намагнічування опорів. Але з огляду на те, що при живленні АТ від ПП зазначені опору є функціями двох змінних, подальший розрахунок ускладнюється.

У разі застосування теорії багатообмоточного трансформатора, можливий облік втрат в сталі виходячи з уявлення основного потоку машини як параметра, що складається з основного потоку і потоку розсіювання. Насичення муздратеатру в цьому випадку враховується введенням в математичну модель коефіцієнта, що враховує ефект насичення.

Короткий огляд показує, що багато запропоновані авторами методики обліку втрат в сталі і ефекту насичення муздратеатру вимагають достатніх зусиль для їх реалізації.

1.4 Сучасні способи підвищення ефективності та оптимізації електроприводів

Підвищення ефективності електроприводів можливе при використанні параметрів приводу, які можуть бути знайдені з вирішення або завдань оптимізації і пошуку невикористовуваних резервів двигуна, або застосування нових матеріалів і технологій [8-10], а також перетворювачів частоти з високою ефективністю. Сучасні ЧП на напівпровідникових елементах IGBT, GTO, MOSFET дозволяють підвищити ефективність електроприводу також виходячи із застосовуваних алгоритмів управління.

Незважаючи на те, що зростання енергоефективності стало можливим завдяки чисельному моделюванню процесів і системної оптимізації, в деяких випадках інтерес до енергоефективності не проявляється і, тим самим, реалізуються неефективні способи управління АД.

Останнім часом дослідження в області оптимізації електроприводу і оптимального управління ним стає все більш актуальними, особливо для зниження вартості і отримання максимальної ефективності.

Створення електромагнітного моменту електродвигуна може бути здійснено із застосуванням деяких методів оптимізації. Перший з них заснований на управлінні з підтриманням мінімуму струму статора, наступний – на підтримці мінімуму загальних втрат системи. Основним недоліком цих методів є недостатня швидкодія при реалізації сили тяги.

При необхідності реалізації високої динаміки в електроприводі з асинхронним двигуном все частіше використовують формування електромагнітного моменту з постійністю потокозчеплення ротора і набагато рідше з постійністю основного потокозчеплення і потокозчеплення статора. Формування електромагнітного моменту з постійністю потокозчеплення ротора знайшло активне застосування з огляду на те, що на зміну електромагнітного моменту потрібна мінімальна кількість миттєвої потужності при сталості потокозчеплення.

В [3, 8, 11] були виконані основні дослідження в області підвищення енергоефективності електроприводів змінного струму при управлінні магнітним потоком. Одним з результатів стало підтвердження необхідності врахування ефекту насичення машини при розгляді завдань оптимізації та енергоефективності системи.

У роботі [11] при оптимізації геометрії машини з постійними магнітами особлива увага зверталася на режими роботи проектованої машини. При обліку зазначеного аспекту, за словами авторів, можливість підвищення ефективності зростає до 10 %, що також пов'язане зі зниженням витрат при виробництві приводу.

Модель АД повинна враховувати втрати в міді і в сталі як в статорі, так і в роторі електродвигуна. Крім того, повинні бути враховані додаткові втрати і втрати на тертя. Це дозволяє визначити оптимальне управління при сталості потоку ротора АТ в аналітичному вигляді. Виконано спрощення для практичного використання, але за допомогою розглянутого способу неможливо з належною точністю отримати результат у всьому діапазоні регулювання.

За допомогою розрахунку втрат двигуна методом кінцевих елементів і подальшого визначення карти розподілу температури методами обчислювальної

гідродинаміки домагаються досягти підвищення ефективності електричної машини на 1,5% за рахунок оптимізації її геометричних параметрів. Вибір дизайну машини з використанням процесу оптимізації дозволяє знизити струм намагнічування і втрати в сталі ротора.

Всі перераховані вище моделі розглядали лише оптимізацію АТ, а не всього приводу в цілому, що говорить про окремий випадок вирішення завдання оптимізації при розгляді всієї рухомої одиниці. Облік втрат вхідного фільтра, інвертора, редуктора, а також виробничого механізму (в разі рухомої одиниці – це опір руху поїзда) дозволяє отримати повну картину ефективних зон роботи приводу і оптимізувати його режими роботи.

Електропривод необхідно розглядати як систему, що складається з перетворювача і асинхронної машини з урахуванням режиму її роботи. Проведена оптимізація системи в статичному режимі роботи за критерієм мінімуму втрат всієї системи за допомогою чисельних методів, але, крім того, запропоновані і аналітичні способи вирішення подібних завдань. Автор проаналізував також вплив режимів роботи АТ на величину втрат в ПП і звернув увагу на той факт, що АТ має низку екстремумів при розгляді критеріїв якості його роботи. Наявність екстремумів двигуна (струм статора і споживана потужність) визначає екстремум деяких складових втрат компонентів ПП.

Існують моделі електроприводу, в яких розглядаються втрати як в електродвигуні, так і в Випрямлячі і в інверторі. Після цього проведено загальну оптимізацію системи за критерієм мінімуму.

Використання оптимізації параметрів АД може дозволити досягти 25% зниження вартості асинхронної машини, та підвищити її ефективність за рахунок зміни щільності магнітного потоку в повітряному зазорі машини. При оптимізації асинхронного двигуна за методом рою частинок, а також зі звичайним методом проектування двигунів отримано, що метод рою частинок простіший у реалізації і надійніший. Крім того, метод рою частинок дозволив авторам отримати більш якісне рішення задачі оптимізації за критерієм вартості.

Тим самим, випадковий підбір конструктивних параметрів двигуна дає позитивний результат в поліпшенні техніко-економічних показників приводу і швидкості розробки, але без можливості розуміння його внутрішніх процесів.

Існують моделі АД при управлінні з мінімальною потужністю втрат електродвигуна. Вирішувалася задача оптимального регулювання АТ з урахуванням струмів Фуко в осерді статора.

В роботі [13] було вирішено завдання оптимізації асинхронного електродвигуна за критерієм мінімуму втрат.

Теоретичні дослідження, проведені в [12], засновані на миттєвому визначенні оптимального коефіцієнта потужності для роботи двигуна з мінімальними втратами за рахунок зміни струму статора. Особливо підкреслюється, що такий підхід ефективний при роботі з низькими значеннями моменту. Лабораторні дослідження асинхронного двигуна, що працює зі змінним навантаженням, дають можливість підвищити енергоефективність приводу на 1-2% за рахунок управління з нечіткою логікою і необхідного і достатнього використання потужності.

При розгляді завдань оптимізації по мінімуму струму статора не розглядався ефект насичення осердя, оскільки недостатньо була врахована потужність втрат від вихрових струмів при зміні частоти основної гармоніки напруги в області регулювання приводу. Багатьма авторами не були враховані при оптимізації машини втрати на "скін" - ефект в обмотках, а також втрати від не-синусоїдальності магнітного поля і від пазності статора і ротора.

Неврахованість окремих параметрів і неповний розгляд системи приводу ставить завдання пошуку оптимального стану частотного електроприводу з урахуванням втрат в ПП, АТ, редукторі, а також з урахуванням основного і додаткового опорів руху рухомої одиниці. Критерієм оптимізації при цьому доцільно вибрати енергоспоживання.

2 РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДУ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ ПРИ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

2.1 Тягові розрахунки для ділянки експлуатації з урахуванням змінних зовнішніх факторів

Тягові розрахунки для метрополітену ґрунтуються на математичній моделі процесу руху матеріальної точки (поїзда метро) при обліку деякої кількості припущень (основні: відсутність поздовжніх, поперечних, вертикальних коливань, постійний за величиною діаметр коліс колісних пар), початкових умов (часу, швидкості і координати шляху) і прийнятих обмежень (основні: швидкість, сила тяги, маса складу). Задача тягових розрахунків вважається вирішеною, якщо отримані всі три величини: прискорення a , швидкість v і шлях s у залежності від часу [1, 2].

Основні рівняння руху матеріальної точки:

$$\frac{dv}{dt} = K_1 \cdot f, \quad (2.1)$$

$$\frac{ds}{dt} = K_2 \cdot v, \quad (2.2)$$

де K_1, K_2 – змінні коефіцієнти, що залежать від маси складу;

f – питома рівнодіюча сила поїзда, Н/кН.

У загальному випадку результуюча сила дорівнює

$$f = f_k - w_0 - w_i - k_t \cdot b_t, \quad (2.3)$$

де f_k – питома сила тяги рухомої одиниці, Н/кН;

w_0 – питома сила опору руху, Н/кН;

w_i – питома сила опору руху від ухилу, Н/кН;

k_t – коефіцієнт реалізації гальмівної сили;

b_t – питома гальмівна сила, Н/кН.

У режимі тяги

$$f_{(т)} = f_k - w_0 - w_i. \quad (2.4)$$

В режимі вибігу

$$f_{(в)} = -w_{0х} - w_i, \quad (2.5)$$

де $w_{0х}$ – питома сила опору руху поїзда на холостому ході, Н/кН.

У режимі гальмування:

- екстреного (коефіцієнт гальмування $k_T = 1$)

$$f_{(зт)} = -w_0 - w_i - b_T; \quad (2.6)$$

- службового (коефіцієнт гальмування $k_T = 0,8$)

$$f_{(ст)} = -w_0 - w_i - 0,8 \cdot b_T. \quad (2.7)$$

При цьому прийняті обмеження

$$V_i = \min \left(\frac{V_{доп}}{V_{пс}} \right), \quad (2.8)$$

де V_i , $V_{доп}$ – поточне і допустиме значення швидкостей руху рухомого складу, км / год;

$V_{пс}$ – конструкційна швидкість рухомого складу, км / год.

Величини питомих рівнодіючих сил показані на рис. 2.1. Сила тяги і гальмування вибиралися з умови найбільш часто зустрічаються тягових характеристик для метрополітенів.

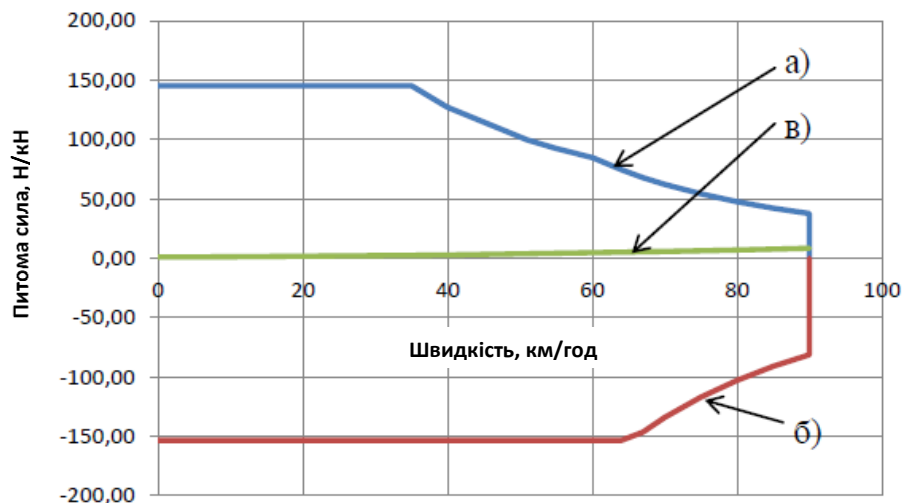


Рисунок 2.1 – Питомі сили, що діють на поїзд: а) питома тягова характеристика; б) питома гальмівна характеристика; в) питома характеристика основного опору руху

Розв'язок задачі тягових розрахунків зводиться до застосування методу кусочно лінійної апроксимації нелінійної залежності питомої результуючої сили поїзда від швидкості $f(V)$ методом чисельного інтегрування підінтегральної функції при розв'язанні диференціальних рівнянь першого порядку (2.1).

2.2 Аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів роботи вагонів метрополітену

Використання інноваційних шляхів розвитку залізничного транспорту загального користування із загальною орієнтацією на науково-технологічний напрямок прописано в стратегіях розвитку рейкового транспорту. При пошуку відповіді на все ще актуальні завдання, такі як: 1) зниження енергоспоживання на тягу поїзда; 2) зниження рівня втрат в компонентах рухомої одиниці; 3) ефективне використання кінетичної енергії поїзда, – поставлені в стратегії і сформульовані ще в ХХ столітті, підлягають вирішенню через більш детальне вивчення зовнішніх і внутрішніх факторів. Кількість цих факторів, а також глибина їх обліку в моделях потребують належного опрацювання в залежності від поставлених цілей. Зазначені напрямки активно розробляються проектними інститутами і провідними фірмами в області проектування і виробництва рухомого складу, щоб знизити питомі показники споживання енергії на тягу на 10 - 15 %.

Оптимізація енергоспоживання рухомої одиниці може стати одним з напрямків пошуку резервів і підвищення ефективності як з боку ведення поїзда, дозволяючи ефективно використовувати його кінетичну енергію, так і з боку використовуваних компонентів, знижуючи загальний рівень втрат.

Найчастіше вимога високої продуктивності робіт в тяговому господарстві призводить до неефективного ведення поїзда і високим поточним витратам на його експлуатацію в подальшому. В кінцевому підсумку висока вартість експлуатації рухомої одиниці змушує проводити аналіз структури витрат, в якій особливе місце займає енергоспоживання. Враховуючи тенденції до зниження

використання енергоресурсів, в результаті споживання яких відбувається зростання вмісту вуглекислого газу (CO_2) в атмосфері, провідні світові фірми з виробництва, зокрема, рухомого складу намагаються знизити зазначену величину до гранично низьких значень. Але зниження енергоспоживання, як завдання, також ставиться і для експлуатаційних локомотивних депо, що експлуатують рухомий склад, з метою опрацювання шляхів грамотної експлуатації та використання кінетичної енергії поїзда. У той же час перед заводами-виробниками стоїть точно таке ж завдання, змушуючи їх шукати резерви при проектуванні, застосовуючи нові технології і розробляючи системи активної допомоги машиністу.

Отримання реальних (близьких до експлуатаційних) значень енергоспоживання рухомої одиниці і в кінцевому підсумку концепції енергоспоживання поїзда можливо при вирішенні завдання визначення загальної (без урахування аварійних або граничних режимів) моделі руху поїзда. Використовувана модель повинна бути здатна повною мірою описати життєвий цикл рухомої одиниці в нормальних або близьких до нормальних умов експлуатації. Для побудови цієї моделі необхідно чітко уявлення про кількість і способи впливу зовнішніх і внутрішніх факторів, що надають прямий або непрямий вплив на досліджуваний показник.

Проведено оцінку впливу зовнішніх і внутрішніх факторів по відношенню до енергоспоживання рухомої одиниці метрополітену в режимі ведення поїзда на ділянці обігу. Крім того, Показані сторони господарської діяльності (оператор ПС і виробник), які здатні вплинути на зміну енергоспоживання поїзда. В якості визначення зовнішніх факторів, які мають найбільший вплив при розрахунку енергоспоживання, було прийнято наступне (особливо при використанні асинхронного приводу ПС):

- щомісячна зміна величини пасажиропотоку протягом року, а також щоденна зміна величини пасажиропотоку протягом тижня і погодинна зміна величини пасажиропотоку протягом дня характеризують величину мінливості завантаження вагона при заданій щільності;

- число поїздів, що використовується на ділянці обігу у вихідний і будній день (визначає наповнюваність вагона), а також їх зміна протягом будь-якого інтервалу визначають ефективність використання вагона поїзда;

- зміна величини привабливості станцій для пасажирів визначає величину флуктуації пасажиропотоку в залежності від станції і задає модель поведінки мінливості пасажиропотоку для кожної лінії метрополітену

- зміна величини пасажиропотоку за напрямками також розглядається залежно від розташування на лінії станції з найбільшим пасажиропотоком;

- зміна часу стоянки на станції в залежності від величини пасажиропотоку при посадці і висадці поїзда, послідовності цих операцій, числа і ширини двохотворного отвору;

- зміна величини прискорення як в режимі тяги, так і в режимі рекуперативного гальмування;

- зміна часу руху в режимі вибігу між станціями або режиму руху з підтриманням швидкості руху в залежності від розкладу, діючих обмежень, протяжності станції і невиконання графіка руху;

- параметри шляху ділянки обігу, де основними є: ухил, обмеження швидкості, відстань між станціями, частота і радіус кривих шляху, рух повітряних мас і висота тунелю над рівнем моря;

- ефективність приводу рухомої одиниці (його потужність, маса і інерційність, ефективність інвертора, двигуна і редуктора), Конструкційні параметри приводу, діаметр по колу катання колісної пари;

- гнучкість розкладу, що передбачає рух як за вже сформованим розкладом, так і облік запізнень: визначення величини мінімального інтервалу руху з відсутністю затримки;

- окремі вимоги технічного завдання компанії-оператора (завдання екстремального (граничного) режиму роботи і максимальної швидкості руху на ділянці обігу).

Фактори, що впливають на величину енергоспоживання поїздів метрополітену можна розподілити на три групи: перша група факторів не передбачає

їх змінність, друга і третя характеризують змінні фактори. Останні фактори поділяються в залежності від сторони (оператор ПС і виробник), здатної на них вплинути.

Структурування факторів дає зрозуміти, що енергоспоживання залежить як від оптимізованості конструкційних параметрів приводу, так і від експлуатаційних режимів роботи, а також показує, що перше має пряме відношення до якості проектування приводу, тобто до виробника, а друге – до якості експлуатації, тобто вже до компанії-оператора.

2.3 Аналіз роботи вагонів метрополітену в умовах нестабільності експлуатаційних факторів

Розглянуто в роботі вагони метро середньої місткості з осьовим навантаженням близько 11...14 т передбачає загальну конфігурацію складу до 6 вагонів і пасажиропотік до 50 тис. чоловік на годину в одному напрямку з експлуатаційною швидкістю до 100 км/ч. рухомий склад такого типу займає місце між вагонами метро з високим пасажиропотоком (до 100 тис. пасажирів на годину, в одному напрямку, з конфігурацією до 8 вагонів) і трамваями. До метро середньої місткості відноситься метро в таких містах як: Софія (Болгарія), Торонто (Канада), Варшава (Польща), Копенгаген (Данія), Прага (Чехія) та ін.

Для виконання тягових розрахунків була розроблена ділянка обігу радіальної лінії метро з середньою довжиною ділянки в 1031 м і параметрами, зображеними на рисунок 2.6. Ділянка включає в себе сукупність різних ліній метро.

Зміна пасажиропотоку такого типу метро протягом року на радіальних лініях, обумовлене сезонними соціально-економічними закономірностями, може досягати 23% від максимально можливого рівня. Коливання пасажиропотоку характерна для літніх місяців і стрибкоподібна зміна рівня пасажиропотоку до кінця тижня задають поведінку, яку необхідно врахувати в моделі

завантаженості вагона. Разом з тим, через сильну зміну розглянутого параметра протягом тижня при складанні моделі навантаження доцільно розділяти пасажиропотоки в робочі і вихідні дні.

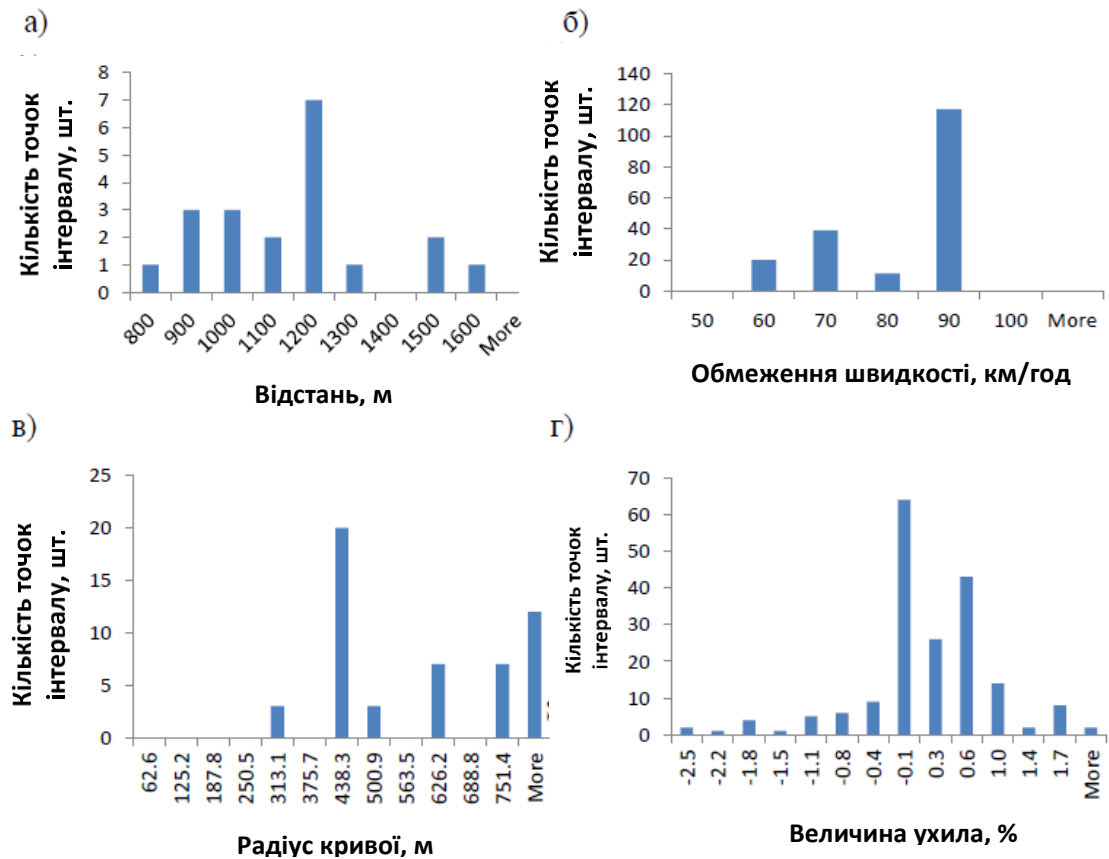


Рисунок 2.6 - Параметри колії ділянки обертання поїзда метрополітену: а) гістограма відстані між станціями; б) гістограма обмежень швидкості; в) гістограма радіуса кривих; г) гістограма крутизни ухилів ділянки

На основі отриманих даних з річного звіту метрополітенів були отримані наступні залежності завантаження вагона і кількості експлуатованого рухомого складу від часу доби в будні і вихідні дні (рис. 2.7).

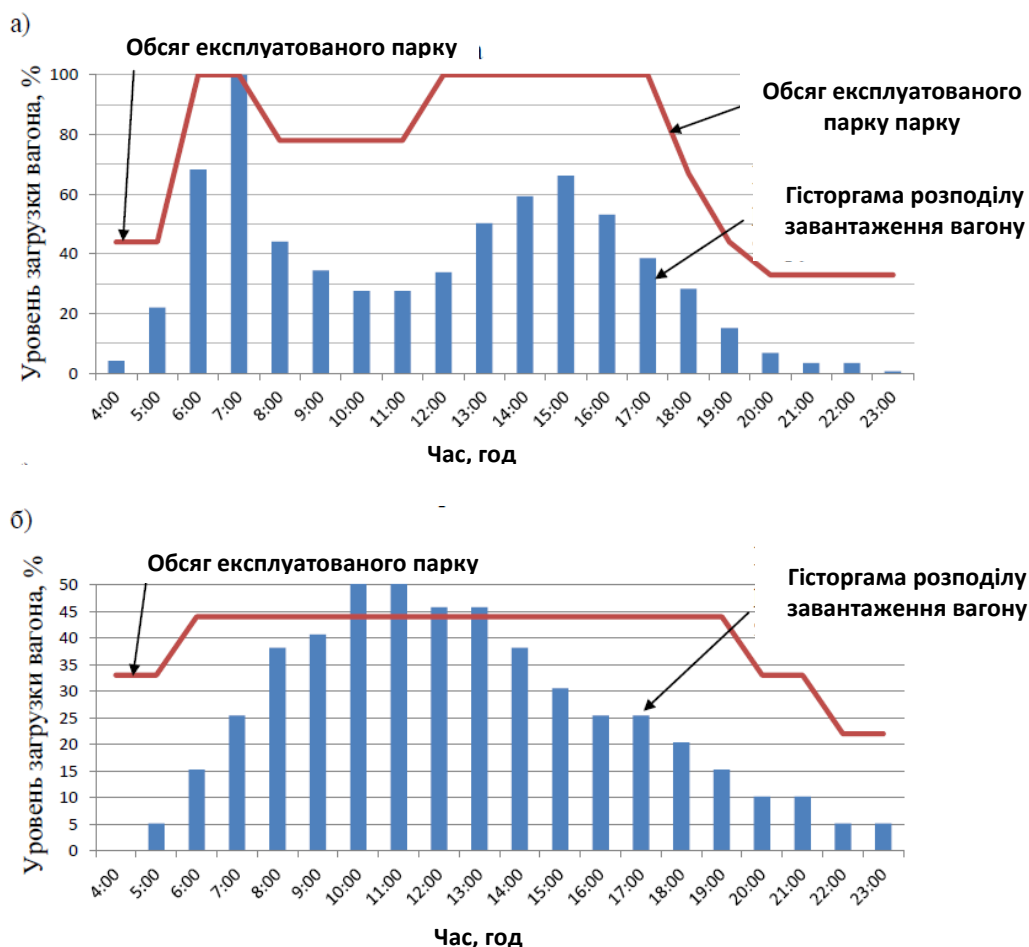


Рисунок 2.7 – Залежність завантаження вагона та кількості обслуговуючого рухомого складу від часу доби: а) зміна пасажиропотоку в будній день; б) зміна пасажиропотоку у вихідний день

Неможливість точної відповідності експлуатованої величини рухомого складу контуру пасажиропотоку визначає резерви місць в поїзді і знижує його економічну ефективність, причому залежність може бути вироблена лінійно за інших рівних умов. Висока пасажиромісткість вагона, при щільності 7 чол / м², відповідна максимально можливій і максимально ефективній з точки зору прибутку перевізника, а також енергопостачання також не прийнятна, оскільки знижує комфорт пасажирів вже в найближчій перспективі. У зв'язку з цим зниження експлуатованого обсягу парку не є вирішенням завдання, але може бути оптимізовано, наприклад, за рахунок експлуатації поїздів без машиніста.

Пасажиropoтiк є визначальною величиною навантаження поїзда. Знаючи пасажиромісткість або максимальну щільність, можна визначити навантаження на весь поїзд, яка в свою чергу залежить як від розглянутого вище пасажиропотоку, так і від привабливості станції для пасажирів. Навантаження буде різна в різні місяці, дні тижня і час доби.

При найбільш масовому пересуванні пасажирів протягом буднього дня (з 7 до 9 годин) в процентному вираженні завантаження поїзда на радіальній лінії метрополітену (що відповідає рівній для кожної станції привабливості) може бути представлена в наступному вигляді (рис. 2.8).

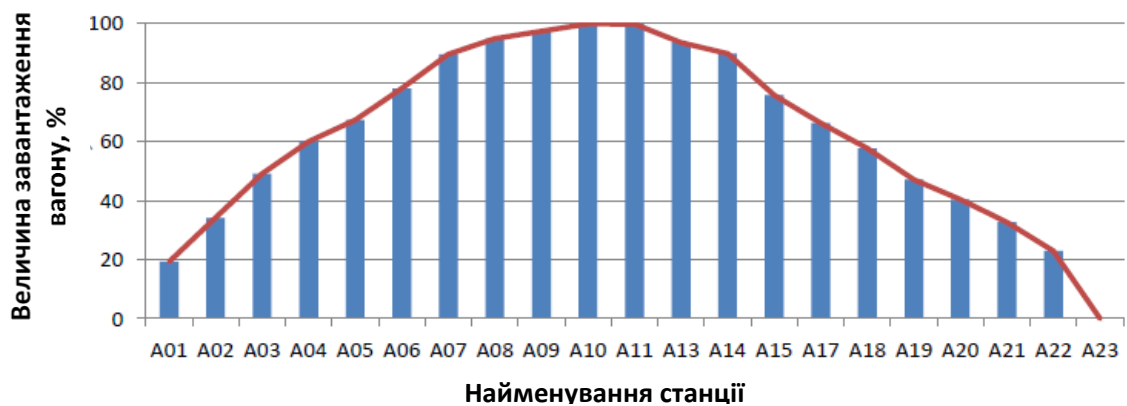


Рисунок 2.8 - Завантаженість вагона метро в одному з напрямків при рівній привабливості станцій

Детальний розгляд пасажиропотоку окремо за різними часовими параметрами, а також аналіз радіальної лінії ділянки обороту поїздів і подальший їх синтез дозволили створити модель, характерною особливістю якою є мінливість завантаження вагона у напрямку і за часом (рис. 2.9). Використання такої моделі в тягових розрахунках дозволяє описати реальний режим експлуатації поїзда протягом його життєвого циклу, а також оцінити можливість продовження роботи при настанні граничного режиму.

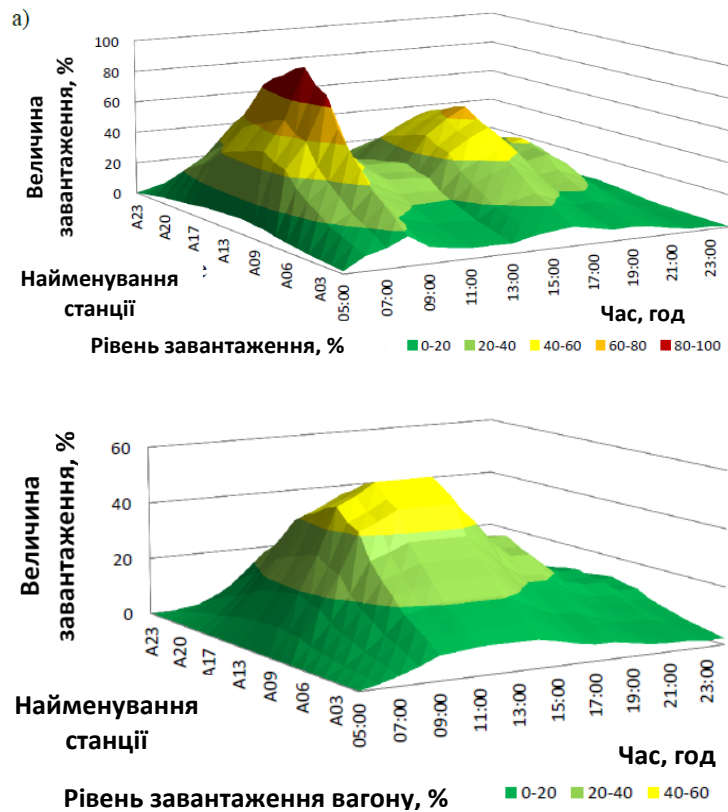
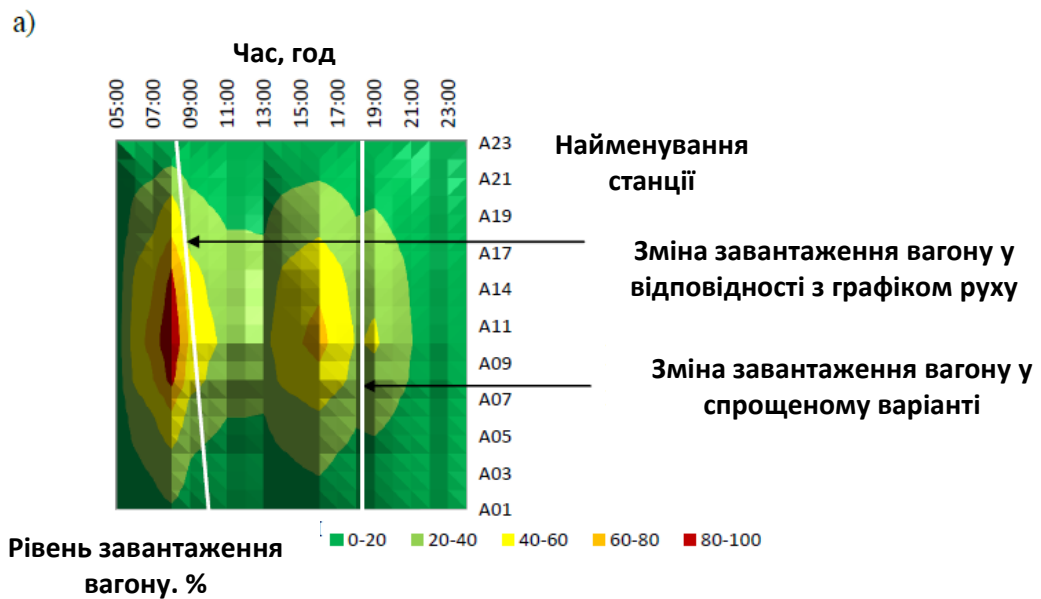


Рисунок 2.9 – Розподіл завантаження вагона за часом і напрямком: а) у будній день; б) у вихідний день

Безперервна зміна величини завантаження вагона в реальності в будній і вихідний день відбувається також з урахуванням фактору роботи по «нитці» графіка руху (рис. 2.10).



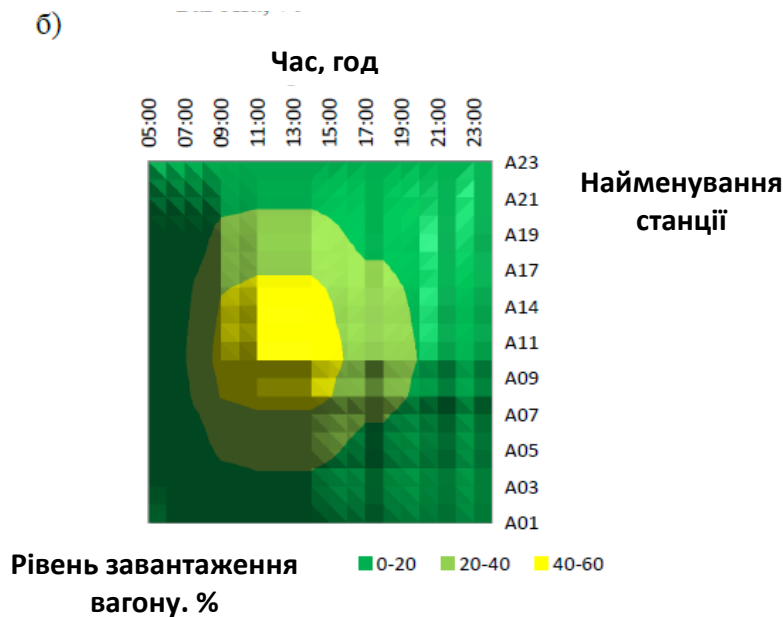


Рисунок 2.10 – Часовий фактор зміни завантаження вагона: а) у будній день; б) у вихідний день

Врахування даного моменту не дозволяє реалізувати рух по кривій завантаження вагона, зображеної на рис. 2.8. Це говорить про те, що величина завантаження вагона на початковому і кінцевому етапі руху поїзда має більш низьке значення. У зв'язку з трудомісткістю обліку цього факту і незначності його впливу на енергоспоживання, модель завантаження вагона метро була спрощена для виконання тягових розрахунків.

Висока детальність розподілу навантаження вагона при виробництві тягових розрахунків призведе до величезного обсягу розрахункових даних і зажадає надалі великої розрахункової потужності. Для зниження обсягу даних була спрощена модель (див. рис. 2.9) шляхом об'єднання рівнів завантаження на п'ять нерівних частин, та проведено аналіз адекватності спрощеної моделі вихідному варіанту.

Детальна погодинна мінливість навантаження, зображена на рис. 2.7, може бути представлена у вигляді експоненціальної залежності (рис. 2.11), яка являє собою вагу кожного рівня завантаження вагона в загальному обсязі з урахуванням буднього і вихідного розподілу. При спрощенні моделі і розбитті

її на кілька частин розподіл спрощеної моделі має максимально точно повторювати розподіл вихідної моделі.

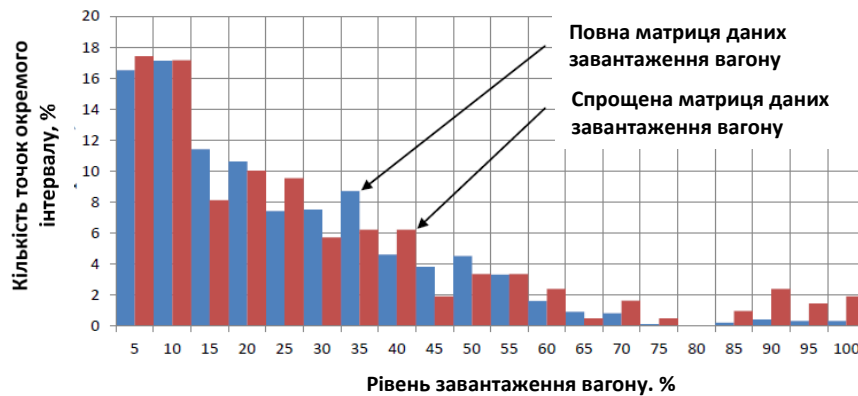


Рисунок 2.11 - Вага окремого рівня завантаження вагона в загальному обсязі

Слід відзначити, що дослідження взаємозв'язку між спрощеною і повною матрицею даних завантаженням вагона полягало в його максимізації, що призвело до розбиття загального пасажиропотоку на п'ять частин з ваговими коефіцієнтами 8 %, 24 %, 38 %, 55 % і 100 %. Коефіцієнт кореляції між дійсною і модельною величиною становить 94 % [73]. Середнє значення завантаженості вагона метро становить 25,1 %.

2.4 Нормальний і граничний режими експлуатації приводу вагонів метрополітену

Реальний спосіб ведення електропоїзда, що дозволяє в подальшому визначити величини тягового зусилля при русі в кожній точці шляху і розрахувати показник енергоспоживання, може бути обраний по-різному і в дійсності визначається характером ведення поїзда машиністом. При складанні моделі потрібно враховувати рух згідно з чинним розкладом, а також рух, що не приводить до затримок наступних поїздів при мінімально можливому інтервалі руху.

З метою подальших термодинамічних розрахунків розглядається кілька режимів руху: режим нормальної і граничної експлуатації, основні параметри яких представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Режими роботи вагонів метрополітену

Режим роботи	Резерв часу	Рівень моторизації, %	Момент при гальмуванні, %	Температура навколишнього середовища, °C	Рівень завантаження вагона
1	2	3	4	5	6
За розкладом	Макс.	66	80	25	Модель
З мінімальним інтервалом	Мін.	66	80	25	Модель
Граничний режим 1	Мін.	50	100	40	Модель
Граничний режим 2	0	66	100	40	100%
Граничний режим 3	Мін.	50	100	40	Стрибок пасажиропотоку

До нормального режиму експлуатації в даному випадку відносяться режими руху, які переважають в процесі щоденної експлуатації. З табл. 2.1 видно, що рух за розкладом, точно також як і рух з мінімальним інтервалом, відноситься до нормального режиму експлуатації. Крім того, величина уповільнення при гальмуванні менше на 20% величини максимального прискорення в режимі тяги, що пов'язано з частим недовикористанням максимальної потужності і комфортом.

Граничні режими експлуатації необхідні для перевірки приводу відповідності заданим обмеженням в екстремальних умовах експлуатації. Сюди відносять в першу чергу температурні зміни обмоток двигуна.

В якості максимального резерву часу виступає різниця між прибуттям за розкладом і прибуттям з повною відсутністю вибігу і реалізацією точок тягової

характеристики із заданим прискоренням і уповільненням. Величина резерву часу безпосередньо залежить від величини завантаження вагона (рис. 2.12 б). Мінімальний резерв часу визначається виходячи з максимального по довжині тунелю на ділянці обігу (найбільшого по довжині блок-ділянки) і параметрів ЕРС, крім того, залежить від реалізованої системи сигналізації і зображено на рис. 2.12 (а).

Високе значення резерву часу при русі за розкладом дозволяє оптимізувати використання рухомого складу як з боку енергоспоживання, так і з боку життєвого циклу приводу. При цьому варто звернути увагу на те, що рух за розкладом не завжди описує дійсну поїзну обстановку і в години пік, при запізненні, призводить до руху з видалення.

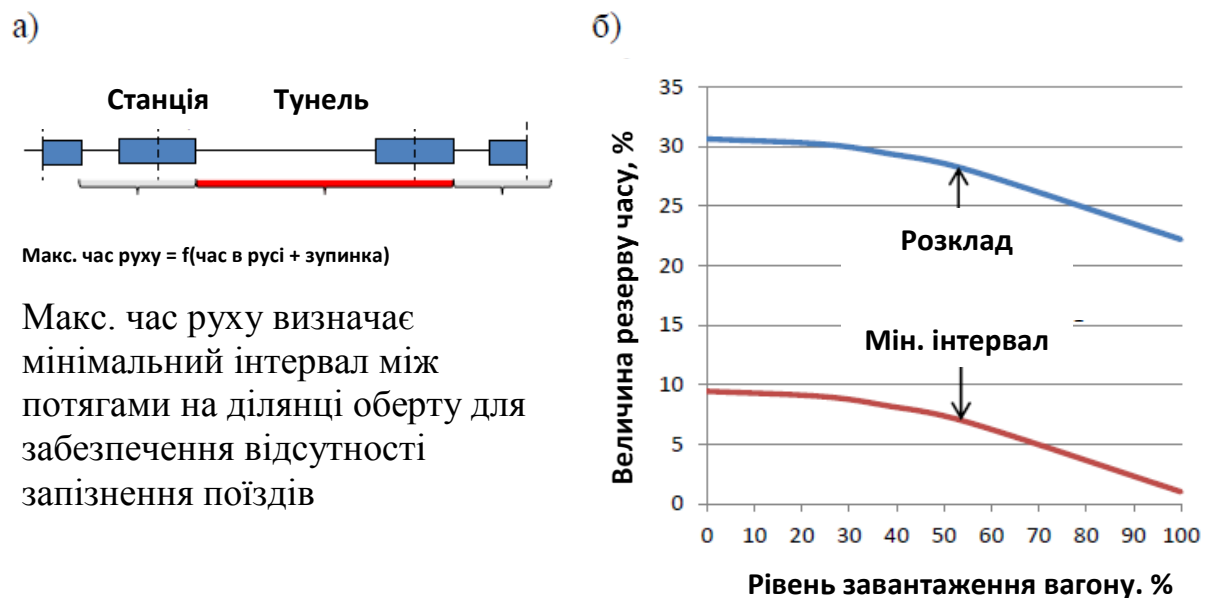


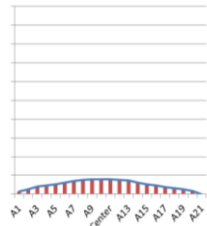
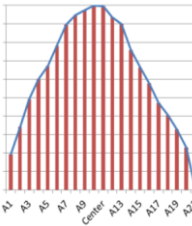
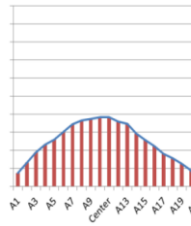
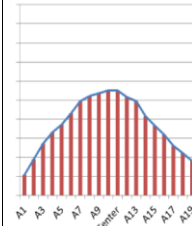
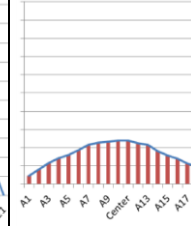
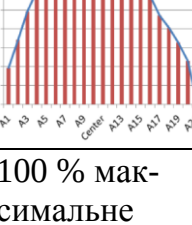
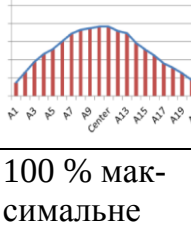
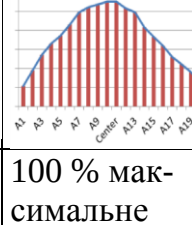
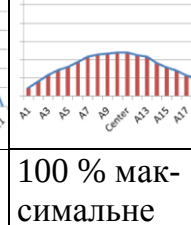
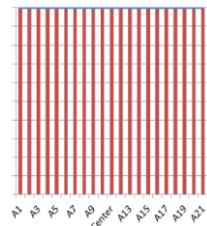
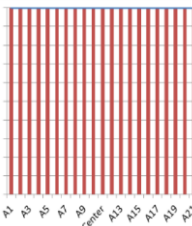
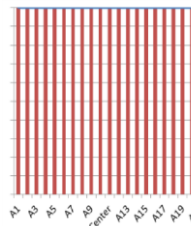
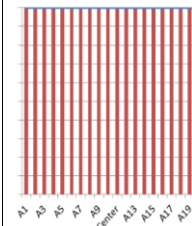
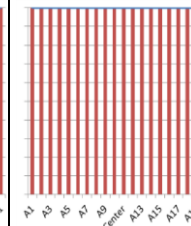
Рисунок 2.12 – До визначення резерву часу: а) до поняття мінімального резерву часу; б) розподіл резерву часу в залежності від завантаження вагона

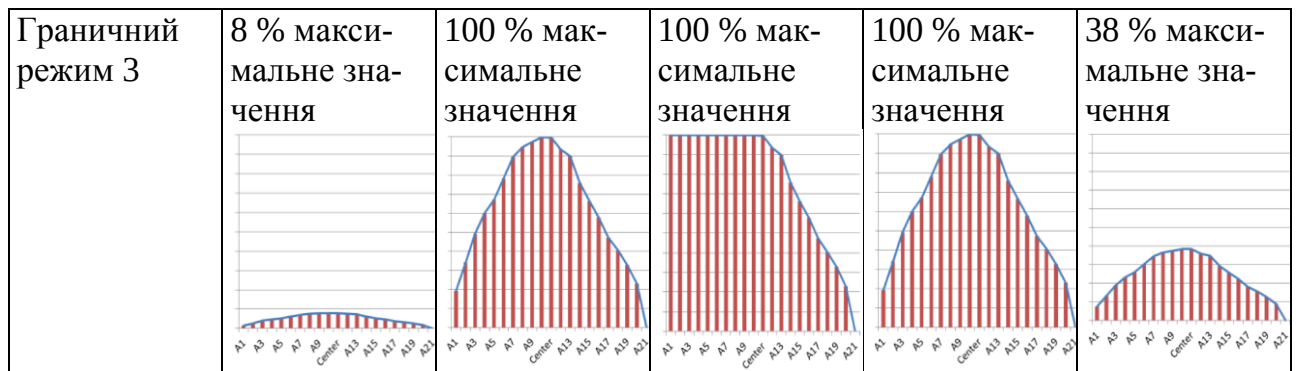
Резерв часу, прийнятий за нуль, при роботі відповідно до граничного режиму 2 (див. табл. 2.1) насправді може лише існувати на ділянці поводження з високим інтервалом руху і повним завантаженням вагона, що практично не зустрічається, оскільки повне завантаження вагона завжди пов'язане з мінімальним інтервалом руху. Але, тим не менш, його облік необхідний, оскільки

саме така вимога досить часто зустрічається в Технічному завданні компанії-оператора.

Моделі завантаження вагонів при різних режимах експлуатації представлені в табл. 2.2. Кожна модель завантаження вагона при будь-якому режимі роботи являє собою сукупність п'яти послідовних елементів змін маси складу в залежності від станції. Кожен елемент моделі передбачає 40-хвилинний рух в одному напрямку і характеризує конкретний час доби. Між елементами моделюється стоянка на 3...5 хвилин, викликана зміною напрям руху. Така ж послідовність має місце при русі в зворотному напрямку.

Таблиця 2.2 – Моделі завантаження вагонів при різних режимах експлуатації

Режим роботи		Елементи послідовності зміни завантаження вагона			
За розкладом / з мінімальним інтервалом	8 % максимальне значення	100 % максимальне значення	38 % максимальне значення	55 % максимальне значення	24 % максимальне значення
					
	8 % максимальне значення	100 % максимальне значення	38 % максимальне значення	55 % максимальне значення	24 % максимальне значення
Граничний режим 1	8 % максимальне значення	100 % максимальне значення	38 % максимальне значення	55 % максимальне значення	24 % максимальне значення
					
	8 % максимальне значення	100 % максимальне значення	38 % максимальне значення	55 % максимальне значення	24 % максимальне значення
Граничний режим 2	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення
					
	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення	100 % максимальне значення



Грунтуючись на реальних даних експлуатації, а також завдяки моделі процесів руху вагонів метрополітену та моделі завантаження вагона з урахуванням тимчасової та дистанційної мінливості пасажиропотоку, стає можливим передбачити поведінку поїзда, підібрати Конструкційні параметри і оптимізувати розклад. Створені моделі також допоможуть розрахувати максимально ефективний спосіб експлуатації поїздів на ділянці, можливість реалізації якого може бути здійснена більшою мірою на метро з автоматичним управлінням, або ж при веденні поїзда за допомогою системи інформування машиніста.

3 ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ТЯГОВОГО ПРИВОДУ З ЦИКЛІЧНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ

3.1 Математична модель мостового трифазного інвертора

Якість електроенергії, споживаної двигуном, забезпечується за рахунок застосування різних способів широтно-імпульсної модуляції інвертора на базі повністю керованих транзисторів IGBT в межах зміни основної частоти напруги. Для оптимізації роботи інвертора необхідні математичні моделі, що характеризуються наступними властивостями:

- моделювання тільки усталеного режиму інвертора;
- висока продуктивність моделі;
- простота зміни параметрів схеми і алгоритмів управління.

Метод моделювання заснований на операціях порівняння керуючого і опорного сигналів, в результаті чого виходять функції перемикання m_i ключів трифазного інвертора.

Функції перемикання m_i описують стан кожного з ключів і можуть приймати значення 1 при відкритому стані ключа T_i і 0 при закритому. Для запису рівнянь схеми заміщення інвертора (рис. 3.1) вводиться середня точка (т. D – т. O).

При роботі на симетричну активно-індуктивне навантаження будуть справедливими наступні твердження при відсутності короткого замикання в фазі:

$$\begin{aligned}m_{1a} + m_{2a} &= 1, \\m_{1b} + m_{2b} &= 1, \\m_{1c} + m_{2c} &= 1.\end{aligned}\tag{3.1}$$

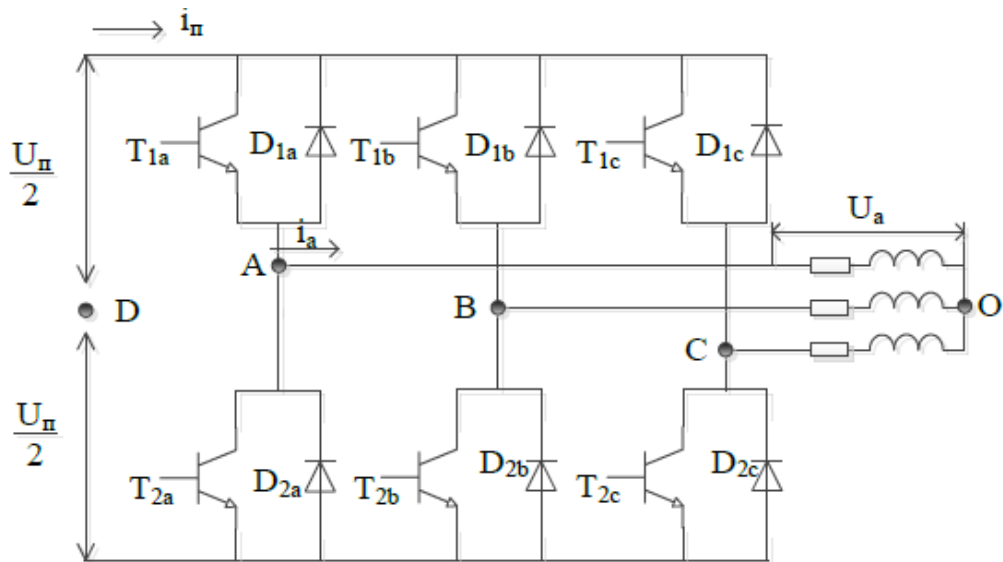


Рисунок 3.1 – Трифазний мостовий інвертор

Напруги по відношенню до середньої точки інвертора будуть виглядати:

$$\begin{aligned} u_{a0} &= u_n \cdot (m_{1a} - m_{2a}), \\ u_{b0} &= u_n \cdot (m_{1b} - m_{2b}), \\ u_{c0} &= u_n \cdot (m_{2c} - m_{1c}). \end{aligned} \quad (3.2)$$

де u_n – напруга ланки постійного струму.

При з'єднанні навантаження зіркою напруга в т. О виглядає

$$u_0 = \frac{1}{3} \cdot (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}). \quad (3.3)$$

Тоді фазні напруги інвертора приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} u_a &= u_{a0} - u_0, \\ u_b &= u_{b0} - u_0, \\ u_c &= u_{c0} - u_0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

У свою чергу лінійні напруги будуть виражатися:

$$\begin{aligned} u_{ab} &= u_{a0} - u_{b0}, \\ u_{bc} &= u_{b0} - u_{c0}, \\ u_{ca} &= u_{c0} - u_{a0}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Споживаний інвертором струм

$$i_n = i_a \cdot m_{1a} + i_b \cdot m_{1b} + i_c \cdot m_{1c}, \quad (3.6)$$

з урахуванням того, що

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (3.7)$$

Фазні струми інвертора:

$$i_a = \frac{u_a}{Z}, i_b = \frac{u_b}{Z}, i_c = \frac{u_c}{Z}, \quad (3.8)$$

де Z – повний опір кола навантаження.

При цьому величина струму фази i_i для наступних розрахунків поділяється на струм через транзистор i_{Ti} і струм через діод i_{Di} .

В якості повного опору кола виступає значення опору, отримане зі схеми заміщення асинхронного двигуна, обмотка статора якого має з'єднання «зірка».

Наведений математичний опис дозволяє робити аналіз при будь-якій схемі перемикання ключів трифазного інвертора при відомому поведінці функції перемикання m_i .

Функція перемикання є результатом роботи логічного пристрою-компаратора, який безперервно порівнює керуючий u_c і опорний сигнали u_m . Останній формується генератором лінійно змінюється напруги.

$$\begin{aligned} m_i(\omega) &= 1, \text{ якщо } u_c(\omega) > u_m(\omega), \\ m_i(\omega) &= 0, \text{ якщо } u_c(\omega) \leq u_m(\omega). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Використання різних способів модуляції вихідної напруги інвертора дозволяє змінювати величину основної гармоніки. При цьому зміна її величини відбувається при мінімальному вмісті вищих гармонік в спектрі. Нижче розглянуті найбільш часто зустрічаються способи модуляції напруги в асинхронної і синхронної області зміни основної гармоніки напруги статора, які відрізняються максимальною величиною напруги першої гармоніки, а також гармонічним складом.

Областю застосування асинхронної модуляції при управлінні приводом є період його розгону, при цьому можуть використовуватися кілька її видів.

Синусоїдальна ШІМ використовує керуючий сигнал u_c :

$$\begin{aligned}u_{ca} &= A \cdot \sin(\omega t), \\u_{cb} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right), \\u_{cc} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right).\end{aligned}\tag{3.10}$$

де A – коефіцієнт модуляції;

ωt – кутова частота (залежить від частоти першої гармоніки напруги f_b).

На рис. 3.2 представлені вихідні параметри інвертора при заданому законі управління за один період при $u_n = 730$ В, $A = 0,9$, $f_b = 3$ Гц. Максимальне значення напруги першої гармоніки при модуляції синусоїдальної ШІМ становить $0,7854u_n$ без урахування його зниження в залежності від частоти перемикання ключів.

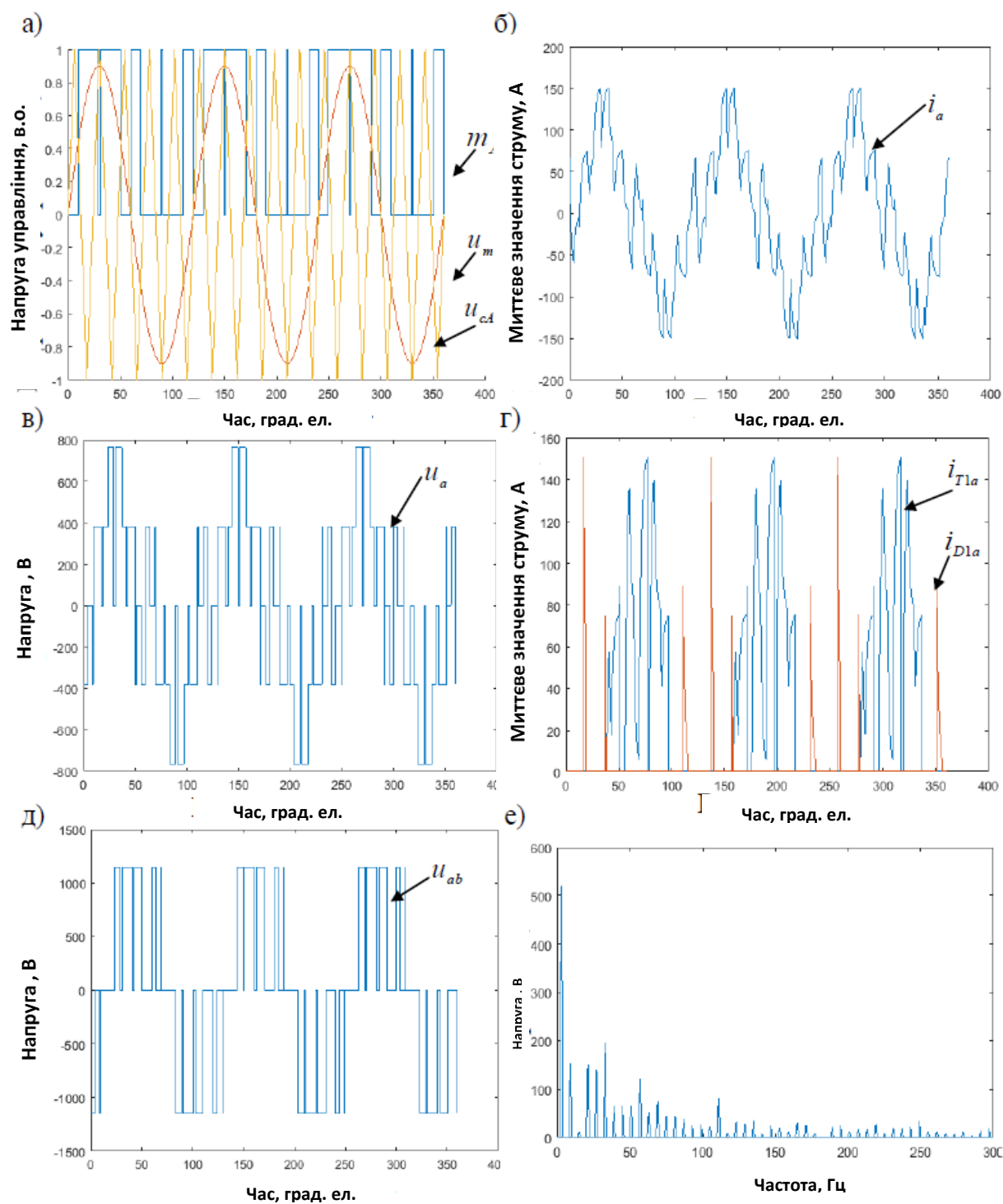


Рисунок 3.2 – Вихідні характеристики і сигнали управління при реалізації синусоїдальної ШІМ (а, б, в, г, д, е)

На рис. 3.3 представлені вихідні параметри перетворювача при синусоїдальній ШІМ, з включенням третьої гармоніки за один період при $u_n = 730$ В, $A = 0,9$, $f_b = 3$ Гц.

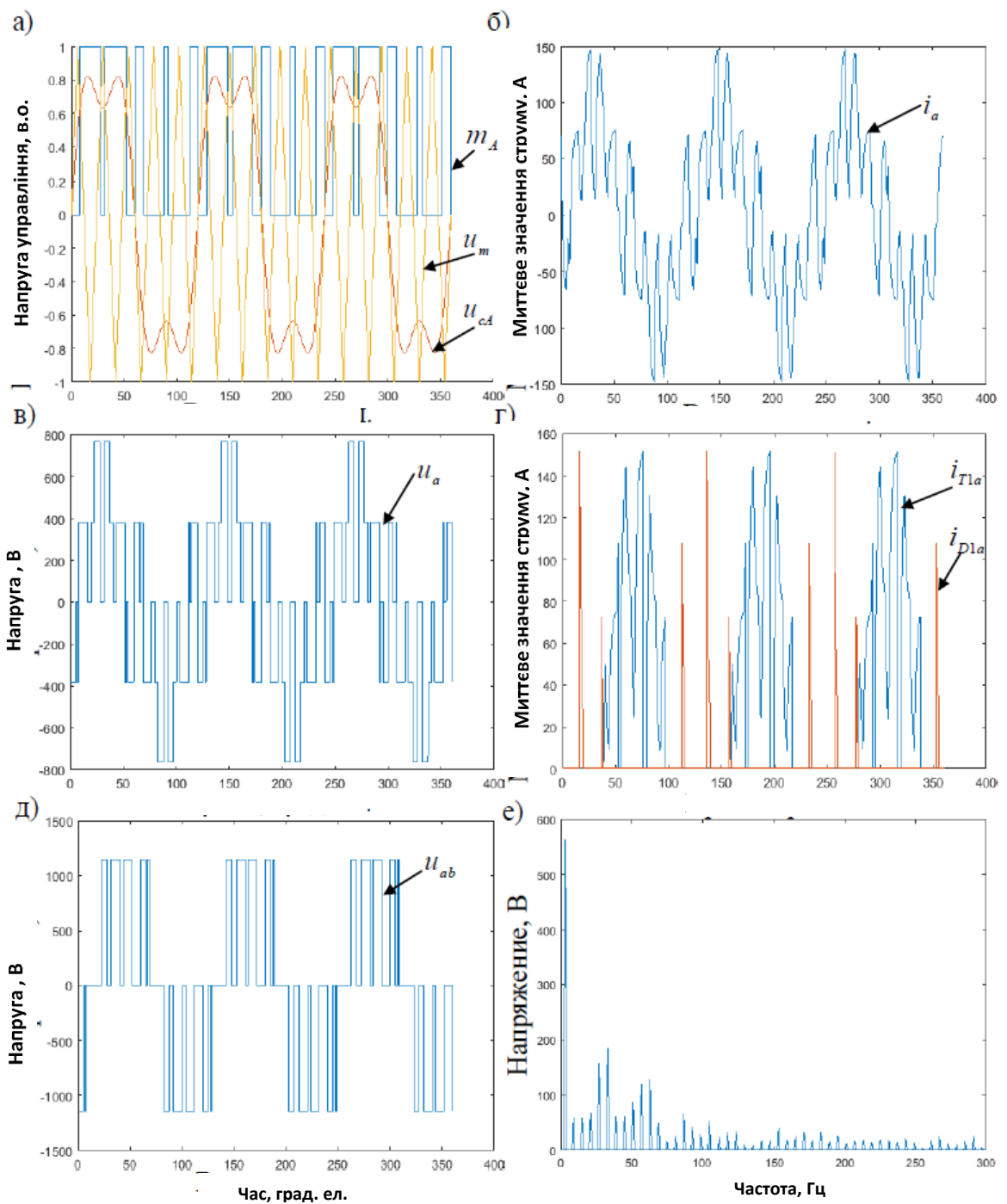


Рисунок 3.3 – Вихідні характеристики і сигнали управління при реалізації синусоїдальної ШІМ з вмістом третьої гармоніки (а, б, в, г, д, е)

Синусоїдальна ШІМ з вмістом третьої гармоніки використовує керуючий сигнал u_c :

$$\begin{aligned}
u_{cA} &= \frac{A}{k} \cdot (\sin(\omega t) - (1-k)\sin(3 \cdot \omega t)), \\
u_{cB} &= \frac{A}{k} \cdot \left(\sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) - (1-k)\sin(3 \cdot \omega t) \right), \\
u_{cC} &= \frac{A}{k} \cdot \left(\sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right) - (1-k)\sin(3 \cdot \omega t) \right), \\
k &= \cos\left(\frac{\pi}{6}\right).
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Максимальне значення напруги першої гармоніки при модуляції синусоїдальної ШІМ становить $0,9u_n$ без урахування його зниження в залежності від частоти перемикання ключів.

Векторна ШІМ використовує керуючий сигнал u_c :

$$\begin{aligned}
u_{cA} &= A \cdot \sin(\omega t) + \Delta u, \\
u_{cB} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) + \Delta u, \\
u_{cC} &= A \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi\right) + \Delta u,
\end{aligned} \tag{3.12}$$

де Δu – сигнал передмодуляції.

Векторна ШІМ знайшла найширше поширення серед асинхронних алгоритмів управління приводом за рахунок найкращого використання напруги ланки постійного струму, тому вона використовується в найбільшій області зміни частоти основної гармоніки напруги. Тривалість використання векторної ШІМ залежала від величини втрат в приводі і при порівнянні її з синхронними алгоритмами управління для однієї і тієї ж частоти основної гармоніки напруги вибирався той алгоритм, при роботі з яким втрати в приводі були мінімальні.

На рис. 3.4 представлені вихідні параметри інвертора при заданому законі управління за один період при $u_n = 730$ В, $A = 0,9$, $f_b = 3$ Гц.

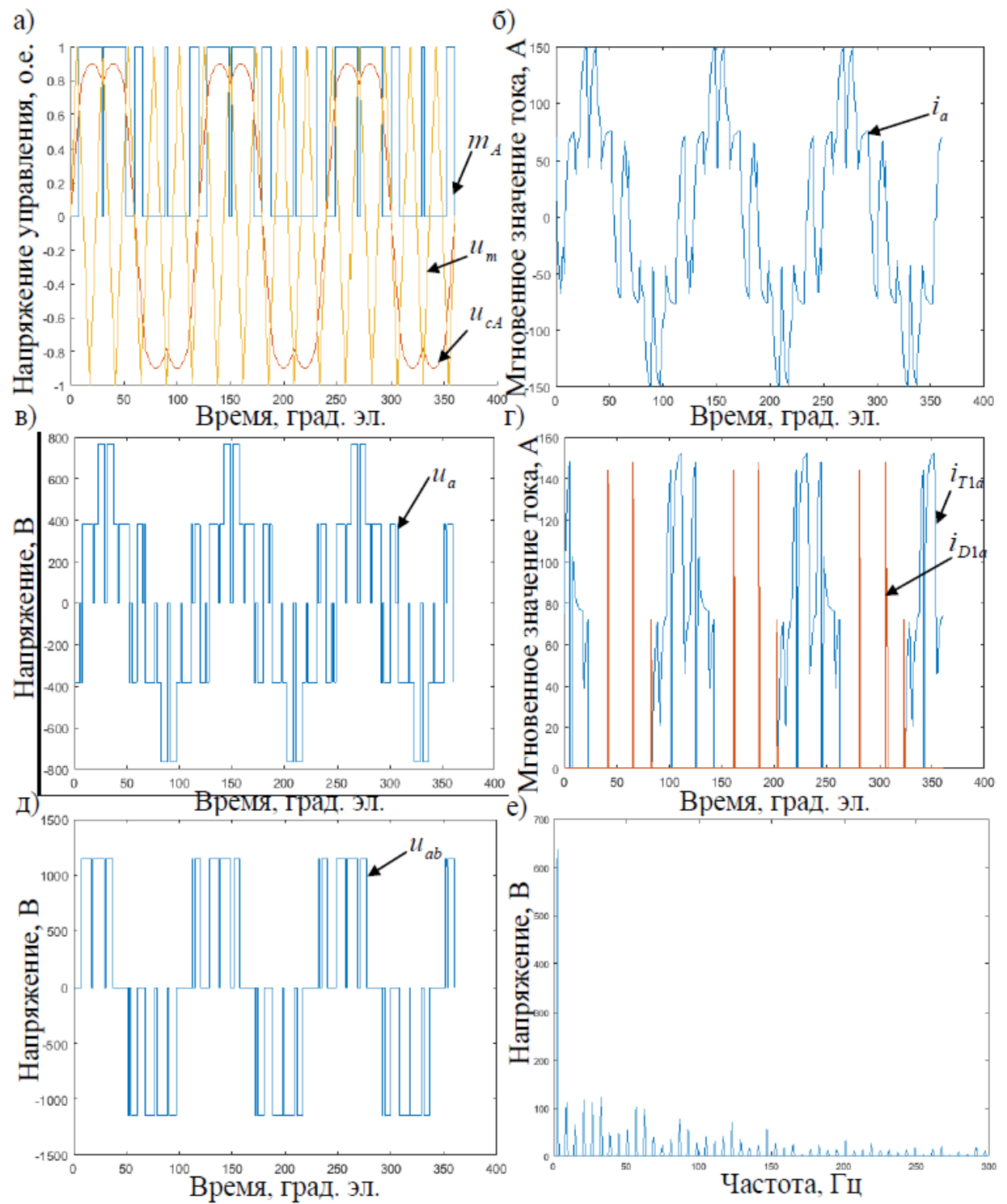


Рисунок 3.4 - Вихідні характеристики і сигнали управління при реалізації векторної ШІМ (а, б, в, г, д, е)

Сигнал передмодуляції Δu на кожному кроці інтегрування може бути визначений наступним чином:

$$\begin{aligned}
u_{\max} &= \max \left(\sin(\omega t), \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi \right), \sin \left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi \right) \right), \\
u_{\min} &= \min \left(\sin(\omega t), \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi \right), \sin \left(\omega t + \frac{4}{3} \cdot \pi \right) \right), \\
\Delta u &= - \left(\frac{(u_{\max} - u_{\min})}{2} + u_{\min} \right).
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Максимальне значення напруги першої гармоніки при модуляції векторної ШІМ становить $0,907u_n$ без урахування його зниження в залежності від частоти перемикавання ключів, що більш ніж на 15% вище значення при використанні синусоїдальної ШІМ.

3.2 Втрати енергії в інверторі

Математичне моделювання процесів в інверторі дозволяє розрахувати величину фазного струму, а також розділити її на складові, що протікають по зворотному діоду і транзистору одного IGBT. Беручи до уваги цикл роботи, їх кількість (на основі режиму навантаження ЕРС, описаного в розділі 2), а також величину струму, представляється можливим визначити статичні і комутаційні втрати, що виникають в одному модулі IGBT. Статичними втратами будуть втрати при пропущенні струму через транзистор або діод у відкритому стані і визначаються активним опором елемента і величиною протікає струму. Комутаційні втрати визначаються втратами при включенні і виключенні транзистора і діода, а також частотою їх включення.

Розрахунок статичних втрат заснований на використанні апроксимованих вольтамперних характеристик як транзистора, так і діода з урахуванням їх фактичних температур t_{Tj} і t_{Dj}

$$\Delta u_{Ti} = f(i_{Ti}, t_{Ti}), \tag{3.14}$$

$$\Delta u_{Di} = f(i_{Di}, t_{Dj}), \tag{3.15}$$

де Δu_{Ti} , Δu_{Di} – падіння напруги на транзисторі і діоді відповідно i -тої вітки однієї фази.

Враховуючи (3.14) і (3.15), статичні втрати потужності ΔP_{S_IGBTi} та енергетичні втрати одного модуля IGBT будуть визначатися сумою втрат на кожному з елементів модуля

$$\Delta P_{S_IGBTi} = \Delta u_{Ti} \cdot i_{Ti} + \Delta u_{Di} \cdot i_{Di}, \quad (3.16)$$

$$\Delta W_{S_IGBTi} = \Delta W_{Ti} + \Delta W_{Di} + \Delta t_{Ti} \cdot \Delta u_{Ti} \cdot i_{Ti} + \Delta t_{Di} \cdot \Delta u_{Di} \cdot i_{Di}, \quad (3.17)$$

де ΔW_{Ti} , ΔW_{Di} – втрати енергії транзистора і діода відповідно на попередньому кроці інтегрування;

Δt_{Ti} , Δt_{Di} – час протікання струму по транзистору і діоду відповідно.

Розрахунок потужності динамічних втрат багато в чому залежить від моделі управління і заснований на використанні функції втрат енергії для кожного елемента модуля від величини струму, частоти модуляції і фактичної температури

$$\Delta P_{Ti} = \Delta P_{TiON} f(i_{Ti}, t_{Ti}, f_m) + \Delta P_{TiOFF} f(i_{Ti}, t_{Ti}, f_m), \quad (3.18)$$

$$\Delta P_{Di} = \Delta P_{DiOFF} f(i_{Di}, t_{Di}, f_m), \quad (3.19)$$

де ΔP_{TiON} , ΔP_{TiOFF} – потужність втрат енергії на транзисторі і-тої вітки однієї фази при включенні і виключенні відповідно;

ΔP_{DiOFF} – потужність втрат енергії на діоді і-тої гілки однієї фази при вимиканні;

f_m – частота модуляції на кроці розрахунку.

Загальна потужність втрат мостового інвертора ΔP визначається як сума статичних і динамічних втрат на кожному з ключів

$$\Delta P = \sum_{i=1}^6 (\Delta P_{S_IGBTi} + \Delta P_{Ti} + \Delta P_{Di}). \quad (3.20)$$

Розрахунок потужності втрат інвертора дозволяє враховувати втрату енергії у перетворювачі, незважаючи на те, що використовується поняття «ідеальні ключі» при моделюванні. За рахунок додаткового введення в схему перетворювача опорів зі змінною величиною вдається враховувати в моделі статичні і динамічні втрати інвертора.

3.3 Визначення життєвого циклу інвертора

Коливання температури в напівпровідникових структурах призводять до руйнування паяних з'єднань, розшаровування чіпів, появи тріщин на основі та ін. У зв'язку з цим актуальним є питання, пов'язане з аналізом життєвого циклу інвертора в експлуатації і, як правило, розглядається при відомих параметрах циклограми навантаження.

Визначення дійсної величини втрати життєвого циклу в експлуатації можливо при відомих значеннях втрат життєвого циклу, отриманих лабораторно при постійній амплітуді температури елементів інвертора.

Для цього порівнюються отримані експериментально діапазони температур і відповідну їм кількість циклів навантаження з втратами життєвого циклу при постійних амплітудах температури. При визначенні залишкової величини життєвого циклу компонентів інвертора використовується наступна послідовність:

- визначення температурної циклограми навантаження;
- розрахунок кількості циклів і відповідного діапазону температур при реалістичному режимі роботи;
- порівняння з величинами втрат життєвого циклу при різних діапазонах температури навантаження;
- розрахунок залишкової величини життєвого циклу.

Розрахунок загального рівня втрат енергії як на тиристорах, так і на діодах, описаний вище, дозволяє визначити їх температуру при відомій температурній моделі, параметри для якої, як правило, вказуються в технічних даних. Як зазначалося раніше, для визначення кількості циклів температурного навантаження з усього обсягу даних повинен визначатися вектор локальних екстремумів. Локальні екстремуми і експлуатаційні значення температури транзистора мостового інвертора при неповному циклі реалістичного режиму роботи представлені на рис. 3.7.

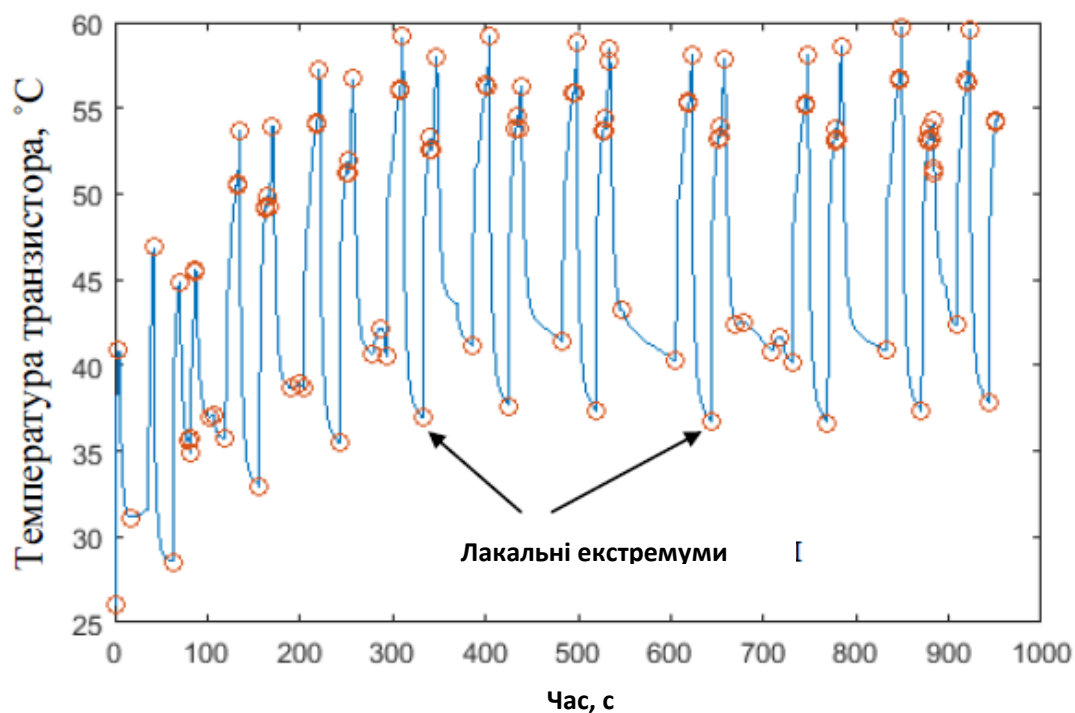


Рисунок 3.7 – Температурна циклограма навантаження транзистора

Великий обсяг даних аналізується з використанням тільки вектору локальних екстремумів. Для цього в кожному напівциклі визначаються значення мінімальної і максимальної температури, а також амплітудне і середнє значення (рис. 3.8).

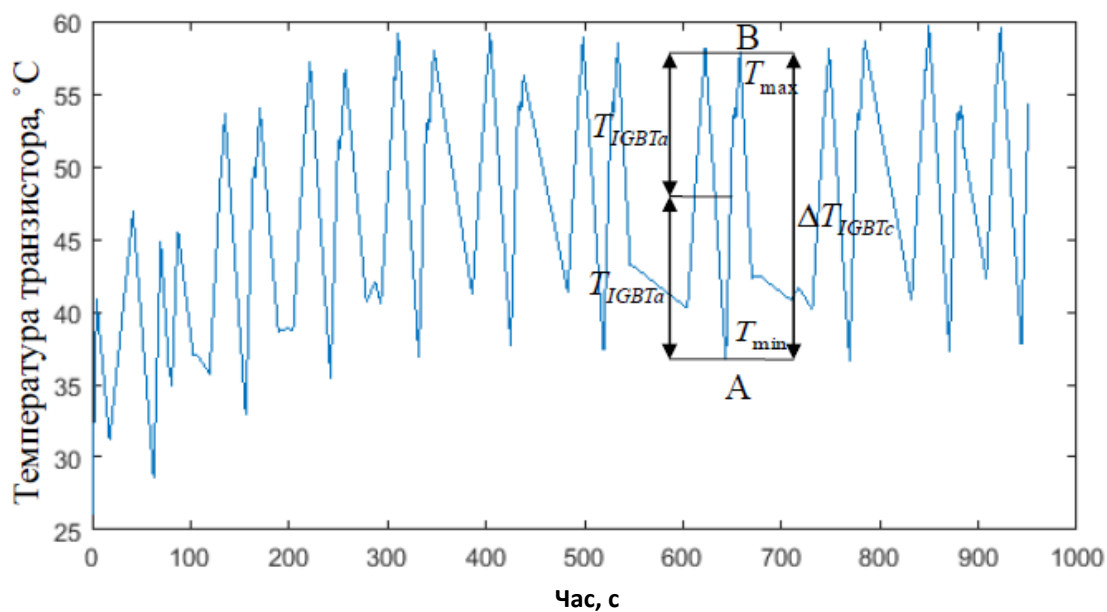


Рисунок 3.8 – Екстремальна температурна циклограма навантаження транзистора

Аналіз температурних циклограм проводиться одним з методів схематизації процесів навантаження. Найбільш поширений серед них – це метод «дощу». Він дозволяє визначити кількість циклів навантаження, а також відповідне їм середнє значення температури. Коливальна температурна крива (рис. 3.8) є найбільш частим випадком експлуатаційних вимірювань. На її основі, як описувалося вище, визначаються для кожного напівперіоду (наприклад, АВ) основні параметри циклу.

Амплітуда напівперіоду АВ

$$T_{IGBTa} = \left| \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right|. \quad (3.21)$$

Середнє значення температури за напівперіод АВ

$$T_{IGBTm} = \left| \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right|. \quad (3.22)$$

Зміна температури за напівперіод АВ

$$\Delta T_{IGBTc} = T_{\max} - T_{\min}. \quad (3.23)$$

Розгляд повного режиму роботи, представленого на рис. 3.9, при певних параметрах приводу і на підставі матриці «дощу» дає можливість побудувати гістограму циклів навантаження (рис. 3.10).

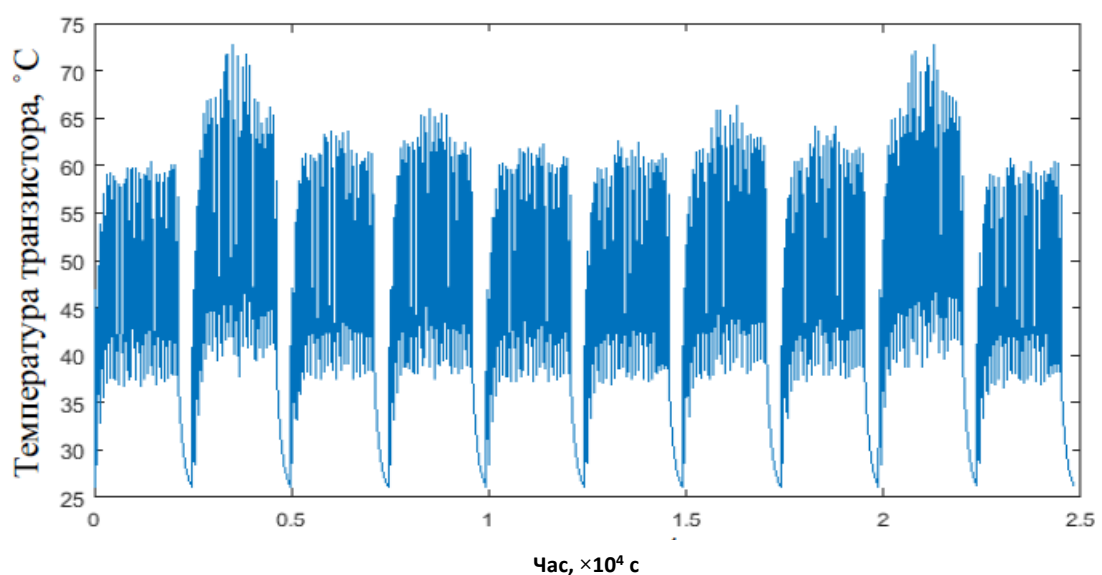


Рисунок 3.9 – Зміна температури транзистора при реалістичному режимі роботи

В кінцевому підсумку при аналізі циклограми температурного навантаження методом «дощу» [13] вдається отримати матрицю, значення якої визначають частоту появи окремих величин температур, їх середнє значення, амплітуду і зміну температури.

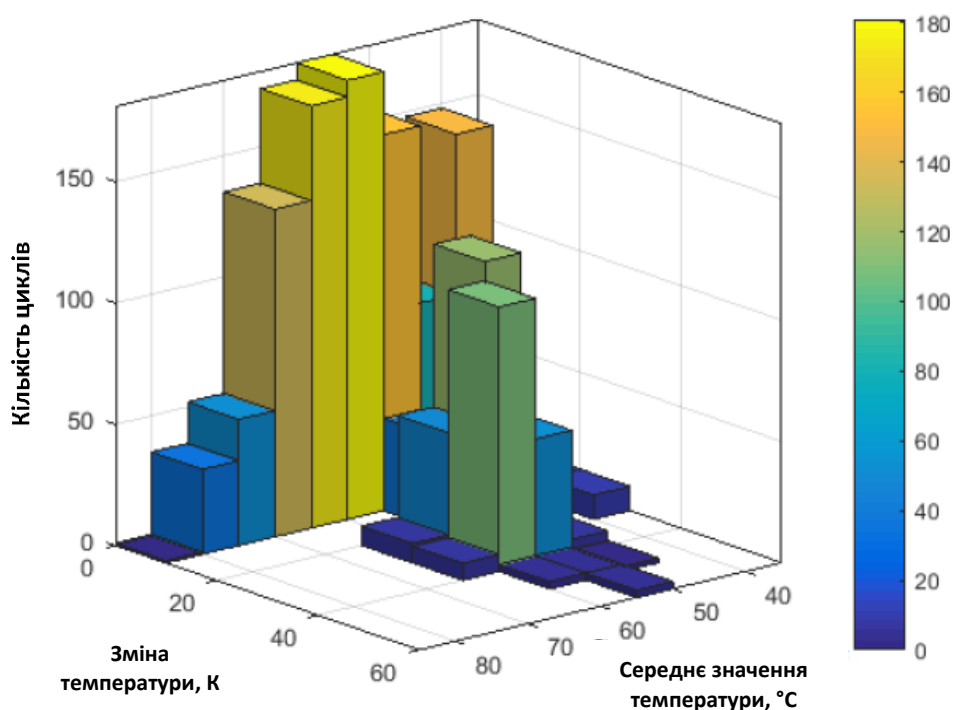


Рисунок 3.10 – Гістограма циклів навантаження при реалістичному режимі роботи

Залежність кількості циклів до пошкодження в залежності від зміни температури в кожному циклі описується законом Менсона. Але для визначення параметрів формули повинні бути проведені лабораторні дослідження для декількох температур роботи напівпровідникових структур і виявлено кількість циклів, при яких, як правило, 10 % зразків виходять з ладу. Кількість циклів до пошкодження розраховується на основі абсолютного і середнього значень температури N виражає закон Менсона

$$N = A \cdot \Delta T_a^\alpha \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_b \cdot T_m}\right), \quad (3.24)$$

де A – постійна величина, одержувана експериментально для кожного конкретного модуля;

α – постійна величина, значення якої залежить від ступеня мінливості температурної циклограми;

E_a – енергія активації;

k_b – постійна Больцмана.

Залишкова величина життєвого циклу розраховується адитивним методом, припускаючи, що послідовність циклів не впливає на результат. При цьому кожен температурний цикл забирає частку життєвого циклу, відповідну амплітуді і мінливості температури в ньому.

Повне пошкодження B може бути розраховане як сума пошкоджень B_i за кожен цикл i , виходячи з їх максимальної кількості n , визначеної за допомогою методу «дощу»

$$B = \sum_{i=1}^n B_i. \quad (3.25)$$

У свою чергу пошкодження B_i розраховується для кожного циклу як

$$B_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad (3.26)$$

де n_i – кількість циклів відповідних одному середньому значенню;

N_i – кількість циклів до пошкодження, розрахованих відповідно до Закону Мєнсона.

Кінець життєвого циклу компонента інвертора настає при величині пошкодження B , що дорівнює 100 %.

3.4 Визначення життєвого циклу обмотки статора машини

Часті зміни величини крутного моменту двигуна при роботі в реалістичному режимі експлуатації призводять до циклічності температурних процесів.

Циклічність в режимі роботи дозволяє більш точно врахувати втрати життєвого циклу обмотки і визначити її ресурс для обраного ізоляційного класу.

У зв'язку з тим, що температура навколишнього середовища не постійна протягом року, її абсолютне значення було збільшено на 60% при реалістичному режимі роботи (табл. 2.1) для двадцяти відсотків циклу (рис. 3.11). Відомі значення потужності втрат в певні часові моменти циклу дають можливість отримати абсолютне значення температури обмотки.

Розрахунок температурного старіння ізоляції може бути проведений за допомогою рівняння Арреніуса

$$LT = A \cdot \exp^{\frac{-E_A}{RT}}, \quad (3.27)$$

де A – коефіцієнт, що враховує частоту зіткнень молекул;

T – температура;

R – універсальна газова постійна.

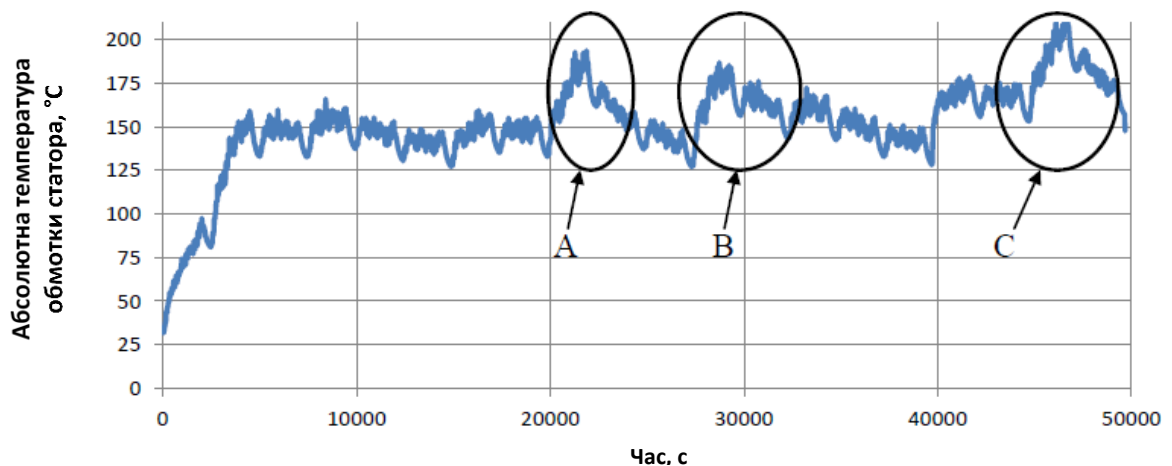


Рисунок 3.11 – Температурний цикл обмотки статора АД

Розподіл абсолютних температур АТ представлено на рис. 3.12.

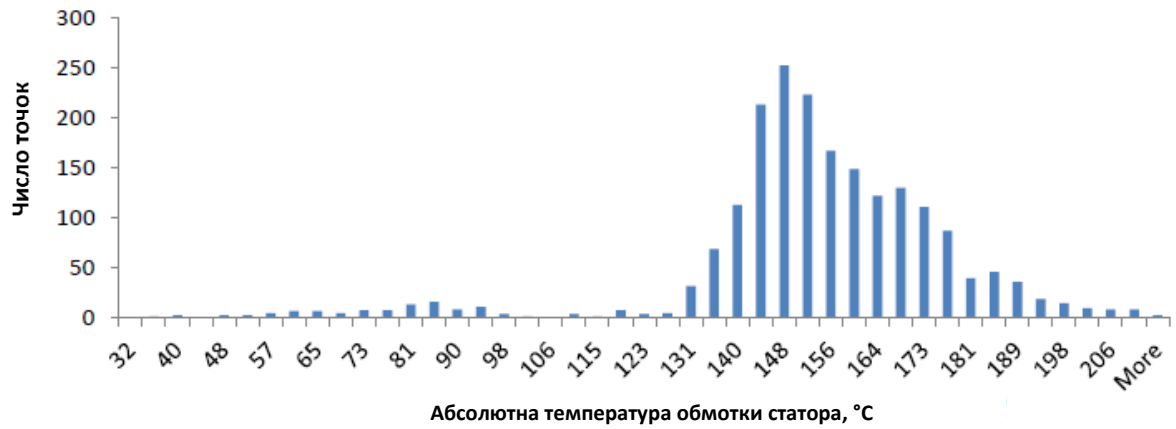


Рисунок 3.12 – Гістограма розподілу абсолютних температур АД при реалістичному режимі роботи

Життєвий цикл ізоляції при постійному значенні температури LT

$$LT = LT_0 \cdot 2^{\frac{TI - \vartheta_c}{HIC}}, \quad (3.27)$$

де LT_0 – відносне значення життєвого циклу, зазвичай $LT_0 = 20000$ год;

TI – відносне значення температури;

ϑ_c - абсолютне значення температури обмотки;

HIC – коефіцієнт зниження на половину (halving index).

Величини TI і HIC визначаються лабораторним способом для кожного виду ізоляції за рахунок її прискореного температурного старіння.

Залишкова величина життєвого циклу B розраховується адитивним методом за виразом (3.25), припускаючи, що послідовність циклів не впливає на результат. Старіння ізоляції при i -тому значенні (рис. 3.12) абсолютної температури B_i

$$B_i = \frac{LT}{LT_0} \int_{t_1}^{t_2} 2^{\frac{TI - \vartheta_c}{HIC}} dt, \quad (3.28)$$

де t_1 і t_2 – часові межі одного значення абсолютної температури.

Величина B_i показує, як сильно температурний сплеск в межах часових границь t_1 і t_2 впливає на життєвий цикл ізоляції машини. Кінець життєвого циклу настає при $B = 100\%$.

При кількості циклів, відповідних 40 років експлуатації, і при 150 тис. км. річного пробігу температурні скачки А, В і С (рис. 3.11) призводять до 6, 8 і 10 %-вої втрати життєвого циклу відповідно.

4 ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ ДЛЯ МЕТРОПОЛІТЕНУ ЗА КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

4.1 Основні принципи оптимізації системи приводу

Розвиток математичних моделей приводу представляє інтерес для індустрії, де вони можуть бути використані для реалізації швидкого прототипування, уточнення параметрів компонентів і подальшого підвищення енергоефективності всієї системи.

Завдання оптимізації передбачає вибір найкращого варіанту з безлічі рішень системи, який відповідає заявленому критерію оптимізації. Для вирішення такого завдання визначають цільову функцію Q , при цьому система може бути як однокритеріальною (4.1), так і багатокритеріальною (4.2) [13].

$$Q = f(x) \equiv \{x_1, x_2 \dots x_{\max}\}, \quad (4.1)$$

де x_i – змінна величина проектування.

В результаті розв'язання задачі оптимізації чисельно виводяться змінні величини проектування $\{x_1, x_2, \dots, x_{\max}\}$ при екстремальній поведінці функції з урахуванням прийнятих обмежень.

Зростання числа критеріїв оптимізації системи веде до зростання числа цільових функцій, кожна з яких залежить від змінних величин проектування. Подальший пошук екстремуму дозволить визначити оптимальні параметри системи

$$O = f(Q) \equiv \{Q_1, Q_2 \dots Q_{\max}\}. \quad (4.2)$$

Багатокритеріальна оптимізація значно ускладнює завдання і може бути спрощена за рахунок розгляду умовного екстремуму однієї цільової функції в рівнянні (4.2) в припущенні, що інші цільові функції лежать в певній області значень.

Різна розмірність функцій при багатокритеріальній оптимізації розв'язується за рахунок переходу до відносних одиниць і запису рівняння складової цільової функції O

$$O = k_1 Q_1(x_{11}, x_{21} \dots x_{\max 1}) + k_2 Q_2(x_{12}, x_{22} \dots x_{\max 2}) \dots k_n Q_n(x_{1n}, x_{2n} \dots x_{\max n}), \quad (4.3)$$

де $k_{1...n}$ – коефіцієнти ваги кожної цільової функції, $\sum_1^n k_i = 1$.

Блок-схема створення матриць даних, заснована на існуючих математичних моделях її компонентів. Блок-схема включає в себе чотири підпрограми, кожна з яких виконується послідовно один за одним:

а) Підпрограма «тягові розрахунки» виконує розрахунок ділянки повождення з урахуванням його особливостей і особливостей ведення поїзда в різних експлуатаційних ситуаціях.

б) Підпрограма "Редуктор" виконує розрахунок ефективності редуктора в області заданої тягової характеристики відповідно до його конструктивними параметрами.

в) Підпрограма «Двигун» виконує розрахунок електричних і термодинамічних параметрів двигуна. Електричні параметри розраховуються на основі заданої сили тяги, часу її застосування і швидкості (підпрограма «тягові розрахунки»), а термодинамічні на основі втрат двигуна і тривалості їх існування.

г) Підпрограма "перетворювач" виконує розрахунок електричних і термодинамічних параметрів інвертора з урахуванням необхідного струму двигуна і параметрів вхідного фільтра при реалізованій схемою управління.

д) Підпрограма "збір даних" перевіряє на кожному ітераційному кроці наявність порушення обмежень за граничними характеристиками, а також масогабаритних і термодинамічних меж компонентів, в разі його появи розраховується варіант не заноситься в базу даних.

В подальшому створена матриця значень енергоефективності при різних параметрах приводу може бути проаналізована на наявність як локальних екстремумів, так і загального екстремуму різними методами оптимізації (методом рою частинок, генетичного алгоритму та ін.).

Надалі компоненти розглядаються в зазначеному вище порядку.

4.2 Аналіз результатів визначення статичних циклів експлуатації приводу

При розгляді реалістичного режиму руху розглядається кілька сценаріїв управління, при цьому заслуговують на увагу є наступні сценарії: рух з підтриманням постійної швидкості і повна відсутність тягового моменту (режим вибігу). У першому випадку двигуном створюється крутний момент спрямований на компенсацію сил опору руху, у другому – повна відсутність тягового зусилля. На рис. 4.2 показано відмінність при русі з різним сценарієм управління для частини ділянки звернення.

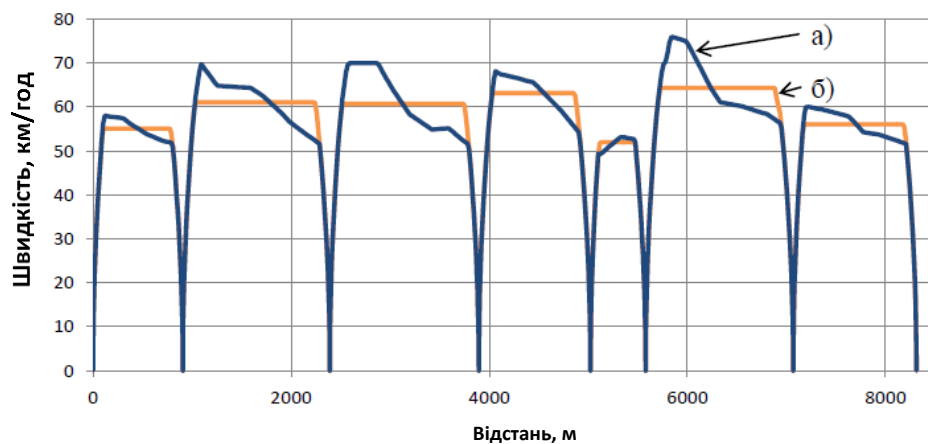


Рисунок 4.2 – Рух при різних сценаріях реалізації сили тяги: а) повна відсутність тягового моменту; б) підтримка максимальної швидкості

Цикл навантаження, постійні точки якого показані на рис. 4.3, знаходиться в межах обмеженої області обраної тягової характеристики за умови руху з мінімальним інтервалом і обраної стратегії управління.

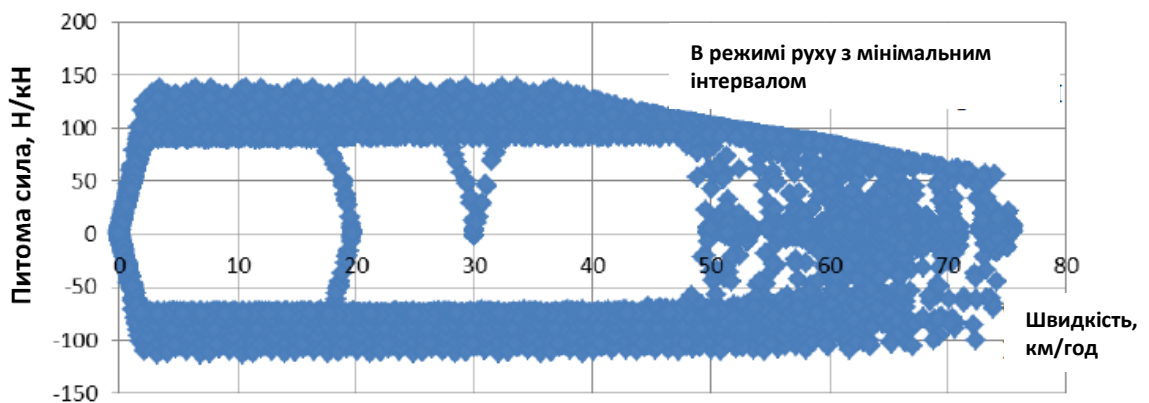


Рисунок 4.3 – Розподіл робочих точок на тяговій характеристиці

Під стратегією управління мається на увазі швидкість зміни прискорення і його величина в режимах розгону і гальмування. У разі реалізації їх постійних величин можна помітити, що для поїздів метро характерна реалізація сили по межі характеристики і великий розкид робочих точок при 53-85% максимальної швидкості при невеликому значенні резерву часу (в прикладі середнє значення 6 %). Зниження резерву часу призведе до зсуву частини точок циклу навантаження в бік великих швидкостей і навпаки.

Відмінність двох видів руху зручно представити на гістограмах питомої сили тяги і швидкості поїзда на всій ділянці обігу. Як видно з рис. 4.4, підтримка максимальної швидкості супроводжується наявністю робочих точок в області низьких значень сили тяги, а також реалізація більш низьких значень швидкості поїзда на ділянці. Низькі значення сили тяги супроводжуються низькою ефективністю двигуна, а більш низьке значення швидкості більш високою ефективністю всього складу.

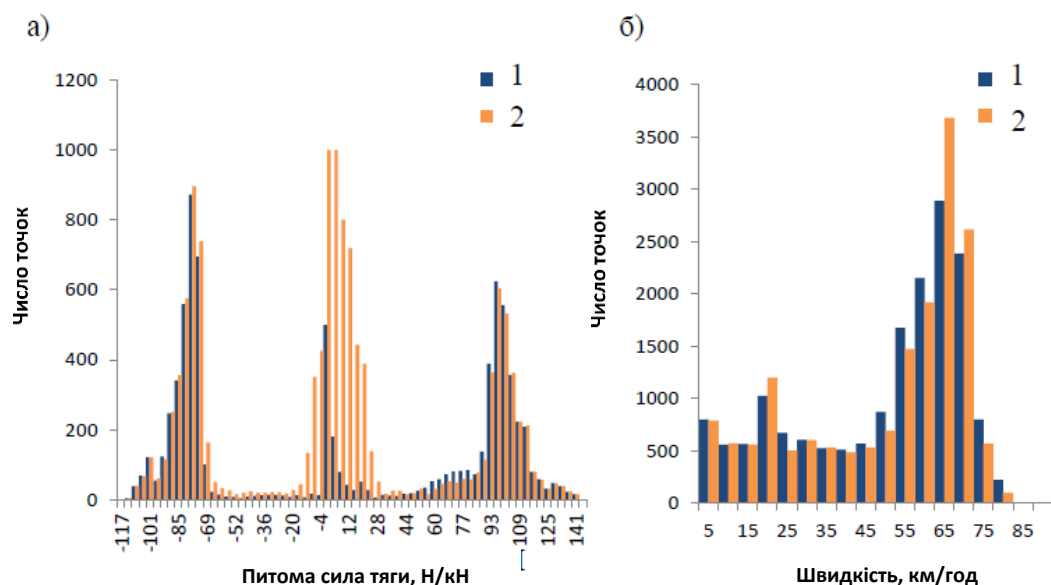


Рисунок 4.4 – Гістограми розподілу питомої сили тяги (а) і швидкості (б):
1 – повна відсутність тягового моменту; 2 – підтримка максимальної швидкості

Випадок підтримки тягового моменту буде цікавий при розгляді температурних розрахунків двигуна, інший же – при розгляді життєвого циклу перетворювача, оскільки паузи в його роботі призводять до коливань температури «ключа».

Конфігурація поїзда для метро середньої місткості з осьовим навантаженням 11...14 т, що складається з 6 вагонів наведена в табл. 4.1 при роботі в області, яка обмежена обраної тягової характеристикою (рис. 2.1). У всіх варіантах приводу, якщо це не обговорено окремо, розглядається можливість застосування двоступеневого редуктора. Крім того, враховується застосування різних інверторів в якості змінної проектування.

Таблиця 4.1-можливі конфігурації інвертора системи приводу метро

Тип інвер- тора	Конфігу- рація приводу	Максимальна частота модуляції, Гц							
INV101	1C4M*	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
INV103	1C2M**								
INV105	1C4M*								
* – 1 інвертор на 4 двигуна; **– 1 інвертор на 2 двигуна.									

Номінальні потужності інверторів наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Номінальна потужність інверторів

Параметр	Одиниця вимірювання	Тип інвертора		
		INV101	INV103	INV105
Номінальна потужність	кВт	400	200	600

4.3 Оптимізація конструктивних параметрів двигуна і перетворювача за критерієм енергоефективності

При розгляді машин з самовентиляцією, використання різних передавальних чисел редуктора призводить до відмінних максимальних кутових шви-

дкостей обертання вентилятора, що позначається на ефективності охолодження і, відповідно, на температурі машини. Ефективність охолодження машини залежить як від величини падіння тиску, так і від величини повітряного потоку, створюваного вентилятором двигуна. Зміна величини падіння тиску в залежності від створюваного повітряного потоку в загальному вигляді наведено на рис. 4.5.

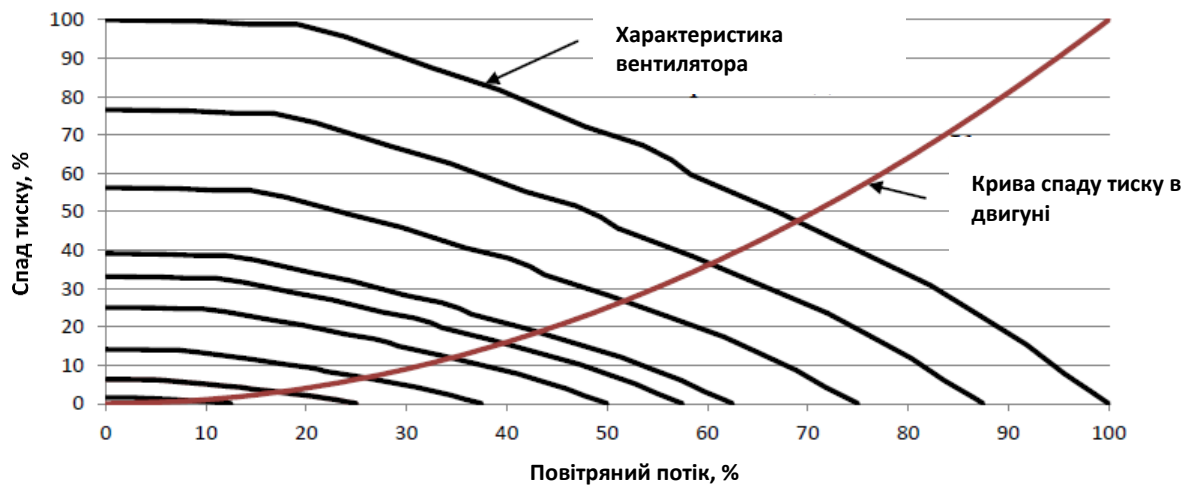


Рисунок 4.5 – Характеристика вентилятора двигуна

Підвищення максимальної частоти обертання при незмінній геометрії машини збільшить значення повітряного потоку і падіння тиску всередині машини, що призведе до більш ефективного охолодження і навпаки. Відомо, що реалістичний режим роботи характеризується експлуатаційними точками (рис. 4.3) з високою і низькою кутовою швидкістю вентилятора, що говорить про мінливості ефективності охолодження. Варто зауважити, що незмінні інтенсивність охолодження і режим роботи призводять до різних температурних розподілів в обмотках (рис. 4.6), що залежать від параметрів машини.

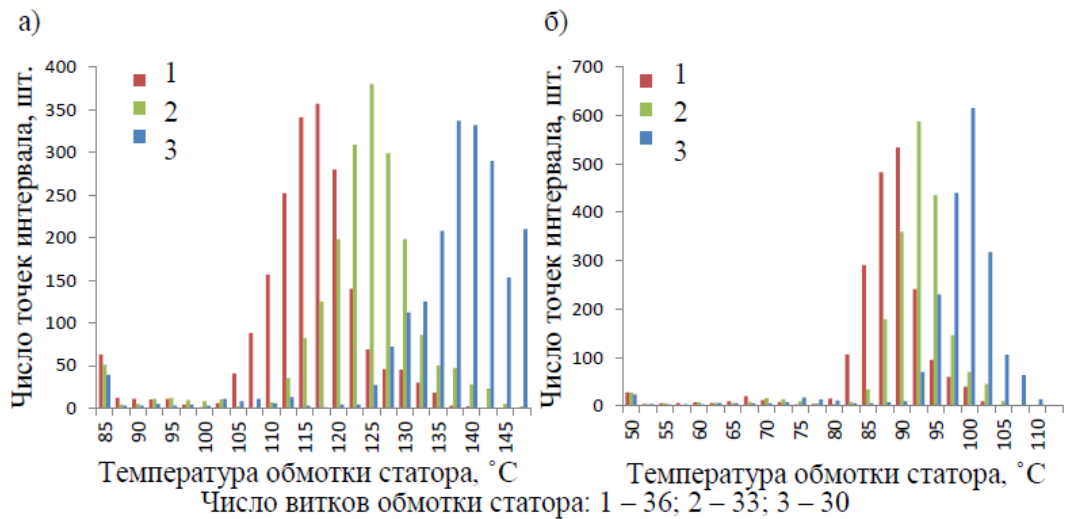


Рисунок 4.6 – Гістограми розподілу температур в реалістичному режимі роботи при довжині активної частини $l_{Fe} = 130$ мм (а), при довжині активної частини $l_{Fe} = 180$ мм (б)

З аналізу температур двигуна в реалістичному режимі роботи (рис. 4.6) видно, що зростання числа витків і довжини активної частини позитивно позначається на температурному розподілі обмоток і всієї машини, зрушуючись в область більш низьких значень.

При розрахунку значень енергоспоживання важливо враховувати температуру обмоток в режимі роботи (табл. 4.3), оскільки, як відомо, це призводить до зміни активного опору фаз обмотки машини і її вихідних характеристик

$$R_i = R_{i0}(1 + \alpha_i(T_i - 20)), \quad (4.4)$$

де R_i – активний опір i -тої обмотки;

R_{i0} – активний опір i -тої обмотки статора або ротора при температурі 20 °C;

α_i – коефіцієнт температурного опору;

T_i – температура обмотки;

i – обмотка статора або ротора.

Облік зміни температури в режимі роботи може бути виконаний ітераційними методами.

Таблиця 4.3 – Зміна енергоспоживання приводами з урахуванням температурного стану обмоток двигуна на прикладі конфігурації 1С 4М

Параметр	Довжина активної частини двигуна, мм					
	130	140	150	160	170	180
Середня температура обмотки статора, °С	91					
Енергоспоживання без урахування температури АД в режимі роботи, %	104,5	102,5	101,2	100,0	99,2	98,5
Середня температура обмотки статора, °С	114	105	99	94	90	87
Енергоспоживання з урахуванням температури АД в режимі роботи, %	105,7	103,2	101,5	100,0	99,0	98,2

Таблиця 4.4 – Зміна середньої температури обмотки статора (°С) в залежності від передавального числа і параметрів машини при частоті модуляції 500 Гц

Передатне відношення редуктора	Число витків обмотки статора, одиниць	Активна довжина двигуна, мм					
		130	140	150	160	170	180
14,3	30	104	97	91	87	83	80
	33*	96	90	85	82	79	76
	36	91	86	—	—	—	—
13,2	30	114	106	99	94	91	90
	33*	105	98	92	88	85	82
	36	99	93	88	85	82	79
12,3	30	124	114	106	100	95	92
	33*	113	105	98	93	89	86
	36	106	99	93	89	86	83
11,5	30	135	123	114	107	101	97
	33*	122	112	105	99	94	91
	36	114	105	99	94	90	87
	42	106	—	—	—	—	—
10,2	30	160	148	138	126	118	112
	33*	149	134	124	115	109	104
	36	137	124	115	108	103	98
	42	124	115	108	—	—	—
9,1	30	202	180	164	150	139	130
	33*	175	162	147	135	127	119

	36	167	148	136	126	119	112
	42	147	134	125	117	112	107
8,1	33*	215	195	176	159	146	137
	36	205	180	161	147	137	129
	42	180	160	146	136	128	121
	48	171	156	145	—	—	—
7,2	36	244	213	187	169	156	145
	42	221	193	172	158	147	138
	48	211	187	171	158	150	142

Згідно табл. 4.3 значення енергоспоживання є завищеними при відсутності обліку температурного стану обмоток для більш довгих виконань машини і навпаки. Різниця значень енергоспоживання максимальна при мінімальній розглянутій довжині активної частини ротора і досягає 1,2 %.

Високі температури обмотки, що проявляються при реалістичному режимі роботи і низьких максимальних частотах обертання, не дозволяють слідувати вимогам достатності життєвого циклу машини. У зв'язку з цим варіанти приводу з високою температурою обмотки не можуть бути розглянуті далі. За результатами розрахунків життєвого циклу, обмоток, середня температура яких вище 151 С (табл. 4.4) в реалістичному режимі роботи, не відповідають критерію достатності життєвого циклу.

Слід зазначити, що варіанти приводу з підвищеною середньою температурою обмотки при роботі в режимі граничної експлуатації виразно вийдуть за межі температурного класу, що значно збільшить темпи старіння ізоляції.

Проведений облік температурної нестабільності обмоток допомагає оцінити вплив зміни опору на рівень загальних втрат машини, її ККД і т.д. надалі всі значення ефективності приводу наводяться з урахуванням температурного стану обмотки статора і ротора.

4.4 Оптимізація конструктивних параметрів асинхронного двигуна

Для визначення енергоспоживання приводу, знаючи конкретні експлуатаційні точки (рис. 4.3), необхідно скористатися картою ефективності приводу. Карта є узагальненою ефективністю як редуктора, так і двигуна, інвертора і мережевого фільтра з урахуванням опору руху для різних швидкостей руху в межах тягової і гальмівної характеристик. Використання алгоритму (рис. 4.1) дозволяє отримати значення ефективності кожного з компонентів приводу при можливих працездатних варіантах синтезу АД. Карти ефективності двигуна відповідно у режимах тяги і рекуперації представлені на рис. 4.7 та 4.8.

Одним із способів підвищення ефективності вагонів метро є використання реалістичного режиму роботи приводу в процесі проектування поїзда, оскільки тільки так можливо зіставити часті експлуатаційні точки з областю, в якій спостерігається найвища ефективність приводу поїзда.

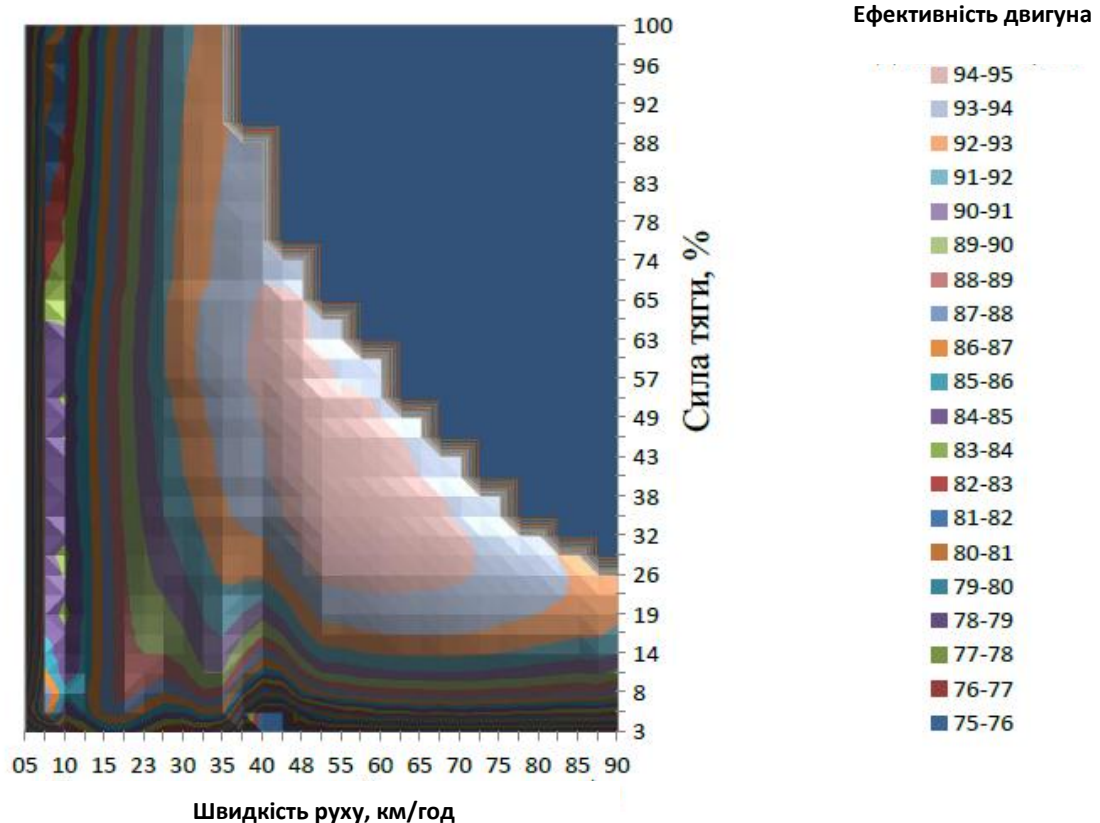


Рисунок 4.7 – Карта ефективності двигуна в режимі тяги

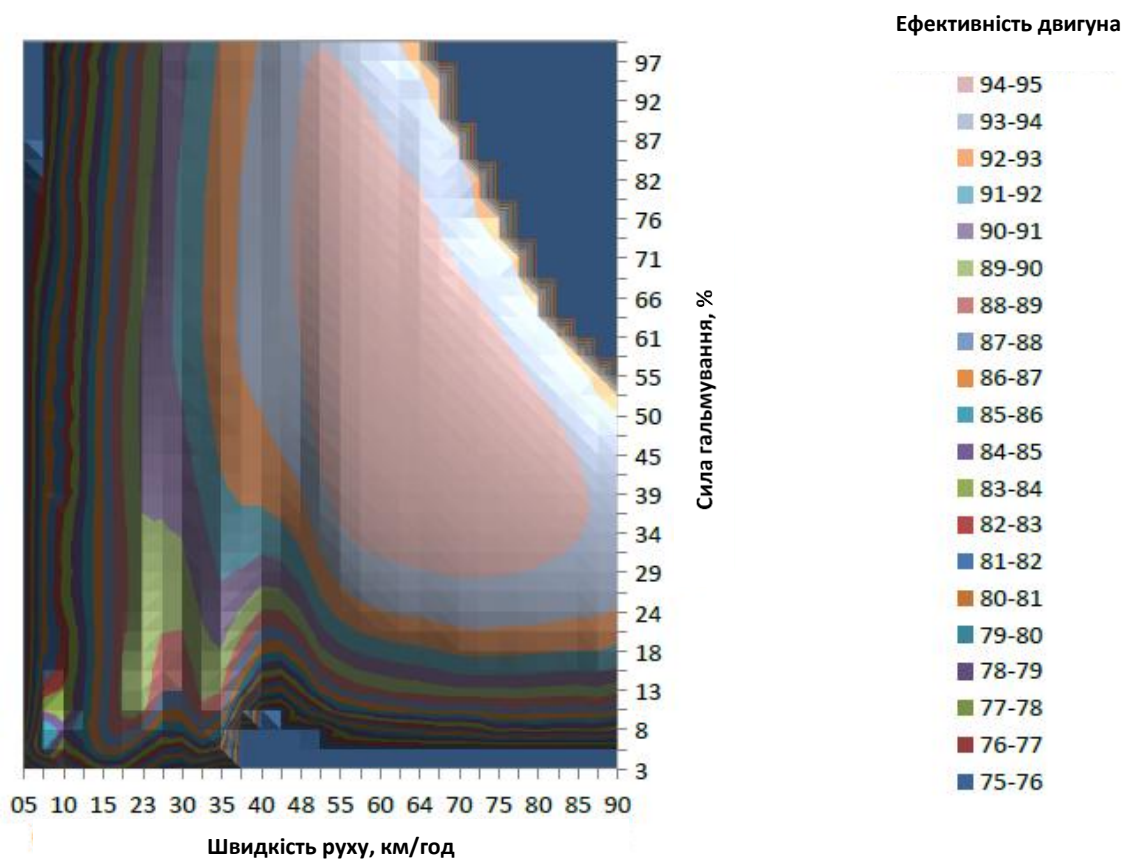


Рисунок 4.8 – Карта ефективності двигуна в режимі рекуперації

При проектуванні приводу з однією величиною передавального відношення редуктора (табл. 4.6) необхідно ввести поняття блокуючого контуру двигуна. Беручи до уваги обмеження, що накладаються технічним завданням, зовнішній вигляд контуру буде виглядати як на рис. 4.9. Блокуючим контуром в даному випадку є обмеження параметричного характеру, при якому в подальшому неможлива зміна параметрів двигуна приводу через досягнення граничних значень обмежень, що накладаються при проектуванні.

Зміна ефективності приводу при різних передавальних числах редуктора і частоті модуляції інвертора 500 Гц представлено в табл. 4.6.

Таблиця 4.5 – Відмінність в енергоспоживанні поїзда при параметрах приводу з постійним значенням передавального числа, рівним 13,2

Число витків обмотки статора, одиниць	Активна довжина ротора, мм					
	130	140	150	160	170	180
30	113,33	110,55	108,33	106,54	105,21	104,49
33	108,44	106,03	104,25	102,85	101,90	101,39
36	104,60	103,04	101,59	100,57	—	—

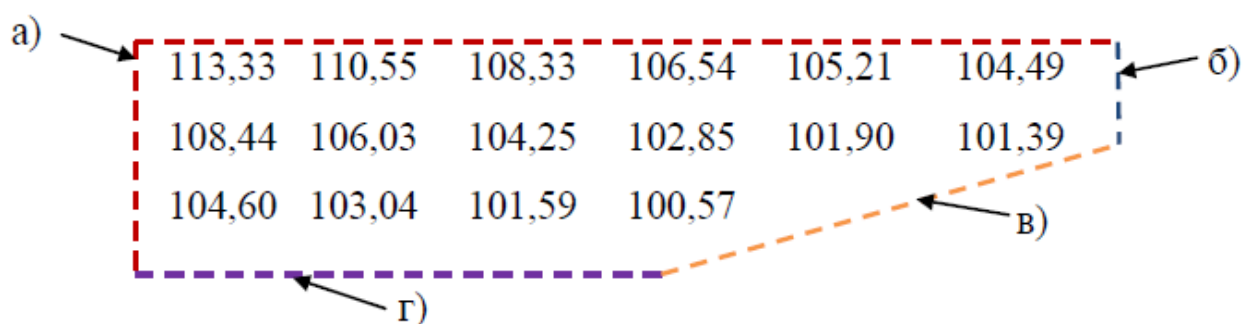


Рисунок 4.9 – Блокуючий контур двигуна при параметрах приводу з постійним значенням передавального числа (значення у відсотках) з обмеженнями (згідно табл. 4.5): а) по життєвому циклу інвертора; б) за габаритами двигуна; в) по перекидаючому моменту; г) по щільності струму

Таблиця 4.6 - відносна ефективність приводу (%) при різних передатних числах редуктора і частоті модуляції інвертора 500 Гц

Передавальне відношення редуктора	Число витків обмотки статора, одиниць	Активна довжина двигуна, мм					
		130	140	150	160	170	180
14,3	30	112,42	110,14	108,28	106,74	105,75	105,01
	33*	108,06	106,07	104,55	103,41	102,75	102,25
	36	104,63	103,44	—	—	—	—
13,2	30	113,33	110,55	108,33	106,54	105,21	104,49
	33*	108,44	106,03	104,25	102,85	101,90	101,39
	36	104,60	103,04	101,59	100,57	—	—
12,3	30	116,35	112,67	110,29	108,19	106,67	105,78
	33*	110,74	107,71	105,82	104,15	103,04	102,38
	36	106,21	104,35	102,88	101,56	100,76	100,31

11,5	30	118,98	114,63	111,76	109,30	107,53	106,12
	33*	112,26	109,00	106,71	104,82	103,48	102,36
	36	107,84	105,21	103,38	101,86	100,88	100,00
	42	103,11	—	—	—	—	—
10,2	30	119,07	119,19	115,77	112,48	109,99	108,08
	33*	117,41	112,68	109,56	106,94	105,11	103,64
	36	111,88	107,87	105,35	103,28	101,86	100,67
	42	105,27	102,72	101,07	—	—	—
9,1	30	134,56	127,27	122,28	118,13	115,15	112,26
	33*	124,18	119,18	115,26	111,69	109,24	107,05
	36	118,89	113,62	110,12	107,18	105,26	103,51
	42	110,56	106,84	104,43	102,42	101,25	100,05
8,1	33*	132,67	125,54	119,98	115,42	112,28	109,50
	36	126,12	119,10	114,32	110,68	108,03	105,82
	42	116,74	111,55	107,93	105,13	103,30	101,66
	48	112,65	108,81	106,10	—	—	—
* – при великому числі паралельних віток.							

Розподіл енергоефективності в залежності від параметрів машини для будь-якого з перетворювачів не дає чіткого уявлення про найкращий вибір її параметрів. Для вирішення цієї проблеми був введений особливий коефіцієнт відносного об'єму машини k_{Mref} , отриманий шляхом перемноження окремих параметрів приводу. Значення k_{Mref} дозволяє оцінити зміну життєвого циклу в залежності від параметрів машини

$$k_{Mref} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot r \cdot D^2 \cdot l_{Fe} \cdot B_{\delta}, \text{ мм}^3 \cdot \text{Вб}, \quad (4.4)$$

де N – число витків обмотки статора;

D – діаметр ротора;

R – передавальне відношення;

B_{δ} – магнітна індукція в повітряному зазорі.

Коефіцієнт відносного об'єму був визначений статистично, шляхом найкращого співвідношення взаємопов'язаних параметрів приводу з життєвим циклом інвертора.

На рис. 4.10 представлено розподіл енергоефективності приводу при різних його параметрах і конфігурації 1С4М при частоті модуляції інвертора 500 Гц.

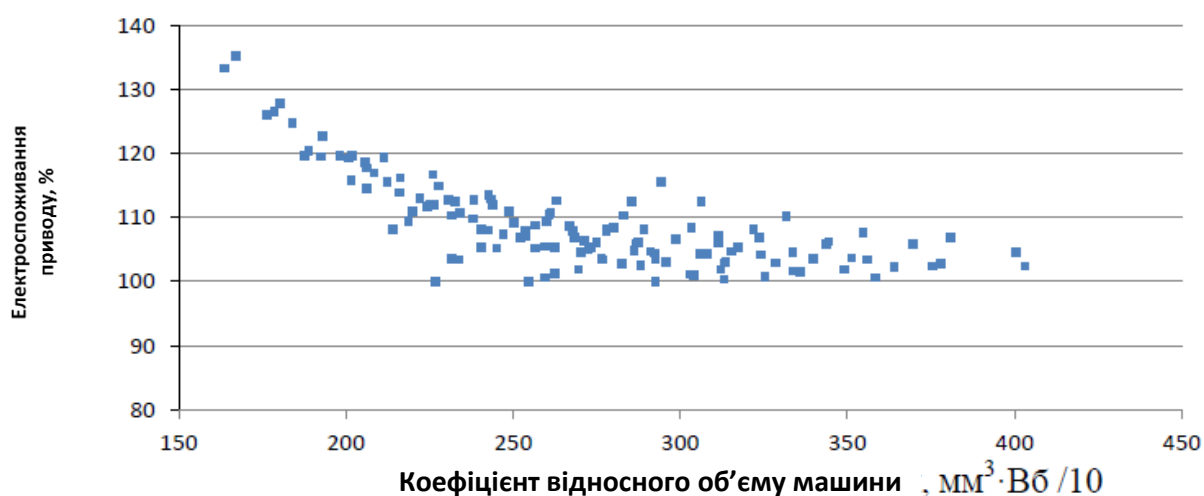


Рисунок 4.10 – Розподіл енергоспоживання приводу при різних його параметрах

З рис. 4.10 випливає, що енергоспоживання знижується при зростанні коефіцієнта відносного об'єму машини і, досягнувши мінімуму, залишається незмінним при подальшому зростанні k_{Mref} при окремих параметрах приводу.

Розглянуті параметри АД змінюють термін служби перетворювача. Значення життєвого циклу перетворювача INV105 при різних передавальних числах редуктора і частоті модуляції інвертора 500 Гц представлені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Зміна життєвого циклу (років) перетворювача INV105 при різних передавальних числах редуктора і модуляції інвертора 500 Гц

Передавальне відношення редуктора	Число витків обмотки статора, од.	Активна довжина двигуна, мм					
		130	140	150	160	170	180
14,3	30	39,8	52,2	66,5	83,0	97,5	108,0
	33*	56,2	83,3	102,0	118,0	131,0	138,0
	36	95,2	111,0	—	—	—	—
13,2	30	30,9	40,8	53,6	68,7	82,6	93,7
	33*	45,6	69,6	87,7	104,0	120,0	128,0
	36	81,9	101,0	118,0	132,0	144,0	149,0

12,3	30	24,2	32,1	42,8	54,1	68,1	79,5
	33*	36,3	55,3	71,4	87,1	104,0	113,0
	36	68,3	85,7	103,0	120,0	133,0	144,0
11,5	30	15,3	25,1	32,8	42,8	53,8	64,2
	33*	29,4	43,5	57,0	70,5	86,6	98,6
	36	53,0	68,7	85,0	104,0	118,0	130,0
	42	99,3	—	—	—	—	—
10,2	30	6,9	11,6	18,9	27,9	34,9	42,4
	33*	18,0	28,2	37,1	47,9	59,2	69,6
	36	34,2	44,9	58,7	73,6	90,0	102,0
	42	73,3	90,7	107,0	—	—	—
9,1	30	3,0	5,1	8,3	13,6	21,1	28,7
	33*	6,2	13,4	22,7	31,6	39,7	47,2
	36	18,7	30,1	39,3	50,0	61,5	71,4
	42	49,5	64,2	79,7	95,1	110,0	120,0
8,1	33*	2,2	5,4	9,1	15,0	23,6	30,8
	36	6,8	12,6	22,0	32,6	40,2	46,8
	42	31,0	41,2	51,9	65,4	78,1	86,7
	48	55,9	68,4	85,0	—	—	—
* — при великому числі паралельних віток.							

При розгляді життєвого циклу перетворювача чітко стає видно, що його зростання сильно залежить від вибраних параметрів приводу, згідно виразу (4.4) при незмінній геометрії магнітної частини машини і її діаметра.

Причому більшого значення довжини машини і передавального числа відповідає велика величина тривалості роботи інвертора (рис. 4.11). Крім того, зростання числа витків обмотки також сприяє підвищенню розглянутого показника k_{Mref} .

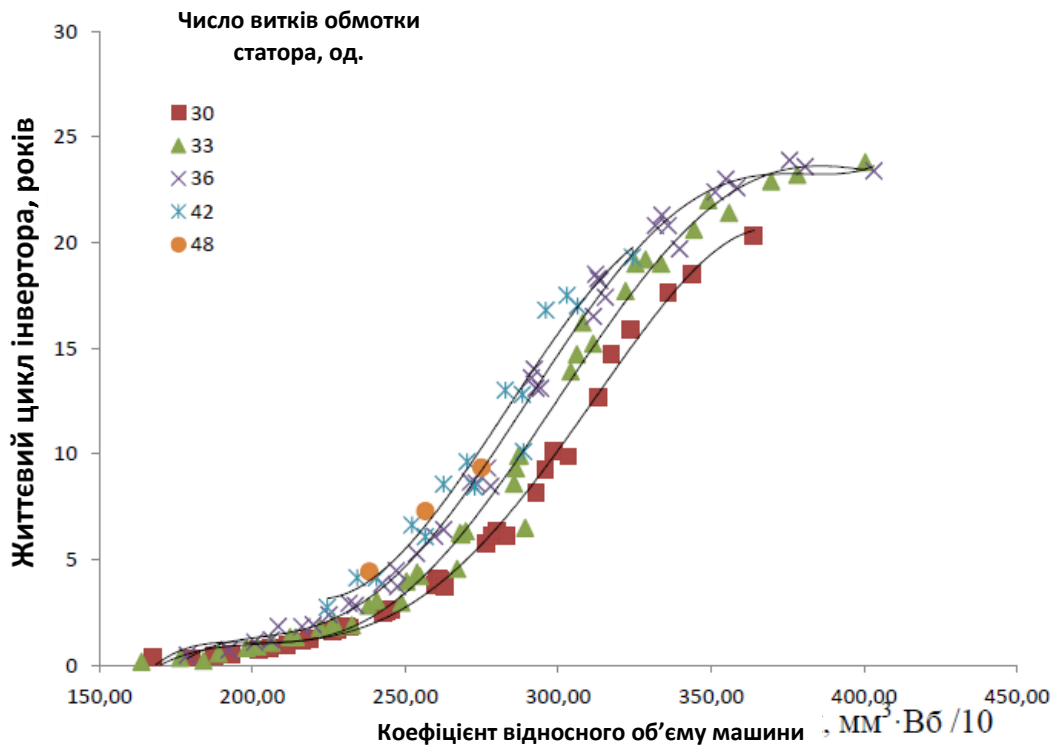


Рисунок 4.11 – Залежність життєвого циклу інвертора INV101 від відносного коефіцієнта машини

З рис. 4.11 видно, що при великих значеннях коефіцієнта відносного обсягу спостерігається ефект насичення тривалості життєвого циклу інвертора, що пояснюється його максимальною здатністю витримувати термічні коливання при розглянутому режимі роботи. Такий підхід буде цікавий при порівнянні приводів, що мають однакову геометрію магнітної частини, але різні конструктивні параметри, а також при оцінці тривалості роботи інверторів.

Ступінь використання матеріалів машини і її габаритні розміри можуть бути визначені через магнітну індукцію в повітряному зазорі B_δ і лінійну струмове навантаження A_α . Для цих цілей в машинах постійного і змінного струму використовується величина машинної постійної Арнольда C_A

$$C_A = \frac{n \cdot D^2 \cdot l_{Fe}}{P_{elt}} = \frac{1}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A_\alpha}, \quad (4.5)$$

де n – частота обертання ротора;

α_δ – коефіцієнт полюсної дуги.

Для перевірки припущення про можливість використання коефіцієнта (4.5) були взяті чотиріполюсні АД с параметрами обмотки, придатними до використовуваної тягової характеристики. Їх основні дані, власне як і оптимізованого двигуна, вказані в таблиці 4.8. В результаті порівняння двигунів, що мають різні виконання магнітної частини і величини діаметрів, можливо за допомогою виразу (4.5) і представлено на рис. 4.12.

Таблиця 4.8 – Параметри асинхронних двигунів по відношенню до базових

Варіант АД	Число витків, од.	Передатне відношення, од.	Діаметр ротора, %	Довжина активної частини, мм	Індукція в повітряному зазорі*, %
1 (базовий)	30...48	8...14	100	130...180	100
2	42...48	7...9	112	170	124
3	40...48	7,5	112	160	104
4	28...36	11...14	108	150...180	101
5	50...60	6...7	127	140	96

* – індукція при скорості подвижной единицы 5 км/ч

Машини, представлені в табл. 4.8, перевірялися при відповідних параметрах рухомої одиниці, режимах роботи і з одним інвертором INV101 з частотою модуляції 500 Гц.

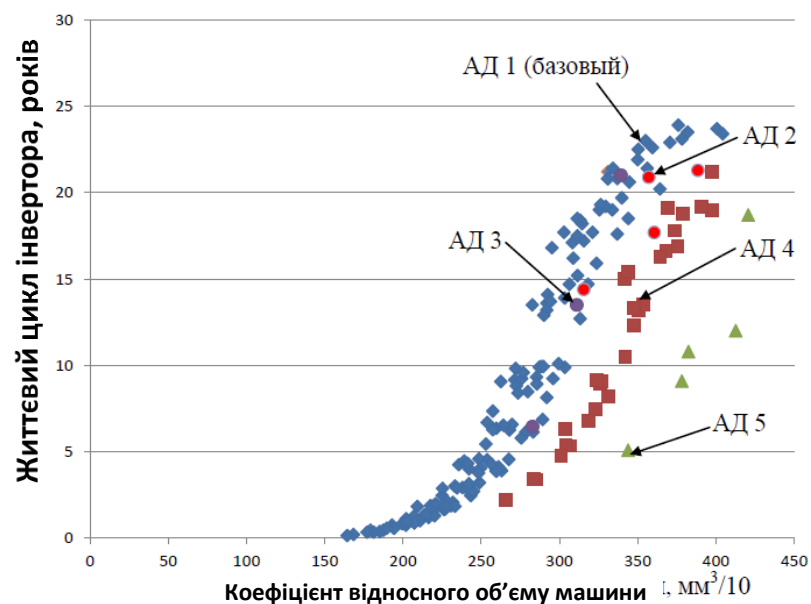


Рисунок 4.12 – Залежність життєвого циклу інвертора від відносного коефіцієнта об'єму машин

Магнітний потік, будучи однією з змінних відносного коефіцієнта об'єму машини, дозволяє змінювати величину життєвого циклу перетворювача. Для інвертора INV 101 при зміні тільки геометрії магнітної частини машини ця залежність показана на рис. 4.13. Зміна в геометрії магнітної системи, що дозволяє збільшити індукцію в повітряному зазорі без зростання насичення муздрамтеатру і зубців, дозволяє знизити як величину споживаного струму статором, так і масу міді обмотки (рис. 4.14).

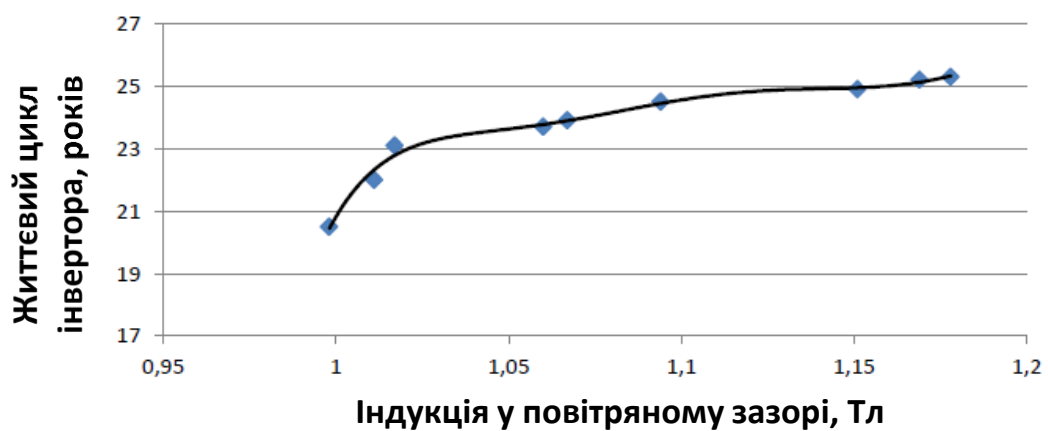


Рисунок 4.13 – Зміна життєвого циклу інвертора INV101 в залежності від індукції в повітряному зазорі машини

Рис. 4.13 показує, що зміна життєвого циклу інвертора відбувається не-пропорційно зміні потоку машини B_δ . При великих значеннях B_δ температура обмоток зростає, що призводить до недостатності життєвого циклу двигуна.

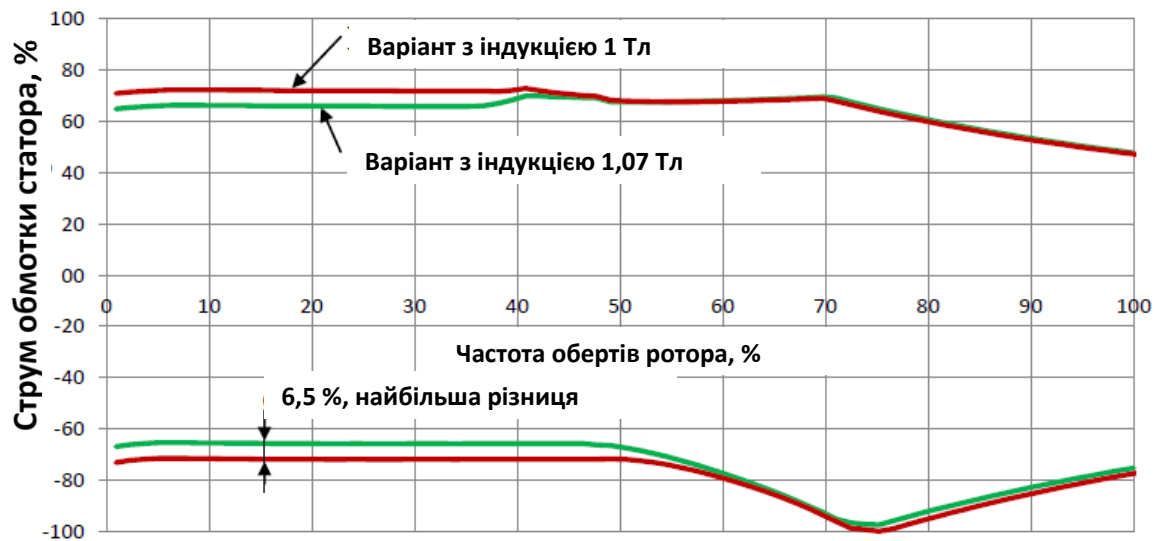


Рисунок 4.14 – Зміна струму статора машини в залежності від частоти обертання ротора при різній індукції в повітряному зазорі

При роботі приводу з відмінними від INV101 перетворювачами з відповідною конфігурацією (табл. 4.1) при тій же тяговій характеристиці, тому ж режимі роботи поїзда і параметрах базового двигуна що змінюються (табл. 4.8) розподіл життєвого циклу інверторів в залежності від k_{Mref} описується залежностями, зображеними на рис. 4.15. Максимальна частота модуляції на рис. 4.15 у всіх випадках становить 500 Гц.

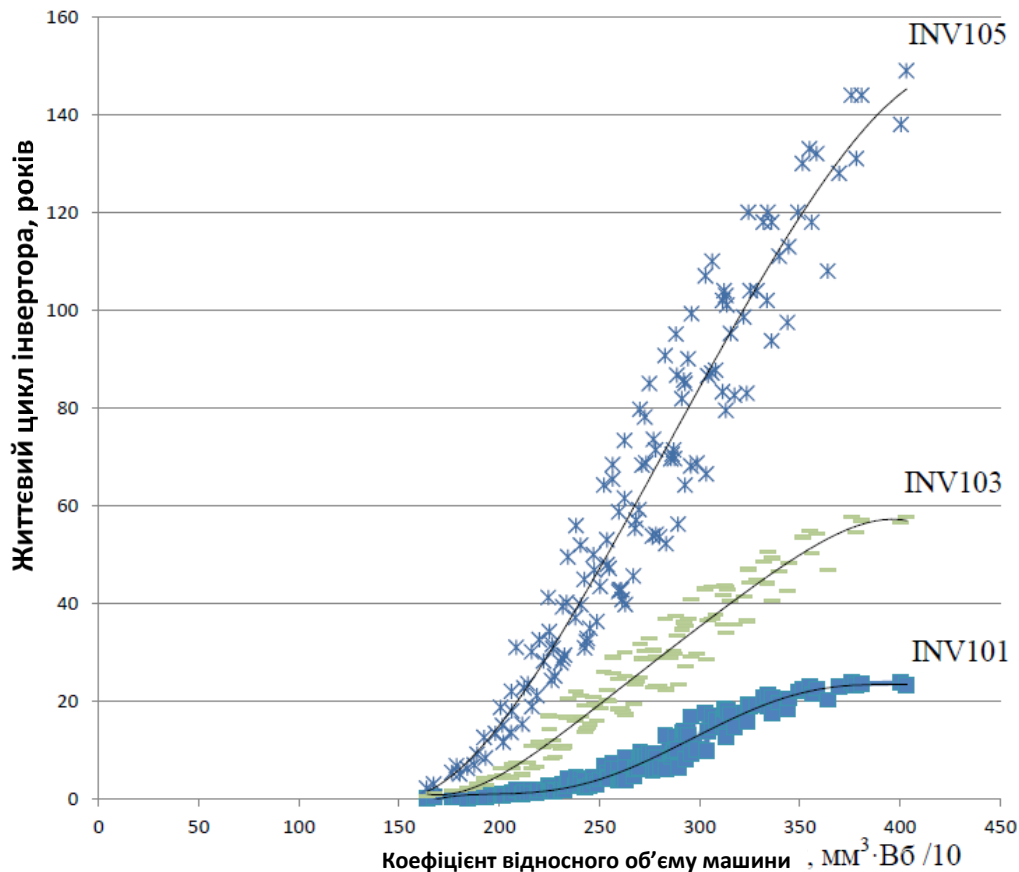


Рисунок 4.15 – Зміна життєвого циклу інверторів при зростанні відносного коефіцієнта об'єму машини

З рис. 4.15 видно що два інвертора (INV 101 і INV103) наближаються до максимальної величини життєвого циклу при коефіцієнті відносного об'єму 400 $\text{мм}^3 \cdot \text{Вб} / 10$. При цьому варто зауважити, що їх життєвий цикл достатній і може задовольнити більшість технічних завдань. При постійному коефіцієнті відносного обсягу, особливо при збільшенні необхідної потужності приводу з виходом за межі розглянутої тягової характеристики, а також при збільшенні частоти модуляції ключів інвертора і ін. величини життєвого циклу будуть зменшуватися, що зажадає вже застосування третього варіанту інвертора (INV105).

4.5 Оптимізація потужності привода

Зміни в режимі роботи приводу-постійний процес, при якому потрібен додаток потужності, з одного боку достатньої для виконання роботи, а з іншого – мінімальної, для дотримання концепцій по енергоспоживанню. В даний час відомо, що багатьма іноземними фірмами пропонується використання відмінного від максимального значення прискорення в окремих режимах експлуатації. Безсумнівно, такий підхід дозволяє знизити енергоспоживання, але недостатньо, оскільки для створення сили тяги з необхідним прискоренням використовуються райони ефективності на тяговій характеристиці з відмінними від максимальних значеннями (рис. 4.16).

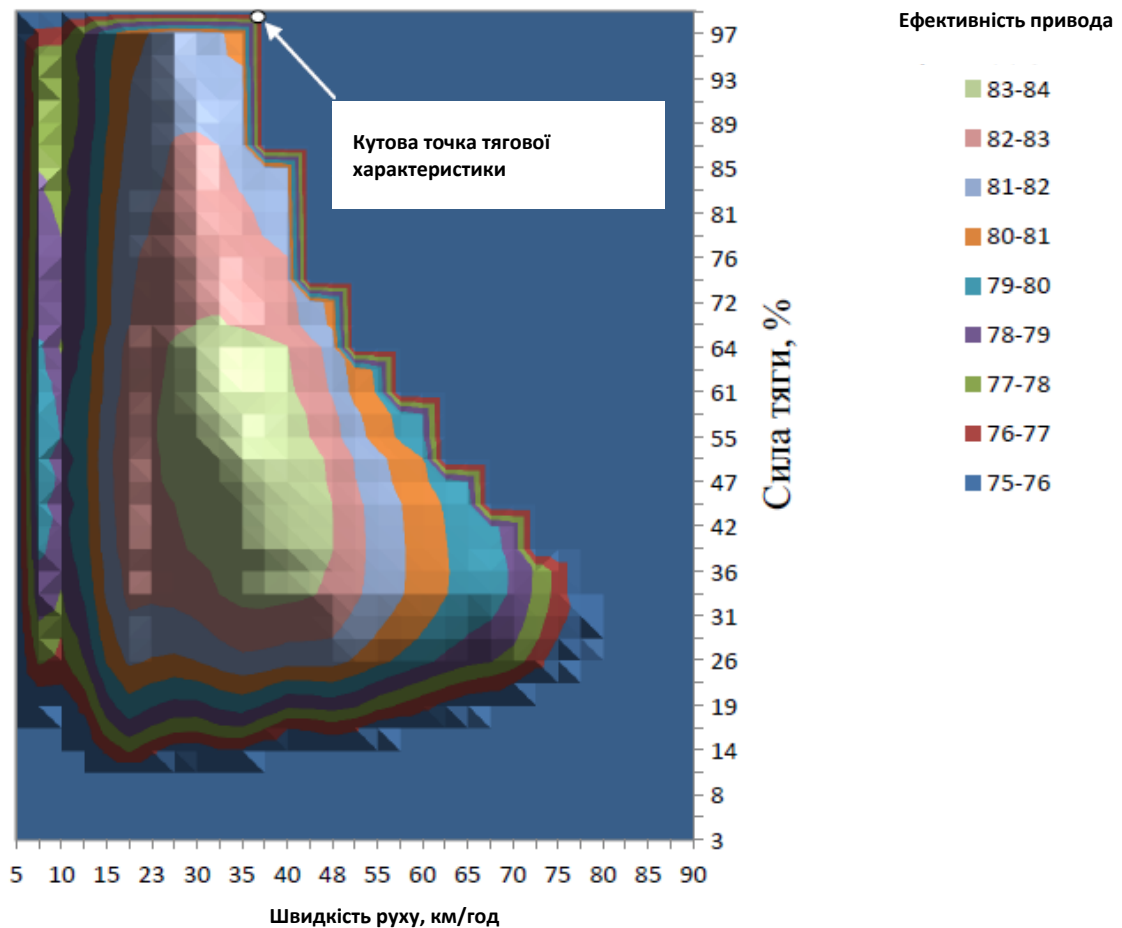


Рисунок 4.16 – Карта ефективності приводу в режимі тяги

Для пошуку способу управління, що дозволяє проводити поїзд по ділянці з максимальною ефективністю (з точки зору рухомої одиниці) необхідно розглядати карти ефективності всього приводу як в режимі тяги (рис. 4.16), так і в режимі гальмування (рис. 4.17).

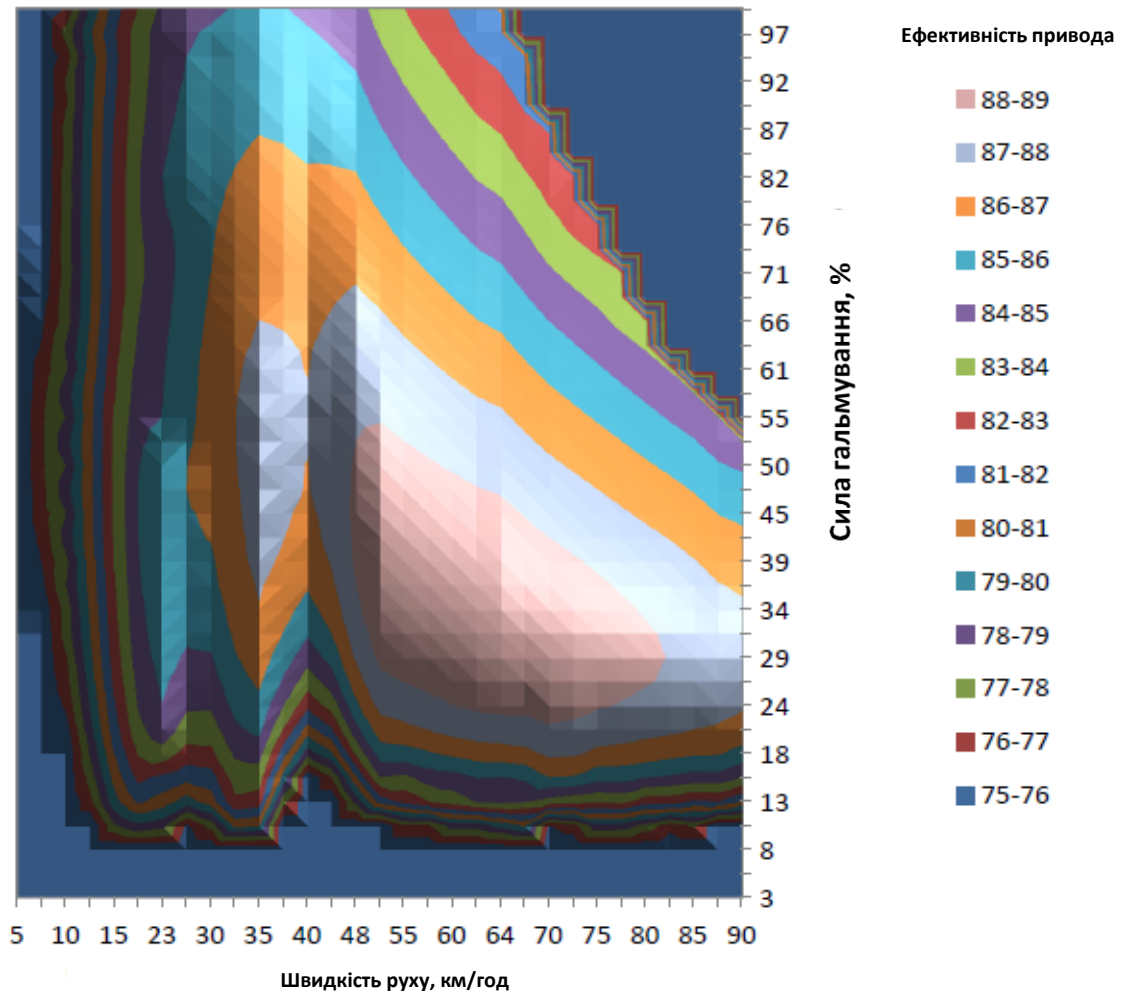


Рисунок 4.17 – Карта ефективності приводу в режимі рекуперації

При використанні заданої максимальної тягової характеристики забезпечується можливість руху з максимальним необхідним прискоренням. У реальних умовах експлуатації рух з найбільшим прискоренням часто потрібно лише в години пік, весь інший час можуть бути використані відмінні значення прискорення.

З одного боку, описаний раніше спосіб зниження прискорення передбачає його зменшення, але, ймовірно, з підтриманням на постійному рівні, що вимагає постійного значення потужності і не максимальної ефективності. З іншого

боку, можливий рух при непостійному прискоренні, але з найвищою ефективністю приводу поїзда. Для цього кутова точка (рис. 4.16) зміщується в бік нижчих значень швидкостей. На рис. 4.18 показано зміну кривої швидкості при русі на ділянці довжиною 800 м в режимі вибігу при підтримці максимальної швидкості (а) і при повній відсутності тягового моменту (б).

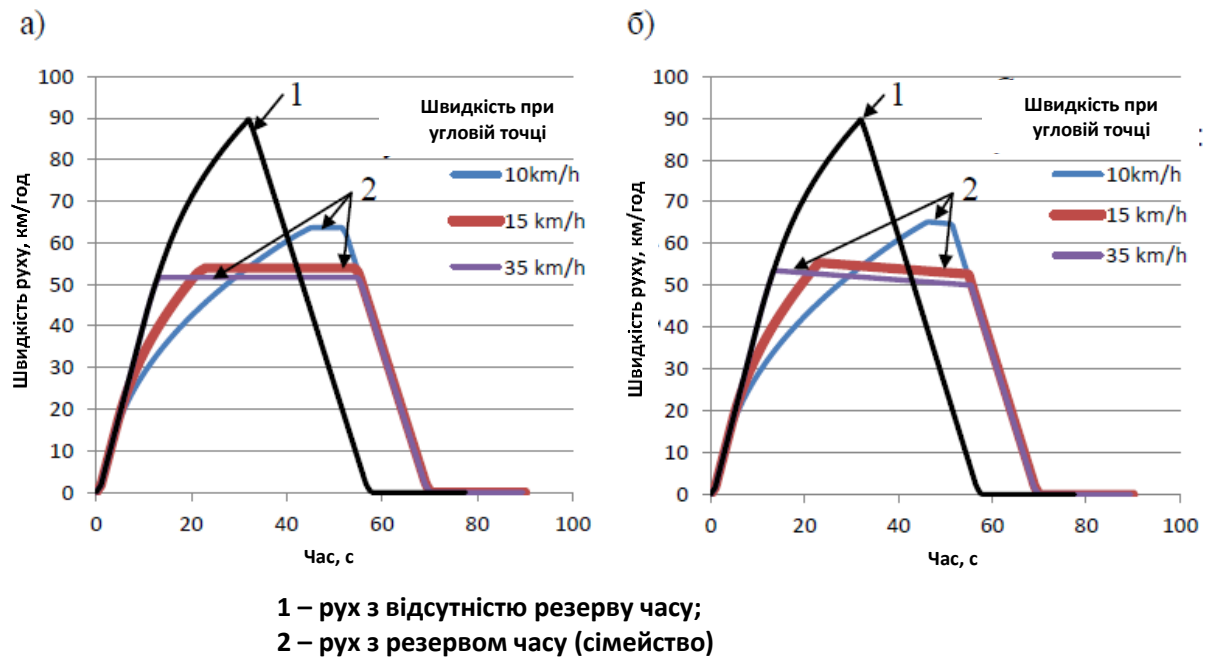


Рисунок 4.18 – Результат тягового розрахунку ділянки довжиною 800 м при підтримці максимальної швидкості (а), при повній відсутності тягового моменту (б)

Для значень сили тяги і швидкості для різних довжин ділянок була розрахована ефективність приводу. На рис. 4.19 показано зміну ефективності приводу при зміні швидкості, відповідної кутовій точці в режимі тяги, а також на рис. 4.20 в режимі гальмування.

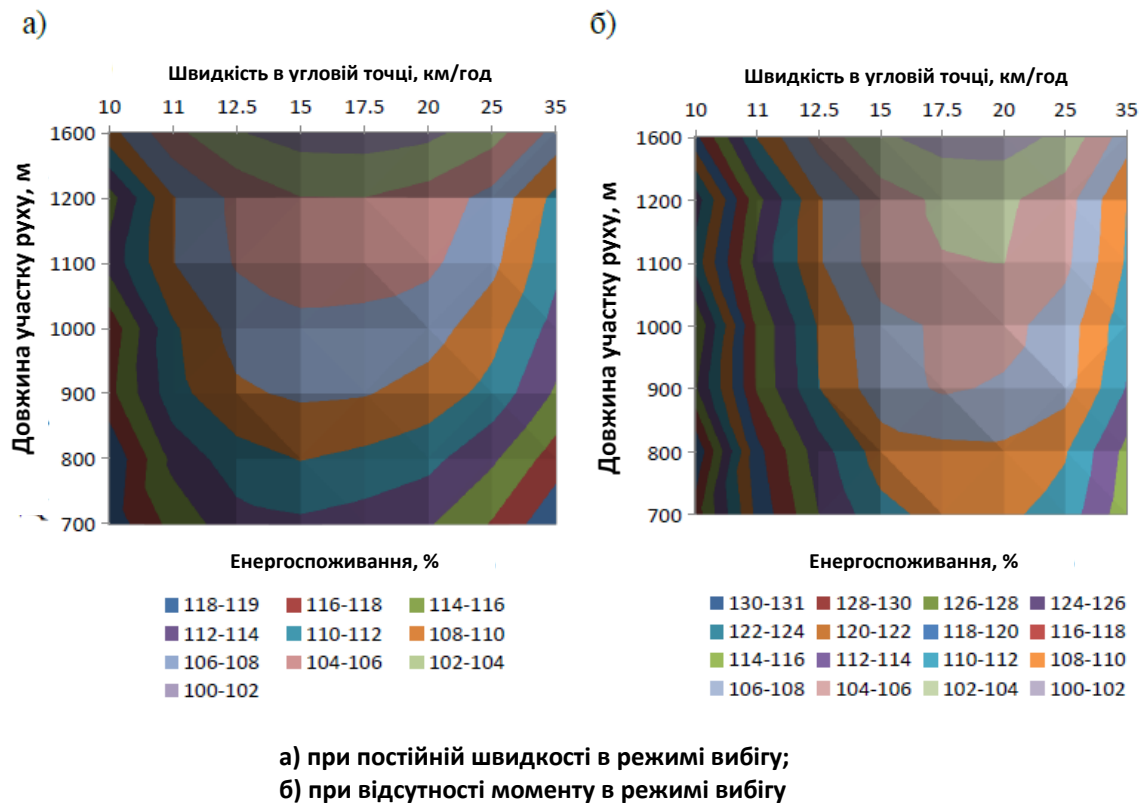


Рисунок 4.19 – Зміна ефективності приводу в залежності від положення кутової точки і довжини ділянки в режимі тяги

Як можна помітити, змінюючи швидкість, відповідну кутовій точці тягової характеристики в режимі тяги (рис. 2.1), прибути в точку призначення можна при будь-якому способі ведення поїзда за той же час. При цьому прискорення спочатку залишається на колишньому рівні, і далі знижується в порівнянні з початковим варіантом. Це призводить до того, що поїзду доводиться набирати більшу швидкість при кожній зміні кутової точки, але при цьому відчуваючи менші прискорення.

При зниженні швидкості, відповідної кутовій точці характеристики, можна вирахувати таку потужність, яка відповідала б найвищій ефективності всього приводу. Варто звернути увагу, що для конкретного приводу існує така кутова точка характеристики, при якій спостерігається найвища ефективність приводу як в режимі тяги, так і в режимі гальмування. Відмінність у порівнянні з початковою характеристикою становить до 5 % величини енергоспоживання

при русі в режимі тяги з постійністю швидкості в режимі вибігу. Потрібно відзначити, що в режимі гальмування оптимальна кутова точка лежить в діапазоні швидкостей, в той час як в режимі тяги вона має екстремальний характер і може бути виражена одним значенням швидкості для конкретної довжини ділянки і способу ведення поїзда.

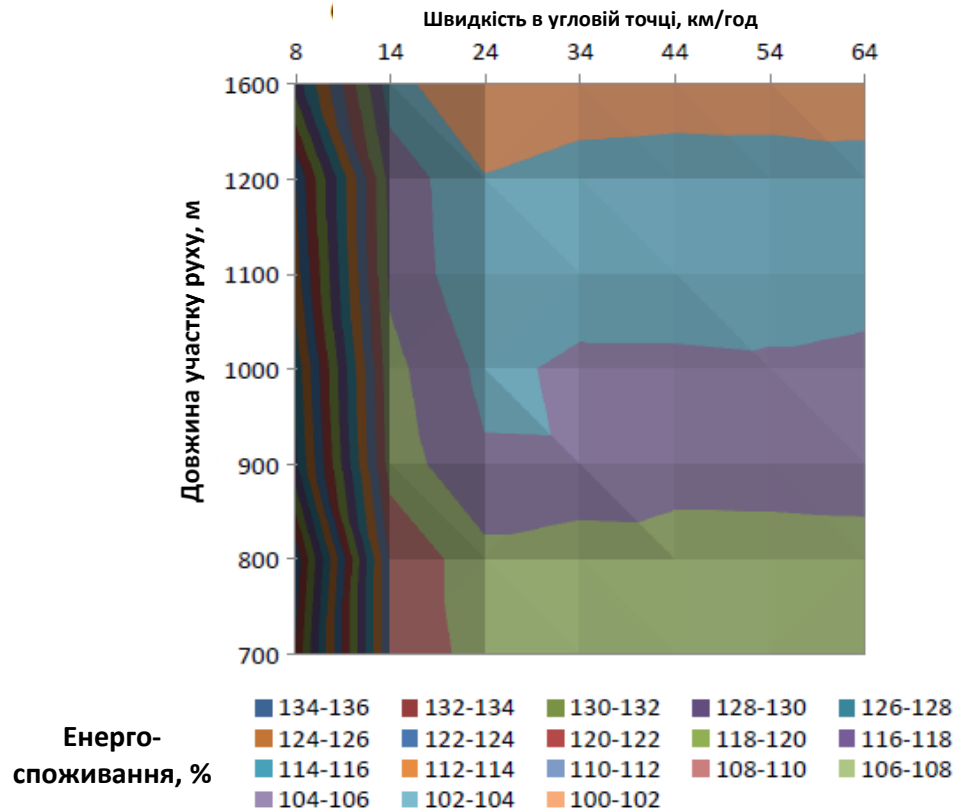


Рисунок 4.20 – Зміна ефективності приводу в залежності від положення кутової точки і довжини ділянки в режимі гальмування

Це означає, що в межах існуючої тягової характеристики, є така характеристика, при якій енергоспоживання приводу мінімально. На рис. 4.21 зображені криві, що проходять через максимум ефективності приводу в режимі тяги.

Використання оптимальних тягових характеристик дозволить в режимах з частковим навантаженням на привід знизити величину енергоспоживання до 5% в залежності від параметрів двигуна і збільшити життєвий цикл інвертора (за умови циклічного використання) до 210 % (максимальна величина). Вне-

сення такого режиму роботи приводу в життєвий цикл поїзда дозволить знизити вартість за рахунок використання інвертора з меншою потужністю (рис. 4.15).

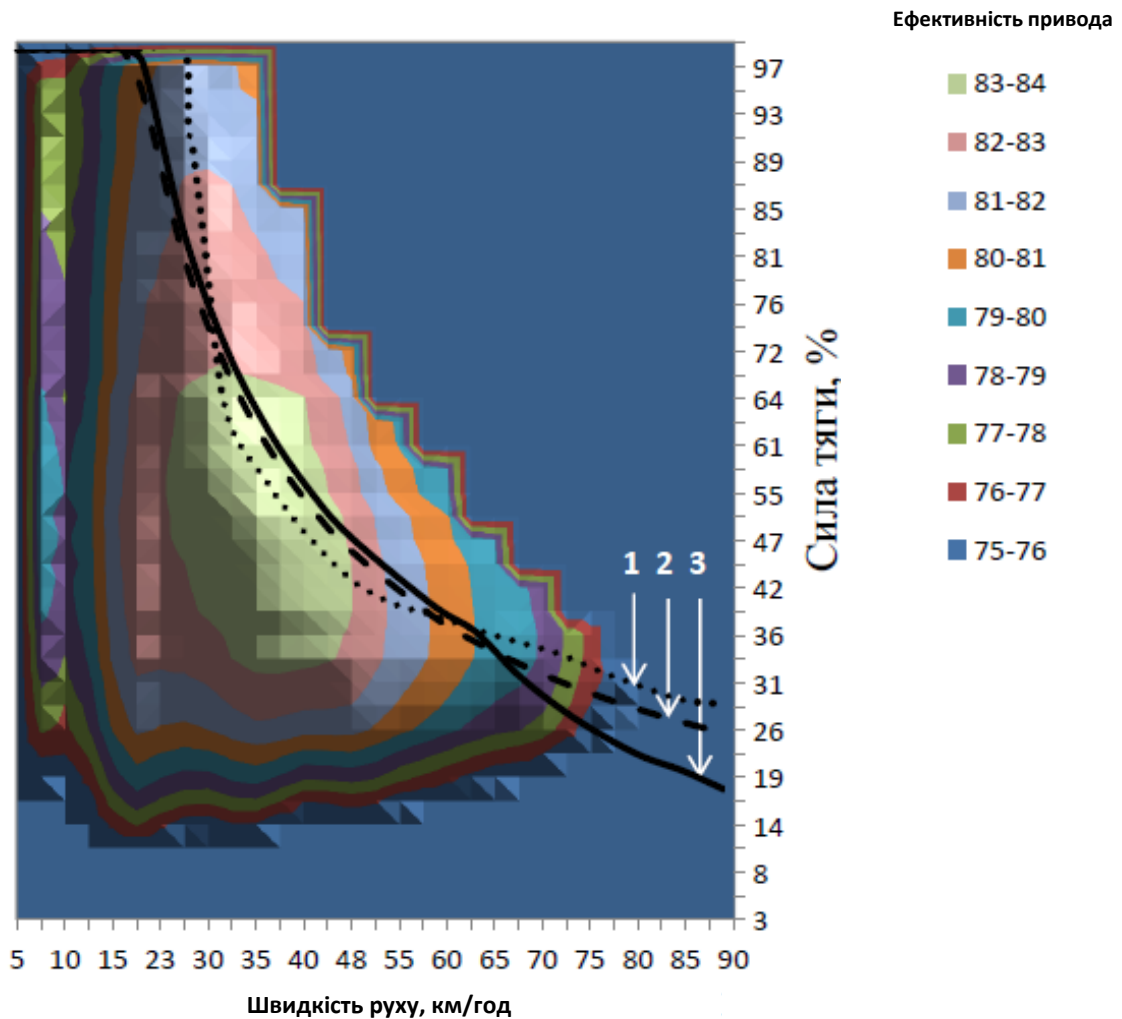


Рисунок 4.21 – Оптимальна тягова характеристика в режимі тяги: 1 – при виборі максимальної ефективності приводу; 2 – гіперболічна залежність; 3 – рух з постійною потужністю і постійним перекидним моментом

Такий режим роботи може застосовуватися при наявності резерву часу на всіх типах ЕРС за умови, що максимальна швидкість не буде перевищена.

Висновки

Виконано аналіз факторів, що впливають на енергоспоживання приводу вагонів метрополітену, яке в основному залежить з боку виробника від максимальної частоти модуляції інвертора, числа витків обмотки статора, активної довжини і діаметру ротора двигуна; з боку оператора – від режиму роботи.

За результатами моделювання змінності завантаження вагона метрополітену в залежності від станції, її віддаленості від центру, часу і напрямку на основі даних річних звітів метрополітенів по пасажиропотоку встановлено, що середнє завантаження вагона становить 25,1 % і воно має два локальних екстремуми 100 % і 6 8%, що характеризують пікові значення пасажиропотоку в будні дні.

Визначено найкраща сукупність параметрів асинхронного тягового приводу вагонів метрополітену за критерієм найменшого енергоспоживання. Проведена оптимізація конструкційних параметрів приводу для заданих умов навантаження, режимів роботи і заданого життєвого циклу за критерієм мінімального енергоспоживання. Це дозволило підвищити ефективність приводу до 11 %. Показана можливість подальшого підвищення ефективності системи (до 5 %) при використанні необхідної і достатньої потужності двигуна, що також супроводжується дворазовим підвищенням життєвого циклу інвертора.

Література

1. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 1. – 456 с.
2. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 364 с.
3. 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.
4. Калинин, В.К. Электровозы и электропоезда [Текст] / В.К. Калинин. – М.: Транспорт, 1991. – 184 с.
5. Системы управления и диагностики электровоза ЭП10 / Под ред. С. В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.
6. Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины [Текст] / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
7. Четвергов, В. А. Надежность локомотивов: учебник для вузов ж.-д. трансп. / В. А. Четвергов, А. Д. Пузанков.- М.: Маршрут, 2003. – 415 с.
8. Гельман М. В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. – Челябинск: Издательский цент ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
9. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения / Б. Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. – 416 с.
10. <https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/urban/metro.html>
11. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов [и др.]. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
12. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1996. – 297 с.
13. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

- 14.Владыкин, А.В. Выбор оптимальных конструктивных параметров асинхронного привода метрополитена с учетом жизненного цикла инвертора / А.В. Владыкин // Транспорт Урала. – 2018. – № 1 (56). – С. 63 – 68. – ISSN: 1815-9400.
- 15.Москаленко, В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Высшая школа, 2000. – 368 с.
- 16.Находкин, М.Д. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин. М.: Транспорт, 1976. – 624 с.