

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ПЕТРЕНКО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 629.429.3:621.313

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА
РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ
ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Любарський Борис Григорович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри електричного транспорту
та тепловозобудування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Матусевич Олександр Олександрович,
Дніпровський національний університет
залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна,
проректор з науково-педагогічної роботи;

доктор технічних наук, професор
Бабасв Михайло Михайлович,
Український державний університет
залізничного транспорту,
завідувач кафедри «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»;

доктор технічних наук, професор
Кононов Борис Тимофійович,
Харківський національний університет Повітря-
них Сил ім. І. Кожедуба, професор кафедри
електротехнічних систем комплексів озброєння і
військової техніки.

Захист відбудеться « 27 » квітня 2018 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізо-
ваної вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті “Хар-
ківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова,
2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного
університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002,
м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розіслано « 26 » березня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Якунін Д. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси перетворення енергії у електрорухомому складі (ЕРС) обумовлюється, в першу чергу, роботою тягового приводу (ТП). Цей процес, для найбільш перспективних для України асинхронних ТП, залежить від їх режимів роботи, які обумовлені профілем колії та графіком руху ЕРС, з одного боку, та режимами роботи системи управління, з іншого. Втрати, що виникають в елементах ТП, призводять до нагріву елементів його конструкції при цьому найбільші втрати у ТП виникають в електромеханічних перетворювачах енергії – тягових двигунах. Температура їх елементів конструкції збільшується з часом роботи і може перевищити допустимі конструктивні обмеження. Особливо це стосується температури ізоляції обмоток статора двигуна, яка обмежена класом застосованої ізоляції. Для зменшення температури в елементах конструкції двигунів використовуються системи охолодження, які підвищують ефективність теплообміну елементів конструкції двигуна при вентиляції. Системи охолодження потребують додаткових витрат для своєї ефективної роботи, що, в свою чергу, збільшує загальне енергоспоживання та зменшує ККД ЕРС в цілому. Таким чином в ЕРС з асинхронними ТП виникає науково-технічна проблема створення ефективних систем охолодження, які, з одного боку, забезпечували необхідні теплові умови для роботи асинхронних тягових двигунів (АТД), а з іншого, дозволили зменшити витрати енергії на охолодження та вентиляцію.

Можливими шляхами вирішення цієї проблеми є, з одного боку, зменшення втрат в елементах конструкції тягових двигунів, а з іншого, підвищення ефективності системи охолодження та вентиляції двигунів.

Режими руху ЕРС, які змінюються завдяки заданому графіку руху та навантаженнями, що обумовлені профілем колії, визначають роботу ТП в режимах з частковим навантаженням при яких ККД ТД нижче за максимальне, а втрати в елементах конструкції більші. Тому визначення оптимальних, за енергоспоживанням режимів руху дозволяє зменшити затрати на охолодження АТД та потрібних для їх відведення енергетичних та конструктивних потужностей, а також підвищити загальний ККД ЕРС в цілому.

Теплові процеси у тягових двигунах характеризуються великими значеннями постійної часу, що обумовлює дуже тривалий, понад десятки хвилин, нагрів двигуна до сталої температури. Однак електромеханічні процеси під час руху електрорухомого складу більш динамічні можуть змінюватися кілька разів на хвилину. При роботі ТП, крім режимів тяги та електричного (рекуперативного або реостатного) гальмування, в яких проходить перетворення енергії у електричній частині ТП, поширені режими вибігу та механічного (пневматичного) гальмування для яких характерна відсутність цього процесу, що обумовлює створення суттєво менш потужної системи охолодження. Тому для визначення теплового стану тягового двигуна необхідно врахування теплового навантаження за весь час роботи, що дозволить оптимізувати режими роботи та параметри системи охолодження для зниження її енергоспоживання.

Таким чином, вирішення комплексної задачі щодо створення наукових основ визначення оптимальних режимів роботи і параметрів системи охолодження

асинхронних тягових двигунів (АТД) є одною з актуальних науково-практичних проблем електричного транспорту залізниць та міст.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ» відповідно до держбюджетної науково-дослідної теми Міністерства освіти і науки України «Розробка практичних положень створення приміських швидкісних поїздів з нахилом кузовів з накопичувачів енергії» (ДР № 0113U000432), та госпдоговірної теми «Переобладнання тролейбуса ЮМЗ для роботи в автономному режимі для міста Кривого Рога» (ДР № 0115U004790).

Мета і задачі дослідження. *Метою досліджень* є створення наукових основ вибору оптимальних параметрів та режимів роботи систем охолодження АТД електротранспорту на базі сучасних і перспективних інформаційних технологій.

Для досягнення мети повинні бути вирішені наступні задачі:

- розробити математичну модель руху електрорухомого складу з асинхронними тяговими двигунами, яка враховує параметри колії, графік руху потягу та режими роботи тягового асинхронного приводу, що дає можливість визначити втрати в елементах конструкції АТД;

- визначити оптимальні, із урахуванням теплових процесів, режими роботи асинхронного ТП ЕРС;

- визначити вплив параметрів та режимів роботи систем охолодження АТД на тепловий стан елементів їх конструкції;

- розробити метод визначення оптимальних параметрів та режимів роботи систем вентиляції та тягового приводу під час руху ЕРС.

Предмет дослідження: електромеханічні та теплові процеси в тягових асинхронних приводах та системах охолодження тягових двигунів електрорухомого складу.

Об'єкт дослідження: системи електромеханічного перетворення енергії та охолодження приводів з АТД.

Методи дослідження. Теоретичною базою проведення досліджень є фундаментальні положення теорій проектування та оптимального управління ЕРС. Метод Гамільтона-Якобі-Беллмана – застосовано для визначення оптимального управління рухом електрорухомим складом; методи узагальненої теорії електричних машин – для створення задачі аналізу витрат у АТД; методи узагальненої теорії статичних напівпровідникових перетворювачів – для створення задачі аналізу витрат у автономному інверторі напруги (АІН); комбінований метод оптимізації, що включає до себе глобальний пошук, якій здійснюється генетичним алгоритмом з одноточечним кросовером і селекцією за принципом рулетки, та методом Нелдера – Міда, що вирішує задачу на завершальному етапі пошуку, застосовано для вирішення задач оптимізації режимів роботи тягових приводів; метод еквівалентних теплових схем заміщення (ЕТС) – для аналізу динамічних теплових режимів АТД; метод Вейля за узагальненим золотим перетином – для оптимізації параметрів та режимів роботи мотор-вентилятора охолодження АТД вантажного електровозу, а також параметрів вентилятора охолодження АТД трамваю.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше для теорії проектування електрорухомого складу поставлена і вирішена задача оптимізації системи охолодження асинхронного тягового двигуна за критерієм економічної ефективності, що дозволяє знизити втрати на охолодження АТД ЕРС. Запропоновано метод оптимізації параметрів та режимів роботи систем охолодження АТД ЕРС. Для вирішення задачі оптимізації системи охолодження запропоновано заздалегідь визначати залежності зміни втрат в елементах тягового двигуна за результатами моделювання руху поїзда на ділянці шляху по оптимальній траєкторії і при роботі тягового приводу в оптимальних режимах;

– отримала подальшого розвитку теорія керування електрорухомим складом з АТД шляхом створення експертної системи та програмно-орієнтованої моделі системи управління електрорухомим складом, яка заснована на рішенні рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана з використанням методу нелінійного програмування і зворотного рішення задачі відносно координати часу, що дало можливість створити експертну систему управління рухом ЕРС. Для зменшення об'єму обчислень запропоновано проводити визначення оптимальної експертної системи в зворотному напрямі відносно часу руху ЕРС – «зворотний підхід Беллмана». При цьому передбачається, що кінцева точка руху ЕРС відома – кінцева координата переміщення і заданий час руху, а кінцева швидкість в цій точці дорівнює нулю – що відповідає прибуттю потягу в кінцевий пункт;

– вперше запропоновано експертна система управління рухом ЕРС, що представлена у вигляді бази даних, яка складається з масивів оптимальних необхідних швидкостей руху, мінімальних витрат енергії і оптимальних режимів роботи тягового приводу, визначена в дискретизованому просторі часу, переміщення і поточної швидкості руху, що дозволяє визначити оптимальні режими руху ЕРС при заданих середньої швидкості руху на перегоні, обмеженнях швидкостей на ділянках та профілю колій;

– вперше запропоновано вираз для визначення ефективності тягового приводу електрорухомого складу. Вираз включає визначення ефективності як максимальне значення ККД ланки АТД-АІН в різних режимах роботи за умов обмежень по зчепленню та конструктивній швидкості, що дозволяє використовувати його в якості критерію при вирішенні задачі пошуку оптимальних значень електромагнітного моменту та ККД;

– вперше запропоновані цільові функції для визначення ефективності приводу, які дозволяють встановити оптимальні режими тягового приводу (ТП) при застосуванні різних режимів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), особливостями якої є наступне: для режимів розгону та гальмування запропоновано застосування векторної цільової функції з компонентами, що обумовлюють ККД та силу тяги, а для режиму підтримання швидкості руху – скалярної функції, яка обумовлена ККД приводу; в якості параметрів для режиму просторово-векторної ШІМ обрано вектор зі складовими ковзання та коефіцієнту модуляції, а для однократній ШІМ – ковзання; встановлені обмеження у вигляді подвійних нерівностей для ковзання та коефіцієнту модуляції (при просторово-векторній ШІМ), нерівностей, що обмежують фазний струм двигуна, а також обмеження за зчепленням, які дозволяють визначити основні енергетичні залежності та складові втрат у тягових

приводах однократній та просторово-векторній ШІМ при різних значеннях температури обмоток.

– вперше встановлено залежність зміни точки переходу з просторово-векторної до однократної ШІМ від температури АТД; визначено, що різний рівень розташування цієї точки обумовлено різним навантаженням магнітного кола двигунів, а як наслідок – різним рівнем коефіцієнту насичення, що дозволяє змінювати режими роботи АІН в залежності від температури АТД.

Практичне значення отриманих результатів для електричного транспорту полягає у наступному:

– створена методика оптимізації керування мотор-вентилятором охолодження тягових двигунів локомотивів з асинхронним тяговим приводом під час руху на ділянці колії з заданим профілем та графіком руху, що дає можливість визначати оптимальні потужності допоміжних систем вентиляції та може бути використана при розробці технічних завдань та конструкцій для нових типів ЕРС залізниць України;

– створена методика оптимізації діаметру та ширини лопатки вентилятора тягового асинхронного двигуна трамвайного вагону, що підвищує ККД ТП при одночасному збереженні робочих властивостей двигуна яка врахована при розробці виготовлені та експлуатації трамвайних вагонів Т-ЗВПА;

– розроблений алгоритм рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана для задачі руху ЕРС на ділянці шляху із заданим профілем і графіком руху, що дозволяє створити експертну систему управління рухом. Цей алгоритм покладено в основу запропонованої експертної система управління рухом, яка представлена у вигляді бази даних, що складається з масивів необхідних швидкостей руху та дозволяє визначити оптимальний, за енергоспоживанням, графік руху ЕРС. Обґрунтування режимів руху трамвайного вагону Т-ЗВПА з АТД на маршруті забезпечує раціональне споживання електроенергії та не призводить до перегріву ТД;

– розроблені рекомендації до встановлення залежності переходу тягового приводу з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ від температури обмоток які застосовані при проектуванні тягових електричних машин для сучасного рухомого складу магістрального та міського транспорту, що дозволяє підвищити загальний ККД ЕРС;

– вирішена задача оптимізації параметрів вентилятора АТД АД931 що встановлено у трамвайному вагоні Т-ЗВПА, для руху на маршрутах у м. Харків, що дозволяє зменшити втрати на вентиляцію тягових двигунів;

– оптимізовано режими керування та параметри системи вентиляції та охолодження для перспективного вантажного електровозу, під час руху з складам із 60 чотирьохвісних вагонів загальною масою 3600 тон в режимі підтримання середньої швидкості в 20 км/год на ділянках колії с заданим профілем та графіком руху, що дозволяє зменшити потужність мотор-вентилятора.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в ДП «ПВІ «Укрзалізничпроект» залізничного транспорту України» (м. Харків), ДП «завод Електроважмаш» (м. Харків), КП Салтівське трамвайне депо (м. Харків), та у навчальний процесі в НТУ «ХП» та ХНУМГ імені О.М. Бекетова.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи получені здобувачем особисто. Серед них – аналіз підходів до підвищення ефективності систем охолодження асинхронних тягових двигунів електрорухомого складу; запропоновані цільові функції для визначення ефективності приводу; перевірка адекватності математичної моделі по визначенню ККД приводу; ідентифікація елементів теплових схем АТД на базі теорії теплових процесів в електричних машинах; визначення параметрів зовнішніх та вбудованих мотор-вентиляторів; вибір оптимальних режимів роботи напівпровідникового перетворювача для живлення АТД; оптимізація параметрів вентилятора АТД трамвайного вагону; визначення оптимальних режимів руху електровозу з вантажним потягом, що обладнаний АТД, на ділянці колії з встановленим графіком руху та профілем.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях та симпозіумах: VIII «Eltrans» «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта», (Санкт-Петербург 2015), «Інформаційні технології, наука, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2016-2017), «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (Дніпро, 2016-2017), Науково–практична конференція магістрантів та аспірантів (Харків, 2016-2017), «ТРАНСЕЛЕКТРО-2017» (Дніпро, 2016-2017), а також на наукових семінарах Наукової ради з проблеми «Наукові основи енергетики», «Проблеми перетворення електричної енергії в системах електричного транспорту» та «Тягово-енергетичні аспекти підвищення ефективності електричної тяги постійного і змінного струмів» (Харків, 2016-2017).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 33 наукових публікаціях, з них 25 – у фахових наукових виданнях України (25 – у наукометричних базах, з них 3 – в наукометричній базі Scopus та 1 – Web of science), 1 – у наукових періодичних фахових іноземних виданнях, 7 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 394 сторінки, з них основного тексту - 327, включаючи: 87 рисунків по тексту, 19 рисунків на 20 окремих сторінках, 6 таблиць по тексту та 2 таблиці на 2 окремих сторінок, 314 найменувань використаних джерел інформації на 35 сторінках, 7 додатків на 26 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступній частині** обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з Державними програмами і бюджетними темами, сформульовані мета та основні задачі досліджень, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** наведено аналіз напрямків підвищення ефективності рухомого складу. Розглянуто основні положення і підходи до визначення ефекти-

вності ЕРС. Зазначено, що зважаючи на тривалий цикл роботи ЕРС, витрати на його розробку, виробництво і утилізацію незрівнянно нижчі за витрати на експлуатацію, тому сучасні тенденції розвитку ЕРС будуються на зниженні витрат на їх використанні. Визначені два основні напрями підвищення ефективності ЕРС. Перший напрям, пов'язаний зі зниженням витрат енергії при русі ЕРС, приводить розробників до необхідності підвищення ККД тягового приводу в цілому і його складових (ТД, тягових статичних перетворювачів, механічної частини тягового приводу) в усіх режимах роботи, а також допоміжних систем одною з яких є система охолодження та вентиляції тягових двигунів. Другий напрям визначається зниженням витрат на обслуговування і ремонт ЕРС.

У розділі визначені основні параметри для оптимального проектування альтернативних типів тягових приводів. Зазначено, що розглянуті перспективні схеми вхідних перетворювачів, які застосовуються на ЕРС з АТД, стабілізують напругу на проміжному контурі. Таким чином, вхідний перетворювач і вихідний розділені між собою. Режими роботи першого визначаються контактною тяговою мережею, а другого (тягового) – рухом ЕРС на ділянці колії та режимами роботи ТД. Тому при дослідженні ефективності роботи ТП ЕРС розглядається тільки вихідний перетворювач.

Визначені критерії ефективності тягового приводу та основні методи до визначення енергетично оптимальних параметрів управління ЕРС. Зазначається, що необхідною є розробка ефективного підходу для розрахунку енергооптимальних режимів ЕРС і оптимальних режимів роботи ТП, а також створення програмно-алгоритмічного комплексу, який забезпечить можливості практичного використання методів оптимального управління в реальних умовах експлуатації ЕРС згідно до обраних критеріїв та обмежень. Розглянуті основні групи чинників, що впливають на ефективність роботи тягового приводу: електромеханічні – пов'язані з рухом поїзда на ділянці колії і теплові – пов'язані з виділенням втрат в ТД при його роботі, що додає обмеження в роботу тягового приводу.

Проведено аналіз основних підходів до моделювання теплового стану тягових двигунів які базуються на принципі умовного розділення ТД на систему однорідних тіл. Розглянуто основні положення методу теплових параметрів та його застосування для моделювання нагріву ТД ЕРС. В зв'язку з постійним змінням перевищень температур, втрати в ТД в процесі роботи на перегоні міняються, що знижує точність розрахунків та обмежує можливості використання методу лише інженерними розрахунками.

Розглянуто застосування методу теплових схем для визначення перегрівів окремих частин ТД. Він ґрунтується на поданні елементів машини у вигляді вузлів (джерел теплоти) з тепловиділенням у них, усередненим по всьому об'єму елемента. Перевагою цього методу є можливість встановлення температури найбільш навантажених в тепловому відношенні елементів ТД. Проте застосування цього методу різко підвищує порядок математичної моделі теплового стану ТД і, як наслідок, ускладнює процес розрахунку режимів роботи ЕРС.

Аналіз моделей, створених на основі методу теплових схем для різних близьких по конструкції, але не однакових ТД показує, що вони надзвичайно схожі по структурі. В той же час навіть електричні машини, що істотно відрізняються по

конструкції, містять значне число аналогічних конструктивних елементів. Це дозволяє засновувати універсальну математичну модель для розрахунку теплових полів в електричних машинах, яка легко адаптується до конструкції будь-якого ТД. У основу універсальної моделі покладено застосування блокової структури для дослідження будь-якої електричної машини у поєднанні з методом еквівалентних теплових схем заміщення вузлів ТД. Точність моделі конкретного електродвигуна в цьому випадку залежить від числа блоків. За результатами проведеного аналізу для подальших досліджень в якості основного підходу для аналізу теплового стану асинхронного ТД обрано метод на основі теплових схем заміщення.

За результатами досліджень першого розділу сформульована мета та задачі досліджень дисертації.

Другий розділі присвячено моделюванню руху електрорухомого складу.

Зазначається, що для визначення оптимальних параметрів систем охолодження і вентиляції тягових двигунів необхідно визначити режими їх роботи, оскільки вони в першу чергу обумовлюють процес перетворення енергії в тяговому двигуні, а також об'єм і графік виділення втрат в його різних частинах.

Основою рішення задачі руху пропонується створення експертної системи ведення електрорухомого складу на ділянці шляху, яка дозволяє визначати оптимальний закон зміни режимів роботи рухомого складу на основі критерію витрати енергії при заданій середній швидкості руху.

Загальною проблемою стохастичного управління є складність рішення і експоненціальна залежність зростання потреби у кількості пам'яті і обчислювального часу. Причина в тому, що стан об'єкту дослідження має бути представлений у вигляді дискретної області координат, що і призводить до експоненціального зростання кількості розрахункових точок, що вимагає експоненціально наростаючу кількість обчислень. В цьому випадку рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана, а конкретніше – зворотний підхід Беллмана, дозволяє отримати рішення при прийнятній кількості обчислень. Оскільки вирішувана задача у своїй основі представляє завдання оптимального управління у безперервній часовій області, необхідно представити формулювання загальної задачі оптимального управління в реальному часі.

Основне рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана, що покладено в основу математичної моделі оптимального руху ЕРС має вигляд

$$\min_{u \in U} \left[g(x, u) + \nabla_t J^*(t, x) + \nabla_x J^*(t, x) f(x, u) \right] = 0, \forall t, x$$

де x – вектор стану; u – вектор керування; $g(x, u)$ – потужність затрат у часі; ∇_t – оператор похідної за часом; $J^*(t, x)$ – функція затрат енергії; ∇_x – оператор похідних за станом; $f(x, u)$ – похідна за часом вектору стану.

Розроблена експертна система управління електрорухомим складом, заснована на рішенні рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана з використанням методу нелінійного програмування і зворотного рішення задачі відносно координати часу.

Для зменшення об'єму обчислень запропоновано проводити визначення оптимальної експертної системи в зворотному напрямі відносно часу руху ЕРС – «зворотний підхід Беллмана». При цьому передбачається, що кінцева точка руху

ЕРС відома – кінцева координата переміщення і заданий час руху, а кінцева швидкість в цій точці дорівнює нулю – що відповідає прибуттю потягу в кінцевий пункт.

Розроблена математична модель руху ЕРС на основі диференціальних рівнянь руху, що враховують складові опори руху: основне – тертя кочення, опір від ухилів і від кривих ділянок шляху

$$m_{rs} \frac{dv_{nc}}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (F_A - W_{nc}), \quad (1)$$

де m_{rs} – маса ЕРС; v_{nc} – швидкість руху ЕРС; t – поточне значення часу; $1+\gamma$ – коефіцієнт інерції частин ТП, що обертаються; F_A – прискорення, що створює ЕРС; W_{nc} – повний опір руху.

Відмінною особливістю моделі є визначення сили ЕРС, що розвивається, і витрати енергії шляхом використання залежностей ККД ЕРС, визначеного заздалегідь для усіх режимів роботи з урахуванням обмеження по зчепленню. Введено поняття функції, яка визначає режим роботи приводу та дозволяє спростити розрахунки за визначенням витрати енергії, для одного часового кроку. Ця функція покладена в основу програмно-орієнтованої моделі системи управління ЕРС і визначається за виразом

$$E_{step} = \frac{sign}{(\eta)^{sign}} \left[\begin{array}{l} (1+\gamma)m \cdot \frac{v(t) - v(t-tstep)}{tstep} + a_{rr} + \\ + b v_{avg} + c v_{avg}^2 + \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000} \end{array} \right] \cdot v_{avg} \cdot tstep, \quad (2)$$

де $sign$ – функція, яка визначає режим роботи 1 – при тязі та вибігу та -1 – при усіх режимах гальмування; η – ККД приводу; m – маса рухомого складу; $v(t)$, $v(t-tstep)$; v_{avg} – початкова, кінцева та середня швидкість за крок розрахунку; c_{r0} , c_{r1} – постійні коефіцієнти до розрахунку опорів; a_{rr} , b , c – коефіцієнти опору коченню; R – радіус кривої; i – ухил шляху; g – прискорення вільного тяжіння; $tstep$ – часовий крок.

Розроблено алгоритм рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана для задачі руху ЕРС на ділянці шляху із заданим профілем і графіком руху, що дозволяє створити експертну систему управління рухом. Особливостями цього алгоритму є застосування штрафних функцій для опису обмежень, що накладаються графіком руху: досягнення потягом кінцевого пункту за заданий час руху, обмеження швидкості на ділянках шляху, а також відсутність простоїв потягу в процесі руху. Єдиний підхід штрафних функцій застосований також для введення обмежень по зчепленню. Такий підхід дозволяє значно понизити витрати розрахункового часу і стандартизувати (спростити) процедури розрахунку витрат енергії.

Запропонована експертна система управління рухом ЕРС, що складається з масивів оптимальних необхідних швидкостей руху, мінімальних витрат енергії і оптимальних режимів роботи тягового приводу, визначена в дискретизованому просторі часу, переміщення і поточної швидкості руху.

Розглянувши різні підходи до визначення раціональних режимів тягового приводу, в роботі обґрунтований вибір наступних основних режимів: рух потягу з

максимальною силою тяги; рух потягу з максимальною силою рекуперативного гальмування; режим вибігу; режим механічного гальмування; режим підтримки заданої швидкості з використанням сили тяги і роботи ТП в режимі максимального ККД; режим підтримки заданої швидкості з використанням сили рекуперативного гальмування і роботи ТП в режимі максимального ККД.

Таким чином у другому розділі розроблена математична та програмно-орієнтована модель руху ЕРС, що враховують складові опори та часові обмеження руху і використовує експертну систему управління рухом, яка створена на базі алгоритму рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана.

Третій розділ присвячено оптимізації режимів роботи тягового приводу і тягового двигуна електрорухомого складу. Ефективність тягового приводу в певному режимі його роботи оцінюватимемо за критерієм максимуму його ККД за умови дотримання вимог, що накладаються режимами роботи. Тому завдання визначення ефективності тягового приводу зводиться до знаходження максимуму функції ККД приводу.

З урахуванням вище сказаного ефективність тягового приводу можливо навести у вигляді виразів

$$\eta_1 = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 1; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ F_d \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d > 0 \end{array} \right\}, & \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 2; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d > 0 \end{array} \right\} \\ \\ \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 3; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d < 0 \end{array} \right\}, & \left\{ \begin{array}{l} U_{op} = 5; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ F_d \rightarrow \min, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d < 0 \end{array} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

де U_{op} – номер режиму роботи тягового приводу, що дорівнює 1 при режимі тяги, 2 та 3 підтримання заданої швидкості руху при тязі та гальмування відповідно та 5 – при рекуперативному гальмуванні; η_1 – ККД ланки АТД – АІН; F'_k – сила обмеження за зчепленням, F_d – сила тяги; v_{\max} – конструктивна швидкість руху.

Створена математична модель для визначення ефективності тягового приводу. Модель включає в себе визначення основних втрат у ТД з урахуванням насичення магнітної системи, що визначається за результатами вирішення рекурентного нелінійного рівняння:

$$k'_{нас} = f(|I_0|), \dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2\right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s}\right) + j(X_m + X'_2)}; \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_\Sigma};$$

$$Z_\Sigma = R_1 + jX_1 + \frac{(R_m + jX_m)\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2\right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s}\right) + j(X_m + X'_2)}; R_1 = R_{1ном} t_r / t_{гннo};$$

$$X_1 = X_{1ном} f_1 / f_{1ном}, R'_2 = R_{2ном}' t_r; X'_2 = X_{2ном}' f_1 / f_{1ном};$$

$$R_m = R_{гннo} \frac{f_1^{1,5} k_{насном}^2}{k_{нас}^2 f_{1ном}^{1,5}}; X_m = \left((X_{гннo} + X_{1ном}) \frac{k_{насном}}{k_{нас}} - X_{1ном} \right) \frac{f_1}{f_{1ном}}.$$

де $k'_{нас}$ – коефіцієнт насичення магнітного кола на наступному кроці розрахунку; \dot{I}_1, \dot{I}_0 – струми кола статора та намагнічування; \dot{U} – фазна напруга статора; Z_Σ – загальний опір двигуна в режимі, що розраховується; $R_{1ном}, X_{1ном}, R_{2ном}', X_{2ном}', R_{гннo}, X_{гннo}$ – параметри схеми заміщення у номінальному режимі; $R_1, X_1, R'_2, X'_2, R_m, X_m$ – параметри схеми заміщення у режимі, що розраховується; $f_{1ном}, k_{насном}, t_{гннo}$ – частота живлення, коефіцієнт насичення магнітного кола та температура обмотки у номінальному режимі роботи; $f_1, k_{нас}, t_r$ – частота живлення, коефіцієнт насичення магнітного кола та температура обмотки у режимі, що розраховується,.

Для вирішення рекурентного рівняння використовується метод одновимірної мінімізації функції нев'язки на базі методу «ділення навпіл».

Також у моделі визначення ефективності ТП враховані втрати від вищих гармонік напруги в міді та сталі, а також механічні та додаткові втрати.

В розробленій моделі враховуються статичні та динамічні втрати у IGBT транзисторах та діодах напівпровідникового перетворювача. Модель доповнена виразами, що визначають ККД ланки АТД-АІН та розраховують обмеження за зчепленням. Для вирішення задачі визначення оптимальних режимів роботи ТП необхідно вирішити чотири задачі умовної оптимізації параметрів роботи тягового приводу. Для кожний з цих задач необхідно розглянути два режими: застосування однократної або просторово-векторної ШІМ.

Цільові функція для визначення оптимальних режимів роботи ТП, визначаються відповідно до режиму роботи ТП. Для режиму розгону обертається векторна функцію з наступними параметрами $F_{c1} = [1 - \eta_1 \rightarrow \min, -F_d \rightarrow \min]^T$.

Перший компонент обрано таким чином, що при його мінімізації приходить максимізація ККД тягового приводу.

Для режиму рекуперативного гальмування векторна цільова функція має вигляд $F_{c5} = [1 - \eta_1 \rightarrow \min, F_d \rightarrow \min]^T$.

Для режиму підтримання заданої швидкості руху у якості цільової функції оберемо $F_{c3} = F_{c4} = 1 - \eta_1 \rightarrow \min$.

Величину втрат, отже і ККД приводу, можливо визначити виходячи з ковзання тягового двигуна (s), напруги двигуна (фазної або лінійної) та частоти обертання. В зв'язку з тим, що режими роботи визначаються для усіх швидкостей руху – частот обертання АТД, частота обертання є постійним наперед заданим показником, заданим при вирішенні задачі пошуку оптимального режиму роботи ТП. Для застосування відомих методів оптимізації використані відносних параметрів для вирішення задачі оптимізації такі як: коефіцієнт модуляції (K_m), що обумовлює напруги живлення та ковзання АТД. Вектор параметрів для вирішення задачі вибирається відповідно до режимів роботи напівпровідникового перетворювача. Так у режимі просторово-векторної ШІМ має вигляд $X_{PV} = [s \ K_m]^T$, а у режимі однократної ШІМ має скалярний вигляд $X_O = s$.

Встановлені наступні обмеження у вигляді нерівностей: обмеження діючого значення струму фази АТД за умовами можливості напівпровідникових приборів та апаратури контролю: $I_1 < I_{\max}$, де I_{\max} – максимальне значення фазного струму АТД; обмеження по зчепленню колеса з рейкою $|F_d| < |F'_k|$; обмеження на ковзання та коефіцієнт модуляції що відповідають режимам роботи ТП та напівпровідникового перетворювача.

Розроблено алгоритм вирішення задачі аналізу по визначенню ефективності тягового приводу, в основу якого покладена створена математична модель.

Шляхом порівняльного аналізу експериментально визначених і обчислювальних тягових характеристик та значень ККД була доведена адекватність запропонованої математичної моделі та створеної на її основі задачі аналізу по визначенню ККД приводу. Максимальне відхилення при розрахунку втрат складає 7,42%, що цілком допустимо для розрахунків, які проводяться.

Для вирішення задачі оптимізації було обрано комбінований метод: глобальний пошук здійснюється генетичного алгоритму з одноточечним кросовером і селекцією за принципом рулетки. На завершальному етапі оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера - Міда.

В якості прикладу застосування розробленого підходу було проведено оптимізацію режимів роботи тягових приводів трамвая Татра ТЗВПА та вантажного електровозу у всьому діапазоні частот обертання тягових двигунів які наведено на рис. 1 та рис. 2 в залежності від режиму роботи ТП та напівпровідникового перетворювача, а також від температури обмоток АТД які дозволяють ідентифікувати ККД приводу. Ці залежності використані при моделювання руху ЕРС на ділянці колії в (1) для визначення F_A в залежності від електромагнітного моменту (M) та в (2) для визначення ККД ТП. Визначено основні енергетичні залежності та складові втрат у тягових приводах при однократної та просторово-векторній ШІМ для різних значень температури обмоток.

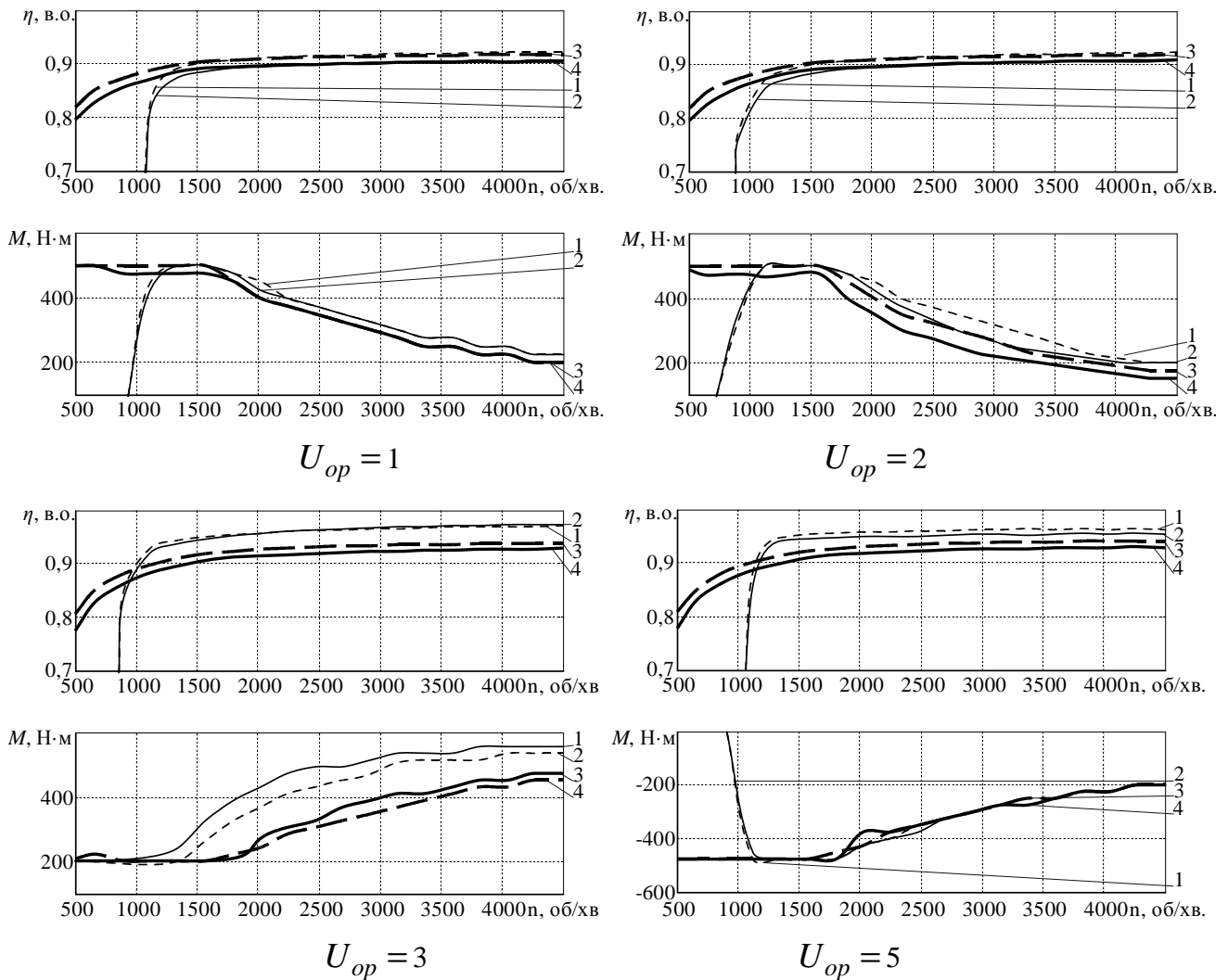


Рисунок 1 – Оптимальні залежності ККД та електромагнітного моменту тягового приводу трамвая Т-ЗВПА у режимах роботи ТП згідно виразу (4): 1– при однократній ШІМ та при температурі двигуна 40 °С, 2– при однократній ШІМ та при температурі обмоток 180 °С, 3– при просторово-векторній ШІМ та при температурі обмоток 40 °С, 4– при просторово-векторній ШІМ та при температурі обмоток 180 °С

За результатами аналізу залежностей, що наведені на рис.1 та рис.2 встановлені точки переходу тягового приводу з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ в залежності від температури обмоток, які обумовлюється рівновагою ККД приводу при різних режимах ШІМ. Розроблено алгоритм пошуку частоти обертання ТД, при якій оптимально здійснювати перехід від просторово-векторної до однократної ШІМ для усіх режимів роботи тягового приводу залежності яких наведено на рис. 3.

Встановлено залежність зміни точки переходу з просторово-векторної до однократної ШІМ від температури ТД які наведені на рис. 3. У режимі розгону ЕРС цей перехід здійснюється на частоті обертання близько 1125..1350 об/хв для трамвая (рис. 3а) та 510..540 об/хв для електровозу (рис. 3б), і незначно змінюється від температури двигуна. Перехід при рекуперативному гальмуванні здійснюється при більших значеннях частот обертання: 1013..1800 об/хв для трамвая (рис. 3а) та 540..600 об/хв для електровозу (рис. 3б).

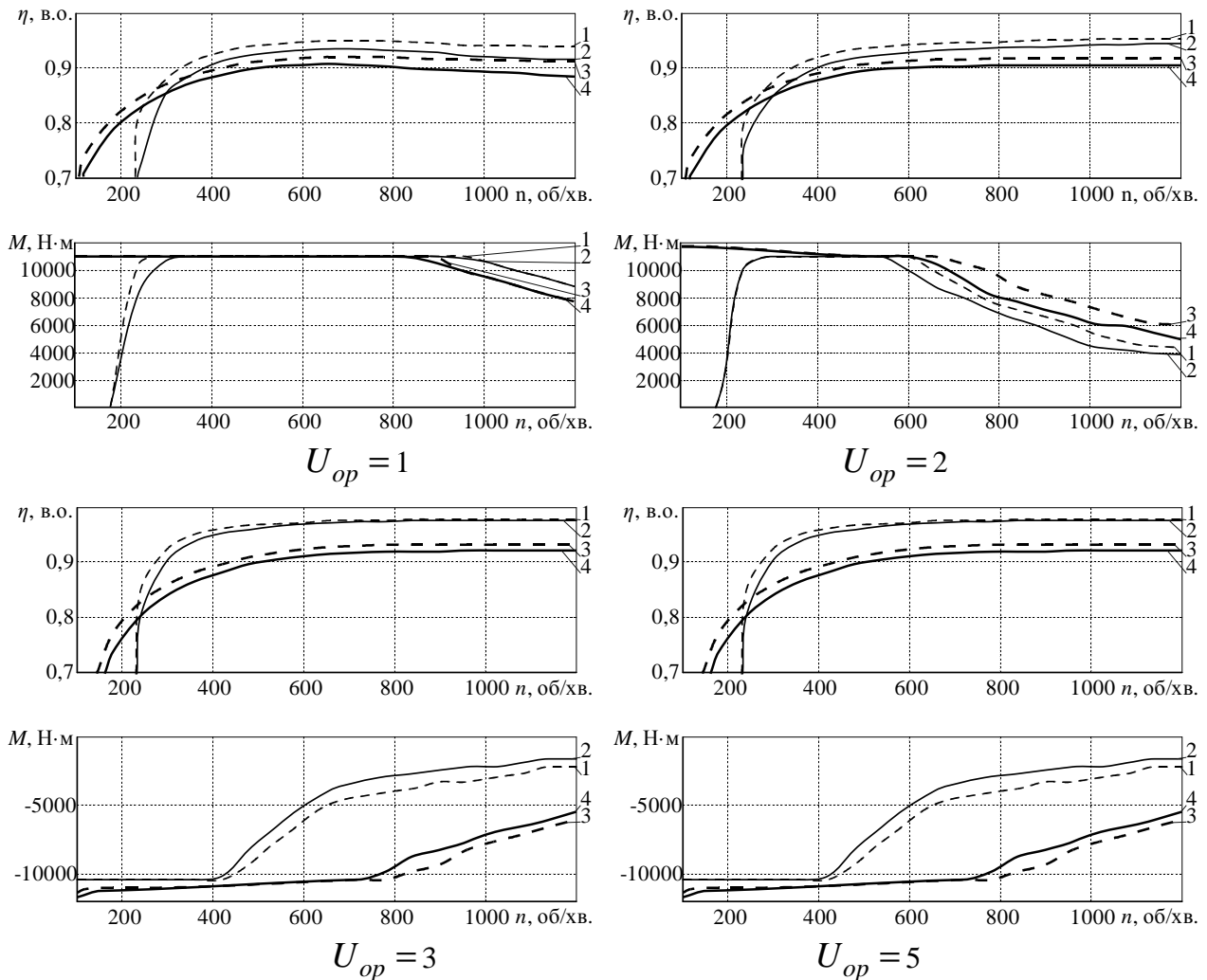


Рисунок 2 – Оптимальні залежності ККД та електромагнітного моменту тягового приводу вантажного електровозу у режимах роботи ТП згідно виразу (4): 1– при однократній ШІМ та при температурі обмоток 40 °С, 2– при однократній ШІМ та при температурі обмоток 180 °С, 3– при просторово-векторній ШІМ та при температурі обмоток 40 °С, 4– при просторово-векторній ШІМ та при температурі обмоток 180 °С

При збільшенні температури частота обертів точки переходу у трамвая зростає до 1800 об/хв при температурі обмоток близько 120 °С, а потім зменшується до 1350 об/хв при температурі 180 °С (рис. 3а). У тяговому приводі електровозу спостерігається збільшення частоти обертання точки переходу при рості температури (рис. 3б). В режимі тяги при підтриманні заданої швидкості руху частота обертання точки переходу збільшується з ростом температури у трамвая з 1800 об/хв до 4275 об/хв (рис. 3а), а у електровозу з 300 до 390 об/хв (рис. 3б).

При гальмуванні у режимі підтримання заданої швидкості точка переходу розташована при частоті обертання 1013 об/хв у трамвая (рис. 3а) та 210...270 об/хв у електровозу (рис. 3б).

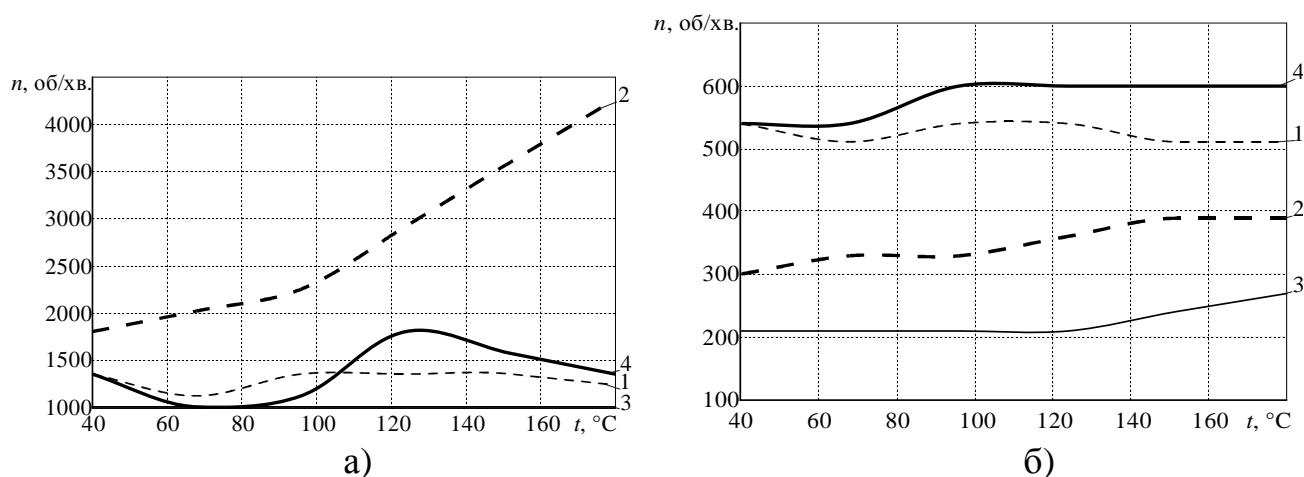


Рисунок 3 – Точка переходу тягового приводу трамвая ТЗВПА (а) та електровозу (б) з режиму просторово-векторної до однократній ШІМ при режимах $U_{op} = 1-1$, 2-2, 3-3, 4-5

Різний рівень розташування цієї точки обумовлено різним навантаженням магнітного кола двигуна, а отже, різним рівнем коефіцієнту насичення, внаслідок чого тягові характеристики приводів відрізняються.

Таким чином у третьому на основі створеної математичної моделі та алгоритму вирішення задач аналізу, для визначення ефективності тягового приводу знайдені оптимальні режими роботи асинхронного ТП ЕРС, з урахуванням температури обмоток АТД.

Четвертий розділ дисертації присвячено моделюванню теплового стану АТД. Зазначається, що для визначення теплового стану АТД у кожному з режимів роботи необхідно скласти систему рівнянь для кожного з тіл, що входять до їх конструкції. Кількість та вид рівнянь залежить від конструктивних особливостей системи обходження двигуна. Розглянуто технічні заходи для охолодження АТД. Відзначено, що на рухомому складі електротранспорту можливо використання більшості технічних рішень, що застосовуються для охолодження асинхронних електричних машин. Найбільш поширенні у теперішній час конструкції двигунів з подачею охолоджуючого повітря за допомогою труб, що підводять, або що підводять та виводять повітря при використанні способу захисту IP23 з аксіальною системою переміщення повітря. Однак при відносно малих потужностях до 200...350 кВт можливо застосування ступеня захисту IP44 з обрешеченою оболонкою, що обдувається вбудованим вентилятором та застосування двоконтурної системи охолодження. На рухомому складі міського електротранспорту можливо застосування водяних систем охолодження, що застосовуються для охолодження статора двигунів зі ступенем захисту IP44.

На основі методу ЕТС розроблена узагальнена математична модель теплових процесів в АТД. Розглянуто складові узагальненої ЕТС АТД та створені найбільш поширені ЕТС (рис. 4) та математичні моделі АТД з внутрішньою та зовнішньою системою вентиляції.

Для розрахунку ЕТС пропонується використати метод вузлових потенціалів для електричних кіл. На його підставі для запропонованої універсальної ЕТС мо-

же бути складена система диференціальних рівнянь теплового балансу. У матричному виді система представляється вираженням:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{u} = [\mathbf{C}]^{-1} \cdot [\mathbf{DP} + \mathbf{L} \times \mathbf{u}],$$

де \mathbf{u} – матриці-стовпці середніх перегрівань над температурою охолоджувального середовища у відповідних конструктивних елементах електричної машини, \mathbf{C} – матриця теплоємностей відповідних конструктивних елементів, на які умовно розбивається АТД, \mathbf{DP} – матриця-стовпець потужностей тепловиділення у відповідних конструктивних елементах АТД, \mathbf{L} – матриця теплових провідностей

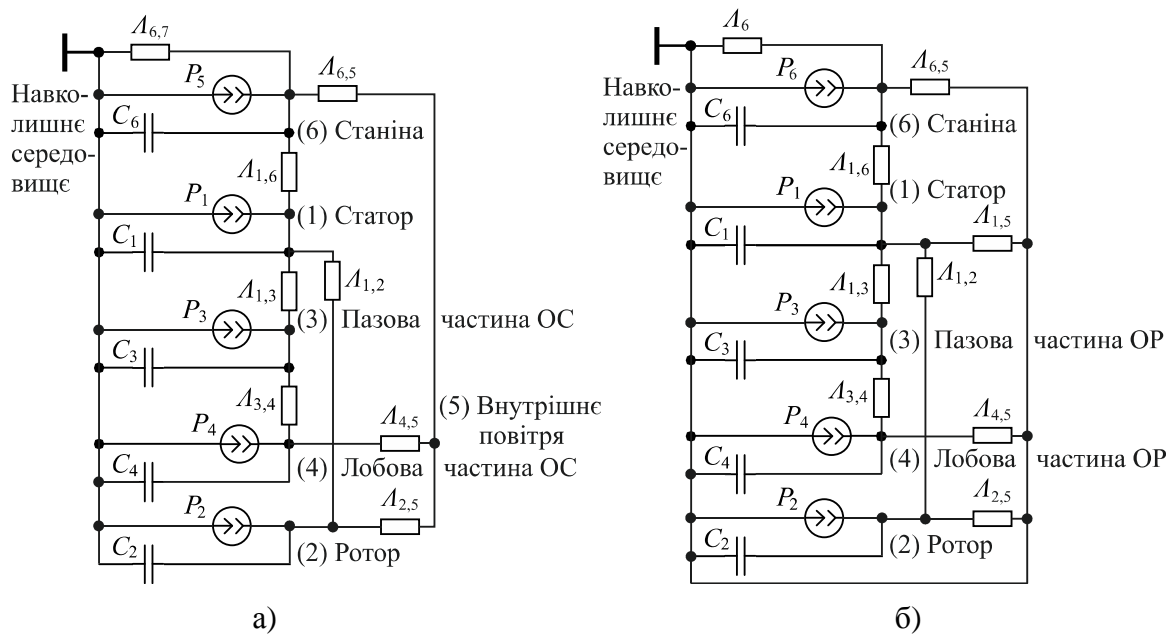


Рисунок 4 – ЕТС для АТД з ступенем захисту: а) IP44, IP54; б) IP22, IP23

Матриці потужностей тепловиділення \mathbf{DP} та провідностей \mathbf{L} складаються на основі метода вузлових потенціалів для електричних кіл.

Рішення цієї системи першого порядку, методом Рунге-Кутта, дозволяє розглянути зміну температур конструктивних елементів АТД при перехідних процесах. Проведено ідентифікацію елементів теплових схем АТД на підставі теорії теплових процесів в електричних машинах. Визначено параметри зовнішніх та вбудованих мотор-вентиляторів.

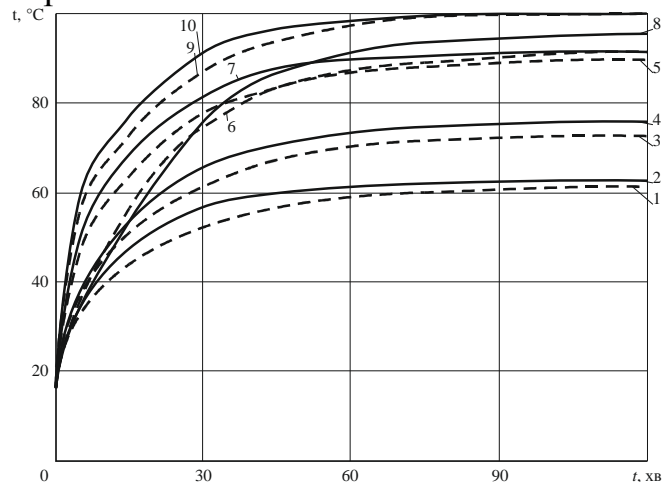
Для підтвердження достовірності розроблених моделей теплового стану АТД була створена його експериментальна фізична модель та стенд для досліджень на основі асинхронного двигуна АИР100S4 у якому на стадії виготовлення були закладені термодатчики. Експериментальні дослідження теплового стану проводилися на випробувальному стенді ХДУМГ ім. Бекетова (м. Харків) (рис.5 а).

Аналіз значень температур вузлів отриманих експериментально та за даними розрахунків, які наведено на рис. 5б, показує, що на початкових ділянках, при температурах значно менших температур, що встановилися, відмінності складають 6 % – 8 %. У міру нагріву двигуна значення відмінностей істотно зменшують-

ся і не перевищують 4 %, що свідчить про адекватність математичної моделі теплового стану двигуна в нестационарних режимах.



а)

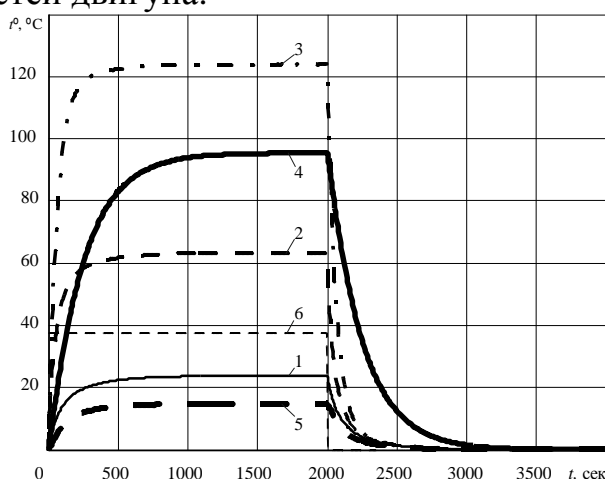


б)

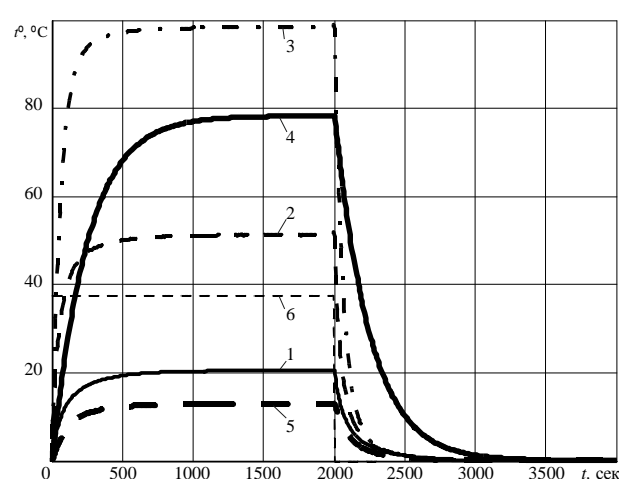
Рисунок 5 – Зовнішній вигляд експериментального стенду для дослідження теплового стану асинхронного двигуна (а) та експериментальні та розрахункові криві нагрівання двигуна АІР100S4 (б): 1,2 – внутрішнє повітря; 3,4 – пазова частина обмотки статора; 5,6 – лобова частина обмотки статора; 7,8 – осердя статора; 9,10 – ротор (розрахункове та експериментальне значення, відповідно).

На прикладі асинхронних двигунів АД 917 та АД 931 було розглянуто результати моделювання теплового процесу нагріву його до сталої температури (рис. 6 та 7).

Показано, що для внутрішньої вентиляції для тривалого режиму роботи в АД 917 достатньо частоти обертання мотор-вентилятора на рівні 1050 об/хв при однократній ШІМ та 510 об/хв при просторово-векторній ШІМ (рис. 6). Таким чином при роботі в режимі просторово-векторної ШІМ можливо значне зменшення продуктивності роботи системи охолодження без зменшення робочих властивостей двигуна.



а)



б)

Рисунок 6 – Перевищення температури елементів конструкції АД917 в залежності від часу роботи при внутрішній вентиляції та живленні від напівпровідникового перетворювача, що працює в режимі однократної ШІМ (а) та просторово-векторної ШІМ (б): 1 – осердя статора; 2 – лобова частина обмотки статора; 3 – пазова частина обмотки статора; 4 – ротор; 5 – станина; 6 – навантаження.

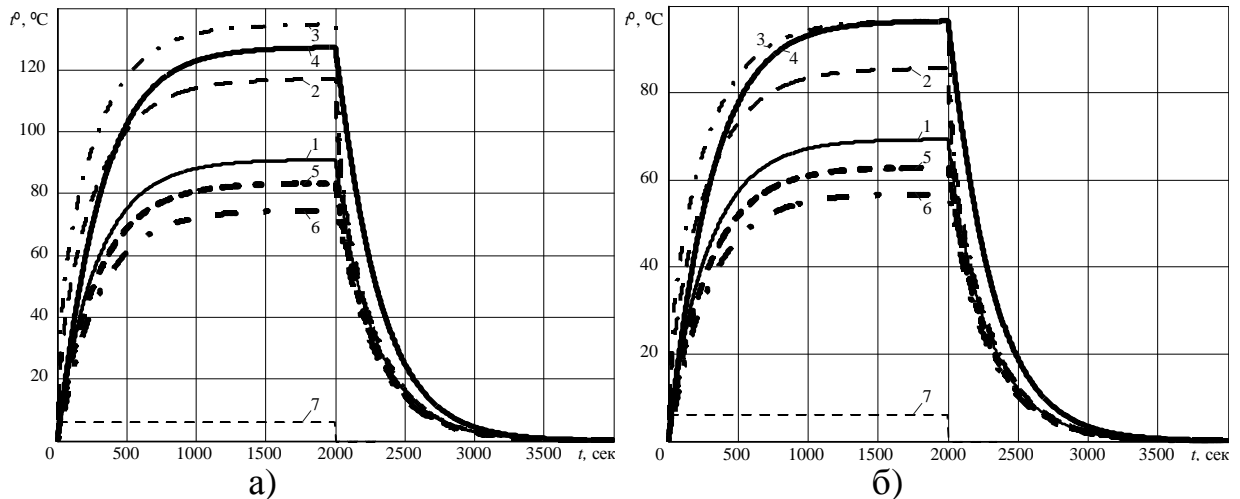


Рисунок 7 – Перевищення температури елементів конструкції А931 в залежності від часу роботи при зовнішній вентиляції та живленні від напівпровідникового перетворювача, що працює в режимі однократної ШІМ (а) та просторово-векторної ШІМ (б). 1– осердя статора; 2 – лобова частина обмотки статора; 3 – пазова частина обмотки статора; 4 – ротор; 5 – ВІ; 6 – станина; 7 – навантаження.

Для визначення раціональних режимів роботи системи охолодження АТД в роботі проведено моделювання теплових режимів в залежності від різної частоти обертання мотор-вентилятора. Встановлено, що для усіх режимів роботи систем вентиляції та режимів роботи напівпровідникового перетворювача температура елементів конструкції АТД знижується з ростом частоти обертання мотор-вентилятора, що обумовлено підвищенням потоку охолоджуючого повітря та збільшенням теплових провідностей між навколишнім середовищем та іншими елементами конструкції двигуна. Характер змін має нелінійний характер.

Проведено аналіз теплового стану АТД з зовнішньою вентиляцією на прикладі АД 931 (рис. 7). Показано, що пазова частина обмотки статора у АД 931, яка має найбільше температурне навантаження може нагрітися до сталої температури 134,67 (рис. 7) в режимі однократної ШІМ 96,64 °С (рис. 7) в режимі просторово-векторної ШІМ. Температура ротора досягнути 127, 3 °С (рис. 7) в режимі однократної ШІМ 96,47°С, а в режимі просторово-векторної ШІМ (рис. 7). Цей факт обумовлено неможливістю безпосереднього підводу охолоджуючої речовини (повітря) до джерел втрат – активних елементів АТД (ротору та статора). Постійні ж часу при зовнішній вентиляції значно більші ніж при внутрішній. Вони складають у АД 931 560..580с (рис. 7). Більшу постійну часу має ротор АТД. Взагалі характер процесів нагріву тягових двигунів має близький характер.

Таким чином у четвертому розділі дисертації розроблені математичні моделі теплових процесів в АТД з зовнішньою та внутрішньою системою вентиляції на основі методу ЕТС та ідентифіковані її елементи на підставі теорії теплових процесів в електричних машинах; шляхом фізичного моделювання доказана адекватність математичної моделі теплового стану АТД.

включення ($t_{омк}$) яку можливо використати в якості параметру для оптимізації роботи мотор-вентилятора АТД ЕРС. Площа перетину повітряпроводу та внутрішній діаметр колеса вентилятора визначається площею вхідного отвору двигуна, яка в свою чергу залежить від геометрії його активних частин. Геометрія в свою чергу залежить від компоновки ЕРС. Отже ці чинники при оптимізації систем охолодження змінюватися не повинні. Інші чинники, такі як зовнішній діаметр (D_l) та ширина колеса (b_l) вентилятора можуть бути застосовані для оптимізації параметрів самовентиляції.

Встановлені обмеження які використовуються при оптимізації систем охолодження АТД. Зазначається, що перша група обмежень пов'язана з конструктивними параметрами систем охолодження. Так, для систем самовентиляції, оптимізований вентилятор та розмір і конструкція ребер охолодження не повинні перевищувати встановлені геометричні розміри базової конструкції. Також розміри активних та механічних частин АТД повинні бути такими, як у базової конструкції, що обумовлено використання сучасних технологій проектування при розробці конструкції більшістю сучасних виробників електрообладнання для ЕРС.

При використанні примусової вентиляції, що здійснюється за допомогою зовнішнього мотор-вентилятора, геометричні обмеження накладаються в першу чергу на геометричні розміри вентилятора. Також накладаються умови на частоту обертання мотор вентилятора, що визначає потужність (тиск та витрати повітря) системи охолодження та вентиляції. Другим комплексом обмежень є максимальні перевищення температури, що виникають в обмотках АТД при русі рухомого складу на заданій ділянці шляху та обумовлені класами ізоляції та матеріалами, які в них використовуються. Їх можливо представити виразом $u_{max} < u_{dop}$, де u_{max} , u_{dop} – вектори стовбці перегрівань елементів АТД та допустимих значень цих перегрівань.

Розроблено методику оптимізації керування мотор-вентилятором вентиляції та охолодження тягових двигунів вантажного локомотива з асинхронним тяговим приводом при русі на ділянці із заданими профілем та графіком руху, особливостями якої є наступне:

- методика основана на вирішенні задачі умовної мінімізації за модернізованим критерієм економічної ефективності системи вентиляції та охолодження методом Вейля за узагальненим золотим перетином;
- в якості параметрів оптимізації обрані наступні величини: температура включення мотор-вентилятору та кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятора, також встановлені обмеження у вигляді нерівностей;
- задача аналізу системи вентиляції та охолодження тягових двигунів основана на моделюванні теплових режимів АТД за узагальненою еквівалентною тепловою схемою.

Для тестової задачі оптимізації керування системою вентиляції та охолодження, на прикладі перспективного вантажного електровозу, при русі з составом із 60 чотирьохвісних вагонів загальною масою 3600 тон в режимі підтримання середньої швидкості в 20км/год, проведено рішення тягової задачі (рис. 8), визначено залежність зміни втрат у АТД у часі (рис. 9) та проведено рішення оптимізації за

критерієм економічної ефективності (рис.10) методом Вейля (жирною лінією показано хід пошукового методу зі стартової точки, що позначена ромбом, до точки оптимуму, що зазначається великим кружком; тонкими лініями та маленькими кружками зазначені додаткові кроки та проміжні точки пошукового методу).

Заразом отримані наступні оптимальні значення: температура включення мотор-вентилятора – 41,7 °С; кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятора – 3; розрахункова частота обертання мотор-вентилятора – 970 об/хв. (рис. 10); потрібна потужність мотор-вентилятора складає 5,5 кВт, що значно менше за потужність базового мотор-вентилятора, яка складає 22 кВт та має частоту обертання 2950 об/хв.

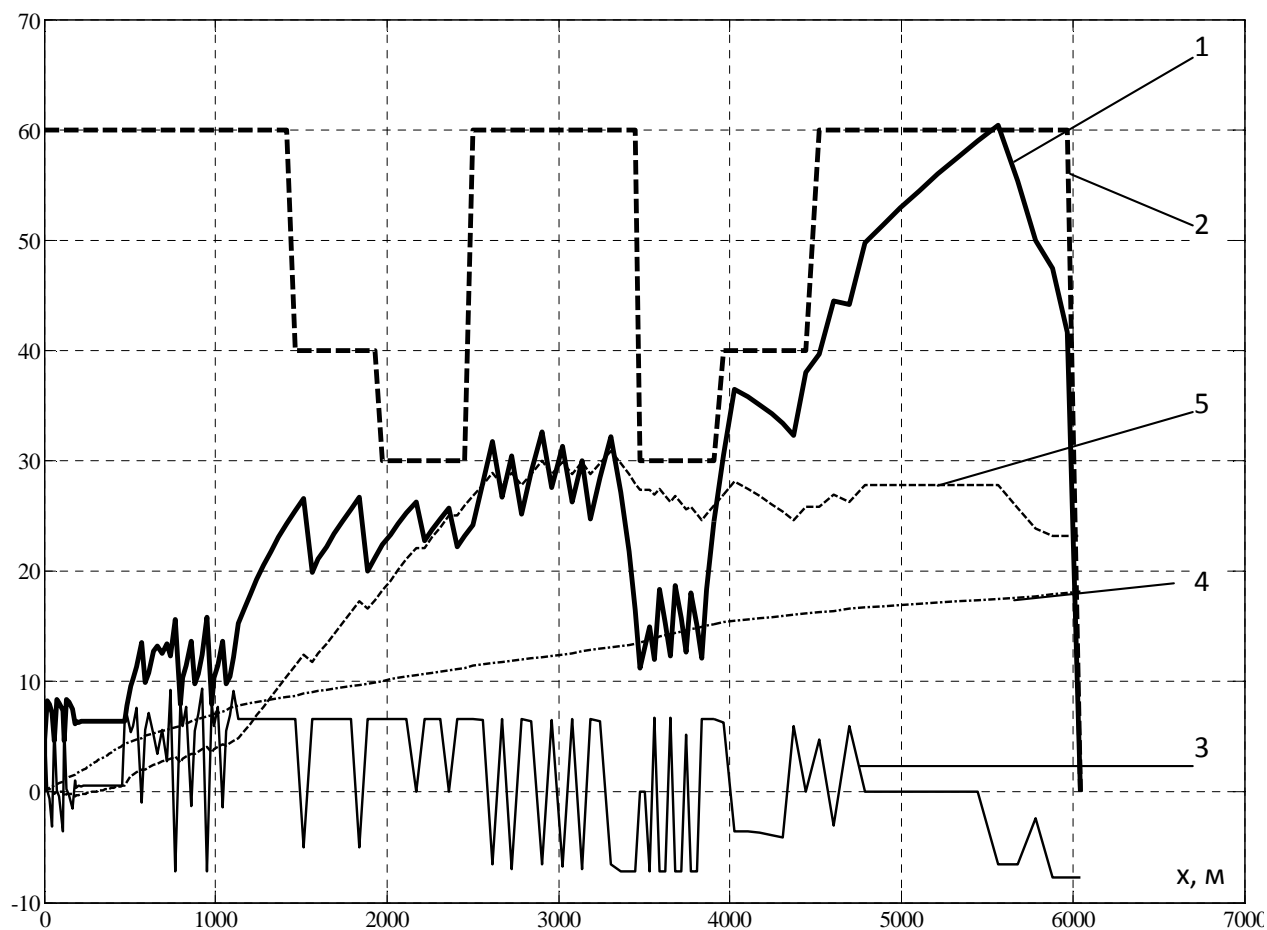


Рисунок 8 – Результати вирішення тягової задачі при русі вантажного потягу: 1- швидкість руху (v), км/год; 2- обмеження швидкості, км/год; 3- сила тяги/100, ($F_{rr}/100$) кН; 4 – час руху (t), хв; 5 – витрати енергії/10 ($E/10$), кВт·год

Результати моделювання теплових режимів АТД АД917 при оптимальному керуванні системи вентиляції приведені на рис. 11. Встановлено, що найбільше перегрівання має пазова частина обмотки статора АТД, що складає 139,5 °С на 14941 с з початку руху і не перевищує допустиме значення у 140 °С. Включення мотор-вентилятора відбувається на 472 с з початку руху. Далі мотор-вентилятор працює зі штатною частотою обертання 570 об/хв.

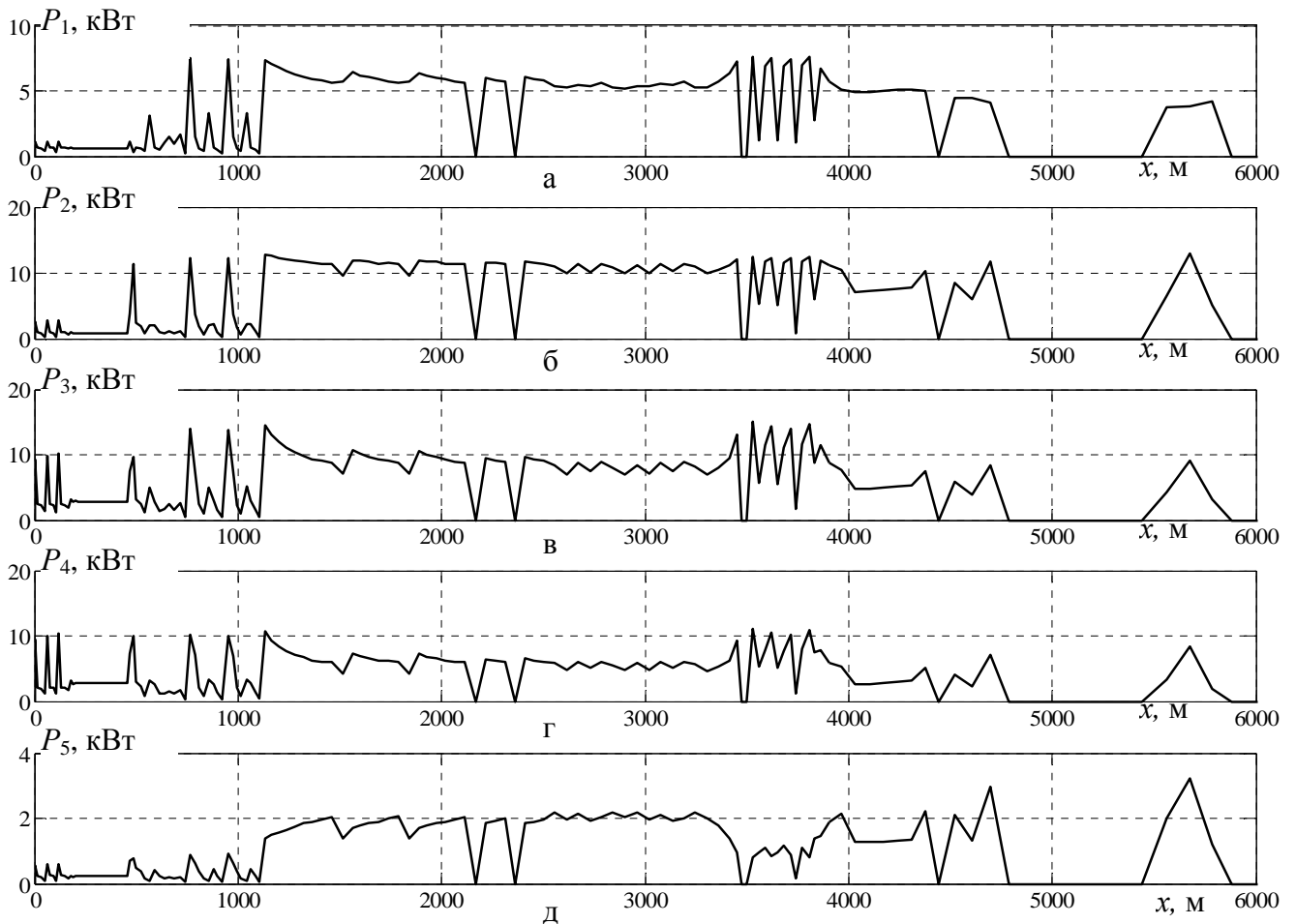


Рисунок 9 – Втрати у тяговим двигуном: а - втрати у сталі статора; б - втрати у роторі; в - пазовій частині обмотки статора; г - лобовій частині обмотки статора; д - механічні втрати

В роботі розроблено методику оптимізації параметрів вентилятора АД трамвайного вагону, що рухається на ділянці колії із заданими профілем та графіком руху, особливостями якої є вирішення задачі умовної мінімізації за модернізованим критерієм економічної ефективності системи охолодження методом Вейля за узагальненим золотим перетином; та аналіз системи охолодження АД засновано на моделюванні теплових режимів за узагальненою еквівалентною тепловою схемою; в якості параметрів оптимізації обрані наступні величини: зовнішній діаметр та ширина лопатки.

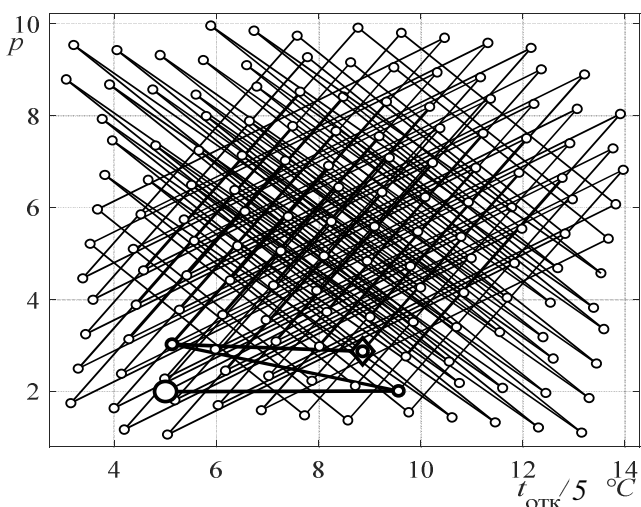


Рисунок 10 – Хід вирішення задачі оптимізації системи охолодження електровозу методом Вейля

Вирішення тестової задачі проведено на прикладі тягового двигуна АД931, встановленого у трамвайному вагоні Т-3ВПА, який рухається на ділянках колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного кола 602 мр/н м.

Вирішення тестової задачі проведено на прикладі тягового двигуна АД931, встановленого у трамвайному вагоні Т-3ВПА, який рухається на ділянках колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного кола 602 мр/н м.

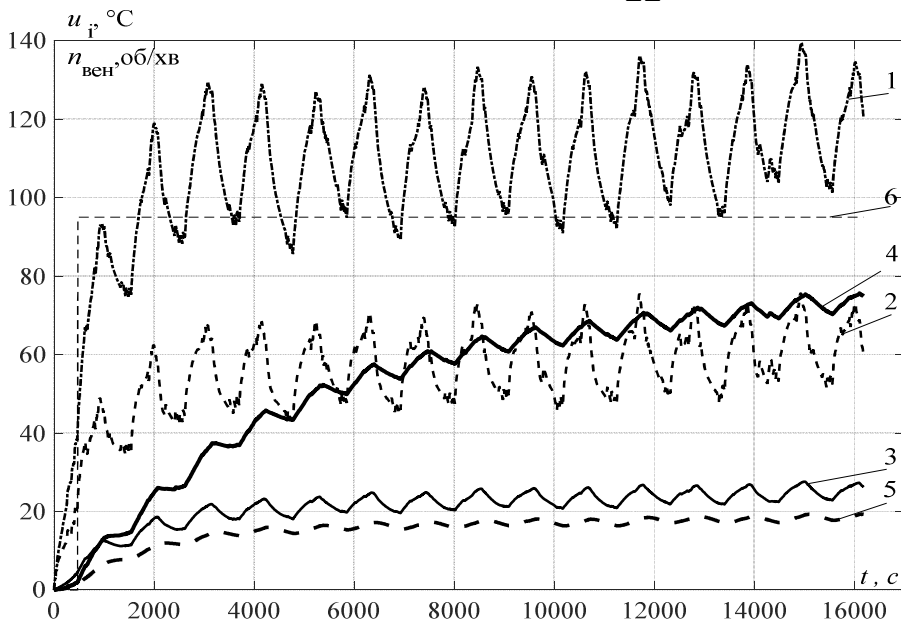


Рисунок 11 – Результати моделювання теплового стану тягового двигуна АД917 вантажного електровозу на ділянках колії. Залежності перегрівань над температурою охолоджувального середовища $^{\circ}\text{C}$ від часу: 1– пазової частини обмотки статора, 2 – лобової частини обмотки статора; 3 – осердя статора, 4- ротору; 5 – станини. 6– частота обертання мотор-вентилятора

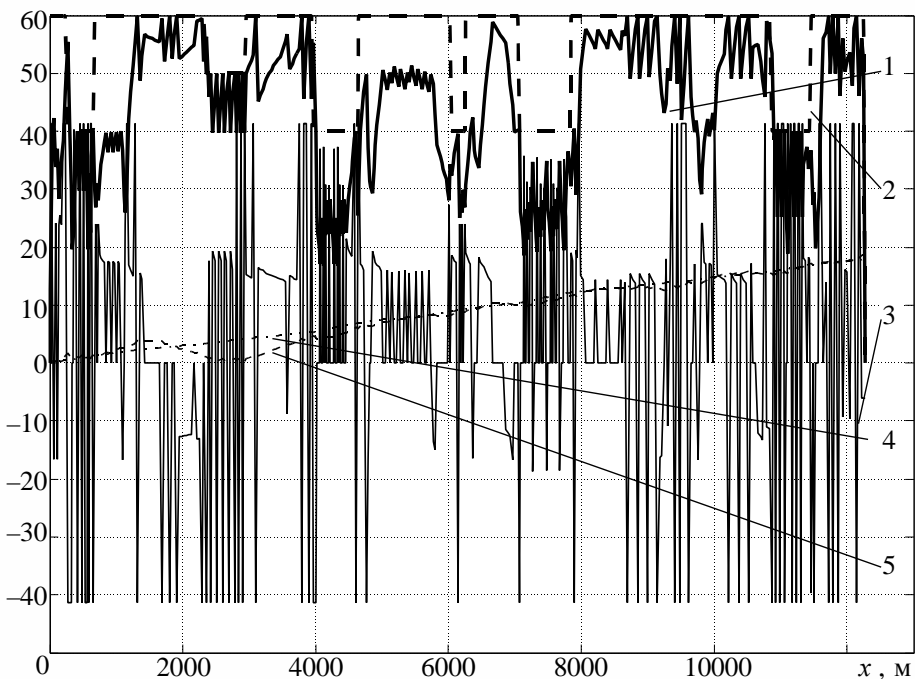


Рисунок 12 – Результати вирішення тягової задачі при русі трамвайного вагона Т-3ВПА з тяговим двигуном АД931: 1 – швидкість руху (v), км/год; 2 – обмеження швидкості, км/год; 3 – сила тяги, ($F_{\text{т}}$) кН; 4 – час руху (t), хв, 5 – витрати енергії (E), кВт·год

Харків та в зворотному напрямі, що повторювалося чотири рази проведено рішення тягової задачі (рис. 12), визначено залежність зміни втрат в АД у часі (рис. 13) та проведено рішення оптимізації за критерієм економічної ефективності (рис.14).

За результатами розрахунків отримано: діаметр вентилятора $D_l = 308,2$ мм (рис. 14), ширина лопатки вентилятора $b_l = 15,7$ мм (рис. 14), критерій оптимальності у розглянутій задачі становив значення 0,0408.

Встановлено, що порівняно з базовою конструкцією критерій ефективності знизився на 27,6%. (0,052). Як видно з графіків на рис. 15, найбільше перегрівання має пазова частина обмотки статора АД, що складає $139,6^{\circ}\text{C}$ на 3363с з початку руху і не перевищує допустиме значення у 140°C .

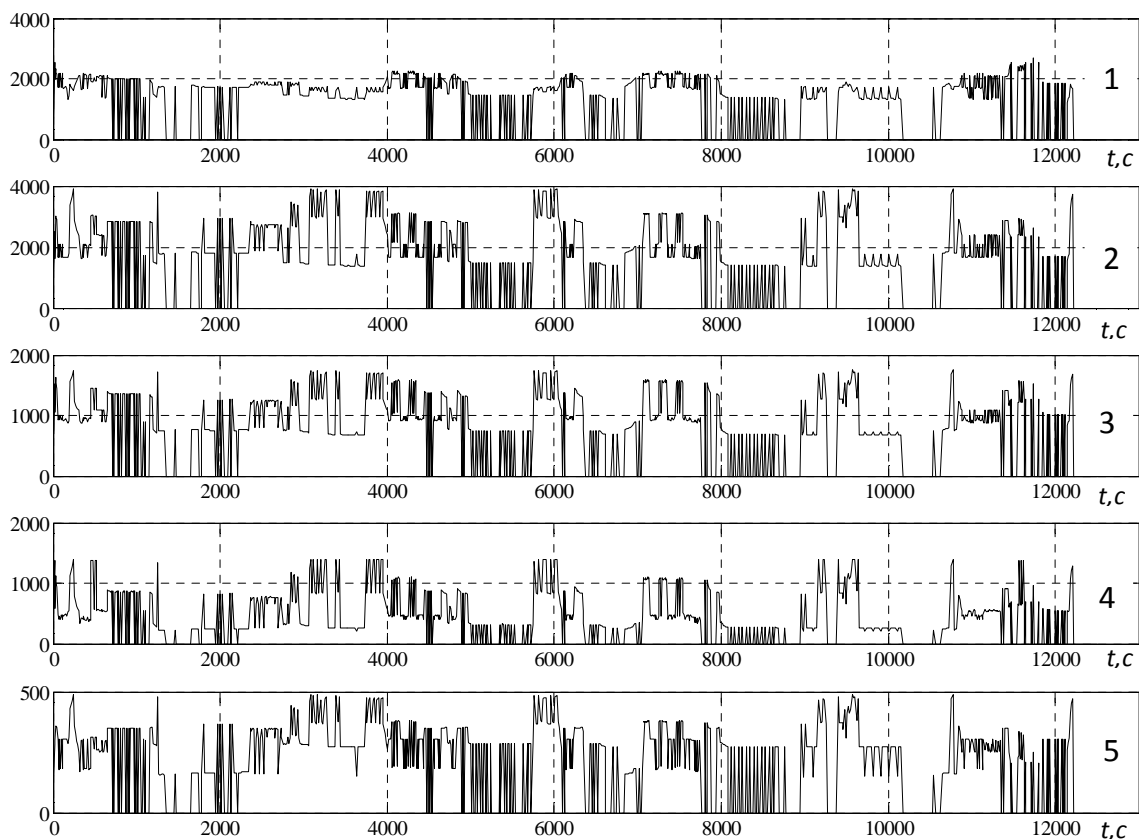


Рисунок 13 – Втрати у тяговому двигуні. 1 – втрати у сталі статора P_1 , Вт; 2 – втрати у роторі P_2 , Вт, 3 – пазовій частині обмотки статора P_3 , Вт, 4 – лобовій частині обмотки статора P_4 , Вт, 5 – механічні втрати P_5 , Вт.

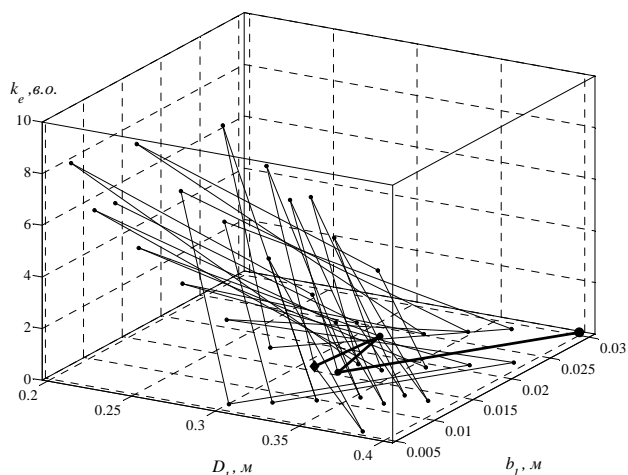


Рисунок 14 – Хід вирішення задачі мінімізації системи охолодження трамваю

У додатках наводяться результати розрахунку складових втрат тягових приводів, матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій здобувача.

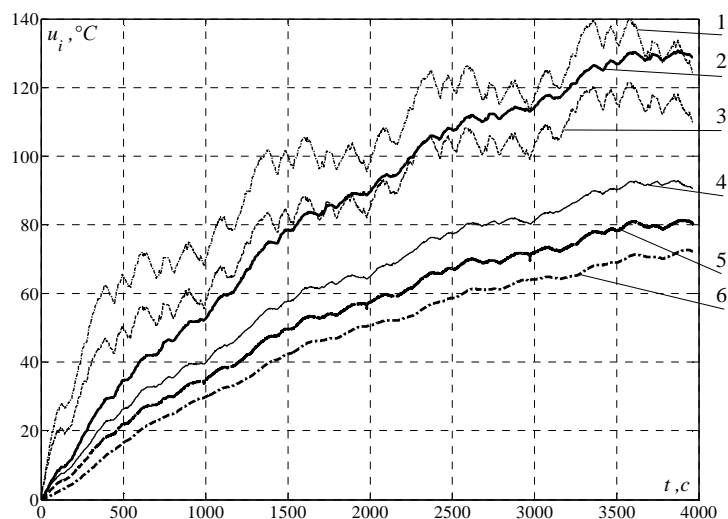


Рисунок 15 – Залежності перегрівань над температурою охолоджувального середовища тягового двигуна АД931 °С від часу: 1 – пазовій частині обмотки статора, 2 – ротору; 3 – лобовій частині обмотки статора; 4 – осердя статора, 5 – внутрішнє повітря, 6 – станини.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична проблема створення наукових основ щодо вибору оптимальних параметрів та режимів роботи систем охолодження асинхронних тягових двигунів електротранспорту.

1. Розроблена математична та програмно-орієнтована модель руху ЕРС на основі його диференціальних рівнянь, що враховують складові опори руху: основне – тертя кочення, опір від ухилів і від кривих ділянок шляху. Відмінною особливістю моделі є визначення сили ЕРС, що розвивається, і витрати енергії шляхом використання залежностей ККД ЕРС, визначеного заздалегідь для усіх режимів роботи з урахуванням обмеження по зчепленню. Введено поняття функції, яка визначає режим роботи приводу, що дозволяє спростити розрахунки за визначенням витрати енергії і сили тяги.

Створений алгоритм рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана для задачі руху ЕРС на ділянці шляху із заданим профілем і графіком руху, що дозволяє створити експертну систему управління рухом. Особливостями цього алгоритму є застосування штрафних функцій для опису обмежень, що накладаються графіком руху: досягнення потягом кінцевого пункту за заданий час руху, обмеження швидкості на ділянках шляху, а також відсутність простоїв потягу в процесі руху. Єдиний підхід штрафних функцій застосований також для введення обмежень по зчепленню. Такий підхід дозволяє понизити витрати розрахункового часу і спростити процедури розрахунку витрат енергії. На його основі створена експертна система управління рухом ЕРС.

2. На основі запропонованого підходу для визначення ефективності тягового приводу електрорухомого складу створена математична модель та алгоритм вирішення задач аналізу, для визначення ефективності тягового приводу, та оптимізації його параметрів. Модель включає в себе визначення основних втрат у АТД з урахуванням насичення магнітної системи, що визначається за результатами вирішення рекурентного нелінійного рівняння та врахуванням втрат від вищих гармонік напруги в міді та сталі, а також механічні та додаткові втрати. В розробленій моделі враховуються статичні та динамічні втрати у IGBT транзисторах та діодах напівпровідникового перетворювача. Модель доповнена виразами, що визначають ККД ланки АТД-АН та розраховують обмеження за зчепленням. Запропоновані цільові функції для визначення ефективності приводу. Шляхом порівняльного аналізу експериментально визначених і обчислювальних тягових характеристик та значень ККД доказана адекватність запропонованої математичної моделі та створеної на її основі задачі аналізу по визначенню ККД приводу. Максимальне відхилення при розрахунку втрат складає 7,42%, що цілком допустимо для розрахунків, які проводяться.

Проведено оптимізацію режимів роботи тягових приводів трамвая Татра Т-ЗВПА та вантажного електровозу у всьому діапазоні частот обертання тягових двигунів. Визначено основні енергетичні залежності та складові втрат у тягових приводах однократній та просторово-векторній ШІМ при різних значеннях температури обмоток. Встановлені залежності переходу тягового приводу з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ в залежності від температури обмо-

ток. Встановлено залежність зміни точки переходу з просторово-векторної до однократної ШІМ від температури АТД. Визначено, що різний рівень розташування цієї точки обумовлено різним навантаженням магнітного кола двигунів, а як слід різним рівнем коефіцієнту насичення.

3. Розроблена узагальнена математична модель теплових процесів в АТД на основі методу ЕТС. Розглянуто складові узагальненої ЕТС АТД та створені найбільш поширені ЕТС та математичні моделі АТД з внутрішньою та зовнішньою системою вентиляції. Проведено ідентифікацію елементів теплових схем АТД на підставі теорії теплових процесів в електричних машинах. Визначено параметри зовнішніх та вбудованих мотор-вентиляторів. Доказано адекватність розробленої математичної моделі шляхом фізичного моделювання. Аналіз значень температур вузлів отриманих експериментально та за даними розрахунків показує, що відмінності не перевищує 8 %, що свідчить про адекватність математичної моделі теплового стану двигуна в нестационарних режимах.

На прикладі асинхронних двигунів АД 917 та АД 931 було розглянуто результати моделювання теплового процесу нагріву їх до сталої температури. Встановлено, що для усіх режимів роботи систем вентиляції та режимів роботи напівпровідникового перетворювача температура елементів конструкції АТД знижується з ростом частоти обертання мотор-вентилятора, що обумовлено підвищенням потоку охолоджуючого повітря та підвищенням теплових провідностей між навколишнім середовищем та іншими елементами конструкції двигуна. Характер змін має нелінійний характер. На прикладі дослідження тягового двигуна АД 917 встановлено, що при роботі в режимі просторово-векторній ШІМ можливо значне зменшення продуктивності роботи системи охолодження без зменшення робочих властивостей двигуна. Встановлено, що температура ротору двигуна зменшується більш стрімко при внутрішній вентиляції. Цей факт обумовлений значно швидшим зменшенням провідності між навколишнім середовищем та ротором, оскільки на швидкість руху повітря у роторі впливає і швидкість обертання самого ротору. В зв'язку з тим, що ротор двигуна при зовнішній вентиляції зв'язано лише з ВП, на його провідність частота обертання мотор-вентилятора не впливає. Тому температура ротора з ростом частоти обертання мотор-вентилятора спадає повільніше.

4. Розроблено метод оптимізації параметрів та режимів роботи систем охолодження АТД ЕРС, якій складається з наступних основних етапів: визначення оптимальних режимів роботи ТП на основі запропонованого виразу ефективності тягового приводу; визначення оптимальних режимів руху електрорухомого складу за критерієм мінімуму витрат; вирішення тягової задачі руху на ділянці колії з заданим графіком руху та профілем колії, а також визначенням залежності зміни витрат в елементах АТД за часом; вибору параметрів та режимів роботи систем охолодження АТД, які обумовлюють ефективність системи охолодження та вентиляції ЕРС; вирішення задачі умовної мінімізації системи охолодження АТД за модернізованим критерієм економічної ефективності на основі методу Вейля за узагальненим золотим перетином та задачі аналізу системи вентиляції і охолодження тягових двигунів, яка створена на базі математичної моделі теплових режимів двигуна за узагальненою еквівалентною тепловою схемою. Запропонова-

ний метод відрізняється від існуючих можливістю врахування маршруту та графіку руху для кожного ЕРС, що дозволяє створювати більш ефективні системи охолодження АТД.

На підставі створеного методу розроблені методики оптимізації керування мотор-вентилятором охолодження тягових двигунів вантажного локомотива та вентилятора тягового двигуна трамваю з асинхронним тяговим приводом при русі на ділянці з заданими профілем та графіком руху, особливостями яких є те, що якості параметрів оптимізації обрані для вантажного локомотива: температура включення мотор-вентилятору та кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятора, а для трамвайного вагону: зовнішній діаметр та ширина лопатки.

Для тестової задачі оптимізації керування системи вентиляції та охолодження на прикладі перспективного вантажного електровозу, розробленого на базі вантажного тепловозу 2ТЕ25А при русі з складам із 60 чотирьохвісних вагонів загальною масою 3600 тон в режимі підтримання середньої швидкості в 20 км/год, отримані наступні оптимальні значення: найбільше перегрівання в елементах конструкції, при якому включається мотор-вентилятори охолодження тягових двигунів – 41,7 °С; кількість пар полюсів двигуна мотор-вентилятору – 3; розрахункова частота обертання мотор-вентилятора – 970 об/хв.; потрібна потужність мотор-вентилятора складає 5,5 кВт, що значно менше за потужність базового мотор-вентилятора яка складає 22 кВт та має частоту обертання 2950 об/хв.

Встановлено, що найбільше перегрівання має пазова частина обмотки статора АТД, що складає 139,5 °С на 14941 с з початку руху і не перевищує допустиме значення у 140 °С. Включення мотор-вентилятору відбувається на 472 с з початку руху. Далі мотор-вентилятор працює зі штатною частотою обертання.

Вирішення тестової задачі оптимізації параметрів вентилятора проведено на прикладі АТД АД931, який має систему самовентиляції, що встановлено у трамвайному вагоні Т-3ВПА, який рухається на ділянках колії від трамвайного депо «Салтівське» до розворотного кола 602 мр/н м. Харків та в зворотному напрямі, що повторювалося чотири рази, отримані наступні оптимальні значення: діаметр вентилятора – 308,2 мм, ширина лопатки вентилятора – 15,7 мм. За результатами моделювання АТД з оптимальним вентилятором встановлено, що найбільше перегрівання має пазова частина обмотки статора АТД, що складає 139,6 °С на 3363с з початку руху і не перевищує допустиме значення у 140 °С.

5. Вироблені наукові положення є ефективним інструментом модернізації існуючих і створення нових систем охолодження АТД ЕРС. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ДП «ПВІ «Укрзалізничпроект» залізничного транспорту України» (м. Харків), ДП «завод Електроважмаш» (м. Харків), КП Салтівське трамвайне депо (м. Харків), та у навчальний процесі в НТУ «ХП» та ХНУМГ імені О.М. Бекетова., що підтверджено актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петренко А.Н. Определение тепловых сопротивлений ротора эквивалентной тепловой схемы адаптированной для частотно-управляемого асинхронного двигателя /А. М. Петренко, В. П. Шайда, Н. Я. Петренко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 42 (1151). – С. 44-48.

Здобувач визначив теплові опори лобової та пазової частини обмотки ротору.

2. Петренко О.М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – № 6. – С. 8-13

Здобувач провів аналітичний огляд визначення ефективності рухомого складу електричного транспорту.

3. Петренко О.М. Основні підходи до створення універсальних теплових моделей тягових двигунів транспортних засобів / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Харків : ХУПС імені Івана Кожедуба, 2015. – № 4(21). – С. 134-137.

Здобувачем розглянуто підходи до створення теплових моделей тягових двигунів на підставі ЕТС.

4. Петренко О.М. Аналіз методів визначення енергетично оптимальних параметрів управління транспортних засобів/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Системи озброєння і військова техніка. – Харків : ХУПС імені Івана Кожедуба, 2015. – № 4(44). – С. 96-100.

Здобувач провів аналітичний огляд методів визначення енергооптимальних параметрів електрорухомого складу.

5. Петренко О.М. Визначення чинників, що впливають на ефективність електричного транспортного засобу/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Системи обробки інформації. – Харків : ХУПС імені Івана Кожедуба, 2015. – № 12(137). – С. 37-42.

Здобувачем було встановлено критерії ефективності електротранспорту.

6. Петренко О.М. Програмно-орієнтована математична модель руху транспортного засобу/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський// Системи обробки інформації.– Харків: ХУПС імені Івана Кожедуба, 2016. – № 5(142). – С. 76-79.

Здобувачем запропоновані основні режими роботи тягового приводу.

7. Петренко О.М. Математична модель оптимального керування рухом електрорухомого складу на підставі вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ, 2016. – № 2 – С.19-24

Здобувачем запропоновано підходи для визначення витрат енергії ЕРС.

8. Петренко О. М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський, М. Л. Глебова // Вісник НТУ «ХПІ» – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 6 (1178). – С. 89-95.

Здобувачем запропоновано алгоритм визначення параметрів ЕРС при зворотному ході рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана.

9. Петренко О.М. Методика оптимізації режимів роботи асинхронного тягового приводу рухомого складу/ О.М. Петренко, І.В. Доманський, Б.Г. Любарський // Механіка та машинобудування – Харків : НТУ «ХПІ», 2016.– № 1. – С. 59-67.

Здобувач запропонував методи вирішення задач аналізу при роботі приводу в режимі просторово-векторної ШІМ.

10. Петренко О.М. Дослідження впливу температури обмоток асинхронного тягового двигуна на режими роботи автономного інвертора напруги / О.М. Петренко, Б. Г. Любарський, Є.С. Рябов // Електрифікація транспорту. – Дніпро: ДНУЗТ, 2016. – № 12. – С. 87-91.

Здобувачем проведено аналіз впливу режимів роботи напівпровідникового перетворювача в режимах однократної та просторово-векторної ШІМ на температуру обмоток АТД.

11. Петренко О. М. Вибір оптимальних режимів роботи напівпровідникового перетворювача для живлення тягового асинхронного двигуна / О. М Петренко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2016. – Вип. 2(38). – С. 33-37.

12. Петренко О. М. Оптимізація режимів руху трамвайного вагону з асинхронними тяговими двигунами на ділянці колії з встановленим графіком руху та профілем / О. М Петренко, Б.Г. Любарський // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2016. – Вип. 4(40). – С. 36-40

Здобувачем визначені криві руху трамвайного вагону на ділянці колії.

13. Petrenko A.N. Using object-oriented design principles in electric machines development / N.N. Zablodskii, V.E. Pliugin, A.N. Petrenko // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – №. 1. – С. 17–20.

Здобувачем визначені активні опори АТД та індуктивності фаз.

14. Петренко О. М. Оптимізація параметрів вентилятора асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону / О. М Петренко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2017. – Вип. 1(41). – С. 64-68

15. Петренко О. М. Математична модель теплового стану тягових асинхронних двигунів трамвайних вагонів / О. М Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2017. – Вип. 2(42). – С. 46-50

Здобувачем адаптована універсальна теплова схема заміщення АТД до вимог тягового двигуна трамвайного вагону.

16. Петренко О.М. Оптимізація керування мотор-вентилятором охолодження тягових двигунів вантажного локомотива з асинхронним тяговим приводом при русі на ділянці с заданим профілем та графіком руху / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: УкрДАЗТ, 2017. – № 2 –С.9-15

Здобувач запропонував метод вирішення задачі оптимізації режимів керування мотор-вентилятором.

17. Петренко О. М. Визначення енергетичних параметрів руху електрорухомого складу з асинхронним тяговим двигуном / О. М. Петренко // Вісник НТУ «ХП» – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 5 (1227). – С. 89-94.

18. Петренко О. М. Моделювання теплових процесів у тяговому асинхронному двигуні вантажного електровозу при русі на ділянці колії с заданим профілем та графіком руху / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський // Вісник НТУ «ХП». - Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 6 (1228). – С. 112-116.

19. Петренко О. М. Визначення оптимальних режимів руху електровозу з вантажним потягом, що обладнаний, асинхронними тяговими двигунами на діля-

нці колії з встановленим графіком руху та профілем / О. М. Петренко // Вісник НТУ «ХПІ» – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 14 (1236). – С. 129-136.

Здобувачем адоптована універсальна теплова схема заміщення АТД до вимог тягового двигуна локомотива.

20. Petrenko A. Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams / В. Liubarskyi, А. Petrenko, D. Iakunin, O. Dubinina // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2017. - №3/9(87) – Р. 59-67.

Здобувач запропонував комплексний критерій ефективності тягового приводу трамвайного вагону.

21. Петренко О.М. Ідентифікація теплової провідності між зовнішнім повітрям і корпусом еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону / О. М Петренко , В.В. Божко, М.В. Хворост // Електрифікація транспорту. – 2017 – № 13. – С. 59-63

Здобувач визначив складові теплової провідності між зовнішнім повітрям і корпусом ЕТС АТД трамвайного вагону.

22. Petrenko A. Analysis of the optimal operating modes of traction drives for determining the control algorithm for a semiconductor converter / В. Liubarskyi, А. Petrenko, V. Shaida, А. Maslii // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2017. – №4/8(88). – С. 65-72.

Здобувач запропонував комплексний критерій ефективності тягового приводу та провів його ідентифікацію для тягового двигуна трамвайного вагону.

23. Petrenko A. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport / Т. Pavlenko, V. Shavkun, А. Petrenko // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2017. – № 5/8 (89) – С. 22-30.

Здобувач визначив вплив температури елементів тягових двигунів на надійність ЕРС.

24. Petrenko O. Determination of railway rolling stock optimal movement modes / О. Petrenko, В. Liubarskiy, V. Pliugin // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – №6. – С. 27-31

Здобувач визначив оптимальні режими руху електрорухомого складу на основі методу Гамільтона-Якобі-Беллмана.

25. Петренко О. М. Оптимізація режимів роботи охолодження тягового двигуна електровоза / О. М Петренко, Б.Г. Любарський // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2017. – Вип. 6(46). – С. 251-254

Здобувач визначив залежність витрат в елементах конструкції тягового двигуна електровозу у часі.

26. Петренко А.Н. Анализ потерь в тяговом асинхронном двигателе при различных режимах питания / Е.С. Рябов, А.Н. Петренко, Л.В. Оверьянова // Евразийский совет ученых (ЕСУ) – Москва, 2016. – №12(33). - Ч2. – С.59-65.

Здобувач запропонував підхід до визначення втрат в обмотці статора АТД.

27. Петренко А. Н. Перспективы улучшения систем охлаждения тяговых двигателей электроподвижного состава Тезисы / Б. Г. Любарский, А. Н. Петренко Г.А. Доманская // Тезисы докладов VIII Международного симпозиума «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта Eltrans`2015». – СПб: ПГУБС, 2015. – С.50.

Здобувачем запропоновані напрямки підвищення ефективності електрорухомого складу з АТД.

28. Петренко О. М. Оптимізація режимів роботи асинхронного тягового приводу електрорухомого складу з урахуванням теплового стану тягового двигуна / О.М.Петренко// Тези X Науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». - Дніпро: ДНУЗТ, 2016. – С. 99-100

Здобувачем запропоновано підходи для визначення ефективності тягового приводу при підтриманні заданої швидкості руху.

29. Петренко О. М. Оптиміальні режими роботи тягового приводу на основі асинхронного тягового двигуна / О.М.Петренко, Б.Г Любарський, Р.Ш. Нурієв // Тези доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків: НТУ «ХП», 2016. – Ч. I. – С. 205

30 Петренко О.М. Моделювання теплового стану асинхронних тягових двигунів / А.К. Шевченко, О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Тези доповідей XI Міжнародної науково–практичної конференції магістрантів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – С. 134–135.

Здобувачем запропоновані основні підходи до визначення структур ЕТС АТД.

31. Петренко О.М. Методика моделювання теплових режимів асинхронних тягових двигунів при русі електрорухомого складу на ділянці колії/ О.М.Петренко, Б.Г Любарський // Тези доповідей XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». - Харків: НТУ «ХП». – 2017. – С.224.

Здобувач запропонував підходи до визначення втрат в елементах АТД при русі ЕРС на ділянці колії.

32. Петренко О.М. Оптимізація систем охолодження асинхронних тягових двигунів / О.М.Петренко, Б.Г Любарський // Тези доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті». – Дніпро: ДНУЗТ, 2017. – С. 44.

Здобувач запропонував шляхи зменшення потужності мотор-вентиляторів охолодження тягових двигунів електровозів.

33. Петренко О.М. Визначення оптимальних режимів роботи тягового асинхронного приводу електрорухомого складу / О.М.Петренко, Б.Г Любарський // Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2017». – Дніпро: ДНУЗТ, 2017. – С. 90-91.

Здобувач запропонував критерій, параметри, та обмеження для визначення оптимальних режимів роботи тягового асинхронного приводу.

АНОТАЦІЇ

Петренко О.М. Наукові основи вибору оптимальних параметрів та режимів роботи систем охолодження асинхронних тягових двигунів електротранспорту. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 «Електротранспорт» - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена створенню наукових основ щодо вибору оптимальних параметрів та режимів роботи систем охолодження асинхронних тягових двигунів електротранспорту.

Розроблений алгоритм рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана для задачі руху електрорухомого складу на ділянці шляху із заданим профілем і графіком руху, що дозволяє створити експертну систему управління рухом. Особливостями цього алгоритму є застосування штрафних функцій для опису обмежень, що накладаються графіком руху: досягнення потягом кінцевого пункту за заданий час руху, обмеження швидкості на ділянках шляху, а також відсутність простоїв потягу в процесі руху. Єдиний підхід штрафних функцій застосований також для введення обмежень по зчепленню. Такий підхід дозволяє значно понизити витрати розрахункового часу і спростити процедури розрахунку витрат енергії.

Створена математична модель для визначення ефективності тягового приводу. Модель включає в себе визначення основних втрат у асинхронного тягового двигуна з урахуванням насичення магнітної системи, що визначається за результатами вирішення рекурентного нелінійного рівняння. Також у моделі враховані втрати від вищих гармонік напруги в міді та сталі, а також механічні та додаткові втрати. В розробленій моделі враховуються статичні та динамічні втрати у IGBT транзисторах та діодах напівпровідникового перетворювача.

Розроблено метод оптимізації параметрів та режимів роботи систем охолодження асинхронних тягових двигунів електрорухомого складу, якій складається з наступних основних етапів: визначення оптимальних режимів роботи тягового приводу на основі запропонованого виразу ефективності тягового приводу; визначення оптимальних режимів руху електрорухомого складу за критерієм мінімуму витрат; вирішення тягової задачі руху на ділянці колії с заданим графіком руху та профілем колії, а також визначенням залежності зміни втрат в елементах тягового двигуна за часом; вибору параметрів та режимів роботи систем охолодження тягових двигунів, які обумовлюють ефективність системи охолодження та вентиляції електрорухомого складу; вирішення задачі умовної мінімізації системи охолодження тягового двигуна за модернізованим критерієм економічної ефективності на основі методу Вейля за узагальненим золотим перетином та задачі аналізу системи вентиляції і охолодження тягових двигунів, яка створена на базі математичної моделі теплових режимів двигуна за узагальненою еквівалентною тепловою схемою.

Ключові слова: електротранспорт, електрорухомий склад, асинхронний тяговий двигун, асинхронний тяговий привод, система охолодження тягового дви-

гуна, рух електрорухомого складу, оптимальні режими роботи тягового приводу, критерій ефективності системи охолодження.

Петренко А.Н. Научные основы выбора оптимальных параметров и режимов работы систем охлаждения асинхронных тяговых двигателей электротранспорта. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.09 «Электротранспорт» - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» МОН Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена созданию научных основ по выбору оптимальных параметров и режимов работы систем охлаждения асинхронных тяговых двигателей электротранспорта.

Создана математическая и программно-ориентированную модель движения электроподвижного состава на основе дифференциальных уравнений движения, учитывающие составляющие сопротивления движению: главного - трения качению, сопротивление от уклонов и от кривых участков пути. Отличительной особенностью модели является определение силы электроподвижного состава, развивается, и затраты энергии путем использования зависимостей КПД электроподвижного состава, определенного заранее для всех режимов работы с учетом ограничения по сцеплению. Введено понятие функции, определяющей режим работы привода, что позволяет упростить расчеты по определению расхода энергии и силы тяги.

Разработанный алгоритм решения уравнения Гамильтона-Якоби-Беллмана для задачи движения электроподвижного состава на участке пути с заданным профилем и графику движения, позволяет создать экспертную систему управления движением. Особенности этого алгоритма является применение штрафных функций для описания ограничений, накладываемых графиком движения: достижения поездом конечного пункта за заданное время движения, ограничение скорости на участках пути, а также отсутствие простоев поезда в процессе движения. Единый подход штрафных функций применен также для введения ограничений по сцеплению. Такой подход позволяет значительно снизить затраты расчетного времени и упростить процедуры расчета затрат энергии.

Создана математическая модель для определения эффективности тягового привода. Модель включает в себя определение основных потерь в асинхронного тягового двигателя с учетом насыщения магнитной системы, определяется по результатам решения рекуррентного нелинейного уравнения. Также в модели учтены потери от высших гармоник напряжения в меди и стали, а также механические и дополнительные потери. В разработанной модели учитываются статические и динамические потери в IGBT транзисторах и диодах полупроводникового преобразователя. Модель дополнена выражениям, определяющие КПД звена асинхронный тяговый двигатель-автономный инвертор напряжения и рассчитывают ограничения по сцеплением. Разработан алгоритм решения задачи анализа по определению эффективности тягового привода, в основу которого положена создана математическая модель.

Проведена оптимизация режимов работы тяговых приводов трамвая Татра ТЗВПА и электровоза во всем диапазоне частот вращения тяговых двигателей. Определены основные энергетические зависимости и составляющие потерь в тяговых приводах однократной и пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции при различных значениях температуры обмоток. Установлены зависимости перехода тягового привода из режима пространственно-векторной к однократной широтно-импульсной модуляции в зависимости от температуры обмоток.

Разработанная обобщенная математическая модель тепловых процессов в асинхронном тяговом двигателе на основе метода эквивалентной тепловой схемы замещения. Рассмотрены составляющие обобщенной эквивалентной тепловой схемы замещения двигателя и созданы наиболее распространенные схемы и математические модели асинхронных тяговых двигателей с внутренней и внешней системой вентиляции. Проведена идентификация элементов тепловых схем двигателей на основании теории тепловых процессов в электрических машинах. Определены параметры внешних и встроенных мотор-вентиляторов.

Установлено, что для всех режимов работы систем вентиляции и режимов работы полупроводникового преобразователя температура элементов конструкции тягового двигателя снижается с ростом частоты вращения мотор-вентилятора обусловлено повышением потока охлаждающего воздуха и повышением тепловых проводимостей между окружающей средой и другими элементами конструкции двигателя. Характер изменений имеет нелинейный характер.

Разработан метод оптимизации параметров и режимов работы систем охлаждения асинхронных тяговых двигателей электроподвижного состава, которой состоит из следующих основных этапов: определение оптимальных режимов работы тягового привода на основе предложенного выражения эффективности тягового привода; определение оптимальных режимов движения электроподвижного состава по критерию минимума затрат; решения тяговой задачи движения на участке пути с заданным графиком движения и профилем пути, а также определением зависимости изменения потерь в элементах тягового двигателя от времени; выбора параметров и режимов работы систем охлаждения тяговых двигателей, обуславливающих эффективность системы охлаждения и вентиляции электроподвижного состава; решения задачи условной минимизации системы охлаждения тягового двигателя с модернизированным критерием экономической эффективности на основе метода Вейля по обобщенным золотым сечением и задачи анализа системы вентиляции и охлаждения тяговых двигателей, которая создана на базе математической модели тепловых режимов двигателя согласно обобщенной эквивалентной тепловой схеме.

Ключевые слова: электротранспорт, электроподвижной состав, асинхронный тяговый двигатель, асинхронный тяговый привод, система охлаждения тягового двигателя, движение электроподвижного состава, оптимальные режимы работы тягового привода, критерий эффективности системы охлаждения.

Petrenko O.M. Scientific bases of a choice of optimum parameters and operating modes of cooling systems of asynchronous traction engines of electric transport. - As a manuscript.

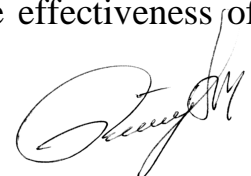
Thesis for the degree of Doctor of Engineering in specialty 05.22.09 "Electric transport" - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kharkov, 2018.

The thesis is devoted to the creation of scientific foundations for the selection of optimal parameters and operating modes for cooling systems for asynchronous traction motors of electric transport.

An algorithm for solving the Hamilton-Jacobi-Bellman equation for the problem of the motion of an electric stock on a section of a track with a given profile and a traffic schedule is developed. That makes it possible to create an expert control system for motion. Features of this algorithm is the use of penalty functions to describe the restrictions imposed by the traffic schedule: the train reaches the destination point for a given driving time, the speed limit on the sections of the track, and the absence of train idle time during the movement. A single approach to penalty functions is also applied to introduce constraints on the adhesion. This approach allows to reduce significantly the costs of the estimated time and to simplify the procedures for calculating energy costs.

A mathematical model is created to determine the efficiency of the traction drive. The model includes the determination of the main losses in an asynchronous traction motor, taking into account the saturation of the magnetic system, which is determined by the results of solving a recurrent nonlinear equation. Also, the model takes into account losses from higher harmonic stresses in copper and steel, mechanical and additional losses. The developed model takes into account static and dynamic losses in IGBT transistors and diodes of a semiconductor converter. A method for optimizing the parameters and operating modes of cooling systems for asynchronous traction motors of the electric stock is developed. It consists of the following main stages: determination of the optimum mode of the traction drive operation on the basis of the proposed expression of its efficiency; determination of optimum modes of movement of the electric stock by the criterion of minimum costs; solution of the traction problem of motion on a section of the track with a specified traffic schedule and the track profile, as well as the determination of the dependence of the change in losses in the elements of asynchronous traction engines in time; choice of parameters and operation modes of cooling systems for asynchronous traction motors, which determine the efficiency of the cooling and ventilation system of the electric stock; solution of the problem of relative minimization of the cooling system for asynchronous traction motors with a modernized criterion of economic efficiency based on the Weil method on the generalized golden section and the problem of analyzing the ventilation and cooling system of traction motors, which is based on the mathematical model of thermal motor conditions by the generalized equivalent thermal scheme.

Keywords: electric transport, electric stock, asynchronous traction motor, asynchronous traction drive, cooling system for a traction motor, motion of an electric stock, optimum operating modes of a traction drive, the criterion of the effectiveness of the cooling system.



Підписано до друку 25.03.2018 р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. № 21

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
М. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354