

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

**ЛЮБАРСЬКИЙ БОРИС ГРИГОРОВИЧ**



УДК 629.429.3:621.313

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДЛЯ ВИБОРУ І ОЦІНКИ  
ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ  
ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2014

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  
**Омельяненко Віктор Іванович,**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри електричного транспорту та  
тепловозобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Хворост Микола Васильович,**  
Харківський національний університет міського  
господарства ім. О.М. Бекетова,  
завідувач кафедри охорони праці та  
безпеки життєдіяльності

доктор технічних наук, професор  
**Гусевський Юрій Ілліч,**  
Українська державна академія  
залізничного транспорту,  
професор кафедри автоматизованих систем електричного  
транспорту

доктор технічних наук, професор  
**Кононов Борис Тимофійович,**  
Харківський університет повітряних сил ім. І. Кожедуба,  
професор кафедри електротехнічних систем комплексів  
озброєння і військової техніки

Захист відбудеться «15» жовтня 2014 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розіслано «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Якунін Д.І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В даний час, в основному, для електричної передачі потужності на залізничному транспорті України використовуються тягові електроприводи на основі колекторних тягових двигунів. Однак з початком ХХІ століття в усіх країнах світу намітилася стійка тенденція по їх заміні приводами на основі безколекторних асинхронних тягових двигунів (АТД).

Разом з тим, в найбільш розвинених країнах (Німеччина, Франція, Японія тощо) інтенсивно ведуться роботи із застосування на тягових електроприводах інших типів електричних машин, таких як: синхронні двигуни з постійними магнітами, реактивні індукторні двигуни, а також тягові двигуни з нетрадиційними магнітними системами. Крім того, у зв'язку з появою можливості реалізації високих моментів на валу електромеханічних перетворювачів, інтенсифіковані роботи із застосування безредукторних приводів. Перелічені типи тягових двигунів, завдяки успіхам у розвитку напівпровідникової техніки, доведені до практичної реалізації як дослідних, так і серійних зразків.

На сьогоднішній день в кожній з цих областей є досить глибокі дослідження й отримані обнадійливі результати. Тому доцільним є проведення системного порівняння тягових електроприводів на базі двигунів різних типів. Крім того, створені теоретичні передумови розрахунків, в яких з єдиних позицій для таких перспективних електромеханічних перетворювачів енергії знаходяться криві руху рухомого складу і можуть бути визначені показники їх ефективності.

Тому розробка критеріїв і методик порівняння різних типів перспективних електромеханічних перетворювачів в умовах роботи в складі поїзда, що рухається за певною ділянкою шляху (рішення тягової задачі), є актуальною науково-практичною проблемою, яка визначила напрямок дисертаційних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ» відповідно до науково-дослідних тем МОН України: «Розробка наукових основ проектування тягових передач високошвидкісного колісного залізничного транспорту для швидкостей руху 200-300 км/год», (ДР № 0103U001506), «Наукові основи вибору раціонального електроприводу з безконтактними електромеханічними перетворювачами для перспективного транспорту», (ДР № 0106U001483), «Розробка наукових основ створення електромеханічного приводу для механізму нахилу вагонів швидкісного залізничного транспорту України», (ДР № 0109U002392), «Розробка наукових основ створення випробувального стенду з накопичувачем енергії для швидкісних поїздів», (ДР № 0111U002268), «Розробка практичних положень створення приміських швидкісних поїздів з нахилом кузовів та накопичувачем енергії», (ДР № 0113U000432), а також госпдоговірної теми «Розробка програмно-алгоритмічного комплексу проектування тягових синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів» ТОВ "Електромаш-Інвест", м. Харків,

(ДР № 0108U010505), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів. Як науковий керівник очолював виконання госпдоговірної теми «Розробка програмно-алгоритмічного комплексу проектування двигунів з поперечним полем» ТОВ "Електромаш-Інвест", м. Харків, (ДР № 0108U010504).

**Мета і задачі дослідження.** *Метою досліджень є розвиток наукових основ для вибору різних типів перспективних систем електромеханічного перетворення енергії (СЕМПЕ), визначення їх оптимальних режимів і встановлення меж області раціонального застосування кожного з них для електрорухомого складу (ЕРС).*

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

– розробити з єдиних позицій математичні моделі, що встановлюють зв'язок геометричних і електрофізичних параметрів з показниками потужності, а також її складовими для різних типів електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМП);

– визначити вплив режимів електромеханічних перетворювачів енергії різних типів на їх параметри і показники роботи;

– встановити залежності максимальних значень ККД для кожного з розглянутих типів систем електромеханічного перетворення енергії при варіюванні компонент вектора управління в режимах тяги і гальмування електрорухомого складу;

– оцінити за результатами аналізу кривих руху ефективність використання різних типів електромеханічних перетворювачів енергії у складі тягових електроприводів перспективного електрорухомого складу.

*Об'єкт дослідження* – процес електромеханічного перетворення енергії в електрорухомому складі залізниць.

*Предмет дослідження* – системи електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу.

**Методи дослідження:** Методи узагальненої теорії електромеханічних перетворювачів енергії, які базуються на вирішенні рівняння Лагранжу щодо електромеханічної системи; метод кінцевих елементів та комбінований коло-польовий метод для розрахунку магнітного поля електромеханічних перетворювачів енергії; методи наближення функцій для апроксимації дискретних експериментальних даних цифрового моделювання; імітаційне моделювання, що застосовується для дослідження процесів роботи приводів та доказу адекватності розроблених математичних моделей; метод циклічного покоординатного спуску при вирішенні задач оптимізації режимів роботи тягових приводів; методи Рунге-Кутти для отримання кривих руху поїздів та методи фізичного моделювання для доказу адекватності розроблених математичних моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– отримала подальший розвиток теорія моделювання електромеханічних перетворювачів енергії в напрямку створення узагальненої математичної моделі, заснованої на вирішенні рівняння Лагранжа для електромеханічної системи з урахуванням нелінійності магнітної системи і зубцового характеру поверхні ротора і статора. Вперше запропоновано удосконалений підхід до складання

математичної моделі, який полягає у ідентифікації параметрів за рахунок апроксимації лінійними сплайн-функціями, що дає можливість знизити порядок моделі без спрощення визначальних чинників. Ідентифікація параметрів математичної моделі для ЕМП різних типів забезпечується розрахунком магнітного поля методами кінцевих елементів, а також комбінованим коло-польовим методом на основі методу кінцевих елементів та методу магнітного кола;

– вперше для ідентифікації параметрів математичної моделі ЕМП реактивного двигуна з аксіальним магнітним потоком (АІД), в якому магнітне поле має істотний тривимірний характер, запропоновано використовувати комбінований коло-польовий метод на базі уточнюючої апроксимації магнітного кола;

– вперше для оцінки робочих властивостей тягових приводів в різних режимах роботи СЕМПЕ введена векторна функція з компонентами: вектор амплітуд фазних струмів ЕМП, що визначає додаткові втрати від вищих гармонік струму; вектор максимальних значень струмів і напруг, що виникають у напівпровідникових елементах перетворювача, який визначає вибір елементної бази напівпровідникового перетворювача; вектор середніх і діючих значень струмів, що протікають через напівпровідникові прилади, які визначають втрати в них.

– вперше визначено компоненти вектора, що визначає робочі властивості електроприводів на базі синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів (СДПМ), реактивного індукторного двигуна (РІД) та АІД при різних частотах обертання і параметрах вектора управління;

– встановлено, що для лінійного електромеханічного перетворювача енергії для приводу нахилу кузова залежність витрати енергії від кута нахилу кузова носить експонентний характер;

– вперше сформульовані задачу аналізу з визначення ККД тягового приводу на основі АТД, СДПМ, РІД і АІД, залежно від параметрів вектора управління і режимів роботи тягового приводу. Особливістю цих моделей є зв'язок аналітичних виразів для електромагнітних параметрів ЕМП і напівпровідникових перетворювачів з результатами розрахунків режимів роботи приводу, що отримані імітаційним моделюванням в середовищі MATLAB;

– для порівняльного аналізу ефективності роботи тягових приводів розглянутих типів вперше введений узагальнений критерій оцінки - «комплексний ККД», що складається з середнього і максимального ККД електроприводу;

– запропоновано комплексний критерій ефективності роботи ЕРС, компонентами якого є витрати енергії і середня швидкість руху поїздів. При суперечливості компонентів цього критерію, вибір раціонального ЕМП запропоновано проводити на основі показника ефективності, визначеного як відношення енергії, що перетворена ЕРС з електричної в механічну, до гранично

можливої енергії, яка здатна реалізуватися за умовами зчеплення колеса з рейкою при максимально можливій швидкості руху на ділянці шляху;

– вперше на запропонованих типових ділянках руху з різними значеннями максимальних швидкостей для приміського, міжрегіонального та швидкісного поїздів визначено раціональні типи електромеханічних перетворювачів енергії.

**Практичне значення отриманих результатів** для електричного транспорту полягає у:

– створенні методики з вибору типу електромеханічного перетворювача енергії для сучасного електрорухомого складу;

– визначення обліку втрат енергії у ЕМП та елементах напівпровідникового перетворювача енергії;

– універсальному визначенні ККД тягового приводу на основі АТД, СДПМ, РІД і АІД у залежності від параметрів вектора управління і режимів роботи щодо різних типів електрорухомого складу;

– розробці програмно-алгоритмічного комплексу для визначення раціонального типу ЕМП на основі комплексного критерію ефективності для ділянок шляху с заданим профілем та графіком руху;

– визначенні для конкретної ділянки шляху раціональних типів електромеханічних перетворювачів енергії для приміських, міжрегіональних і швидкісних електропоїздів, а також, для швидкісних поїздів з нахилом кузова – раціонального куту нахилу вагона.

Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження результатів дисертації в ДП «Завод Електроважмаш» (м. Харків), ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України» (м. Київ), та у навчальному процесі кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ».

**Особистий внесок здобувача.** Положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз тенденцій розвитку електромеханічних перетворювачів електрорухомого складу; розробка узагальненої математичної моделі електромеханічних перетворювачів енергії з урахуванням нелінійності магнітної системи і зубцевого характеру поверхні ротора і статора; підхід до складання математичної моделі, який полягає у ідентифікації параметрів за рахунок апроксимації їх лінійними сплайн-функціями, що дає можливість знизити порядок математичної моделі без спрощення визначальних чинників; загальні підходи з ідентифікації математичних моделей електромеханічних перетворювачів різних типів; перевірка адекватності математичної моделі ЕМП; поняття векторної функції робочих властивостей тягових приводів в різних режимах роботи СЕМПЕ і визначення її компонентів для тягових приводів на основі СДПМ, РІД і АІД; формулювання задачі аналізу з визначення ККД тягового приводу на основі АТД, СДПМ, РІД і АІД; комплексний критерій ефективності роботи ЕРС, компонентами якого є втрати енергії і середня швидкість руху поїздів; при

суперечливості компонентів цього критерію, пропозиція проведення вибору раціонального ЕМП на основі показника ефективності; для типових ділянок руху приміського, міжрегіонального та швидкісного поїздів, дослідження впливу типів електромеханічних перетворювачів енергії на криві руху.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: XVI-XXI Міжнародних наукових конференціях MicroCAD «Інформаційні технології, наука, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2008-2013 р.р.), Міжнародному симпозіумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (м. Харків, 2009 р.), XVI, XIX и XX Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта, 2009, 2012 и 2013 р.р.), V Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне регулювання. Сертифікація, діагностика і безпека на залізничному транспорті» (м. Ялта, 2009 р.), 70 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием представителей производства, ученых транспортных вузов и инженерных работников «Наука, творчество и образование в области электроснабжения – достижения и перспективы» (Россия, г. Хабаровск, 2010 г.), V Міжнародній науковій конференції «MATLAB» (м. Харків, 2011 р.), VI та VII Международных симпозиумах «Eltrans» «Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте», (Россия г. Санкт-Петербург 2011-2013 г.г.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 54 наукових публікаціях, з них 32 – у фахових наукових виданнях України, 5 – у періодичних фахових іноземних виданнях, 15 – у матеріалах наукових конференцій, 1 свідоцтво про реєстрацію авторських прав.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації становить 368 сторінок основного тексту, включаючи 155 рисунків по тексту; 64 рисунків на 42 окремих сторінках; 19 таблиць по тексту; 3 таблиці на 4 окремих сторінках; 235 найменувань використаних літературних джерел на 28 сторінках; 3 додатків на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** наведено аналіз тенденцій розвитку систем електромеханічного перетворення енергії сучасного і перспективного електрорухомого складу.

Доведено, що тип і режими роботи визначають структуру тягового електроприводу, склад устаткування і компоновання ЕРС. Основним напрямком розвитку ЕМП електрорухомого складу є зниження витрат «життєвого» циклу ЕРС. Витрати життєвого циклу складаються з витрат на виробництво ЕМП і витрат на експлуатацію. Зважаючи на тривалий цикл експлуатації ЕРС витрати на його виробництво незрівнянно нижче витрат на експлуатацію. Тому сучасні тенденції розвитку ЕМП будуються на зниженні витрат на експлуатацію ЕРС.

Витрати на експлуатацію складаються з витрат на енергоресурси, необхідні для роботи ЕРС і витрати на обслуговування та ремонт. Перший напрямок, пов'язаний зі зниженням витрати енергії при русі ЕРС, ставить перед розробниками наступні завдання: підвищення ККД тягового приводу в цілому і його складових у всіх режимах роботи; впровадження систем рекуперації енергії, що дозволяє повертати частину накопиченої рухомим складом кінетичної енергії руху в електричну енергію при гальмуванні рухомого складу; введення в структуру тягового приводу елементів, що дозволяють накопичувати зайву енергію при гальмуванні, та віддавати її при розгоні ЕРС - накопичувачів енергії; розробка систем раціонального керування рухомим складом; розробка і вдосконалення допоміжних систем рухомого складу в наступних напрямках: системи, що дозволяють змінювати режими роботи ЕРС шляхом зниження обмежень на швидкість руху ЕРС (системи нахилу кузова), підвищення ККД допоміжних пристроїв. Всі існуючі ЕМП вживані на ЕРС, мають досить високий ККД в номінальних і близьких до нього режимах роботи порядку 0,91...0,95, однак елементи тягового приводу, що забезпечують їх роботу при пуску або в режимах руху на високих швидкостях, можуть значно знизити його через застосування резисторного регулювання струмів і напруг в ЕМП. Тому в сучасному рухомому складі регулювання напружень або струму в ЕМП здійснюється виключно із застосуванням напівпровідникових перетворювачів.

Другий напрямок визначається зниженням витрат на обслуговування та ремонт ЕРС. Найбільш вимогливим до обслуговування є щітково-колекторний вузол ЕМП. Тому застосування безконтактних ЕМП – основний шлях розвитку цього напрямку.

Для реалізації цих напрямків розвитку ЕРС проявляються такі тенденції розвитку ЕМП: застосування для живлення ЕМП напівпровідникового перетворювача з проміжним контуром постійної напруги, що дозволяють уніфікувати конструкції ЕРС різного роду струму і з різними типами ЕМП; впровадження ЕМП у складі безредукторного тягового приводу, що дозволяє підвищити ККД і надійність, а також знизити витрати на обслуговування завдяки відсутності редуктора; застосування тягових приводів на основі АТД, які дозволяють збільшити момент на валу приблизно на 50%, а за питомою потужністю АТД в 2-2,5 рази перевершує колекторні тягові двигуни; також його ККД на 1,5-2% вище ККД колекторних машин; впровадження у тяговий привод синхронних ЕМП з електромагнітним збудженням для приводів високої



потужності у швидкісних електропоїздах; застосування у тягових приводах електропоїздів ЕМП на базі СДПМ та РІД; використання ЕМП на базі електромеханічних перетворювачів з нетрадиційною магнітною системою, що дозволяють значно підвищити питомі показники приводу та використовувати їх у складі безредукторного колісно-моторного блоку. Проведено аналіз існуючих перспективних конструкцій електромеханічних перетворювачів енергії за енергетичними та масо-габаритні показниками.

Таким чином за показниками, що характеризують робочі властивості, надійність і ремонтпридатність в якості перспективних типів для подальших досліджень обрано наступні ЕМП: АТД, СДПМ, РІД та АІД.

**У другому розділі** розроблено математичні моделі електромеханічних перетворювачів енергії ЕРС при несталіх процесах.

Узагальнена математична модель ЕМП, що базується на вирішенні рівняння Лагранжу щодо електромеханічної системи, виглядає наступним чином

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \left( \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k} \right) + Q_k = 0, \quad (1)$$

де  $q_k$  – узагальнена координата,  $L$  – силова функція Лагранжа,  $F$  – Рилєєва функція, що описує втрати у системі,  $Q_k$  – неконсервативна сила.

Для зниження порядку математичної моделі без спрощення визначальних факторів, запропоновано алгоритм із 4 етапів:

Перше. Рівняння (1) для електричних координат перетворимо в узагальнене рівняння стану:

$$\frac{di_k}{dt} = [A]_k \cdot [e] + [B]_k \cdot [i] + C_k \omega, \quad (2)$$

де

$$[A]_k = \begin{bmatrix} A_{1,k} \\ A_{2,k} \\ \dots \\ A_{M,k} \end{bmatrix}^T, \quad [e] = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_M \end{bmatrix}, \quad [B]_k = \begin{bmatrix} B_{1,k} \\ B_{2,k} \\ \dots \\ B_{M,k} \end{bmatrix}^T, \quad [i] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_M \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A_{n,k} = (-1)^{k-1} \frac{\Xi}{L}, \quad (4)$$

$$B_{n,k} = (-1)^{k-1} r_n \frac{\Omega}{L} = r_n A_{n,k}, \quad (5)$$

$$C_k = -\frac{\Theta}{L}, \quad (6)$$



координата, що дорівнює куту повороту ротора ЕМП, для ротативних ЕМП, або переміщенню якоря – для лінійних ЕМП,  $\omega$  – кутова, або лінійна

швидкість, для ротативного або лінійного ЕМП відповідно,  $M$  – кількість обмоток ЕМП.

Друге. За результатами цифрових експериментів функції  $[A]_k$ ,  $[B]_k$  та  $C_k$  апроксимуємо сплайн-функціями 1-го порядку:

$$A_{n,k} = a_{0,n,k} + \sum_{m=1}^M a_{m,n,k} i_m, \quad (10)$$

$$B_{n,k} = b_{0,n,k} + \sum_{m=1}^M b_{m,n,k} i_m, \quad (11)$$

$$C_k = c_{0,k} + \sum_{m=1}^M c_{m,k} i_m, \quad (12)$$

де  $a_{m,n,k}$ ,  $b_{m,n,k}$ ,  $c_{m,k}$  – коефіцієнти сплайн-функцій, які отримані за результатами аналізу цифрового експерименту.

Третє. Перетворимо вираження для механічної координати до виду рівняння стану для лінійного або ротативного ЕМП відповідно:

$$\frac{d\omega}{dt} = D_e + D_c + E\omega, \quad (13)$$

де:

$$D_e = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[ \int_0^{i_1} \Psi_1(i_1', i_2, \dots, i_M, \gamma) di_1' + \int_0^{i_2} \Psi_2(0, i_2', \dots, i_M, \gamma) di_2' + \dots + \int_0^{i_M} \Psi_M(0, 0, \dots, i_M', \gamma) di_M' \right] \quad (14)$$

$$D_c = -\frac{M_c}{J}, \quad E = -\frac{\alpha}{J} \quad (15)$$

де  $J$  – момент інерції ротору, або маса якоря ЕМП, ротативного або лінійного виду відповідно,  $M_c$  – момент або сила опору ЕМП, ротативного або лінійного виду відповідно,  $\alpha$  – коефіцієнт тертя у підшипниках,  $\gamma$  – кутова або лінійна координата.

Четверте. Апроксимуємо функцію  $D_e$  сплайн-функціями для лінійного і ротативних ЕМП, отримаємо відповідно:

$$D_e = d_0 + d_1 \gamma, \quad D_e = d_0 + d_1 \text{ mod}(\gamma, 2\pi), \quad (16)$$

де  $d_0$ ,  $d_1$  – коефіцієнти сплайн-функцій, отримані за результатами аналізу цифрового експерименту.

Додавши в математичну модель рівняння зв'язку механічної координати  $\gamma$  і її швидкості  $\omega$ , отримаємо узагальнену математичну модель зниженого порядку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_1}{dt} = [A]_1 \cdot [e] + [B]_1 \cdot [i] + C_2 \omega, \\ \frac{di_2}{dt} = [A]_2 \cdot [e] + [B]_2 \cdot [i] + C_2 \omega, \\ \dots \\ \frac{di_M}{dt} = [A]_M \cdot [e] + [B]_M \cdot [i] + C_M \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = D_e + D_c + E\omega, \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega. \end{array} \right. \quad (17)$$

Для ідентифікації параметрів математичних моделей (17) пропонується проведення цифрових експериментів з подальшим використанням регресійного аналізу. Послідовність і результати експерименту визначаються типом магнітної системи ЕМП.

Ідентифікацію параметрів реактивного індукторного ЕМП і синхронного ЕМП зі збудженням від постійних магнітів проведено за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів (рис. 1) та подальшого регресійного аналізу. В результаті отримано поліноміальні залежності похідних потокозчеплень по струму і кутовій координаті у вигляді:

$$\begin{aligned} \Psi_k(i_1, i_2, \dots, i_M, \gamma) = & \\ = w \sum_{l=1}^m & \left[ \sum_{\substack{j_1=0 \\ j_2=0 \\ \dots \\ j_M=0}}^n aa_{j_1 \dots j_M} (i_1 M + Z)^{j_1} (i_2 M + Z)^{j_2} \dots (i_M M + Z)^{j_M} \right] \times \\ & \times \cos(pl\gamma) + \left[ \sum_{\substack{j_1=0 \\ j_2=0 \\ \dots \\ j_M=0}}^n ab_{j_1 \dots j_M} (i_1 M + Z)^{j_1} (i_2 M + Z)^{j_2} \dots (i_M M + Z)^{j_M} \right] \times \\ & \times \sin(pl\gamma) + w \sum_{\substack{j_1=0 \\ j_2=0 \\ \dots \\ j_M=0}}^n ac_{j_1 \dots j_M} (i_1 M + Z)^{j_1} (i_2 M + Z)^{j_2} \dots (i_M M + Z)^{j_M} \quad , \end{aligned} \quad (18)$$

де  $aa_{j_1 \dots j_M}$ ,  $ab_{j_1 \dots j_M}$ ,  $ac_{j_1 \dots j_M}$  – коефіцієнти полінома,  $M$  та  $Z$  – масштабний коефіцієнт та зміщення.

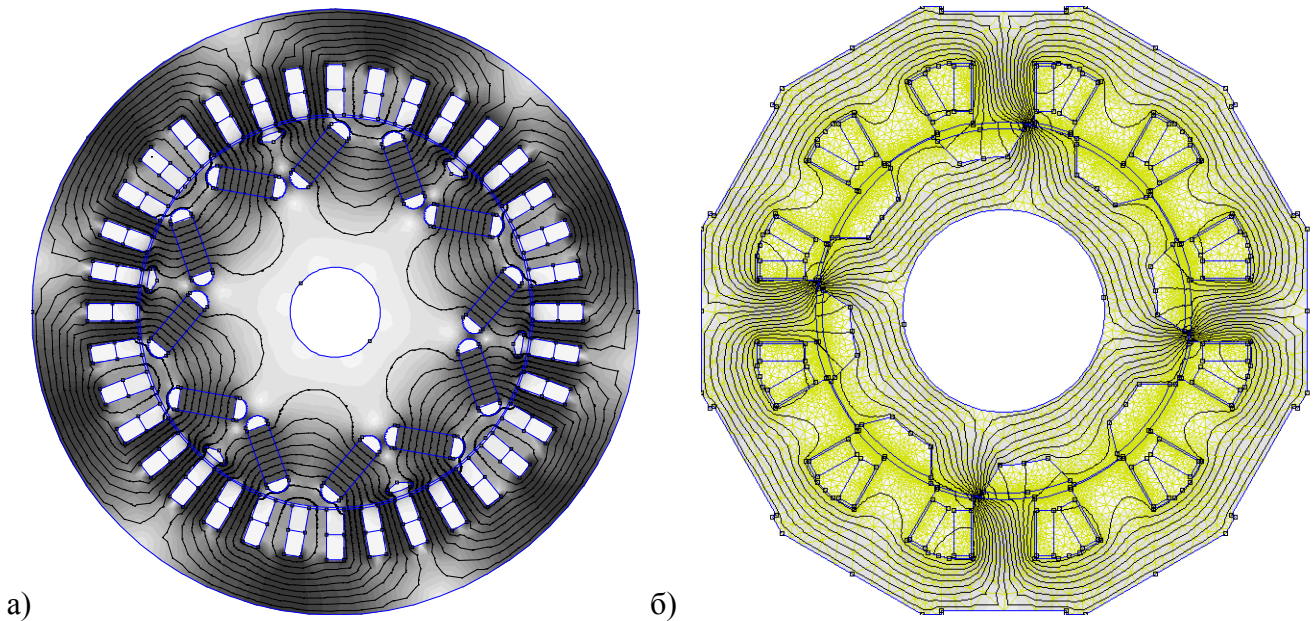


Рисунок 1 – Результати розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів:  
а – СДПМ, що розроблено RTRI; б – РД НТИ-350

Знайдені таким чином потокозчеплення та їх похідні дають можливість ідентифікувати узагальнену математичну модель СДПМ та РД.

Для ідентифікації параметрів математичної моделі ЕМП АІД, в якому магнітне поле має істотний тривимірний характер, запропоновано використовувати комбінований ланцюгово-польовий метод. Розрахунок нелінійного магнітного кола (рис. 2), магнітні опори якого знайдені за результатами розрахунку магнітного поля, здійснюється методом кінцевих елементів, з подальшою апроксимацією поліноміальними функціями. Порівняно з відомим методом, коли апроксимація стосувалася лише частини магнітного кола (зубцевої зони), апроксимація проводиться повторно для всього магнітного ланцюга. Запропоновано алгоритм ідентифікації параметрів ЕМП АІД

За результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів в аксіально-симетричній постановці задачі і подальшого регресійного аналізу отримані поліноміальні залежності похідних потокозчеплень по струму і лінійному переміщенню якоря, які дають можливість ідентифікувати узагальнену математичну модель лінійного двигуна для приводу нахилу кузова ЕРС.

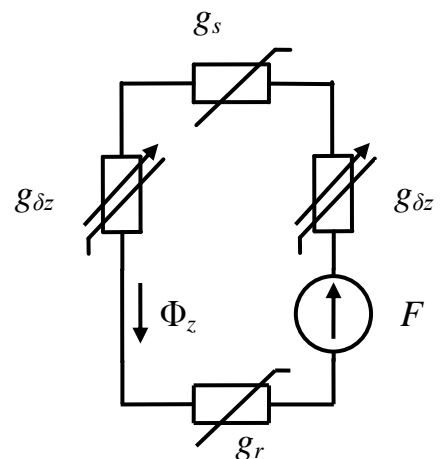


Рисунок 2– Схема заміщення магнітного кола на ділянці зубцевого кроку:  $F$  – МРС фазної котушки;  $\Phi_z$  – магнітний потік на ділянці зубцевого кроку;  $g_{\delta z}$  – нелінійно-параметрична провідність зубцевого слою;  $g_s$  – нелінійна провідність осердя статора;  $g_r$  – нелінійна провідність осердя ротору.

Проведено доказ адекватності математичної моделі ЕМП на прикладі 4-х фазного ЕМП РІД шляхом порівняння результатів фізичного експерименту та імітаційного цифрового моделювання ЕМП в середовищі MATLAB.

На рис. 3 представлені осцилограми фазної напруги і струму для різних швидкостей і моментів опору, що представлені у вигляді фону, чорним кольором показано характеристики, які отримані на імітаційній моделі. Як видно з рис. 3, результати збігаються з достатнім ступенем точності. Середньоквадратичне відхилення результатів фізичного і цифрового експериментів становить 7,21 %, що підтверджує достовірність математичної моделі.

Таким чином, розроблено узагальнену математичну модель ЕМП, як лінійного так і ротативних типів, що заснована на рішенні рівняння Лагранжа для електромеханічної системи без внесення спрощень щодо лінійності магнітної системи і «гладкого» характеру поверхні ротора або статора. Запропоновано знизити порядок математичної моделі, шляхом апроксимації її параметрів лінійними сплайн-функціями.

**Третій розділ** дисертації присвячено визначенню параметрів ЕМП у різних режимах їх роботи.

Визначення параметрів проводилося за результатами цифрових експериментів, які проведено на імітаційних моделях у середовищі MATLAB параметрів ЕМП в різних режимах їх роботи.

Для знаходження оптимальних режимів роботи ЕМП запропоновано векторну функцію, складові якої визначають: гармонійний спектр струмів ЕМП, що впливає на додаткові втрати; максимальні значення струмів і напруг на елементах напівпровідникового перетворювача, що визначають тип напівпровідникових приладів; середні і діючі значення струмів на напівпровідникових елементах, що позначаються на втратах в останніх.

Для оцінки результатів цифрових експериментів і визначення режимів роботи електроприводу в цілому, пропонується всі значення струмів і напруг привести у відносних одиницях і ввести в векторну функцію, складові якої визначають режим роботи приводу. В результаті будується матричне співвідношення:

$$\begin{bmatrix} [I_{\phi_i}] \\ [I_{\max}, U_{\max}] \\ [I_{AV_j}] \\ [I_{RMS_j}] \end{bmatrix} = f(n, [D]), \quad (19)$$

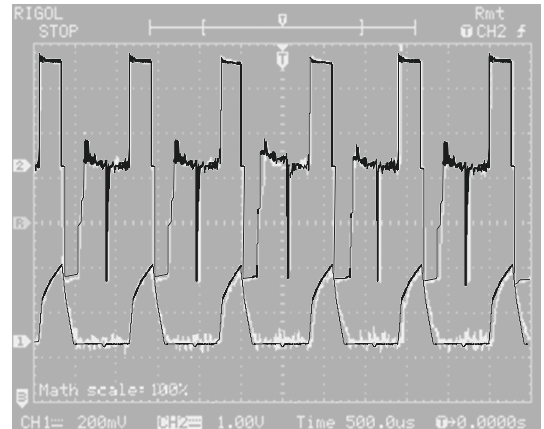


Рисунок 3 – Експериментальні розрахункові осцилограми струму і напруги фази РІД для  $M_c=0,025$  Н·м,  $n = 8500$  об/хв. Масштаби одної клітини: для струму - 2 А; для напруги - 10В.

де  $[I_{\phi_i}]$  – вектор  $i$  гармонійних складових струмів фаз ЕМП,  $[I_{\max}, U_{\max}]$  – вектор складових максимальних струмів і напруг на напівпровідникових елементах,  $[I_{AV_j}], [I_{RMS_j}]$  – вектори середніх і діючих струмів на  $j$  напівпровідниковому елементі,  $n$  – частота обертання,  $[D]$  – вектор параметрів управління.

Для моделювання тягового приводу на основі СДПМ прийнято в якості параметрів моделювання наступні компоненти вектора управління: коефіцієнт модуляції  $K_m$  (визначає величину лінійної напруги) і частоту широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)  $f_{PWM}$  (визначає частоту перемикання ключів і динамічні втрати в IGBT-транзисторах). Імітаційна модель для дослідження режимів роботи тягового приводу на основі СДПМ, представлена на рис. 4. За результатами моделювання встановлено, що при частоті ШІМ більше 1200 Гц, амплітуди вищих гармонійних, як в тяговому, так і в гальмівному режимах роботи, не перевищують 10% від діючого значення фазного струму, а при частоті 3000 Гц - 3%.

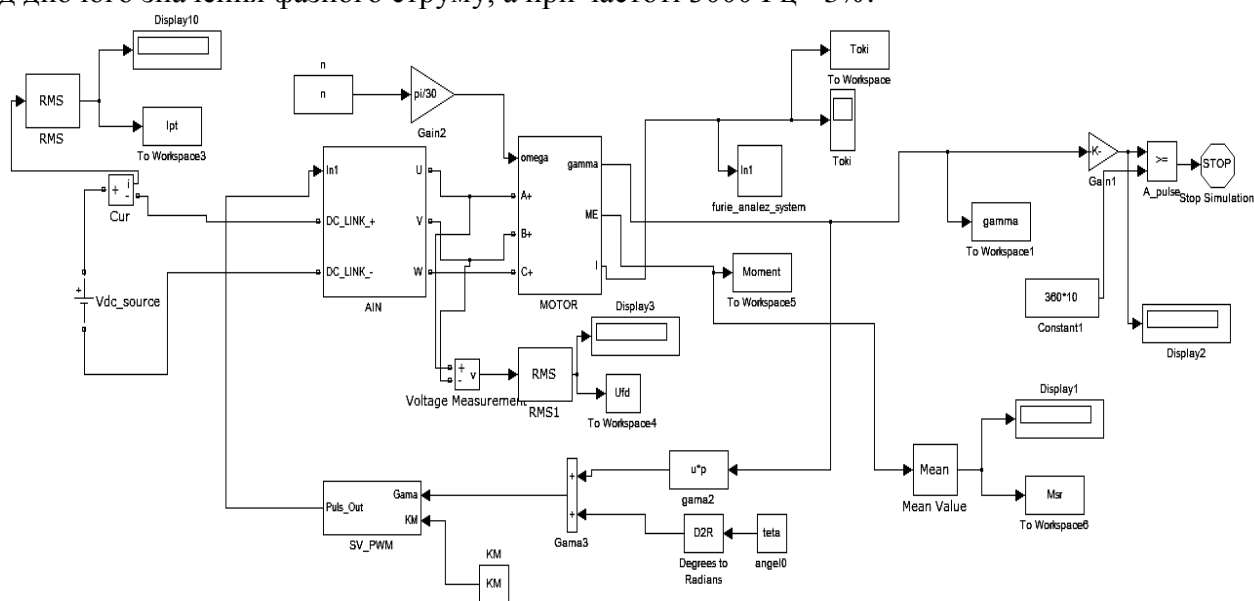


Рисунок 4. – Імітаційна модель для дослідження режимів роботи СДПМ

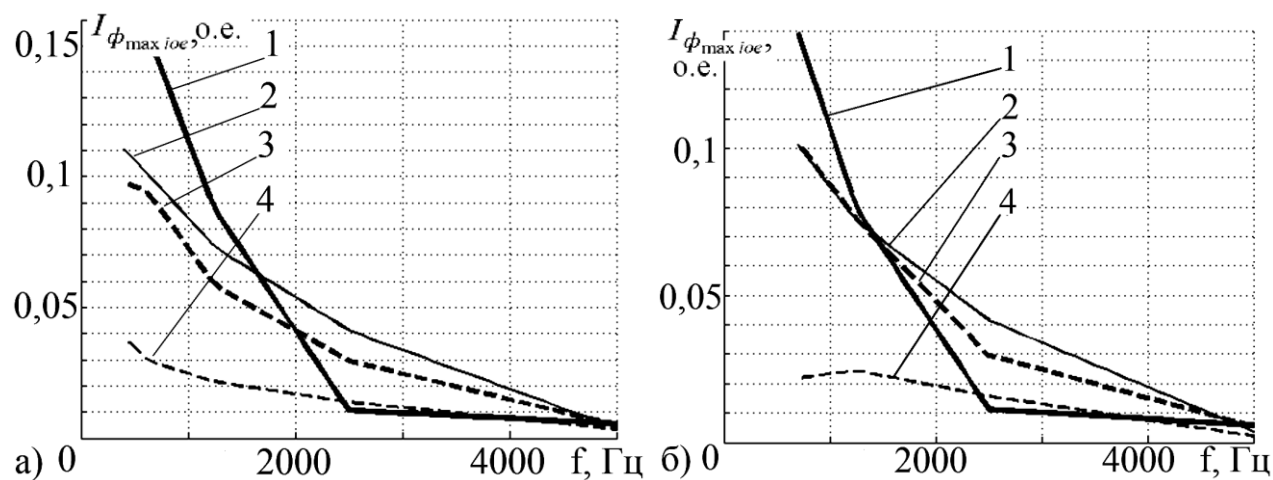


Рисунок 5 – Залежність максимального значення струмів вищих гармонійних від частоти ШІМ у відносних одиницях: а) в режимі тяги; б) в режимі гальмування; номер гармоніки: 1– 5; 2– 7; 3 – 11; 4 – 13



При застосуванні сучасних IGBT транзисторів, які дозволяють здійснювати ШІМ на частотах до 5000 Гц, вплив вищих гармонік на роботу СДПМ незначний. Однак, при використанні низькочастотних IGBT транзисторів з частотою ШІМ до 3000 Гц, врахування вищих гармонійних струмів необхідне. Всі компоненти векторної функції (19), яка визначає параметри ЕМП СДПМ, залежать від режимів роботи ЕМП та змінюються в широких межах. Ці залежності доцільно використовувати при визначенні оптимальних режимів роботи ЕМП СДПМ.

При моделюванні тягового приводу на основі ЕМП РІД та АІД приймаємо у якості параметрів моделювання: інтервал подачі напруги на обмотку  $\beta$ , виражений в електричних градусах, і частоту обертання ротора  $n$  - в об/хв. При цьому кут випередження подачі напруги  $\alpha$  вибирається оптимальним за критерієм мінімуму коефіцієнта пульсацій. Імітаційна модель для моделювання режимів роботи тягового приводу на основі РІД представлена на рис.6. Чинне значення струму, що протікає через транзистор і діод (рис.7б) лежить в межі 0,7 ... 0,92 в.о. від струму фази ЕМП РІД. Встановлено, що амплітуди гармонік струму аж до 13 лежать в межах 0,01 ... 0,98 в.о. від діючого значення струму фаз і значно впливають на робочі властивості ЕМП (рис.7а). Ці залежності доцільно використовувати при визначенні оптимальних режимів роботи ЕМП РІД.

Для моделювання тягового приводу на основі ЕМП АІД розроблено імітаційну модель, що наведено на рис. 8.

Встановлено, що діюче значення струму, який протікає через IGBT-транзистор і діод лежить в межах 0,2...0,8 в.о. струму фази (рис. 9б), а максимальне значення струмів, що протікають через ці прилади, складають 1,8 ... 2,35 в.о. від струму фази (рис. 9а) і значно впливають на робочі властивості СЕМПЕ в цілому. Ці залежності будуть так само використані при визначенні оптимальних режимів роботи ЕМП АІД.

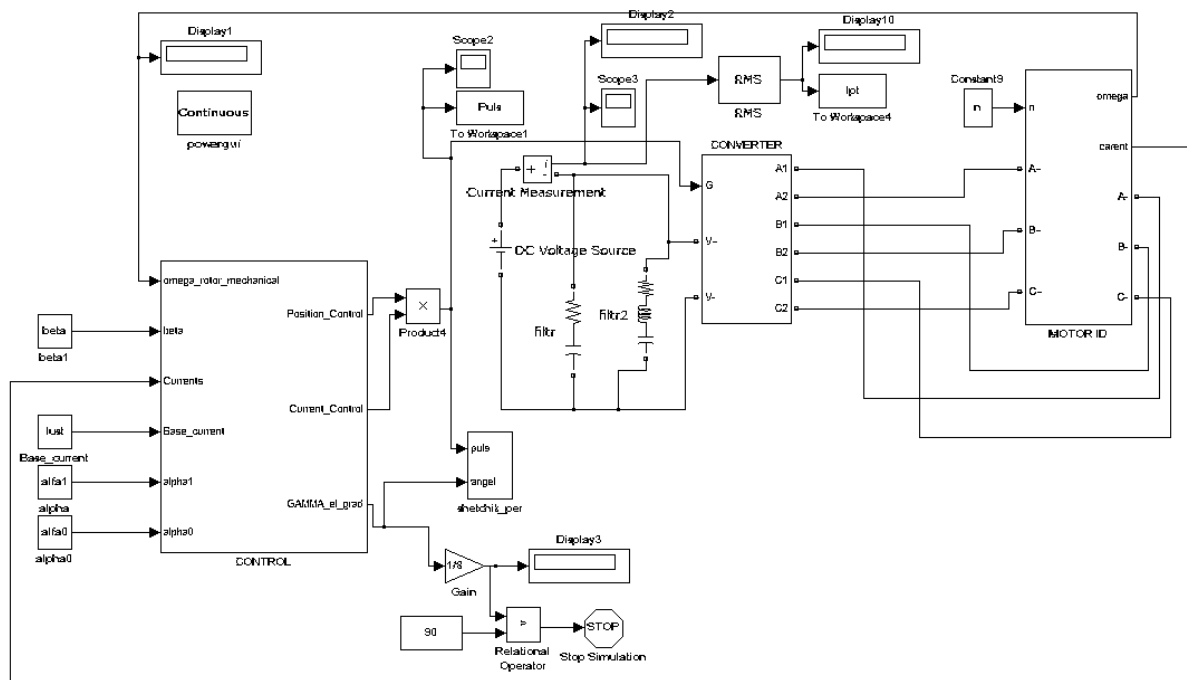


Рисунок 6 – Імітаційна модель тягового приводу на основі ЕМП СДПМ

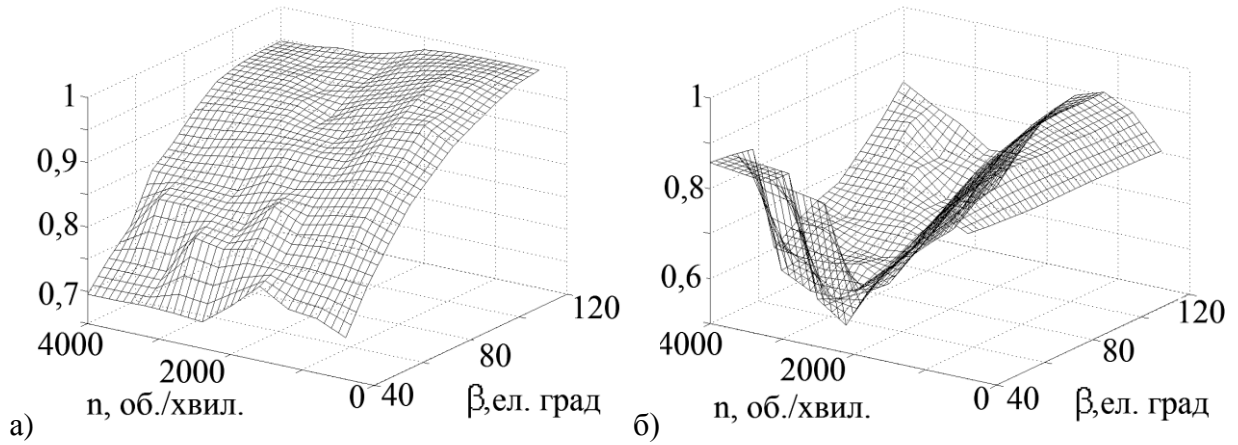


Рисунок 7 – Залежність відносного значення 1-ої гармоніки фазного струму РІД і діючого значення струму, який протікає через транзистор.

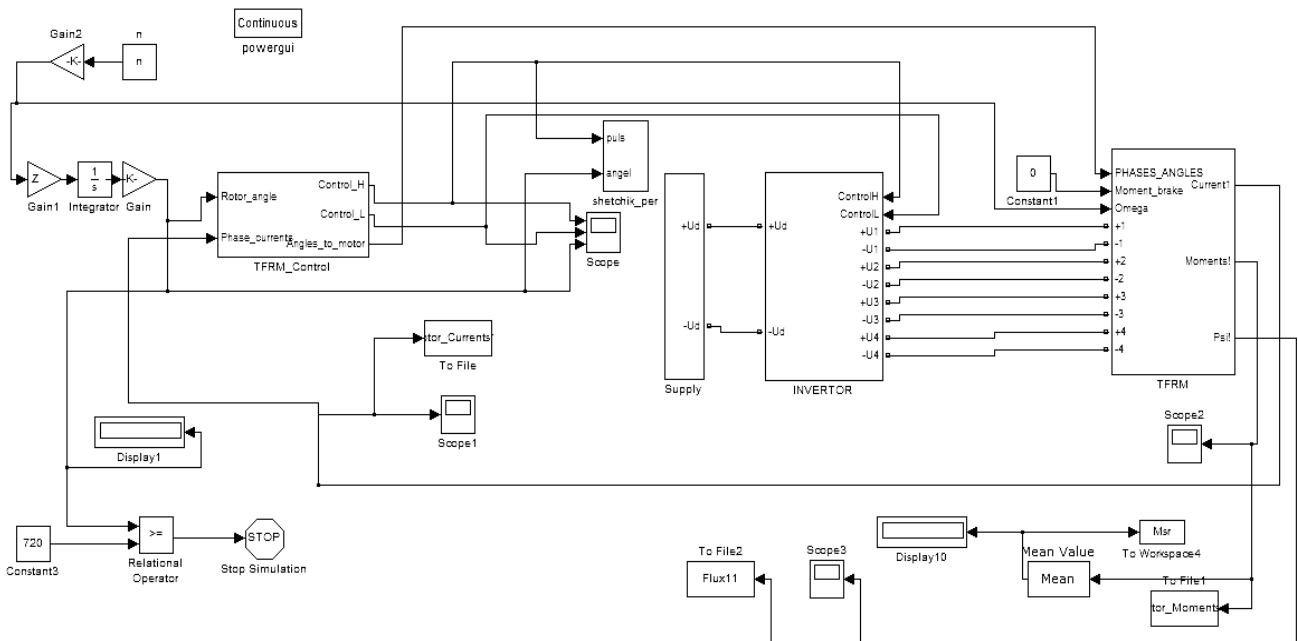


Рисунок 8 – Імітаційна модель тягового приводу на основі ЕМП АІД

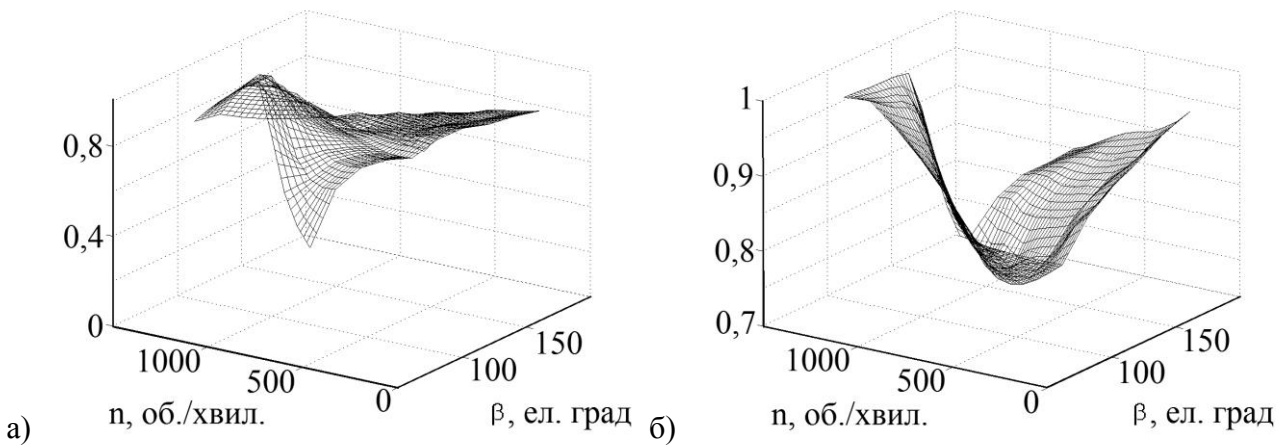


Рисунок 9 – Залежність відносного значення 1-ої гармоніки фазного струму РІД і діючого значення струму, що протікає через транзистор.

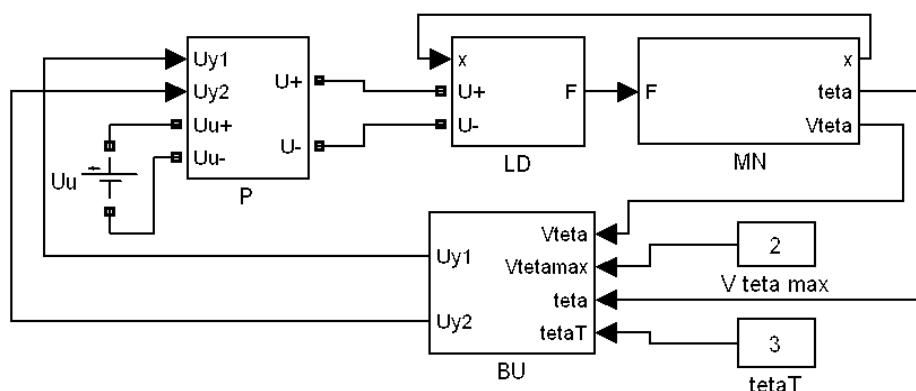


Рисунок 10 – Блок-схема імітаційної моделі СЕМПЕ приводу нахилу кузова

При моделюванні приводу нахилу кузова, на відміну від тягових приводів, дослідження його робочих властивостей проводиться спільно з механічною системою приводу, тому що в процесі роботи швидкість якоря ЕМП в цих СЕМПЕ змінюється в значних межах. Тому в імітаційну модель повинні бути включені блоки, що враховують цю обставину (рис. 10).

Критерієм, що визначає робочі властивості допоміжної системи нахилу кузова, є втрати енергії на його роботу. В якості параметрів для моделювання прийнято кут нахилу кузова тому, що від його значення, в першу чергу залежить витрата енергії на нахил кузова.

З використанням імітаційної моделі, проведено цифрове моделювання нахилу кузова електропоїзда при куті  $\theta_k = 0,5 \dots 7^\circ$  при заданій максимальній швидкості нахилу  $2 \text{ }^\circ/\text{с}$ . При моделюванні визначено втрату енергії на нахил кузова залежно від кута нахилу, що наведено на рис. 11, яку апроксимовано функцією експоненціального виду.

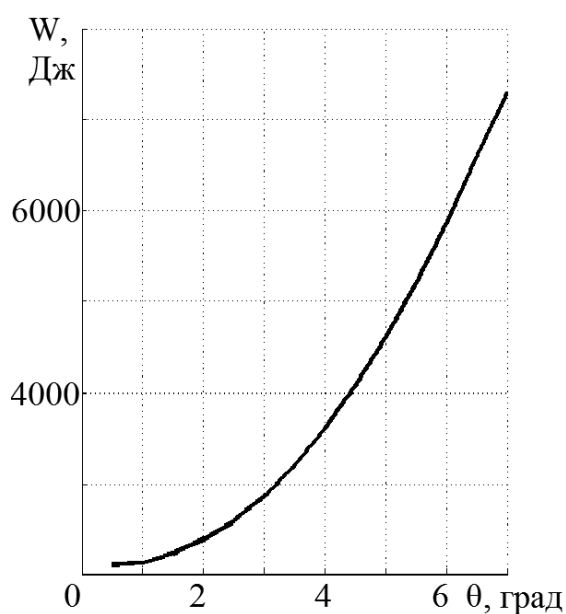


Рисунок 11 – Втрати енергії для нахилу кузова

Таким чином, для оцінки робочих властивостей тягових приводів введено векторну функцію зі складовими: амплітуди фазних струмів ЕМП, максимальні, середні і діючі значення струмів та максимальні значення напруг напівпровідникових елементів перетворювача. Ідентифікація цієї функції проводилась за результатами імітаційного моделювання в середовищі MATLAB. За результатами імітаційного моделювання отримані залежності компонентів векторної функції для тягових ЕМП – СДПМ, РІД та АІД, та втрати енергії в СЕМПЕ швидкісного поїзду з нахилом вагону.

У четвертому розділі дисертації проведена оцінка ефективності роботи різних типів тягових електромеханічних перетворювачів електрорухомого складу.

Ефективність тягового приводу в певному режимі його роботи запропоновано оцінювати за критерієм максимуму ККД за умови дотримання вимог, що накладаються режимами роботи. Тому задача визначення ефективності тягового приводу зводиться до знаходження екстремуму функції:

$$\text{MAX} \eta = f \left( \begin{bmatrix} M_{\text{зад}} \\ n_{\text{зад}} \\ t_{\text{зад}} \end{bmatrix} \right)_{\text{var}[D]}, \quad (20)$$

де  $\eta$  – ККД приводу,  $M_{\text{зад}}, n_{\text{зад}}, t_{\text{зад}}$  – заданий момент на валу, частота обертання ротора і температура ЕМП представляють вектор режиму роботи тягового приводу,  $D$  – вектор параметрів управління.

Сформульовано задачу аналізу з визначення ККД тягового приводу на основі АТД, СДПМ, РІД і АІД, залежно від параметрів вектора управління і режимів роботи тягового приводу. Особливістю моделей є зв'язок аналітичних виразів за визначенням електромагнітних параметрів ЕМП і напівпровідникового перетворювача з результатами розрахунків режимів роботи приводу, отриманих імітаційним моделюванням в середовищі MATLAB. Адекватність задач аналізу з визначення ККД тягових приводів продемонстрована порівнянням результатів розрахунків з результатами, отриманими іншими авторами.

Розроблено алгоритми розв'язання задач оптимізації параметрів управління при різних значеннях моменту на валу тягового двигуна і його частоти обертання, а також температури ЕМП. Отримані залежності ККД приводу і ЕМП апроксимовані кубічними сплайн-функціями.

Для тягового приводу на основі асинхронного двигуна визначені параметрами для оцінки ефективності тягового приводу, що дозволяє раціонально вибрати наступні компоненти вектора управління: коефіцієнт модуляції ( $K_m$ ) величина якого визначає фазну напругу тягового двигуна, величину ковзання ( $s$ ) ротора і режим роботи перетворювача – одноразової або просторово-векторної (ПВ) ШІМ. Ці величини є відносними і їх зручно використовувати для оцінки режимів роботи приводів різної потужності. Порівняння наведених кривих дозволило довести, що ККД ЕМП з ПВ ШІМ до частоти обертання 400..500 об/хв. вище, ніж ККД ЕМП з одноразовою ШІМ. Встановлено, що для малих швидкостей руху ЕРС (малих частот обертання АТД) доцільна робота тягового приводу в режимі ПВ ШІМ, а далі зі зростанням частоти обертання – в режимі одноразової ШІМ (рис. 12). Ковзання ЕМП зростає зі збільшенням частоти обертання в тяговому режимі, що викликано обмеженням струму ротора ЕМП, і різко знижується при малих значеннях частоти обертання в гальмівному режимі у зв'язку з прагненням підвищити ЕРС двигуна.

Для тягового приводу на основі СДПМ запропоновано в якості компонент вектора управління вибрати кут навантаження, коефіцієнт модуляції і режим роботи напівпровідникового перетворювача. Встановлено, що залежність ККД в режимі ПВ ШІМ має гладкий характер, що показано на рис. 13а. У режимі гальмування при частоті обертання приблизно 2000 об/хв спостерігається яр, пов'язаний із зростанням електромагнітних втрат в ЕМП, обумовлених

зростанням амплітуд вищих гармонійних струмів статора. При частотах обертання більше 4000 об/хв і моменті більше 500 Н·м спостерігається зона обмеження по струму. Режим одноразової ШІМ характеризується значною зоною, в якій не було знайдено рішення (рис. 13б), що обумовлено неможливістю регулювання напруги в цьому режимі. ККД приводу в режимі одноразової ШІМ знаходиться у вузькій зоні, при максимально великих значеннях потужності ЕМП. У режимі ПВ ШІМ ККД вище, що обумовлено більш високою напругою живлення ЕМП. Кут навантаження при регулюванні в більшості режимів підтримується  $59 \dots 68^\circ$  – у режимі тяги, і  $-65 \dots -68^\circ$  – у режимі гальмування. Він різко знижується в гальмівному режимі при малих частотах обертання, що обумовлено вимогою підтримки заданого гальмівного моменту.

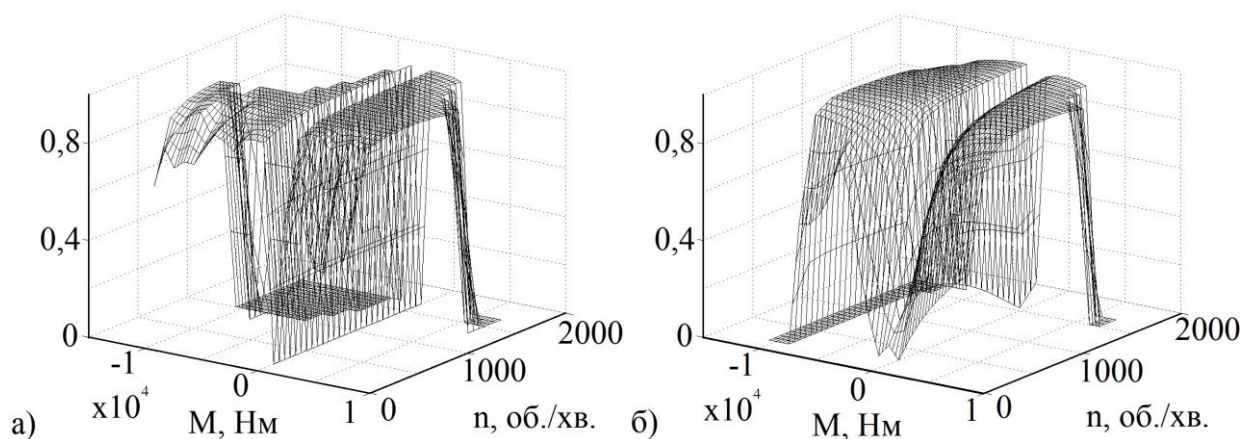


Рисунок 12 – Оптимальне значення ККД приводу на основі АТД в режимі:

а)–ПВ ШІМ та б) – одноразової ШІМ

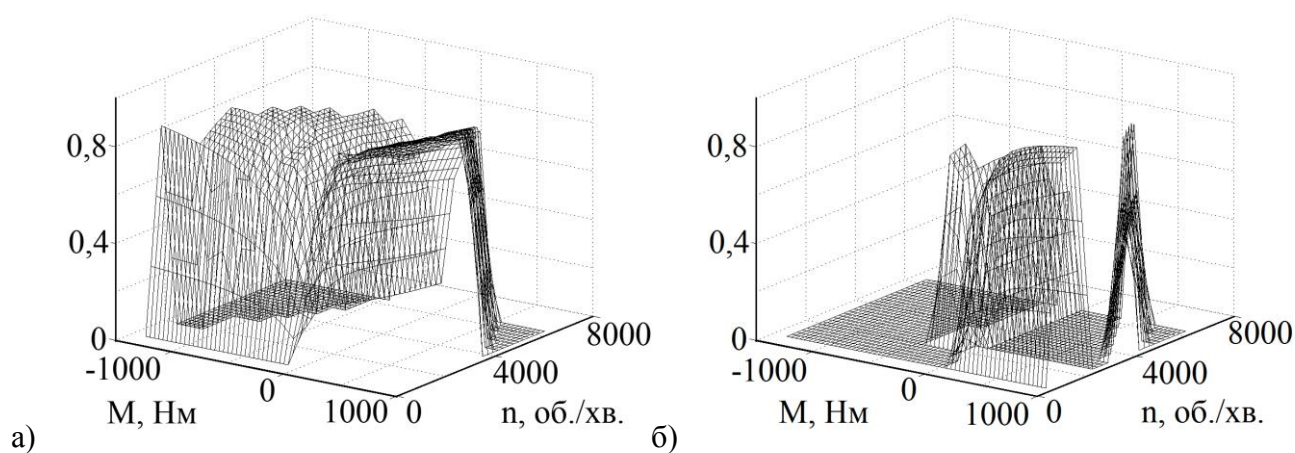


Рисунок 13 – Оптимальне значення ККД приводу на основі СДПМ в режимі:

а) – ПВ ШІМ та б) – одноразової ШІМ

Для тягових приводів на основі РІД і АІД запропоновано в якості компонент вектора управління вибрати струм секції, коефіцієнт модуляції, величина якого визначає значення струму тягового приводу та інтервалу подачі напруги на обмотку. Визначено, що залежність ККД має гладкий характер і зі значень 0,92 незначно знижується до 0,89 при частоті обертання 2000 об/хв для РІД (рис. 14) і 1050 об/хв для АІД.

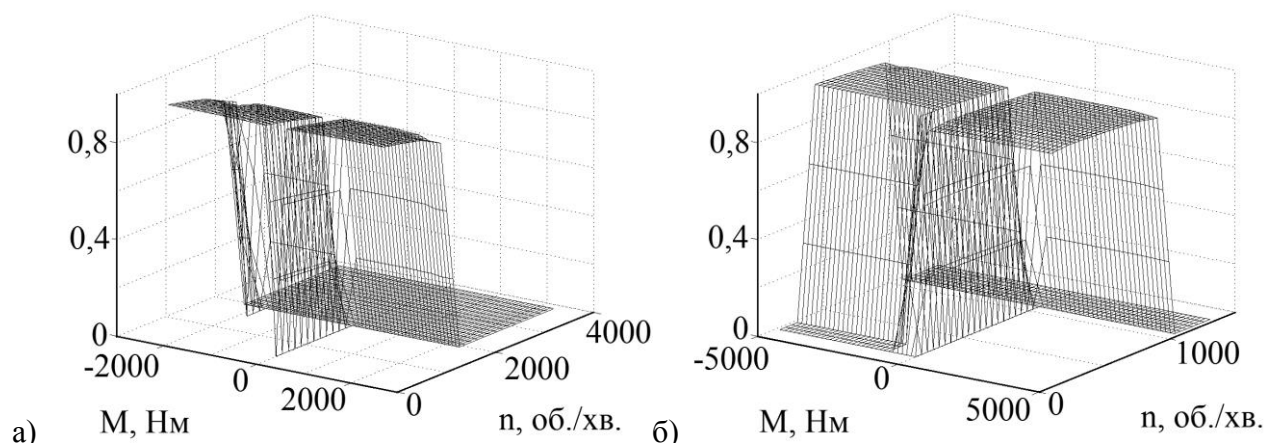


Рисунок 14 – Оптимальне значення ККД приводу на основі: а) РІД та б) – АІД

При великих частотах обертання настає режим обмеження по струму уставки, що характеризується нульовим значенням ККД, як для режиму тяги, так і для режиму гальмування. Коефіцієнт модуляції монотонно зростає при збільшенні частоти обертання і моменту ЕМП до зони обмеження з величини 0,2... 1 в.о. для режиму тяги, і 0,4 ... 1 в.о. для режиму гальмування. Інтервал подачі імпульсів, в основному, лежить в межах 147...151 ел.град. Однак, при максимальних значеннях потужності, реалізованій приводом, зростає до 240 ел. град.

Для порівняльного аналізу ефективності роботи тягових приводів розглянутих типів, введено узагальнений критерій оцінки - «комплексний ККД», що складається з наступних компонент: середній ККД і максимальний ККД електроприводу. Значення компонент вектора комплексного ККД наведено у таблиці. Середній ККД приводу характеризує можливості щодо реалізації в широкому спектрі режимів роботи - «гнучкість в роботі», а максимальний показує енергетичні можливості по перетворенню енергії в конкретному режимі роботи.

Таблиця

Компоненти комплексного ККД ЕМП

Тип ЕМП і режим роботи його перетворювача	Середній ККД, при різній температурі (в.о.)			Максимальний ККД, (тем-ра 96°C) (в.о.)
	40 °C	96°C	180°C	
АТД с ПВ ШИМ	0,5984	0,5535	0,5425	0,9781
АТД с одноразовою ШИМ	0,606	0,6422	0,597	0,9835
СДПМ с ПВ ШИМ	0,4459	0,4215	0,4155	0,9399
СДПМ с одноразовою ШИМ	0,1199	0,1138	0,1123	0,9484
РІД	0,3325	0,2936	0,2841	0,9519
АІД	0,7582	0,6933	0,6775	0,9544

Середній ККД приводу для всіх типів ЕМП знижується при підвищенні його температури, що викликано зростанням електричного опору обмоток. Його

величина, в основному, визначається розмірами зони, в якій можуть бути реалізовані режими роботи ЕМП. Найбільша ця зона у ЕМП АІД, а найменша у ЕМП СДПМ в режимі з одноразовою ШІМ. Застосування ПВ ШІМ знижує середній ККД електроприводу з АТД, що викликано підвищенням втрат в перетворювачі та зниженням напруги живлення. В електроприводі з СДПМ, навпаки, застосування ПВ ШІМ підвищує середній ККД, що викликано значним зниженням зони, в якій реалізуються режими роботи ЕМП. Максимальні значення ККД приводу незначно змінюються залежно від температури обмотки, що викликано малим значенням електричних втрат в цих режимах. Максимальний ККД лежить в межах 0,9399...0,9835 в.о., що характерно для електроприводів з ЕМП змінного струму.

Таким чином, на підставі вирішення задач аналізу по визначенню ККД тягового приводу, встановлені оптимальні значення параметрів вектору управління та ККД ЕМП та приводу в цілому для тягових приводів на основі АТД, СДПМ, РІД та АІД. Визначені раціональні режими роботи ШІМ для приводів на основі АТД та СДПМ.

**У п'ятому розділі** дисертації проведено оцінка ефективності перспективних систем перетворення енергії в електрорухомому складі на прикладі електропоїздів.

Зазначено, що наведені в попередньому розділі оцінки компонент вектора комплексного ККД дають можливість порівняти ефективність роботи приводів тільки як окремих систем перетворення енергії, що не пов'язані з режимами руху ЕРС. Тому для оцінки тягового приводу у складі ЕРС необхідно виконати наступне: побудувати математичну модель руху ЕРС по ділянці шляху з заданим профілем і графіком та знайти аналітичні залежності режимів роботи ЕРС; сформулювати критерій ефективності тягового електропривода, який встановлював зв'язок з режимами роботи і параметрами тягового електроприводу; на конкретному прикладі приміського, міжрегіонального та швидкісного мотор-вагонного ЕРС оцінити ефективність роботи розглянутих типів ЕМП.

Розроблено математичну модель та програмно-алгоритмічний комплекс для визначення кривих руху поїзда, заснований на рішенні тягової задачі, особливістю якої є визначення режимів роботи електромеханічних перетворювачів на основі векторної функції ефективності та облік їх теплового стану, що має вигляд:

$$m \frac{dv_{nc}}{dt} = \frac{1}{1+\gamma} (F - W_{nc} - F_z) , \quad (21)$$

де  $m$  – маса ЕРС;  $v_{nc}$  – швидкість руху ЕРС;  $1+\gamma$  – коефіцієнт інерції обертових частин ЕРС;  $t$  – час;  $F$  – сила тяги;  $F_z$  – гальмівна сила;  $W_{nc}$  – повний опір руху.

$$T_H \frac{dt^\circ}{dt} = \tau_{KH} - t^\circ , \quad (22)$$

де  $T_H$  – постійна часу нагріву тягових двигунів,  $\tau_{KH}$  – усталена температура ЕМП.

Запропоновано раціональний алгоритм управління ЕРС, що включає режими: максимальної сили тяги, максимальної сили рекуперативного гальмування, вибігу, тяги з максимальним ККД і рекуперативного гальмування з максимальним ККД. Ідентифіковано залежності енергетичних показників електромеханічних перетворювачів АТД, СДПМ, РІД і АІД для цих режимів роботи з урахуванням їх температури.

Введено комплексний критерій ефективності, компонентами якого, є витрата енергії ЕРС і середня швидкість його руху. При суперечливості цих компонентів, вибір раціонального ЕМП запропоновано проводити на основі відносного показника ефективності

$$W = \rho \left( \left[ \begin{array}{l} MIN(A_{nci}) \\ MAX(v_{sri}) \end{array} \right], W_{oeemsi} \right), \quad (23)$$

де  $\rho$  – функція відповідності,  $A_{nci}$  – витрата енергії  $i$ -го ЕРС,  $v_{sri}$  – середня швидкість  $i$ -го ЕРС,  $W_{oeemsi}$  – показник ефективності

$$W_{oeemsi} = \frac{W_{real}}{W_{pred}}, \quad (24)$$

де  $W_{real}$  – енергія, що перетворена ЕРС з електричної енергії в механічну енергію сили тяги або гальмування;  $W_{pred}$  – гранично можлива енергія, яку може реалізувати за умовами контакту колеса з рейкою при максимально-можливої швидкості руху на ділянці шляху.

Для запропонованих типових ділянок руху приміського, міжрегіонального (що наведено на рис. 15) та швидкісного поїздів, досліджено вплив типів електромеханічних перетворювачів енергії на криві руху.

Показано, що для приміських електропоїздів найменша витрата енергії у ЕРС з ЕМП АТД, а найбільша середня швидкість у ЕРС з ЕМП СДПМ. Згідно з показником ефективності, для максимальних швидкостей руху 50,90,120 і 140 км/год доцільно вибрати ЕМП СДПМ, для решти розглянутих швидкостей руху - ЕМП АТД.

Що стосується СЕМПЕ з ЕМП всіх розглянутих типів для міжрегіональних поїздів, такого роду закономірностей встановити не вдалося. При цьому інтерес представляють наступні факти. При швидкостях руху до 90 км/год мінімальна витрата енергії у ЕРС з ЕМП АТД, а при великих швидкостях руху - з ЕМП СДПМ. Що стосується швидкості руху, то максимальною вона була у ЕРС з ЕМП СДПМ, РІД і АТД. Однозначно кращими показники витрати енергії і середньої швидкості були тільки при швидкості 100 км/год у ЕРС з ЕМП СДПМ, а в інших випадках критерії витрати енергії і середньої швидкості були суперечливі. Згідно з показником ефективності отримано: для максимальних швидкостей руху 70, 80, 110,140 і 160 км/год - раціональним є застосування ЕМП АТД, для 90 і 130 км/год - ЕМП РІД.



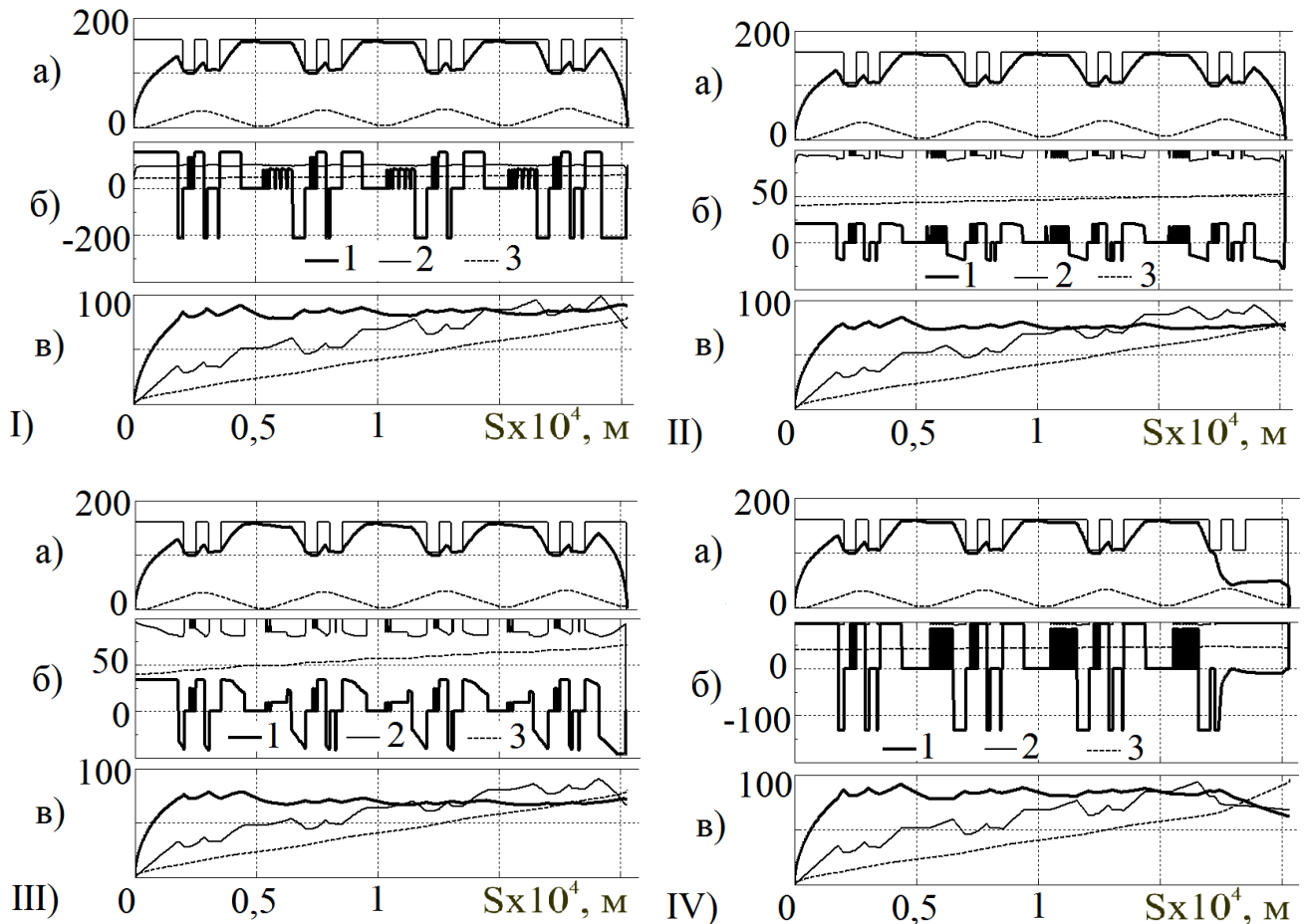


Рисунок 15 – Криві руху міжрегіонального електропоїзда з ЕМП

I)–АТД, II)–СДПМ, III)–РІД, IV) – АІД,

на графіках: а) 1-швидкість руху, км/год, 2-заданна швидкість руху, км/год, 3- профіль шляху, м; б) 1- $M_2/100$ , 2– ККД, %, 3– температура тягового

двигуна, °С, в) 1–  $W_{oeemsi} \cdot 1000$ , 2– втрати енергії, кВт год, 3– час руху/4, с

Для швидкісних ЕРС мінімальні витрати енергії виявилися у ЕРС з ЕМП АТД, а найбільша середня швидкість руху у ЕРС з ЕМП АІД. Згідно з показником ефективності для всіх максимальних швидкостей руху, крім 120 км/год, перевагу має ЕМП АІД, для максимальної швидкості 120 км/год - ЕМП АТД.

Як зазначалося в розділі 1, допоміжні СЕМПЕ можуть впливати на ефективність роботи тягового приводу. Таким прикладом може бути СЕМПЕ приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзда. Як об'єкт дослідження згаданого був обраний електропоїзд з ЕМП АІД. Тут механізмом нахилу прийнята система, розглянута в розділі 3. Для аналізу режимів роботи обрано ділянку шляху «Полтава-Красноград». Результати рішення тягової задачі наведені на рис. 16.

Для розглянутого електропоїзду та шляху згідно з критерієм ефективності, раціональним є застосування нахилу кузова до  $4^\circ$ , що дозволяє підвищити середню швидкість руху з 76,52 км/год до 113,16 км/год.

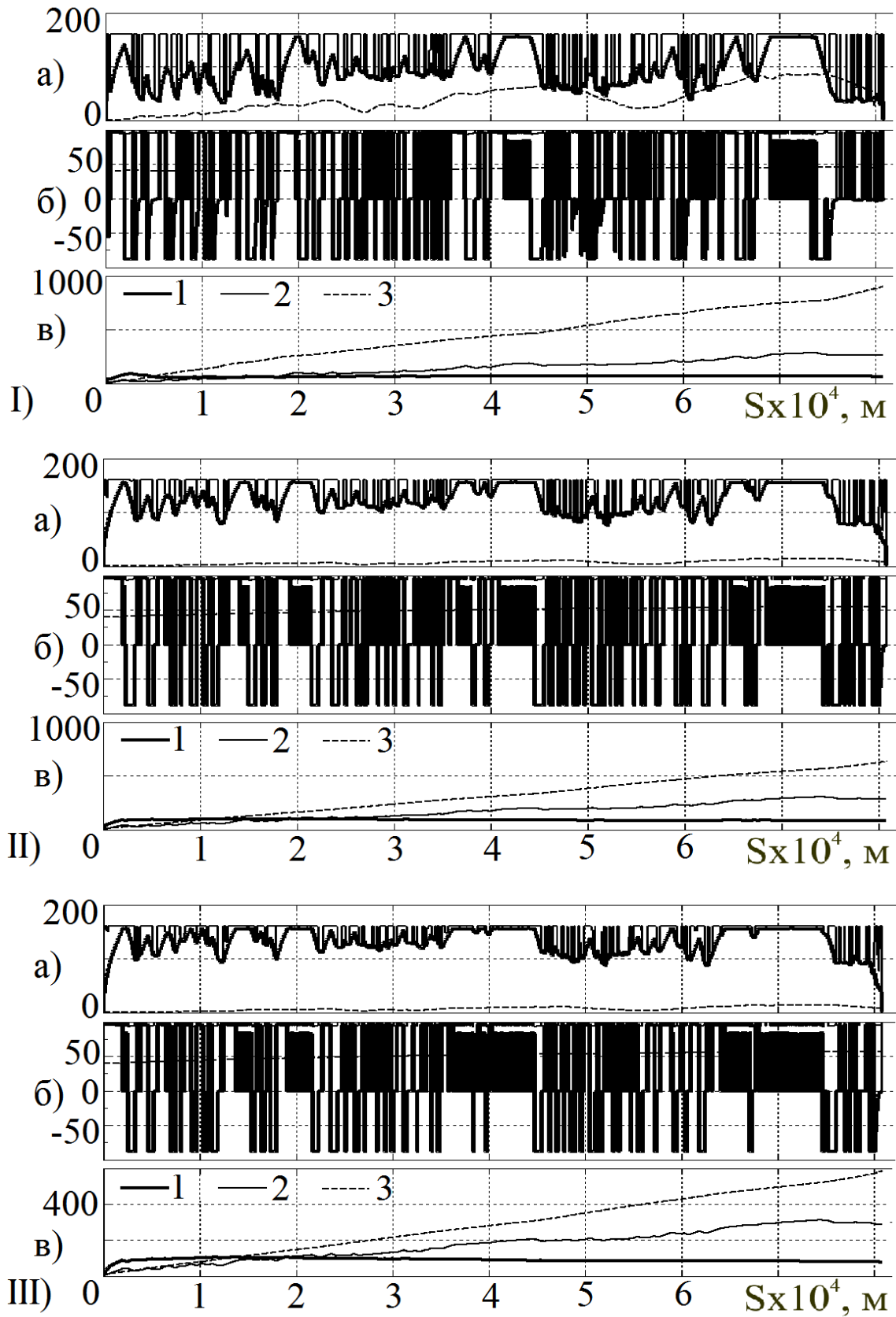


Рисунок 16 – Криві руху швидкісного електропоїзда з ЕМП  
 I)–без нахилу, II) –4 градуси, III)– 6 градусів,  
 на графіках: а) 1-швидкість руху, км/год, 2-заданна швидкість руху, км/год,

3- профіль шляху, м: б) 1- $M_2/50$ , 2- ККД, %, 3- температура тягового двигуна, °С, в) 1-  $W_{oeemsi} \cdot 1000$ , 2- втрати енергії, кВт год, 3- час руху/4, с

Таким чином, на основі запропонованого критерію ефективності за допомогою математичної моделі та програмно-алгоритмічного комплексу для визначення кривих руху поїздів обладнаних ЕМП АТД, СДПМ, РІД або АІД, визначені раціональні області їх застосування в залежності від графіку руху та призначення ЕРС.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична проблема створення теоретичних основ щодо вибору та оцінки різних типів електромеханічних перетворювачів енергії, які за результатами вирішення тягової задачі на ділянках шляху із заданим профілем і графіком руху, працюють в оптимальних режимах.

1. Для ЕМП лінійного і ротативних типів, розроблено узагальнену математичну модель, яка заснована на рішенні рівняння Лагранжа з урахуванням нелінійності магнітної системи та зубцевого характеру поверхні ротора і статора.

Запропоновано узагальнений підхід до складання математичної моделі, який включає процес ідентифікації параметрів шляхом апроксимації їх лінійними сплайн-функціями, що дає можливість знизити порядок математичної моделі без спрощення визначальних чинників.

2. Ідентифікація параметрів математичної моделі для ЕМП різних типів забезпечується різними методами розрахунків магнітного поля та функціями апроксимації результатів розрахунків поточкозчеплень та її похідних, а також електромагнітного моменту чи сили.

Так, для СДПМ і РІД ідентифікація заснована на визначенні поточкозчеплень фаз з подальшою апроксимацією результатів гармонійними функціями по механічній координаті. Амплітуди гармонік представлені поліноміальними функціями струмів системи. Регресійний аналіз проведено з використанням поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок. Вигляд апроксимуючої функції отриманий на підставі вимог безперервності функції, а також її похідних в даному інтервалі та досить простому аналітичному процесі знаходження цих похідних.

Для ідентифікації параметрів математичної моделі ЕМП АІД, в якому магнітне поле має істотний тривимірний характер, запропоновано використовувати комбінований коло-польовий метод. На відміну від відомого методу, для всього магнітного кола проводилась повторна уточнююча апроксимація.

Ідентифікація параметрів математичної моделі для лінійного двигуна відрізнялася поданням магнітного поля в аксіально-симетричному вигляді.

Адекватність узагальненої математичної моделі ЕМП підтверджена результатами фізичного та імітаційного моделювання на прикладі чотирьохфазного ЕМП РІД.

3. Для оцінки робочих властивостей тягових приводів в різних режимах роботи СЕМПЕ введено поняття векторної функції. Компонентами цієї функції є: вектор амплітуд фазних струмів ЕМП, що визначає додаткові втрати від вищих гармонік струму; вектор максимальних значень струмів і напруг в

напівпровідникових елементах перетворювача, що визначає вибір елементної бази напівпровідникового перетворювача; вектор середніх і діючих значень струмів, що протікають через напівпровідникові прилади, що визначають втрати в них.

4. Створені імітаційні моделі тягових приводів в середовищі MATLAB SIMULINK для електроприводів на базі СДПМ, РІД і АІД. Електромеханічні перетворювачі енергії, які описані рівняннями узагальненої математичної моделі з ідентифікацією параметрів для кожного конкретного типу. Напівпровідникові перетворювачі представлені у вигляді стандартних елементів бібліотеки SimPowerSystem.

Визначено компоненти вектора робочих властивостей електроприводів при різних частотах обертання і параметрах вектора управління для різних СЕМПЕ та проведена ідентифікація вектора, що визначає робочі властивості для тягових приводів з різними ЕМП. Встановлено, що для СЕМПЕ на базі СДПМ при частоті ШІМ більше 1200 Гц амплітуди вищих гармонійних не перевищують 10 % від діючого значення фазного струму, а при частоті 3000 Гц – 3 % як у тяговому, так і в генераторному режимах роботи. Для СЕМПЕ на базі РІД і АІД амплітуди гармонік струму до 13-ої лежать в межах 0,01...0,98 і 0,03...0,2 діючого значення струму фаз і роблять значний вплив на робочі властивості ЕМП. Діюче значення струму через IGBT-транзистор і діод лежить в межі 0,7...0,92 і 0,2...0,8 струму фази для СЕМПЕ РІД і АІД відповідно, а максимальні значення струмів, що протікають через ці прилади, становлять 3,74...4,75 і 1,8...2,35 струму фази.

Імітаційна модель допоміжного приводу нахилу кузова в середовищі MATLAB SIMULINK, особливістю якої є застосування для моделювання механічної частини приводу модулів бібліотеки SimMechanics, показала, що залежність витрати енергії від кута нахилу кузова носить експонентний характер.

5. Сформульовано задачу аналізу та математичні моделі для визначення ККД тягового приводу на основі АТД, СДПМ, РІД і АІД, які встановлюють зв'язок параметрів вектора управління з режимами роботи тягового приводу. Особливістю цих моделей є поєднання аналітичних виразів за для визначення електромагнітних параметрів ЕМП і напівпровідникового перетворювача з результатами розрахунків режимів роботи приводу, отриманими завдяки імітаційному моделюванню в середовищі MATLAB.

6. Для порівняльного аналізу ефективності роботи тягових приводів, розглянутих типів, введено узагальнений критерій оцінки - «комплексний ККД», що складається з середнього та максимального значень. Середній ККД характеризує можливості приводу щодо реалізації в широкому спектрі режимів роботи - «гнучкість в роботі», а максимальний ККД показує енергетичні можливості по перетворенню енергії в конкретному режимі роботи. Величина середнього ККД, в основному, визначається розмірами зони, в якій можуть бути реалізовані режими роботи ЕМП. Ця зона найбільша у ЕМП АІД, а найменша у ЕМП СДПМ в режимі з одноразовою ШІМ. Застосування ПВ ШІМ знижує середній ККД електроприводу з АТД, що викликано підвищенням втрат в перетворювачі та зниженням напруги живлення. В електроприводі з СДПМ, навпаки, застосування ПВ ШІМ підвищує середній ККД, що викликано значним збільшенням зони, в якій реалізуються режими роботи ЕМП. Максимальні

значення ККД приводу незначно змінюються залежно від температури обмотки, що викликано малим значенням електричних втрат в цих режимах.

7. На базі рішення тягової задачі розроблено математичну модель та програмно-алгоритмічний комплекс для визначення кривих руху поїздів, особливістю їх є реалізація оптимальних за критерієм ККД СЕМПЕ режимів роботи ЕМП та обліку їх теплового стану і раціонального алгоритму управління ЕРС.

8. Запропоновано комплексний критерій ефективності роботи ЕРС, компонентами якого є витрата енергії і середня швидкість руху поїздів. При суперечливості компонентів цього критерію, вибір раціонального ЕМП запропоновано проводити на основі показника ефективності, визначеного як відношення енергії, що перетворено ЕРС з електричної в механічну, до гранично можливої енергії, що можливо реалізувати за умовами зчеплення колесо-рейка при максимально можливій швидкості руху.

9. Для запропонованих типових ділянок руху приміського, міжрегіонального та швидкісного електропоїздів, встановлені доцільні типи ЕМП при заданих максимальних швидкостях руху.

Водночас встановлено, що при зіставленні систем електромеханічного перетворення енергії на базі АТД, СДПМ, РІД і АІД однозначної відповіді на питання, який з типів ЕМП у всьому діапазоні режимів роботи ЕПС є кращим – немає. Тому при створенні нової ділянки залізниці, вибір типу ЕМП для рухомого складу, що експлуатується на ньому, необхідно проводити на підставі комплексного критерію ефективності.

11. На прикладі рішення тестової задачі показано, що для швидкісних поїздів з ЕМП АІД на ділянці шляху «Полтава-Красноград» згідно з критерієм ефективності, раціональним є застосування нахилу кузова до  $4^\circ$ , що дозволяє підвищити середню швидкість руху з 76,52 км/год до 113,16 км/год.

12. Результати дисертації впроваджені в ДП «завод Електроважмаш», ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України» і в навчальній роботі в НТУ «ХП», що підтверджено актами.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Любарский Б.Г. Тяговый привод для высокоскоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, Д.Ю. Зюзин, Е.С. Рябов, Т.В. Глебова // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – 2006. – №42. – С.72-77.

*Здобувачем проаналізовані конструкції синхронних тягових двигунів для швидкісного рухомого складу.*

2. Любарский Б.Г. Перспективный тяговый привод на базе двигателей с поперечным полем / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов// Залізничний транспорт України. –2007. – №2/1. – С.46–48

*Здобувачем розглянуто принцип роботи двигуна з поперечним полем.*

3. Любарский Б.Г. Цифровое моделирование тягового привода на основе синхронного тягового двигателя с возбуждением от постоянных магнитов /

Б.Г. Любарский, Д.Ю. Зюзин, А.В. Демидов, Т.В. Глебова Е.С. Рябов// Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – 2007. – №37. – С.121-123.

*Здобувачем розроблено імітаційну модель тягового електроприводу.*

4. Любарский Б.Г. Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова. // Залізничний транспорт України.– 2008. – №2/1. – С. 26–31.

*Здобувачем проведено аналіз перспективних двигунів.*

5. Любарский Б.Г. Математическая модель тягового привода на основе двигателя с поперечным полем / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Т.В. Глебова, М.Л. Глебова // Коммунальное хозяйство городов. – 2008. – Вып. 81. – С. 283–288

*Здобувач склав механічні рівняння двигуна.*

6. Любарский Б.Г. Математическое моделирование тягового привода на основе двигателя с поперечным полем / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Т.В. Глебова, М.Л. Глебова // Коммунальное хозяйство городов. – 2008. – Вып. 84. – С. 282–290

*Здобувач розробив модель двигуна з поперечним полем.*

7. Любарский Б.Г. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова // Локомотив-информ. – 2008. №1 – С. 16–19

*Здобувач проаналізував конструкції синхронних тягових двигунів.*

8. Любарский Б.Г. Аппроксимация зависимостей электромагнитных параметров тягового синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов /Любарский Б.Г., Парфенюк Т.В., Ерицян Б.Х. // Східно-європейський журнал передових технологій – 2009. – 6/6(42) С.51–54

*Здобувач розробив методіку визначення залежностей електромагнітних параметрів двигуна.*

9. Любарский Б.Г. Безредукторный тяговый привод: перспективы применения на отечественном подвижном составе / Б.Г. Любарский, Б.Х. Ерицян, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова // Залізничний транспорт України.– 2009. – №2/1. – С. 21–23.

*Здобувачем розглянуті основні типи безредукторних тягових приводів.*

10. Любарский Б.Г. Имитационная модель системы управления инвертором напряжения, работающего по методу пространственно векторной ШИМ при постоянстве амплитуды суммарного вектора напряжения. / Б.Г. Любарский, А.В. Демидов, Т. В. Парфенюк // Вісник НТУ «ХПІ» - Харків: НТУ «ХПІ» – 2009. № 47 – С.34-40.

*Здобувачем розроблені блоки системи управління та інвертора в імітаційній моделі.*

11. Любарский Б.Г. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, В.Л. Емельянов // Електротехніка і електромеханіка – 2009. – № 5 – С.67-72

*Здобувачем розроблені блоки двигуна і напівпровідникового перетворювача.*

12. Любарский Б.Г. К вопросу определения электромагнитного момента реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком. /Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.Ю. Зюзин, В.Л. Емельянов // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №5. – С. 28–30.

*Здобувач запропонував методику визначення моменту двигуна і її реалізацію.*

13. Любарский Б.Г. Концепция выбора типа тягового электропривода современного скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский // Вісник НТУ «ХПІ» – 2010. – № 39 – С.102-107.

14. Любарский Б.Г. К вопросу расчёта мощности тягового привода скоростного электропоезда / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов // Механіка та машинобудування. – 2010. – №1. – С. 125–128.

*Здобувач провів розрахунок потужності та режимів роботи тягового приводу швидкісного електропоезда*

15. Любарский Б.Г. Моделирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Д.Ю. Зюзин. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 57. – С. 243–251.

*Здобувачем проведено моделювання безредукторного тягового приводу на основі реактивного индукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком і обраний раціональний метод для вирішення задачі.*

16. Любарский Б.Г. Упрощенная математическая модель магнитного поля двигателя с поперечным полем/ Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Т.В. Глебова, М.Л. Глебова // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008.– №2– С. 72-78

*Здобувач запропонував основний підхід до розрахунку магнітного поля.*

17. Любарский Б.Г. Цифровое моделирование процессов в тяговом вентильно-индукторном электроприводе на базе имитационной модели / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2010. – 6/7(48). – С.20–23

*Здобувач розробив імітаційну модель електроприводу.*

18. Любарский Б.Г. Влияние параметров исполнительного механизма на показатели работы линейного двигателя в системе привода наклона вагонов скоростных поездов / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин // Науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка».– Харків: НТУ «ХПІ», 2011.– №4.– С.47-52.

*Здобувач запропонував вектори параметрів та показників для оцінки робочих властивостей механізму нахилу кузова, розробив імітаційну модель лінійного двигуна.*

19. Любарский Б.Г. Концептуальный проект электро-механической системы привода с линейным двигателем для наклона кузова / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Б.Х. Ерицяян // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".– 2011. – № 18. – С. 84–89.

*Здобувач визначив характеристики лінійного двигуна.*

20. Любарский Б.Г. Моделирование механизма наклона кузова с приводом на базе линейного электродвигателя / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин// Залізничний транспорт України. –2011. – № 2. – С. 48-52.



*Здобувач розробив модель лінійного двигуна нахилу кузова.*

21. Любарский Б.Г. Имитационная модель тягового безредукторного индукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна . – 2011 – Вип 37 – С. 203–210

*Здобувач розробив імітаційну модель двигуна.*

22. Любарский Б.Г. Идентификация параметров математической модели вентильно-индукторного трехфазного двигателя непрерывными функциями на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек / С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, Б.Г. Любарский // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3/(19) – С. 605-606

*Здобувач запропонував використовувати поліноми Чебишева для ідентифікації параметрів математичної моделі двигуна.*

23. Любарский Б.Г. Концептуальный проект скоростного электропоезда с безредукторным приводом на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, М.Л. Глебова// Світлотехніка та електроенергетика. – 2012 – №1(29) – С. 68-70

*Здобувачем встановлено основні характеристики тягового двигуна.*

24. Любарский Б.Г. Математическая модель реактивного индукторного трехобмоточного электромеханического преобразователя / Б.Г. Любарский, С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, Н.А. Гордеева// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2012. – № 19. – С. 95–104

*Здобувач запропонував розробку математичної моделі проводити на підставі рішення рівняння Лагранжа для електромеханічної системи.*

25. Любарский Б.Г. Математическая модель синхронного тягового электромеханического преобразователя с возбуждением от постоянных магнитов / Б.Г. Любарский// Світлотехніка та електроенергетика. – 2012.– №3(31) – С. 62-71

26. Любарський Б.Г. Сили опору руху електрорухомого складу залізниць / Б.Г. Любарський, С.Ю. Червяков, М.М. Калюжний // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2012. – № 20. – С. 91-96

*Здобувачем проаналізовані питомі опору руху електропоїздів.*

27. Любарський Б.Г. Математическое моделирование вентильно-индукторного привода для стрелочного перевода /Б.Г. Любарский, В.И. Мойсеенко, Н.П. Карпенко, С.Г. Буряковский, А.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – №1(98). – С. 67-76

*Здобувачем розроблена модель вентильно-індукторного двигуна.*

28. Любарский Б.Г. Имитационное моделирование тягового привода мотор-вагонного подвижного состава в среде MATLAB SIMULINK / Б.Г. Любарский, А.В. Демидов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – 2013. – № 31– С. 94–100

*Здобувачем розроблені наступні елементи імітаційної моделі: тяговий двигун і система управління.*

29. Любарский Б.Г. Определение эффективности тягового привода электропоездов / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, С.Ю. Червяков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 32– С. 67–75

*Здобувач запропонував критерії оцінки ефективності тягового приводу.*

30. Любарский Б.Г. Оптимизация системы управления вентильно-индукторного двигателя для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, А.В. Шевчукова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 61–67.

*Здобувач розробив модель вентильно-індукторного двигуна.*

31. Любарский Б.Г. Разработка и исследование системы управления вентильно-реактивным электродвигателем / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 36(1009)– С. 195–197

*Здобувачем визначені вимоги, що пред'являються до системи управління з боку двигуна.*

32. Любарский Б.Г. Система принудительного наклона кузова подвижного состава на базе силового привода с линейным двигателем / Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Е.С. Редченко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения– Ростов-на-Дону.– 2013. – № 1(65)– С. 162–174

*Здобувач визначив вимоги, які пред'являються до лінійного двигуна нахилу кузова.*

33. Любарский Б.Г. Выбор типа тягового электромеханического преобразователя энергии для пригородного электропоезда / Б.Г. Любарский// Вестник Белгородского государственного университета им. В.Г. Шухова – Белгород: РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова.– 2014. – № 3– С. 184–188

34. Любарский Б.Г. Определение рационального угла наклона кузова скоростного электропоезда с тяговым приводом на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком /Б.Г. Любарский , // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – 2014. – № 6(1049)– С. 118–123

35. Любарский Б.Г. Оптимальные режимы работы тягового привода на основе реактивного индукторного двигателя / Б.Г. Любарский// Світлотехніка та електроенергетика. – 2014 —№1 – С. 58–62

36. Любарский Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода / Б.Г. Любарский // Электрика – Курск. – 2014 – №6 –С 5-10.

37. Любарский Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового привода на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов /Б.Г. Любарский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ.– 2014. – № 2(105)– С. 21–24

38. Lyubarskiy B.G., Selezionare il tipo di convertitore di energia di trazione elettrica per i treni elettrici interregionali./ *Italian Science Review*. 2014; 3(12). PP. 273-276.

39. Любарский Б.Г. Безредукторный колёсно-моторный блок на базе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов // Наука, творчество и образование в области электроснабжения – достижения и перспективы: Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием представителей производства, ученых транспортных вузов и инженерных работников (г. Хабаровск, 11-12 ноября 2010 г.) / Под ред. В.Н. Ли, И. В. Игнатенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. – С. 77–81

*Здобувач запропонував конструкцію безредукторного тягового приводу.*

40. Любарский Б.Г. Имитационная модель тягового синхронного привода с пространственно векторной ШИМ при постоянстве амплитуды вектора напряжения статора/ Б. Г. Любарський, А. В. Демідов, Т.В. Парфенюк Зюзін Д.Ю. // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы докладов 70 международной научно-практической конференции. – Днепропетровск: ДНУЗТ. – 2010. – С.90.

*Здобувач розробив блоки системи управління та опору руху.*

41. Любарский Б.Г. Математическая модель тягового вентильно-индукторного электропривода для скоротного электроподвижного состава / Л.В. Оверьянова, Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.Ю. Зюзин // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы докладов 70 международной научно-практической конференции. – Днепропетровск: ДНУЗТ. – 2010. – С.101-102.

*Здобувач розробив рівняння електромеханічного перетворювача приводу.*

42. Любарский Б.Г. Методика расчета тягового синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов/ Б. Г. Любарский, А. В. Демідов, Т.В. Парфенюк, Е.С. Рябов, Д.Ю. Зюзин // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы докладов 70 международной научно-практической конференции. – Днепропетровск: ДНУЗТ. – 2010. – С.93-94.

*Здобувач запропонував методику з визначення режимів роботи двигуна.*

43. Любарский Б.Г. Проектирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы докладов 70 международной научно-практической конференции. – Днепропетровск: ДНУЗТ. – 2010. – С.94-95.

*Здобувач розробив методику визначення моменту тягового двигуна з аксіальним магнітним потоком.*

44. Любарський Б. Г. Моделювання тягового вентильно-індукторного електроприводу для швидкісного електрорухомого складу / Л.В Овер'янова.; Є.С Рябов.; Д.Ю. Зюзін; Б.Г. Любарський // Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я»: Тезиси докладів. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – С.224.

*Здобувач розробив математичну модель вентильно-індукторного електродвигуна.*

45. Любарский Б.Г. Выбор критерия эффективности тягового привода подвижного состава / Б.Г. Любарский // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте Eltrans`2011: Тезисы докладов VI Международного симпозиума. – СПб: Петербургский гос. ун-т путей сообщения – 2011. – С.76.

46. Любарский Б. Г. Вибір типу тягового приводу сучасного рухомого складу / Б.Г. Любарський// Международная научно-практической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье»: Тезисы докладов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – С.170.

47. Любарский Б.Г. Безредукторный тяговый привод на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком /Б.Г. Любарский, В.И. Омеляненко // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте Eltrans`2011: Тезисы докладов VI Международного симпозиума. – СПб: Петербургский гос. ун-т путей сообщения – 2011. – С.77.

*Здобувач запропонував загальну конструкцію безредукторного тягового приводу.*

48. Любарский Б.Г. Имитационное моделирование механизма наклона кузова с линейным электромеханическим преобразователем. / Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин // MATLAB: материалы V Международной научной конференции (г. Харьков, 11 – 13 мая 2011г.) / сост. В.В. Замаруев. – Харьков: «БЭТ», 2011. – С. 425–436.

*Здобувачем розроблені наступні елементи імітаційної моделі: лінійний двигун, перетворювач і система управління.*

49. Любарский Б.Г. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MATLAB Simulink /Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов // MATLAB: материалы V Международной научной конференции (г. Харьков, 11 – 13 мая 2011г.) / сост. В.В. Замаруев. – Харьков: «БЭТ», 2011. – С. 404–424.

*Здобувачем ідентифіковані параметри імітаційної моделі тягового двигуна.*

50. Любарский Б.Г. Привод на базе линейного двигателя для наклона кузова подвижного состава /Б.Г. Любарский, В.И. Омеляненко, Д.И. Якунин // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте Eltrans`2011: Тезисы докладов VI Международного симпозиума. – СПб: Петербургский гос. ун-т путей сообщения – 2011. – С.77.

*Здобувач запропонував конструкцію лінійного двигуна нахилу кузова.*

51. Любарский Б. Г. Моделирование системы нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу з комбінованим електромеханічним та пневматичним приводом / Б.Г. Любарський, Б.Х. Єриця, Д.І. Якунін// Международная научно-практической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье»: Тезисы докладов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – С.168.

*Здобувачем розроблена електромеханічна частина приводу нахилу.*

52. Любарський Б. Г. Моделювання тягового приводу електрорухомого складу на основі синхронних тягових двигунів / Б. Г. Любарський // Международная научно-практической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье»: Тезисы докладов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – С.181.

53. Любарский Б.Г. Имитационное моделирование электроприводов электроподвижного состава на основе математических моделей двигателей, учитывающих расчет магнитного поля в них методом конечных элементов /Б.Г. Любарский // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: Тезисы докладов на VII Международном симпозиуме «Eltrans' 2013». – – СПб: Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2013. – С.63.

54. Свід. про рег. авторських прав № 53923 Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма расчета режимов работы и движения поездов с электрической тягой, которые оборудованы тяговыми двигателями переменного тока» / Б.Г. Любарський, В.І. Омеляненко, С.Ю. Черв'яков; зареєстр. 04.03.2014р

*Здобувач розробив алгоритм розрахунку режимів роботи тягових двигунів.*

## АНОТАЦІЇ

**Любарський Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. - «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, - 2014.

Дисертація присвячена створенню теоретичних основ вибору та оцінки типу електромеханічних перетворювачів енергії, що працюють в оптимальних режимах з урахуванням нелінійності їх електрофізичних властивостей, на основі рішення тягової задачі на ділянці шляху з заданим профілем і графіком руху.

Для ЕМП лінійного і ротативних типів, розроблено узагальнену математичну модель, що основана на рішенні рівняння Лагранжа для електромеханічної системи з урахуванням нелінійності магнітної системи і зубцевого характеру поверхні ротора і статора.

Створені імітаційні моделі тягових приводів в середовищі MATLAB SIMULINK для електроприводів на базі СДПМ, РІД і АІД, електромеханічні перетворювачі енергії та проведена ідентифікація вектора, що визначає їх робочі властивості. Сформульовано задачу аналізу з визначення ККД тягового приводу на основі АТД, СДПМ, РІД і АІД. Розроблено математичну модель та програмно-алгоритмічний комплекс для визначення кривих руху поїзда, що основана на рішенні тягової задачі, особливістю якої є реалізація оптимальних, за критерієм ККД СЕМПЕ, режимів роботи ЕМП, обліку їх теплового стану і раціонального алгоритму управління ЕРС.

Запропоновано комплексний критерій ефективності роботи ЕРС, компонентами якого є витрати енергії і середня швидкість руху поїздів. При суперечливості компонентів цього критерію, вибір раціонального ЕМП запропоновано проводити на основі показника ефективності.

*Ключові слова:* електромеханічний перетворювач енергії, електрорухомий склад, критерій ефективності тягового електропривода, тяговий електродвигун, привід нахилу кузова.

**Любарский Б.Г. Теоретические основы для выбора и оценки перспективных систем электромеханического преобразования энергии электроподвижного состава. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.09. – «Электротранспорт». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Харьков, – 2014.

Диссертация посвящена созданию теоретических основ выбора и оценки типа электромеханических преобразователей энергии, работающих в оптимальных режимах с учетом нелинейности их электрофизических свойств, на основе решения тяговой задачи на участке пути с заданным профилем и графиком движения. На основании проведенного анализа показано, что перспективными для использования на электроподвижном составе являются электромеханические преобразователи на основе асинхронных, синхронных с возбуждением от постоянных магнитов и реактивных индукторных двигателей, а также на основе реактивного двигателя с аксиальным магнитным потоком. Обосновано влияние на эффективность тягового привода вспомогательных приводов, например привода наклона кузова электропоезда.

Для ЭМП линейного и ротативного типов, разработана обобщенная математическая модель, основанная на решении уравнения Лагранжа для электромеханической системы с учетом нелинейности магнитной системы и зубцового характера поверхности ротора и статора. Впервые предложен новый подход к составлению математической модели, который заключается в идентификации параметров за счет аппроксимации их линейными сплайн-функциями, что дает возможность понизить порядок математической модели без упрощения определяющих факторов. Адекватность обобщенной математической модели подтверждена результатами физического и имитационного моделирования.

Созданы имитационные модели тяговых приводов в среде MATLAB SIMULINK для электроприводов на базе СДПМ, РИД и АИД, электромеханические преобразователи энергии и проведена идентификация вектора, определяющего их рабочие свойства.

Сформулированы задачи анализа по определению КПД тягового привода на основе АТД, СДПМ, РИД и АИД, в зависимости от параметров вектора управления и режимов работы тягового привода. Особенностью этих моделей является связь аналитических выражений по определению электромагнитных параметров ЭМП и полупроводникового преобразователя с результатами

расчётов режимов работы привода, полученными имитационным моделированием в среде MATLAB.

Для сравнительного анализа эффективности работы тяговых приводов, рассматриваемых типов впервые введен обобщенный критерий оценки – «комплексный КПД», состоящий из следующих компонент: средний и максимальный КПД электропривода.

Разработана математическая модель и программно-алгоритмический комплекс для определения кривых движения поезда, основанная на решении тяговой задачи, особенностью которой является реализация оптимальных, по критерию КПД СЭМПЭ, режимов работы ЭМП, учет их теплового состояния и рационального алгоритма управления ЭПС.

Предложен комплексный критерий эффективности работы ЭПС, компонентами которого являются расход энергии и средняя скорость движения поездов. При противоречивости компонентов этого критерия, выбор рационального ЭМП предложено проводить на основе показателя эффективности.

Для типовых участков движения пригородного, межрегионального и скоростного поездов исследовано влияние типов электромеханических преобразователей энергии на кривые движения.

*Ключевые слова:* электромеханический преобразователь энергии, электроподвижной состав, критерий эффективности тягового электропривода, тяговый электродвигатель, привод наклона кузова.

### **Liubarskyi B. G. The theoretical basis for the selection and evaluation of advanced systems of electromechanical energy conversion of electric rolling stock.**

A manuscript.

Doctoral thesis, technical sciences, specialty 05.22.09. - "Electric transport." National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv - 2014.

The thesis is devoted to the establishment of the theoretical foundations of the selection and evaluation of the type of electromechanical energy converters operating in optimal conditions, taking into account the nonlinearity of their electrical properties, based on the solution of the traction task in the area of the path with a given profile, and motion graphics.

Mathematical model is developed. It is based on the solution of the Lagrange equation for electromechanical systems, taking into account the nonlinearity of the magnetic system and the slot surface of the rotor and the stator for electromechanical energy converters of rotating and linear types.

Simulation models of traction drives in the environment MATLAB SIMULNIK are created on the basis of a synchronous motor with permanent magnet excitation, a reactive inductor motor and an axial inductor motor. The identification of the vector that determines their working properties is effected. The task of analyzing is formulated to determine the efficiency of the traction drive based on an asynchronous traction motor, a synchronous motor with permanent magnet excitation, a reactive inductor motor and an axial inductor motor. Mathematical model and software and algorithmic complex are developed to determine the movement of the curves of a train, based on the solution of

the traction task. Its special feature is an implementation of the optimal efficiency of a system by the criterion of electromechanical energy conversion, modes of operation of electromechanical energy converter, consideration of their thermal state and a rational control algorithm of an electric rolling stock.

Complex criterion of the operating efficiency of an electric rolling stock is proposed. The expenditure of the energy and the average speed of trains are its components. It's proposed to carry out the choice of a rational electromechanical energy converter with the inconsistency of the components of this criterion on the basis of the efficiency rating.

*Keywords:* electromechanical energy converter, electric rolling stock, efficiency criterion of a tractive electric drive , traction motor, body tilt drive.





Відповідальний за випуск  
к.т.н., доц. кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ»  
Овер'янова Л.В.

Підписано до друку \_\_. \_\_. 2014 р.  
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.  
Друк на різнографі. 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. Червонопрапорна, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354