

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

АФАНАСОВ АНДРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 629.423.31- 48.24

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАННЯ
ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
ПОСТІЙНОГО ТА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ**

Спеціальності: 05.22.09 – електротранспорт;
05.22.12 – промисловий транспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Гетьман Геннадій Кузьмович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
завідувач кафедри електрорухомого складу залізниць

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бабанін Олександр Борисович
Українська державна академія залізничного транспорту,
професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу

доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,
завідувач кафедри промислового електроспоживання та електричного транспорту

доктор технічних наук, професор
Хворост Микола Васильович,
Харківська національна академія міського господарства,
декан факультету заочного навчання

Захист відбудеться «27» червня 2013 року о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий «24» травня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, доцент

А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз інвентарного парку тягового рухомого складу залізниць та промислових підприємств України показує, що найбільшу його частину становлять тягові засоби, у яких використовуються колекторні тягові двигуни постійного або пульсуючого струму. Приймально-здавальні випробування тягових електромашин є важливою та невід'ємною частиною технологічного процесу їх виготовлення або ремонту, матеріальні витрати на яку входять у собівартість кінцевої продукції. Якість технічного контролю, що здійснюється при приймально-здавальних випробуваннях тягових електромашин, зрештою, визначає надійність та безвідмовність всього тягового засобу, а отже, й економічну ефективність залізничних перевезень.

Реальний стан багатьох з існуючих станцій з випробування тягових електромашин не відповідає сучасним вимогам щодо організації ремонту та технічного контролю. На більшості таких станцій використовуються стенди взаємного навантажування з низькою енергетичною ефективністю. На деяких підприємствах з ремонту тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту взагалі відсутні стенди для проведення післяремонтних випробувань тягових електромашин під навантаженням.

Випробуванням електричних машин загальнопромислового призначення присвячено низку досліджень, до основних з яких належать роботи таких вчених, як Г. К. Жерве, В. Нюрнберг, Ф. Пунга, Р. Ріхтер, Л. М. Піотровський, Є. А. Паль, А. Б. Йоффе, А. Є. Олексів, В. А. Вінокуров, М. Ф. Котеленець, Є. М. Коварський, О. Д. Гольдберг. Деякі питання, пов'язані з випробуванням тягових електричних машин, освітлені в роботах Д. Д. Захарченка, М. Д. Находкіна, О. С. Курбасова, І. П. Ісаєва, В. Є. Розенфельда, Б. М. Тіхменєва, Л. М. Трахтмана.

Із сучасних досліджень у сфері удосконалення технології випробування тягових електричних машин слід відмітити роботи В. В. Артьоменка, О. Б. Бабаніна, Л. В. Дубинця, П. О. Лози, О. М. Сінчука, Д. Л. Сушка, І. І. Тальї, О. П. Чорного та інших вчених. Випробуванням електричних машин постійного та змінного струму методами динамічного навантажування присвячені численні роботи Д. І. Родькіна.

У багатьох з відомих досліджень, як правило, розглядаються загальні питання випробувань електромашин із згадуванням існуючих схемних рішень системи взаємного навантажування. При цьому до цього часу не визначений та не систематизований повний ряд принципово можливих схемних рішень, які забезпечують взаємне навантажування тягових електромашин постійного та пульсуючого струму послідовного збудження. Існує необхідність визначення раціональності використання того або іншого варіанта схеми навантажування для проведення приймально-здавальних випробувань тягових електричних машин визначеного типу. Мало вивчені питання, пов'язані з еквівалентними режимами випробувань тягових електромашин та їхнім впливом на витрати електроенергії, а також на якість випробувань.

У зв'язку з викладеним вище можна зробити висновок, що дослідження, які спрямовані на вирішення проблеми вибору раціональних схем та режимів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до наступних державних програм:

- Енергетична стратегія України на період до 2030 р., затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 р. № 145;
- Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки, затверджена Постановою кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 243 із змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України від 27.04.2011 № 447 та від 25.01.2012 № 105;
- Постанова Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 р. № 661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту»;
- Програма енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996-2010 р., затверджена рішенням науково-технічної ради Укрзалізниці від 26.06.1996 р.

Основні результати дисертаційної роботи отримані в ході виконання науково-дослідних робіт «Розробка пропозицій щодо зниження витрат електроенергії на випробування електричних машин тягового рухомого складу» (№ ДР 0109U002982), у якій автор був відповідальним виконавцем, «Експлуатаційні випробування електровозів 2ЭС6 № 147 і 2ЭС10 № 012 в умовах Львівської залізниці» (№ ДР 0112U003558), у якій автор був співвиконавцем.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розвиток наукових основ та вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму шляхом обґрунтування нових принципів визначення раціональних схем і режимів навантажування тягових електромашин, які забезпечують зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної станції, підвищення енергетичної ефективності та якості випробувань.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі поставлені такі задачі:

- виконати аналіз відомих способів та режимів навантажування електричних машин постійного струму, за результатами якого визначити перспективні напрямки удосконалення енергоефективних методів випробування електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту;
- обґрунтувати та формалізувати загальні енергетичні та електромеханічні принципи взаємного навантажування електричних машин постійного струму, на базі яких можуть бути сформульовані принципи синтезу систем навантажу-

вання електромашин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту;

- визначити та систематизувати повний ряд принципово можливих варіантів електромеханічної схеми взаємного навантажування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму послідовного збудження, який може розглядатися як множина альтернатив при вирішенні задачі вибору раціональної схеми навантажування для випробування тягових електромашин;

- отримати аналітичні вирази для визначення сумарної приведеної потужності джерел живлення випробувальної системи, яка може розглядатися як один з критеріїв вибору раціонального варіанта схеми взаємного навантажування випробуваних електромашин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту;

- сформулювати та обґрунтувати загальні принципи регулювання режимів взаємного навантажування тягових електричних машин для їх випробувань, на базі яких можуть бути створені функціональні схеми систем автоматичного керування режимами взаємного навантажування випробуваних тягових електромашин;

- обґрунтувати показники енергетичної ефективності процесу випробування електромашин постійного та пульсуючого струму, які можуть бути використані як критерії вибору раціональних схем та режимів навантажування під час випробувань електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту;

- розробити та обґрунтувати методи оцінки ступеня розбіжності теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження пари взаємно навантажених випробуваних тягових електромашин, яка визначає якість випробування і може бути використана як один з критеріїв вибору раціонального варіанта схеми взаємного навантажування;

- визначити раціональні схеми та режими взаємного навантажування електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту, що забезпечують високу енергетичну ефективність та якість приймально-здавальних випробувань електромашин.

Об'єкт дослідження – процес приймально-здавальних випробувань електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

Предмет дослідження – характеристики систем і режимів взаємного навантажування електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

Методи досліджень. Методологічною основою дисертації є загальні теоретичні положення і принципи системного підходу теоретичної електротехніки, теоретичної механіки, теорії електричних машин та перетворювачів. Обґрунтування енергетичних та електромеханічних принципів взаємного навантажування тягових електромашин виконано з використанням основ узагальнення і систематизації фізичних величин та понять, теорії електричних кіл, теорії механіч-

них систем, теорії електричних машин. Для обґрунтування принципів регулювання режимів взаємного навантажування тягових електромашин використовуються методи аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів у електричних машинах, а також методи математичного аналізу. Аналіз теплових процесів та енергетичних показників системи випробування електромашин виконано з використанням теорії нагрівання однорідного твердого тіла та відомих методів розрахунку теплових схем. Обробку статистичних даних виконано з використанням методів теорії ймовірностей та математичної статистики. При розробці функціональних схем систем автоматичного керування режимом взаємного навантажування електромашин використані основні принципи теорії автоматичного керування. При вирішенні задачі вибору раціональних схем і режимів навантажування випробуваних електромашин використані основи теорії прийняття рішень.

Достовірність отриманих результатів визначається коректністю прийнятих припущень, забезпечується використанням у теоретичних дослідженнях відомих методів аналізу, а у розрахунках – ПЕОМ. Результати теоретичних досліджень дисертації підтверджено експериментально.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- формалізовані загальні енергетичні та електромеханічні принципи взаємного навантажування електричних машин постійного струму, які подані у вигляді умови компенсації втрат потужності у взаємно навантажених електромашинах, множини умов протікання струму навантажування та множини умов обертання роторів, що дозволило визначити повний ряд можливих схемних рішень системи взаємного навантажування електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту;

- введено поняття небалансної електромагнітної потужності взаємно навантажених електричних машин, а також обґрунтовано загальні принципи регулювання режимів взаємного навантажування шляхом зміни небалансного електромагнітного моменту та небалансної е. р. с., на основі яких розроблено функціональні схеми систем автоматичного керування режимами взаємного навантажування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту;

- енергетичну ефективність випробування тягових електромашин на нагрів запропоновано розглядати як залежність від енергетичних ефективностей системи взаємного навантажування і процесу нагрівання, що дозволяє розглядати вирішення задачі підвищення енергетичної ефективності випробування тягових електричних машин у двох незалежних напрямках, один з яких – підвищення к. к. д. джерел та перетворювачів потужності, а другий – вибір раціональних режимів навантажування;

- введено поняття та отримані аналітичні вирази для визначення енергетичної ефективності нагрівання обмоток випробуваної тягової електричної машини, поданої у вигляді відношення зміни сумарної термічної енергії електромашини

до сумарної енергії втрат у ній, що дозволило обґрунтувати можливість підвищення енергетичної ефективності випробування на нагрів тягових двигунів електрорухомого складу магістрального залізничного транспорту за рахунок збільшення струму навантажування до пускового значення;

- науково обґрунтовано доцільність проведення випробувань на нагрів тягових двигунів електрорухомого складу промислового залізничного транспорту при струмі навантажування п'ятнадцятихвилинного режиму, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності випробувань та відповідне зменшення загальних витрат електроенергії на приймально-здавальні випробування;

- отримано універсальну характеристику магнітних втрат у тягових електричних двигунах постійного та пульсуючого струму, яка являє собою залежність приведених магнітних втрат від частоти перемагнічування якоря при постійній напрузі на колекторі, використання якої суттєво спрощує виконання узагальненого аналізу залежності магнітних втрат у випробуваних тягових двигунах від режимів їх навантажування.

Дістали подальший розвиток та удосконалені:

- систематизація та класифікація систем взаємного навантажування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму, в основу яких покладено як енергетичні, так і електромеханічні принципи взаємного навантажування, що дозволило збільшити кількість ознак розбиття множини альтернатив при вирішенні задачі вибору раціональних схем навантажування випробуваних електромашин;

- уявлення про вплив на режим взаємного навантажування пари тягових електромашин ступеня розбіжності їх магнітних характеристик, що дозволило отримати аналітичні вирази для визначення приведеної сумарної потужності джерел живлення випробувальної системи й коефіцієнта запасу цієї потужності з урахуванням максимального допустимого відхилення частоти обертання в номінальному режимі;

- метод аналітичного визначення вагових коефіцієнтів впливу на перевищення температури обмотки якоря електричних та магнітних втрат, використання якого дозволяє оцінити вплив режимів взаємного навантажування випробуваних тягових електромашин на ступінь розбіжності теплових навантажень обмоток їх якорів;

- метод моделювання магнітних характеристик тягових електричних двигунів, який дозволяє визначити коефіцієнти апроксимуючої залежності питомої е. р. с. від струму збудження тільки за коефіцієнтом магнітного насичення та типовими номінальними даними електромашини;

- поняття та метод визначення енергетичної ефективності системи взаємного навантажування тягових електричних машин, який відрізняється врахуванням у ньому к. к. д. джерел та перетворювачів потужності, а також введених понять енергетичної ефективності непрямих методів компенсації втрат.

Практичне значення отриманих результатів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, що отримані в дисертації, дозволили:

- визначити раціональні схеми систем взаємного навантажування, використання яких забезпечує зниження собівартості нових та матеріальні витрати на модернізацію наявних станцій для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту в півтора – два рази;

- визначити раціональні режими взаємного навантажування тягових електричних машин, що дозволяють зменшити витрати електроенергії на проведення їх випробувань на нагрів на 20 – 30% та скоротити час проведення випробувань на нагрів в три – чотири рази;

- розробити функціональні схеми систем автоматичного керування стендами для випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму, виконаними за раціональними електромеханічними схемами;

- розробити метод визначення параметрів джерел та перетворювачів потужності системи взаємного навантажування, у якому враховані як типові дані випробуваних тягових електромашин, так і допустимий ступінь розбіжності їх магнітних характеристик;

- запропонувати спосіб оцінювання якості приймально-здавальних випробувань тягових електричних машин, у якому враховується ступінь розбіжності теплових навантажень обмоток пари випробуваних електромашин;

Результати досліджень впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна в курсі «Теорія електропривода», прийняти до розгляду щодо впровадження в локомотивному господарстві «Укрзалізниці» та в ПрАТ «Запорізький електровозоремонтний завод».

Особистий внесок здобувача. Постановку проблеми дисертаційного дослідження виконано сумісно з науковим консультантом. Теоретичні та експериментальні дослідження, результати яких наведені в дисертації, виконані автором самостійно. Усі опубліковані наукові роботи за темою дисертації написані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались та обговорювалися на 69^й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2009 р.), III Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту “Транселектро – 2009”» (Місхор, 2009 р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту “Транселектро – 2010”» (Місхор, 2010 р.), III Міжнародній науково-практичній конференції «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті» (Дніпропетровськ, 2010 р.), V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: керування, економіки і технології» (Київ, 2011 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (Дніпропетровськ, 2011 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті» (Жденієво, 2011 р.), V Міжнародній науково-практичній конференції

«Електрифікація транспорту “Транселектро – 2011”» (Дніпропетровськ, 2011р.), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту “Транселектро – 2012”» (Місхор, 2012р.).

Дисертація в повному обсязі доповідалася на науковому семінарі кафедри «Електрорухомий склад залізниць» та міжкафедральному науковому семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 42 наукових роботах, серед яких: одна монографія, 21 стаття у фахових наукових журналах; 2 статті у інших виданнях; 10 тез доповідей на науково-технічних конференціях; 6 патентів; два заключних звіти НДР.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, переліку використаних джерел та дев'яти додатків. Основний текст роботи викладений на 360 сторінках, містить 122 рисунка і 24 таблиці. Рисунки та таблиця, розміщені на окремих сторінках, займають 4 сторінки. Список літератури з 208 найменувань займає 22 сторінки. Додатки на 109 сторінках оформлені окремою книгою. Повний обсяг дисертації – 469 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та визначено основні задачі наукових досліджень, викладено суть наукової проблеми, наукову новизну і практичне значення результатів роботи, наведено данні про їх публікацію, особистий внесок здобувача і апробацію дисертації.

У першому розділі виконано аналіз стану проблеми вибору раціональних схем та режимів навантажування тягових електричних машин для проведення їх приймально-здавальних випробувань. Надана загальна характеристика системи приймально-здавальних випробувань електромашин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту, розглянуто найбільш відомі методи навантажування електричних машин постійного струму паралельного та послідовного збудження.

Аналіз технічного стану парку електрорухомого складу залізниць та тягового рухомого складу промислового залізничного транспорту України показує, що найбільша кількість випадків відмов тягового рухомого складу пов'язано з відмовами апаратури в силових схемах, у тому числі тягових двигунів та допоміжних електромашин. Щорічно внаслідок відмови тягових двигунів виконують неплановий ремонт близько п'ятисот, а внаслідок відмови допоміжних машин – більше двохсот електровозів. Понад 20 % випадків непланового ремонту електровозів пов'язано з відмовами тягових двигунів та понад 10 % випадків – з відмовами допоміжних електромашин. На деяких залізницях України частка відмов тягових двигунів, які спричинили неплановий ремонт електровозів, досягає 40 %, а частка відмов допоміжних електромашин – 80 %. Така ситуація пов'язана з низькою якістю не тільки ремонту, а й післяремонтних випробувань, метою яких і є визначення якості ремонту.

Якісне проведення післяремонтних випробувань тягових електромашин можливе тільки під навантажуванням. Аналіз робіт у галузі створення систем навантажування електричних машин постійного струму показує, що існують три основних способи навантажування випробуваних електромашин: безпосереднє навантажування; взаємне навантажування; динамічне навантажування. Системи безпосереднього навантажування являють собою навантажувальні пристрої у вигляді: механічного гальма; генератора та навантажувального резистора; генератора та пристрою рекуперації енергії в мережу. Суттєвим недоліком усіх трьох видів безпосереднього навантажування є необхідність наявності джерела для живлення випробуваного двигуна потужністю, яка дорівнює типовій потужності електромашини. Визначним недоліком двох перших способів безпосереднього навантажування, що робить їх застосування неприйнятним для випробувань електричних машин великої потужності, є їх низька енергетична ефективність. Використання третього способу потребує наявності, крім джерела, ще й веденого трифазного інвертора з потужністю, яка дорівнює потужності випробуваної тягової електромашини.

Суттєвою перевагою випробування тягових електромашин методом динамічного навантажування є відсутність необхідності агрегування електромашин для проведення випробувань та зменшення трудомісткості цього процесу. Однак ціла низка пунктів програми приймально-здавальних випробувань електромашин тягового рухомого складу, визначених у ГОСТ 2582-81 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия», може бути виконана тільки шляхом їх безперервного статичного навантажування.

Високу енергетичну ефективність при відносно невисокій приведеній сумарній потужності джерел живлення забезпечують системи взаємного навантажування із замкненим циклом енергообміну між випробуваними електромашинами. Джерела зовнішнього живлення у таких системах навантажування потрібні тільки для компенсації втрат потужності у електромашинах, що випробовуються.

Для електромашин постійного струму загальнопромислового призначення найбільш відомими є способи взаємного навантажування за схемою Блонделя, Гопкінсона, Пот'є, Хетчинсона і Каппа. Основним недоліком цих схем є незалежне збудження випробуваних електромашин. Для випробування тягових електричних машин послідовного збудження цей недолік стає досить суттєвим.

На станціях для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту, як правило, використовується схема взаємного навантажування з вольтододавальною машиною та лінійним генератором, на деяких підприємствах – схема з вольтододавальною машиною та додатковим приводним двигуном. Суттєвими недоліками першої схеми є необхідність у високовольтному джерелі напруги та розбіжність теплових навантажень обмоток якорів пари випробуваних електромашин. Спільним недоліком обох схем є використання двох джерел живлення, що потребує запасу їх сумарної потужності, зумовленого можливим розходженням магнітних характеристик випробуваних електромашин.

Енергоємність випробувань тягових електромашин визначається тривалістю випробувань та сумарною потужністю, що споживається з мережі для компенсації втрат потужності у випробуваних тягових електромашинах та перетворювачах випробувальної системи. Сумарні втрати у випробуваних тягових електромашинах – це ті втрати, які не залежать або, принаймні, не повинні залежати ні від структури випробувального стенда, ні від характеристик його джерел та перетворювачів. Більше того, умови проведення випробувань повинні забезпечувати повну відповідність характеру втрат потужності у тягових електромашинах реальним умовам експлуатації. Сумарні втрати потужності у джерелах та перетворювачах є втратами, пов'язаними із забезпеченням випробувань, і повинні бути мінімізовані.

У другому розділі сформульовано загальні принципи взаємного навантажування та наведено обґрунтування методу синтезу систем взаємного навантажування електричних машин постійного струму, за допомогою якого визначений і систематизований повний ряд принципово можливих варіантів електромеханічної схеми системи взаємного навантажування електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту.

Енергетичні принципи взаємного навантажування електромашин постійного струму сформульовані на підставі результатів аналізу запропонованої в дисертації універсальної схеми перетворення потужностей в основному контурі системи взаємного навантажування будь-якої структури. Схему перетворень наведено на рис. 1.

Основний контур перетворень містить: електричні частини двигуна ЕД і генератора ЕГ, механічні частини двигуна МД і генератора МГ, перетворювачі електричної та механічної потужностей ПЕ і ПМ відповідно, джерела електричної та механічної потужностей ІЕ і ІМ відповідно.

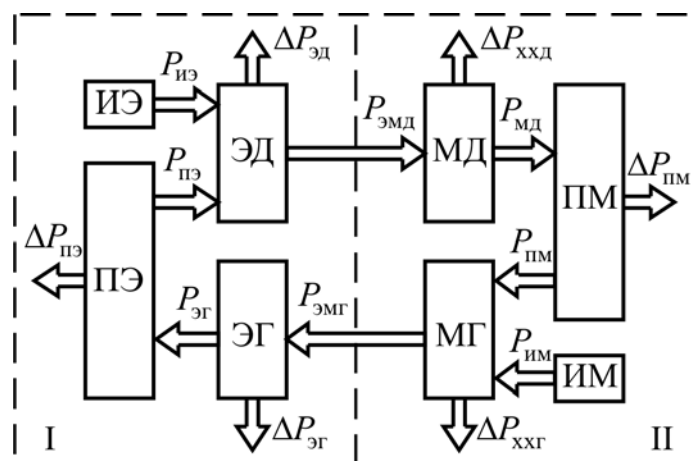


Рисунок 1 – Універсальна схема перетворення потужностей

Відповідно до схеми на рис. 1 робота системи взаємного навантажування електромашин будь-якої структури у стаціонарному режимі може бути описана рівнянням балансу потужностей

$$P_{\text{эмд}} - P_{\text{эмг}} = \frac{1}{2}(P_{\text{иэ}} - P_{\text{им}}) - \frac{1}{2}(\Delta P_{\text{э}} - P_{\text{хх}}), \quad (1)$$

де $P_{\text{эмд}}$ $P_{\text{эмг}}$ – електромагнітні потужності двигуна та генератора відповідно;

$P_{\text{иэ}}$ та $P_{\text{им}}$ – потужності електричних та механічних джерел відповідно;

$\Delta P_{\text{э}}$ та $\Delta P_{\text{хх}}$ – електричні втрати та втрати неробочого ходу відповідно.

Принципово можливі такі варіанти компенсації втрат потужностей у двигуні, генераторі та перетворювачах:

- а) компенсація всіх втрат одним джерелом електричної потужності;
- б) компенсація окремих видів втрат двома окремими джерелами електричної потужності;
- в) компенсація всіх втрат одним джерелом механічної потужності;
- г) компенсація окремих видів втрат двома окремими джерелами механічної потужності;
- д) компенсація електричних втрат джерелом електричної потужності, а втрат неробочого ходу – джерелом механічної потужності;
- е) компенсація електричних втрат джерелом механічної потужності, а втрат неробочого ходу – джерелом електричної потужності.

Кожному з варіантів компенсації втрат відповідатиме своє співвідношення електромагнітних потужностей випробуваних електромашин. Аналіз рівняння (1) показує, що непрямі методи компенсації втрат в системах взаємного навантажування базуються на створенні небалансної електромагнітної потужності випробуваних електромашин, яку в дисертації запропоновано подавати у вигляді

$$\Delta P_{\text{эм}} = P_{\text{эмг}} - \Delta P_{\text{эмд}}. \quad (2)$$

Знак $\Delta P_{\text{эм}}$ залежить від того, який з видів втрат компенсується непрямим методом, а величина – від значення цих втрат. Енергетичні характеристики можливих варіантів компенсації втрат у системі взаємного навантажування наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Енергетичні характеристики варіантів компенсації втрат

Характеристики		Варіанти			
		а, б	в, г	д	е
Вид втрат	$\Delta P_{\text{э}}$	ИЭ	ИМ	ИЭ	ИМ
	$\Delta P_{\text{хх}}$	ИЭ	ИМ	ИМ	ИЭ
Співвідношення $P_{\text{эм}}$		$P_{\text{эмд}} > P_{\text{эмг}}$	$P_{\text{эмд}} < P_{\text{эмг}}$	$P_{\text{эмд}} = P_{\text{эмг}}$	$P_{\text{эмд}} \approx P_{\text{эмг}}$

Електромеханічні принципи взаємного навантажування електромашин формалізовані у вигляді двох незалежних умов: протікання струму навантажування в обмотках електромашин та обертання їх роторів. Універсальні схеми електричних та механічних перетворень у системі взаємного навантажування розроблено на основі аналізу електромеханічних аналогій фізичних величин та понять.

Універсальну схему перетворення електричної потужності наведено на рис. 2. Коло електричних перетворень містить обмотку якоря генератора G , обмотку якоря двигуна M , конвертор постійної напруги (струму) K , джерело електроорушійної сили $ИЭ$ та джерело струму $ИТ$. При цьому припускається, що є можливість незалежного регулювання магнітних потоків електромашин. В цій схемі заміщення передбачені такі теоретично можливі види електричних перетворень, як конвертування напруги (струму); додавання електроорушійної сили $E_{и}$ (вольтодобавка); підживлення струмом $I_{и}$. На схемі: $u_{д}$ і $u_{г}$ – напруги на двигуні та генераторі відповідно; $i_{д}$ і $i_{г}$ – струми двигуна та генератора відповідно; $u_{д}$ і $i_{к}$ – вихідні напруга та струм конвертора відповідно.

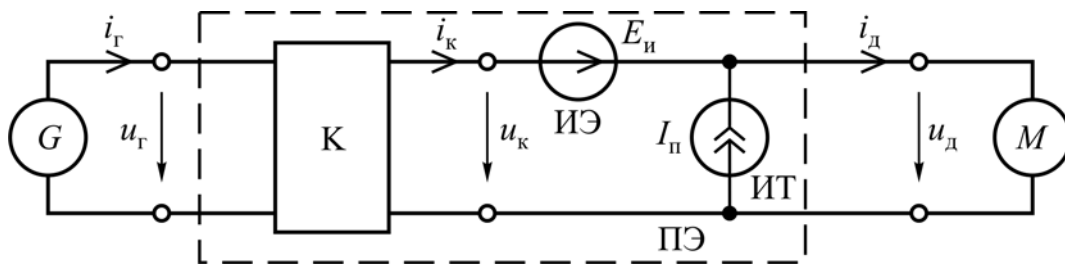


Рисунок 2 – Схема перетворення електричної потужності

Універсальну схему перетворення механічної потужності наведено на рис. 3. Коло механічних перетворень містить ротор двигуна M , ротор генератора G , механічний редуктор P (варіатор), джерело моменту $ИМ$ (додатковий двигун) та джерело кутової швидкості $ИС$. В цій схемі заміщення передбачені такі теоретично можливі види механічних перетворень, як конвертування механічного моменту (кутової швидкості); додавання обертового моменту $M_{и}$; додавання кутової швидкості $\omega_{и}$. На схемі: $M_{д}$ і $M_{г}$ – моменти на валах двигуна та генератора відповідно; $M_{р}$ і $\omega_{р}$ – момент та кутова швидкість на виході редуктора відповідно.

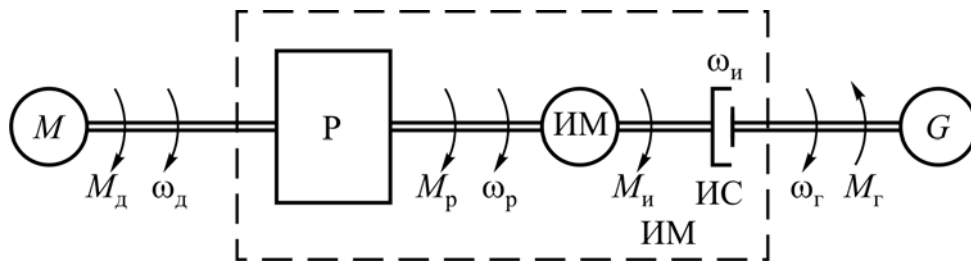


Рисунок 3 – Схема перетворення механічної потужності

Умову протікання струму навантажування електромашин відповідно до результатів аналізу схем заміщення на рис. 2 і 3 може бути формалізовано у вигляді

$$i_{д}R_{д} + i_{г}R_{г}k_U = (C_{г}\Phi_{г}k_Uk_{\omega} - C_{д}\Phi_{д})\omega_{д} + C_{г}\Phi_{г}\omega_{и}k_U + E_{и}, \quad (3)$$

де k_U – коефіцієнт передачі напруги;

C_D і C_G – конструктивні постійні двигуна та генератора відповідно;

Φ_D і Φ_G – магнітні потоки двигуна та генератора відповідно;

ω_D і ω_G – кутові швидкості валів двигуна та генератора відповідно;

R_D і R_G – опір обмоток двигуна та генератора відповідно;

k_ω – коефіцієнт передачі кутової швидкості.

Умову обертання роторів електромашин відповідно до результатів аналізу схем заміщення на рис. 2 і 3 може бути формалізовано у вигляді

$$\Delta M_G + \Delta M_D k_M = (C_D \Phi_D k_I k_M - C_G \Phi_G) i_G + E_D \Phi_D I_{II} k_M + M_{II}, \quad (4)$$

де ΔM_D і ΔM_G – втрати моменту двигуна та генератора відповідно;

k_M – коефіцієнт передачі моменту;

k_I – коефіцієнт передачі струму.

Рівняння (3) характеризує баланс напруг в електричній схемі стенда в стаціонарному режимі та визначає п'ять незалежних умов протікання струмів якорів випробуваних електромашин, позначених буквами латинського алфавіту від A до E , наведених у табл. 2.

Таблиця 2 – Варіанти умови протікання струму навантажування

Позначення	A	B	C	D	E
Умова	$U_{II} > 0$	$\omega_{II} > 0$	$\Phi_G > \Phi_D$	$k_\omega > 1$	$k_U > 1$

Умови A і B є достатніми, оскільки передбачають наявність відповідно електричного та механічного джерел потужності. Умови C , D і E недостатні, оскільки забезпечують компенсацію електричних втрат тільки при обертанні роторів.

Рівняння (5) характеризує баланс моментів у механічній частині випробувального стенда в стаціонарному режимі та визначає п'ять незалежних умов обертання валів випробуваних електромашин, позначених буквами латинського алфавіту від F до J , наведених у табл. 3.

Таблиця 3 – Варіанти умови обертання роторів

Позначення	F	G	H	I	J
Умова	$M_{II} > 0$	$I_{II} > 0$	$\Phi_D > \Phi_G$	$k_M > 1$	$k_I > 1$

Умови F і G є достатніми, оскільки передбачають наявність відповідно механічного та електричного джерел потужності. Умови H , I і J недостатні, оскільки забезпечують компенсацію втрат неробочого ходу тільки за наявності струмів якорів.

Взаємне навантажування двигуна M і генератора G відповідно до рівнянь (3) і (4) можливе тільки при забезпеченні сполучення не менше двох умов, що входять до множин $\{A, B, C, D, E\}$ і $\{F, G, H, I, J\}$. З урахуванням того, що хоча б одна з умов кожного сполучення повинна бути достатньою, отримаємо шукану множину з 16 сполучень у вигляді

$$X = \{AF, AG, AH, AI, AJ, BF, BG, BH, BI, BJ, CF, CG, DF, DG, EF, EG\}.$$

Принципові схеми варіантів системи взаємного навантажування, які відповідають множині X , наведено на рис. 4 – 19. Чотири варіанти (AH, BH, CF, CG) мають по дві можливих реалізації за способом регулювання різниці магнітних потоків випробуваних тягових електромашин (підживлення або отпитка), що дає ще чотири додаткових варіанти. Всього отримано 20 варіантів схеми взаємного навантажування, які можуть розглядатися як множина альтернатив при вирішенні задачі вибору раціональної схеми випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

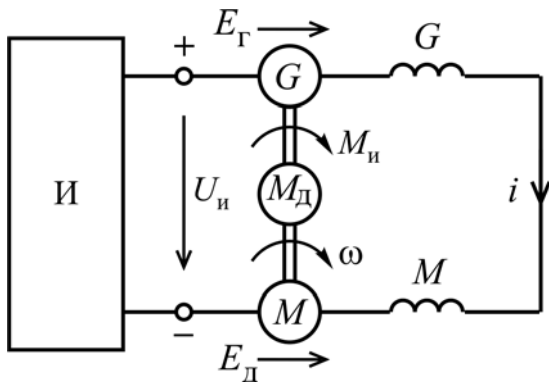


Рисунок 4 – Варіант «AF»

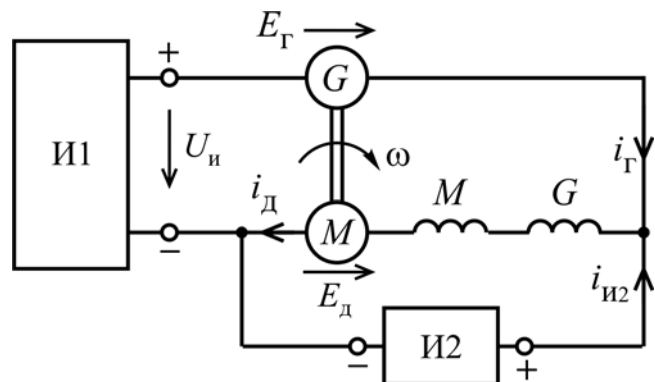


Рисунок 5 – Варіант «AG»

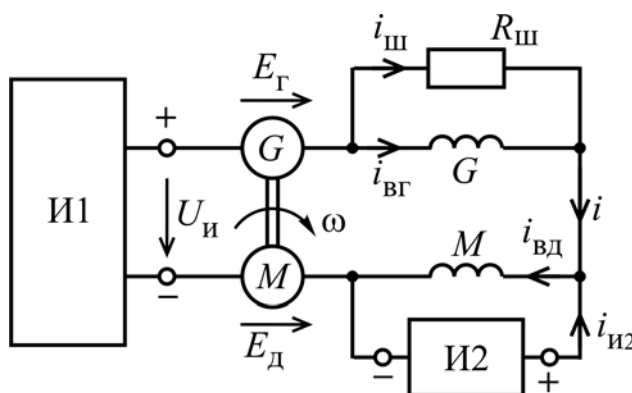


Рисунок 6 – Варіант «AH»

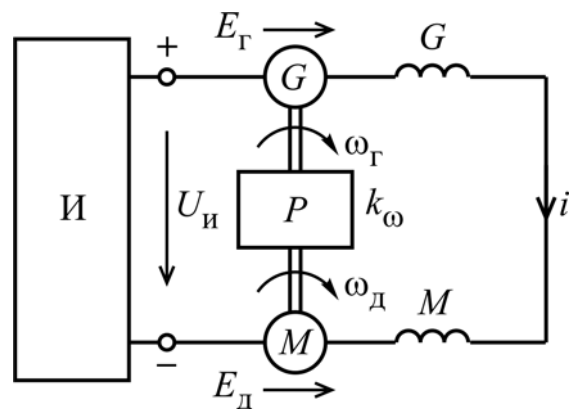


Рисунок 7 – Варіант «AI»

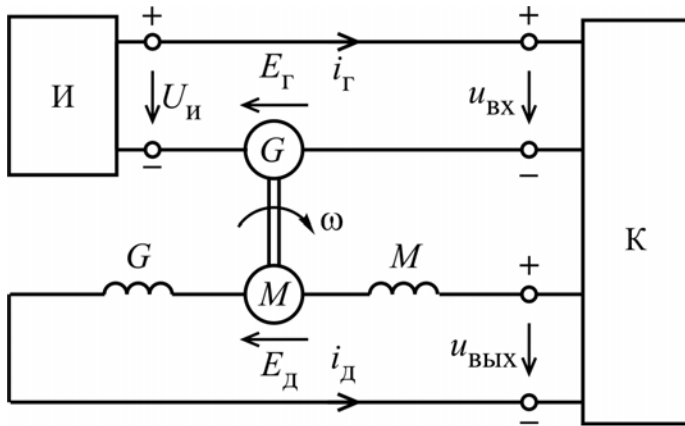


Рисунок 8 – Вариант «АJ»

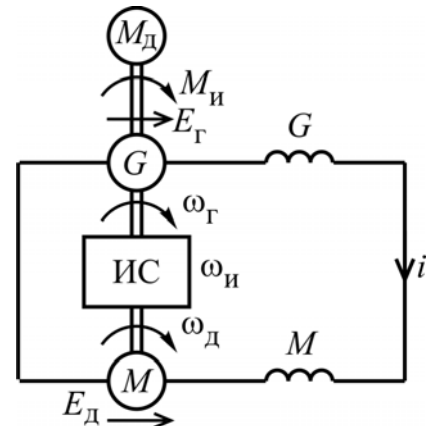


Рисунок 9 – Вариант «BF»

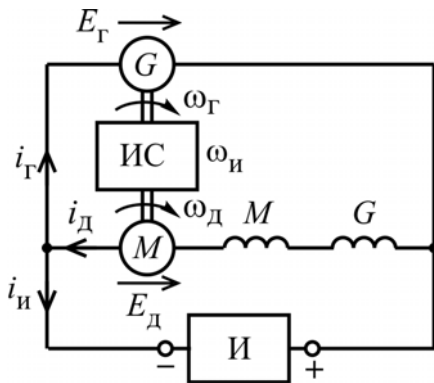


Рисунок 10 – Вариант «BG»

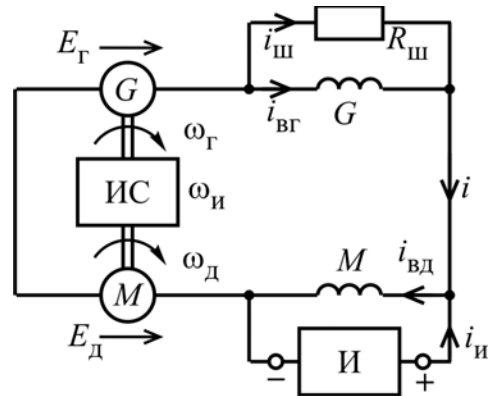


Рисунок 11 – Вариант «BH»

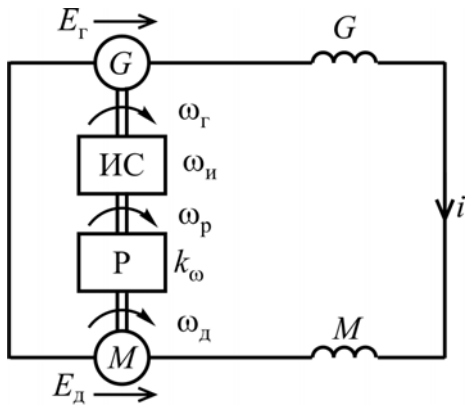


Рисунок 12 – Вариант «BI»

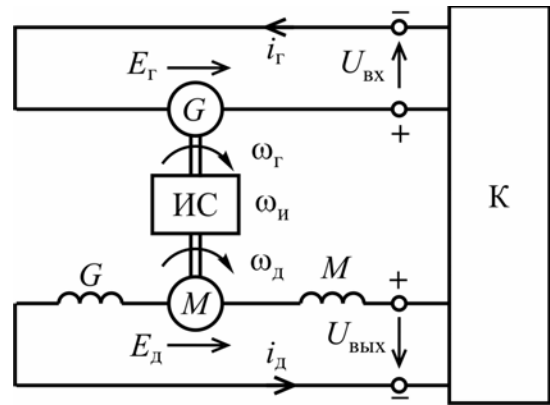


Рисунок 13 – Вариант «BJ»

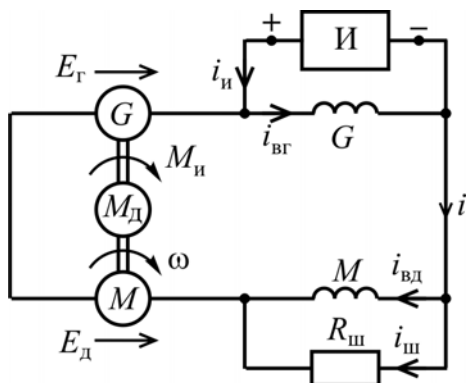


Рисунок 14 – Вариант «CF»

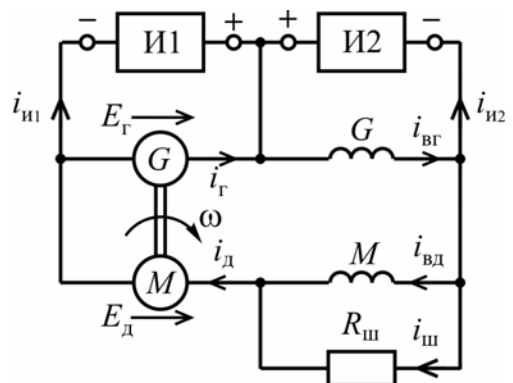


Рисунок 15 – Вариант «CG»

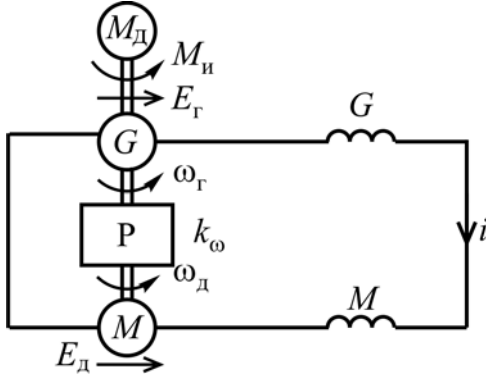


Рисунок 16 – Варіант «DF»

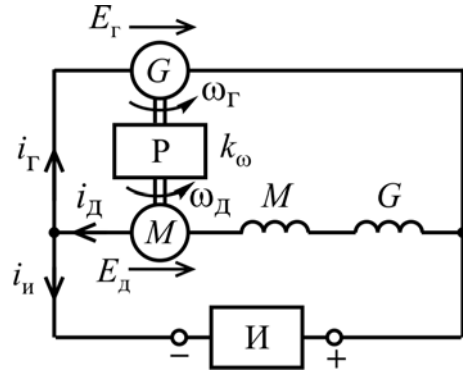


Рисунок 17 – Варіант «DG»

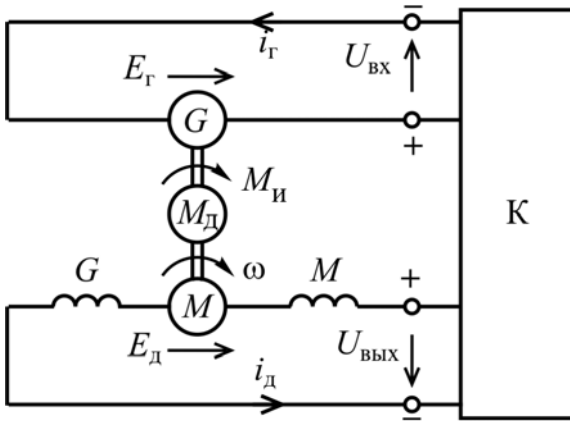


Рисунок 18 – Варіант «EF»

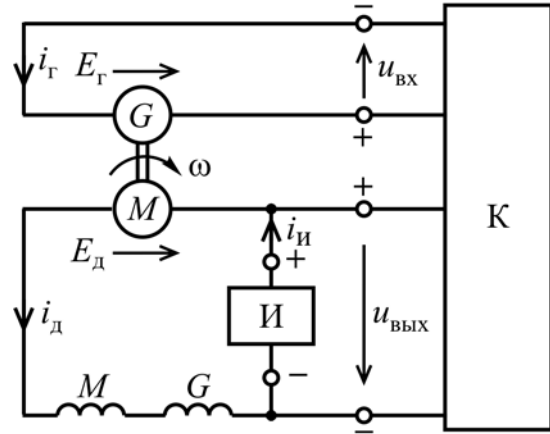


Рисунок 19 – Варіант «EG»

У третьому розділі обґрунтовано принципи керування режимами взаємного навантажування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту. Розглянуто способи регулювання небалансного електромагнітного моменту та небалансної е. р. с. тягових електромашин. Запропоновано функціональні схеми систем автоматичного керування взаємним навантажуванням тягових електромашин.

У загальному вигляді небалансна електромагнітна потужність електромашин

$$\Delta P_{\text{эм}} = c(\Phi_r I_r \Delta \omega + \Phi_r \Delta I \omega_d + \Delta \Phi I_d \omega_d), \quad (5)$$

де $\Delta \omega = \omega_r - \omega_d = \omega_d (k_\omega - 1) + \omega_n$ – різниця кутових швидкостей роторів;

$\Delta I = I_r - I_d = I_d (k_U - 1) + I_n k_U$ – різниця струмів якорів;

$\Delta \Phi = \Phi_r - \Phi_d = \Phi(I_{\text{вр}}) - \Phi(I_{\text{вд}})$ – різниця магнітних потоків ($I_{\text{вр}}$, $I_{\text{вд}}$ – струми збудження генератора та двигуна відповідно).

Регулювання небалансної електромагнітної потужності в системах взаємного навантажування зводиться до регулювання або небалансної е. р. с., або небалансного електромагнітного моменту. При електричному способі компенсації втрат неробочого ходу регулюється величина небалансного електромагнітного моменту

$$\Delta M_{\text{ЭМ}} = c(\Phi_{\text{Д}} I_{\text{Д}} - k_{\omega} \Phi_{\text{Г}} I_{\text{Г}}).$$

При механічному способі компенсації електричних втрат регулюється величина небалансної е. р. с.

$$\Delta E = c \left(\Phi_{\Gamma} \omega_{\Gamma} - \frac{1}{k_U} \Phi_{\mathcal{D}} \omega_{\mathcal{D}} \right).$$

Проведено аналіз та отримано характеристики регулювання небалансних е. р. с. ΔE і електромагнітного моменту $\Delta M_{\text{эм}}$ шляхом зміни різниці магнітних потоків $\Delta \Phi$, різниці кутових швидкостей $\Delta \omega$, різниці струмів якорів ΔI , коефіцієнтів передачі напруги k_U та кутової швидкості k_ω .

Універсальну схему взаємного навантажування, за допомогою якої може бути реалізовано регулювання $\Delta P_{\text{зм}}$ шляхом змінення $\Delta \Phi$, зображено на рис. 20. Зміна $\Delta \Phi$ у цій схемі здійснюється за рахунок підживлення або отпитки обмоток збудження струмами I_{p1} і I_{p2} регуляторів поля РП1 і РП2 відповідно.

Найбільш очевидні такі режими регулювання $\Delta\Phi$.

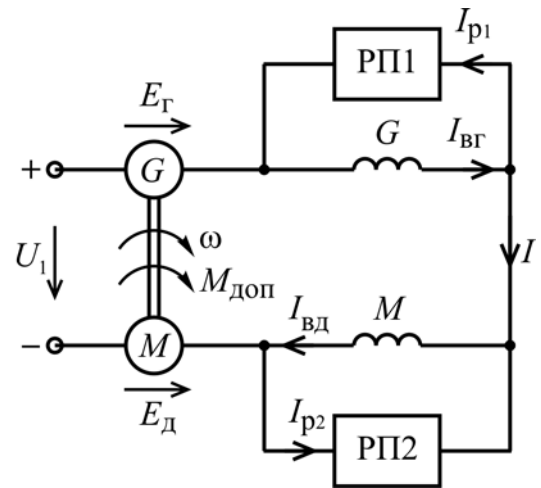


Рисунок 20 – Схема взаємного навантажування з регулюванням різниці магнітних потоків

$$\begin{aligned} \text{Режим 1: } & \begin{cases} I_{p1} > 0; \\ I_{p2} = 0. \end{cases} & \text{Режим 2: } & \begin{cases} I_{p1} = 0; \\ I_{p2} < 0. \end{cases} \\ \text{Режим 3: } & \begin{cases} I_{p1} = 0; \\ I_{p2} > 0. \end{cases} & \text{Режим 4: } & \begin{cases} I_{p1} < 0; \\ I_{p2} = 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Для кожного з чотирьох режимів можливі два найбільш раціональні варіанти регулювання струму збудження:

- із підтримкою незмінності відношення струмів збудження та якоря;
- із підтримкою незмінності різниці струмів якоря та збудження.

Аналіз характеру залежності $\Delta\Phi(I)$ для кожного з варіантів регулювання виконано з використанням апроксимації залежності магнітного потоку від струму збудження у вигляді $\Phi_0 = A \cdot \arctg(B \cdot I_B)$. У результаті цього аналізу отримано аналітичні вирази, які дозволяють знайти значення $\Delta\Phi$ за відомими струмами регуляторів I_{p1} , I_{p2} або коефіцієнтами збудження $k_{вг}$, $k_{вд}$ та навпаки.

Діапазони регулювання струму збудження шляхом підживлення та отпитки обмоток збудження можуть бути представлені у вигляді залежностей відносної різниці магнітних потоків від відносної різниці струмів збудження $K_{\Delta\Phi} = f(K_{\Delta I})$. Ці залежності визначені за універсальною магнітною характеристикою тягових двигунів для трьох значень коефіцієнта магнітного насичення k_H (1,67; 1,91; 2,15).

Необхідне значення відносної різниці магнітних потоків з урахуванням можливої максимальної розбіжності магнітних характеристик

$$K_{\Delta\Phi} = 2\Delta p + 2\Delta\bar{n}^*,$$

де Δp – втрати в системі взаємного навантажування (електричні або неробочого ходу), приведені до потужності однієї тягової електричної машини;

$\Delta\bar{n}^*$ – максимальне допустиме відносне відхилення частоти обертання тягової електромашини (ГОСТ2582-81);

Для тих же значень k_H отримано універсальні залежності відносної різниці струмів збудження від питомих втрат (електричних або неробочого ходу) $K_{\Delta I} = f(\Delta p)$, які графічно для $k_H = 1,91$ зображено на рис. 21.

Залежності $K'_{\Delta I}(\Delta p)$ відповідають режиму отпитки, а $K''_{\Delta I}(\Delta p)$ – режиму підживлення. Криві 1 відповідають випадку збігу, а криві 2 – максимальній розбіжності магнітних характеристик ($2\Delta\bar{n}^* = 0,06$).

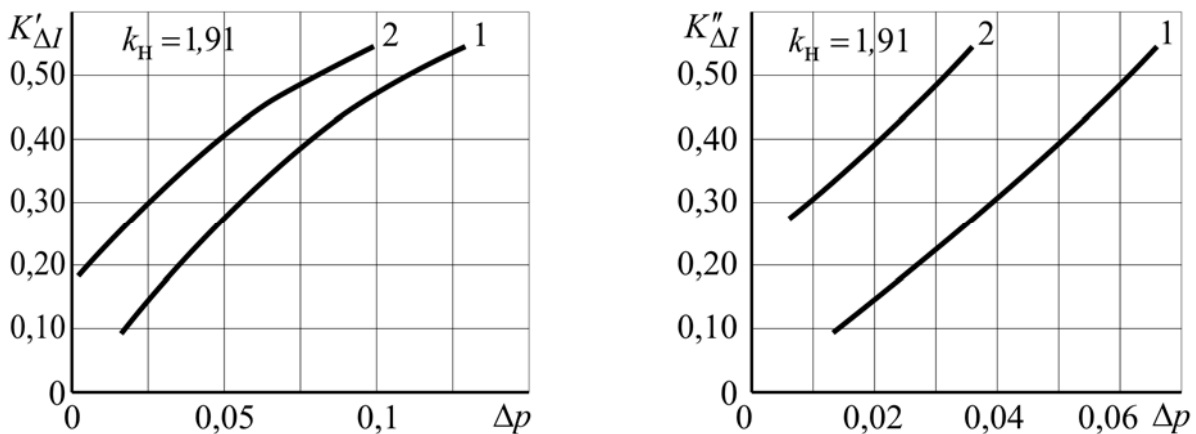


Рисунок 21 – Універсальні залежності $K_{\Delta I} = f(\Delta p)$

У дисертації запропоновано метод моделювання магнітних характеристик тягових електричних двигунів у вигляді апроксимуючої залежності питомої е. р. с. від струму збудження $e(I_B) = A \arctg(BI_B)$. Особливістю методу є відсутність при моделюванні необхідності наявності всієї магнітної характеристики тягового двигуна.

Коефіцієнти A і B апроксимуючої залежності визначаються за номінальними даними тягового двигуна, коефіцієнтом магнітного насичення у годинному ре-

жимі $k_{\text{нч}}$ і універсальною залежністю запропонованого в дисертації безрозмірного параметра $e_{\text{Ач}}$ від коефіцієнта насичення в годинному режимі $k_{\text{нч}}$.

$$B = \frac{\text{tg} e_{\text{Ач}}}{I_{\text{ч}}}; \quad A = \frac{e_{\text{ч}}}{e_{\text{Ач}}}; \quad e_{\text{ч}} = \frac{E_{\text{ч}}}{\omega_{\text{ч}}}.$$

Універсальну залежність $e_{\text{Ач}} = f(k_{\text{нч}})$ (рис. 22) отримано в результаті моделювання універсальної магнітної характеристики за умовою проходження апроксимуючої кривої через точку годинного режиму при максимальному її збігу з кривою універсальної магнітної характеристики на заданому інтервалі зміни питомої м. р. с.

У четвертому розділі здійснено аналіз теплових процесів у електричних машинах тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту, які протікають під час їх випробування на нагрів методом взаємного навантажування. Розглянуто вплив окремих видів втрат у випробуваних електромашинах на перевищення температури їх обмоток. Досліджено вплив режимів взаємного навантажування на розбіжність теплових факторів обмоток якорів та обмоток збудження пари випробуваних тягових електромашин.

Електричні втрати потужності під час випробування електромашини представлені у вигляді функції часу

$$\Delta P_{\Sigma}(t) = I^2(t) R_{\text{дв}}(t) + I(t) U_{\text{щ}}(t).$$

Магнітні втрати в тягових електромашинах представлені у вигляді залежності від частоти перемагнічування f і є. р. с. обертання E

$$\Delta P_{\text{М}} = K_{\text{М}} \cdot \left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right) \cdot E^2,$$

де $K_{\text{М}}$ – постійний коефіцієнт.

Отримано універсальну характеристику магнітних втрат $\Delta p_{\text{М}/50}(f)$ (рис. 23), яка являє собою залежність питомих магнітних втрат, приведених до втрат при частоті перемагнічування 50 Гц, від самої частоти перемагнічування в герцах.

$$\Delta p_{\text{М}/50} = \frac{30,8}{f} + 0,385.$$

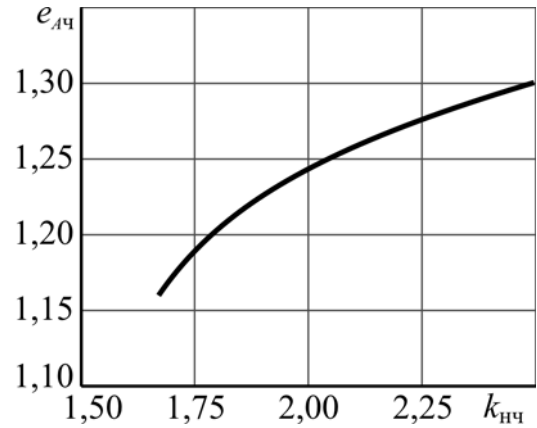


Рисунок 22 – Універсальна залежність $e_{\text{Ач}} = f(k_{\text{нч}})$

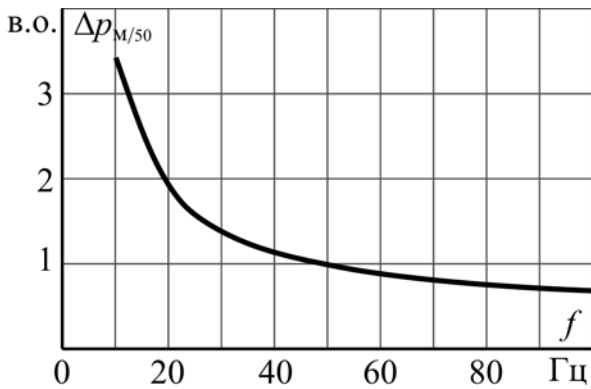


Рисунок 23 – Універсальна характеристика магнітних втрат

На підставі аналізу результатів випробування тягових електричних машин з незалежною вентиляцією і самовентиляцією отримано універсальні залежності механічних втрат потужності в електромашинах від кутової швидкості їх обертання.

Приведені до годинного режиму механічні втрати потужності та момент опору в тягових електричних двигунах з незалежною вентиляцією становлять відповідно:

$$\Delta p_{\text{мех}}^* = 0,35\omega^{*2} + 0,65\omega^*; \quad \Delta m_{\text{мех}}^* = 0,35\omega^* + 0,65,$$

де ω^* – приведена до годинного значення кутова швидкість обертання.

Приведені до годинного режиму механічні втрати потужності й момент опору в тягових електричних двигунах із самовентиляцією становлять відповідно:

$$\Delta p_{\text{мех}}^* = 0,65\omega^{*2} + 0,35\omega^*; \quad \Delta m_{\text{мех}}^* = 0,65\omega^* + 0,35.$$

Аналіз впливу окремих видів втрат на перевищення температури обмотки якоря, виконаний шляхом розрахунку теплової схеми заміщення, дозволив виразити питоме перевищення температури обмотки якоря у відносних одиницях (приведене до номінального режиму) у вигляді залежності від приведених втрат

$$\tau_{\text{мотн}} = k_M p_M + k_C p_C,$$

де p_M і p_C – приведені (до номінальних) втрати в міді та сталі якоря відповідно;

k_M і k_C – безрозмірні вагові коефіцієнти впливу втрат у міді та сталі відповідно.

У дисертації отримано аналітичні вирази, які дозволяють визначити вагові коефіцієнти k_M і k_C за конструктивними параметрами тягових електромашин. На рис. 24 графічно зображено характер залежності $\tau_{\text{мотн}} = f(p_M; p_C)$, яку отримано за

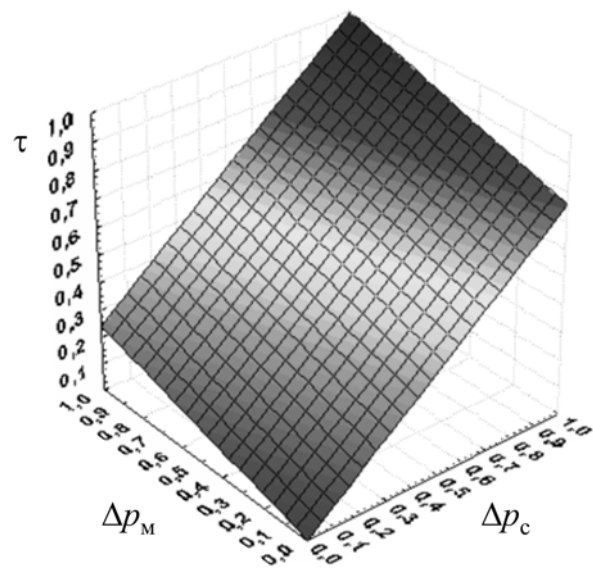


Рисунок 24 – Залежність $\tau_{\text{мотн}} = f(p_M; p_C)$

розробленою методикою для тягового двигуна НБ-406Б. З рис. 24 видно, що тепловий потенціал обмотки якоря тягового двигуна приблизно на 75 % формується за рахунок електричних втрат і на 25 % – за рахунок магнітних.

Якість випробувань тягових електричних машин на нагрів у дисертації запропоновано оцінювати ступенем розбіжності теплових навантажень обмоток якорів, а також обмоток збудження пари взаємно навантажених електромашин. Показано, що з допустимим ступенем спрощення розбіжність теплових навантажень обмоток якорів може бути оцінена за допомогою коефіцієнта відношення перевищень температур обмоток якорів у вигляді

$$K_{\tau\text{я}} = \frac{\tau_{\text{яг}}(t_1)}{\tau_{\text{яд}}(t_1)} = \frac{\tau_{\text{яг}\infty}}{\tau_{\text{яд}\infty}} = \frac{I_{\text{яг}}^2}{I_{\text{яд}}^2} = K_{I\text{я}}^2,$$

де $K_{I\text{я}}$ – відношення струмів якорів випробуваних генератора $I_{\text{яг}}$ та двигуна $I_{\text{яд}}$.

Для систем взаємного навантажування з електричним способом компенсації втрат неробочого ходу та одним джерелом потужності

$$K'_{\tau\text{я}} = (1 - \sum \Delta p)^2. \quad (6)$$

Для таких самих систем, але з двома джерелами потужності

$$K''_{\tau\text{я}} = (1 - \sum \Delta p_{\text{хх}} - 2\Delta \bar{n}^*)^2. \quad (7)$$

Значення $K'_{\tau\text{я}}$ і $K''_{\tau\text{я}}$ для деяких типів тягових двигунів електрорухомого складу магістрального та промислового транспорту наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Розрахункові значення коефіцієнтів $K'_{\tau\text{я}}$ і $K''_{\tau\text{я}}$

Коефіцієнти	Тип ТЕД					
	НБ-406Б	НБ-418К	УРТ-110А	РТ-51Д	НБ-511	ДТ-9Н
$K'_{\tau\text{я}}$	0,71	0,789	0,673	0,672	0,751	0,72
$K''_{\tau\text{я}}$	0,754	0,823	0,776	0,854	0,81	0,76

З табл. 4 видно, що компенсація втрат неробочого ходу шляхом утворення різниці струмів якорів взаємно навантажених тягових електромашин може викликати розбіжність теплових навантажень обмоток якорів більш ніж на 30 %.

Розбіжність теплових навантажень обмоток збудження пари випробуваних електромашин, яка також визначає якість випробувань, може бути оцінена за допомогою коефіцієнта відношення теплових навантажень обмоток збудження у вигляді

$$K_{\tau B} = K_{IB}^2,$$

де K_{IB} – відношення струму збудження I_B до струму якоря I_A , $K_{IB} = I_B / I_A$.

Коефіцієнти $K_{\tau B}$ для випадків отпитки та підживлення становлять відповідно:

$$K'_{\tau B} = (1 - K'_{\Delta I})^2; \quad K''_{\tau B} = (1 + K''_{\Delta I})^2. \quad (8)$$

У дисертації в результаті спільного аналізу виразів (8) та залежностей $K'_{\Delta I}(\Delta p)$ і $K''_{\Delta I}(\Delta p)$ (рис. 21) отримані універсальні залежності $K'_{\tau B} = f(\Delta p)$ і $K''_{\tau B} = f(\Delta p)$ для трьох значень коефіцієнта магнітного насичення k_H (1,67; 1,91 і 2,15) як для випадку збігу магнітних характеристик, так і максимальної їх розбіжності ($2\Delta\bar{n}^* = 0,06$). Отримані залежності для $k_H = 1,91$ представлені на рис. 25 (отпитка) та рис. 26 (підживлення). Криві 1 стосуються випадку збігу магнітних характеристик тягових електромашин, а криві 2 – випадку їх максимальної розбіжності.

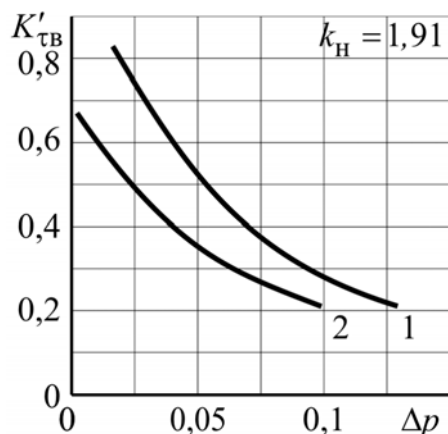


Рисунок 25 – Залежність $K'_{\tau B} = f(\Delta p)$

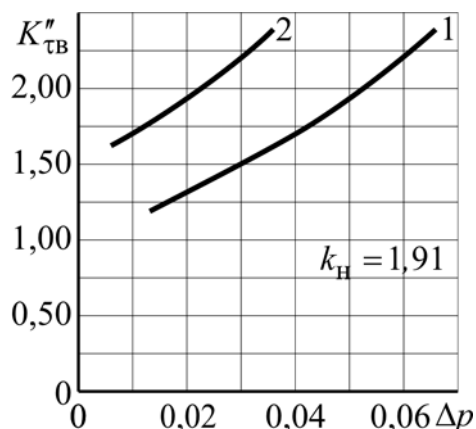


Рисунок 26 – Залежність $K''_{\tau B} = f(\Delta p)$

З рис. 25, 26 видно, що для реального діапазону зміни питомих втрат (одного з видів) $\Delta p \in [0,03; 0,05]$ розбіжність теплових навантажень обмоток збудження пари випробуваних тягових електромашин для випадку підживлення неприпустима не тільки для випадку максимальної розбіжності, але й збігу магнітних характеристик.

У п'ятому розділі виконано аналіз енергетичних показників систем та режимів взаємного навантажування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту. Розроблено метод визначення корисної потужності джерел живлення системи взаємного навантажування, у якому враховано розбіжність магнітних характеристик випробуваних тягових електромашин. Розглянуто питання визначення енергетичної ефективності випробувань.

У ході розробки методу визначення сумарної корисної потужності джерел розглянуто особливості роботи систем взаємного навантажування з двома джерелами живлення (варіанти AF , AG , BF , BG).

У загальному вигляді небалансу електромагнітну потужність випробуваних електромашин може бути записано у вигляді суми двох складових

$$\Delta P_{\text{эм}} = \Delta P'_{\text{эм}} + \Delta P''_{\text{эм}}, \quad (9)$$

де $\Delta P'_{\text{эм}}$ – складова небалансної електромагнітної потужності, яка йде на компенсацію одного з видів втрат непрямым способом;

$\Delta P''_{\text{эм}}$ – складова небалансної електромагнітної потужності, яка викликана розбіжністю магнітних потоків $\Delta \Phi = \Phi_{\text{д}} - \Phi_{\text{г}}$.

Наявність складової $\Delta P''_{\text{эм}}$ призводить до перерозподілу потужностей джерел живлення випробного стенда, характер якого наведений на рис. 27. На рисунку: И1 і И2 – джерела потужності, які призначені для компенсації втрат в електричній (ЭЧ) та механічній (МЧ) частинах системи взаємного навантажування відповідно.

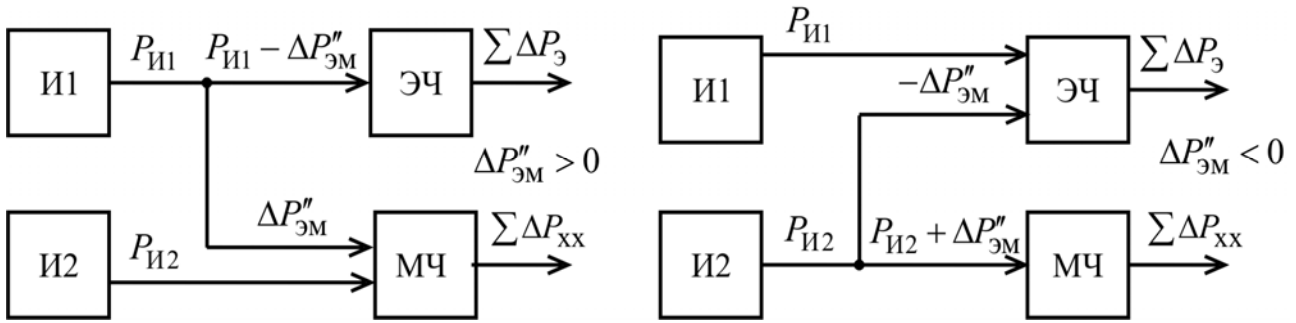


Рисунок 27 – Розподіл потужностей джерел при $\Delta \Phi > 0$ і $\Delta \Phi < 0$

Максимальна сумарна приведена потужність джерел живлення випробного стенда з урахуванням можливої розбіжності магнітних характеристик пари випробуваних тягових електромашин

$$\sum \bar{p}_{\text{и}} = \frac{2}{\eta} (1 - \eta) + 4 \Delta \bar{n}^*, \quad (10)$$

де η – коефіцієнт корисної дії однотипних випробуваних тягових електромашин, що відповідає режиму випробування.

Коефіцієнт запасу сумарної приведеної потужності джерел живлення

$$k_{\text{зап}} = \frac{\sum \bar{p}_{\text{и}}}{\Delta \bar{p}_{\text{э}} + \Delta \bar{p}_{\text{хх}}}, \quad (11)$$

де $\Delta\bar{p}_3 + \Delta\bar{p}_{xx}$ – сумарні електричні втрати та втрати неробочого ходу електромашин, приведені до потужності однієї електромашини.

У табл. 5 наведено значення $\sum \bar{p}_и$ і $k_{зап}$, отримані за формулами (10) і (11) для реального діапазону зміни к. к. д. тягових двигунів та допоміжних електромашин тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту з урахуванням максимальної розбіжності магнітних характеристик ($2\Delta\bar{\eta}^* = 0,06$).

Таблиця 5 – Залежності $\sum \bar{p}_и$ і $k_{зап}$ від к. к. д. тягових електромашин

К. к. д.	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96
$\sum \bar{p}_и$	0,34	0,32	0,29	0,27	0,25	0,23	0,20
$k_{зап}$	1,54	1,6	1,69	1,80	1,94	2,14	2,50

Як видно з табл. 5, для тягових електромашин з високим к. к. д. (до 0,95) необхідний запас сумарної потужності двох джерел живлення системи взаємного навантажування, зумовлений можливою максимально припустимою розбіжністю магнітних характеристик випробуваних електромашин, є більш ніж вдвоє більшим. Результати цих теоретичних досліджень підтверджені експериментально.

Енергетичну ефективність випробування на нагрів представлено у вигляді

$$k_{эфи} = k_{эфс} \cdot k_{эфн},$$

де $k_{эфс}$ – коефіцієнт енергетичної ефективності системи взаємного навантажування;

$k_{эфн}$ – коефіцієнт енергетичної ефективності нагрівання обмоток.

Відповідні коефіцієнти енергетичної ефективності представлено у вигляді:

$$k_{эфс} = \frac{\int_0^{t_1} \sum \Delta P_{дг} dt}{\int_0^{t_1} \sum P dt}; \quad k_{эфн} = \frac{Q_c}{\int_0^{t_1} \sum \Delta P_{дг} dt}; \quad k_{эфи} = \frac{Q_c}{\int_0^{t_1} \sum P dt},$$

де $\sum \Delta P_{дг}$ – сумарні втрати у випробуваних двигуні та генераторі;

$\sum P$ – сумарна споживана потужність всіх джерел живлення;

Q_c – накопичена теплова енергія (витрачена на підвищення температури);

t_1 – тривалість випробування на нагрів.

Додаткові втрати потужності у випробуваних електромашинах, викликані перетворенням видів потужності зовнішніх джерел при непрямим способах компенсації основних втрат, запропоновано оцінювати за допомогою коефіцієнта енергетичної ефективності перетворення $\eta_{пр}$. У результаті аналізу енергетичних діаграм отримано аналітичні вирази для визначення $\eta_{пр}$ для всіх варіантах непрямої компенсації основних втрат у випробуваних електромашинах.

У дисертації на основі аналізу діаграми зміни потужностей, наведеної на рис. 28, отримано аналітичний вираз для визначення коефіцієнта енергетичної ефективності нагрівання $k_{\text{эфн}}$. На рис. 28: τ – поточне значення перевищення температури обмотки; τ_1 – максимальне перевищення температури в кінці випробування; $\Delta P_{\text{э}}$ – еквівалентні втрати при $\tau = 0$; $\Delta P_{\text{пр}}$ – приведені втрати; ΔP_{τ} – додаткові втрати від перевищення температури; $P_{\text{в}}$ – потужність тепловіддачі; $P_{\text{с}}$ – потужність, яка витрачається на зростання перевищення τ та енергії $Q_{\text{с}}$.

Коефіцієнт енергетичної ефективності нагрівання $k_{\text{эфн}}$ та тривалість випробування t_1 відповідно визначаються виразами:

$$k_{\text{эфн}} = \frac{T_{\text{э}} \cdot \tau_1}{\tau_{\infty} (t_1 + \alpha(\tau_{\infty} t_1 - \tau_1 T_{\text{е}}))}; \quad t_1 = T_{\text{э}} \cdot \ln \frac{\tau_{\infty}}{\tau_{\infty} - \tau_1},$$

де $T_{\text{э}}$ – еквівалентна постійна часу нагрівання;

τ_{∞} – стале значення перевищення температури;

α – температурний коефіцієнт опору.

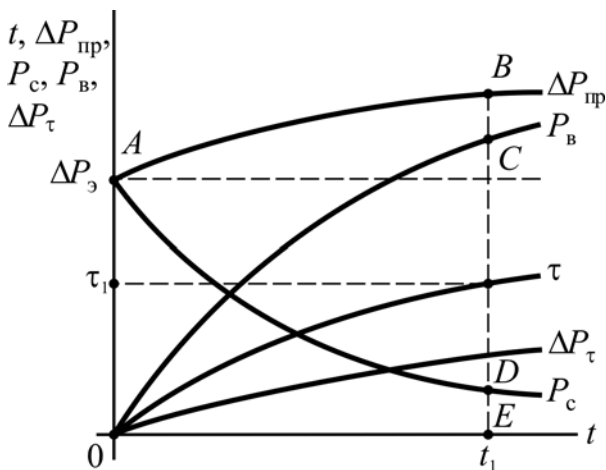


Рисунок 28 – Діаграма зміни потужностей

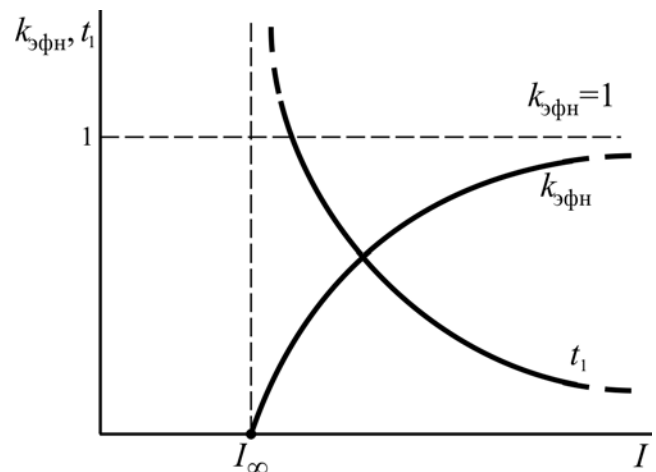


Рисунок 29 – Залежності $k_{\text{эфн}}(I)$ та $t_1(I)$

Характер залежностей $k_{\text{эфн}}(I)$ та $t_1(I)$ показаний на рис. 29. З графіків видно, що збільшення струму навантажування приводить до зростання коефіцієнта енергетичної ефективності нагрівання та зменшення тривалості випробувань.

У шостому розділі наведено порівняльний аналіз можливих варіантів схемних рішень джерел та перетворювачів електричної й механічної потужності, отримано аналітичні вирази для визначення їх параметрів для систем взаємного навантажування тягових електромашин. Визначено раціональні схеми та режими взаємного навантажування для проведення прийнятно-здавальних випробувань електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

Потрібні значення напруг та струмів джерел і перетворювачів електричної потужності представлено у вигляді залежностей від максимальних значень напруги та струму випробуваних тягових електромашин, їх коефіцієнта корисної дії, приведених втрат потужностей та максимально припустимого відносного відхилення частоти обертання в номінальному режимі.

Потрібні значення механічних моментів та кутових швидкостей джерел та перетворювачів механічної потужності подано як залежності від максимальних значень моменту та кутової швидкості випробуваних тягових електромашин, їх коефіцієнту корисної дії, приведених втрат потужностей та максимально припустимого відносного відхилення частоти обертання в номінальному режимі.

Розв'язання задачі вибору раціональних схем взаємного навантажування тягових електродвигунів та допоміжних електромашин тягового рухомого складу було розбито на такі незалежні підзадачі:

- визначення раціональної кількості джерел живлення;
- вибір раціонального типу джерела потужності;
- вибір раціонального типу перетворювача;
- вибір раціонального способу регулювання збудження електромашин.

Кожну з поставлених підзадач розглянуто окремо. Як критерії вибору раціонального варіанту в кожній з підзадач розглядались:

- мінімум приведеної сумарної потужності джерел та перетворювачів;
- максимум енергетичної ефективності процесу випробування;
- мінімум розбіжності теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження пари випробуваних тягових електромашин;
- можливість виконання всіх пунктів програми приймально-здавальних випробувань тягових електромашин.

Як альтернативи при розв'язуванні задачі вибору раціональних схем випробування тягових електричних машин було розглянуто всі 20 варіанти, які отримані при синтезі повного ряду схемних рішень системи взаємного навантажування.

Аналіз раціональності тієї чи іншої альтернативи виконано з умови визначеності режиму навантажування тягових електромашин, а саме: напруги на колекторі, струму навантажування, ступеня ослаблення збудження.

Результати аналізу показують, що з точки зору мінімуму сумарної приведеної потужності джерел живлення найбільш раціональними є схеми з використанням одного джерела. Залежність коефіцієнта запасу сумарної потужності джерел, зумовленої можливою розбіжністю магнітних характеристик випробуваних тягових електромашин, від їх к. к. д. наведено на рис. 30. Пряма $k'_{\text{зап}}$ відповідає варіантам з одним джерелом, а крива $k''_{\text{зап}}$ – з двома джерелами живлення.

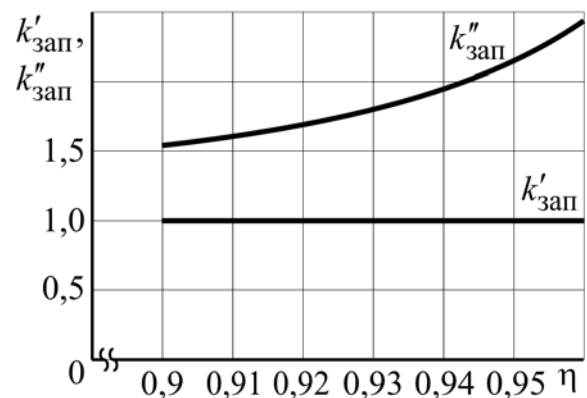


Рисунок 30 – Залежність $k''_{\text{зап}}(\eta)$

Рациональними джерелами потужності з точки зору мінімуму розбіжності теплових навантажень обмоток якорів є послідовне електричне джерело напруги та джерело механічного моменту, а найбільш раціональним перетворювачем потужності – з тій же точки зору, а також виходячи з мінімуму собівартості випробувальної станції – перетворювач механічної потужності (редуктор або варіатор).

Рациональним способом регулювання різниці магнітних потоків випробуваних електромашин є опитка обмотки збудження випробуваного генератора. Підживлення обмоток збудження є неприйнятним, оскільки викликає значну розбіжність теплових навантажень обмоток збудження пари випробуваних електромашин. Регулювання поля двигуна є неприйнятним, оскільки не дозволяє виконати таку частину програми випробувань тягових електромашин, як перевірка частоти обертання. Регулювання струму збудження випробуваного генератора запропоновано здійснювати за допомогою широтно-імпульсного регулятора ослаблення поля (РОП).

На рис. 31 наведено схему системи взаємного навантажування, яка є раціональною за наведеними вище критеріями для всіх типів тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму (тягових двигунів та допоміжних електромашин) електровозів, електропоїздів, тягових агрегатів та тепловозів.

На рис. 32 наведено функціональну схему системи автоматичного керування стендом взаємного навантажування за принциповою схемою, яку наведено на рис. 31.

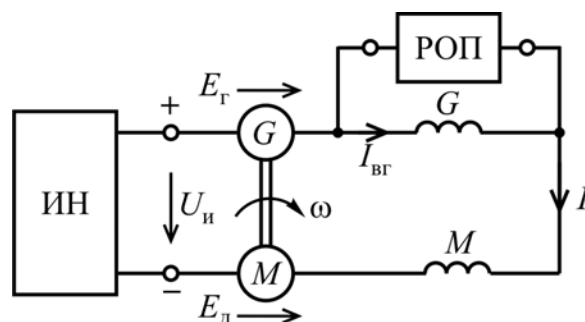


Рисунок 31 – Схема навантажування за варіантом «АН»

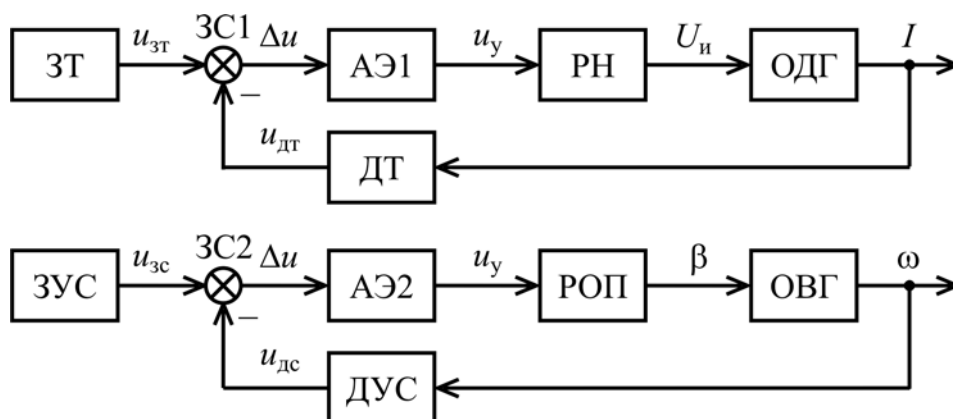


Рисунок 32 – Функціональна схема системи автоматичного керування

Система автоматичного керування є двоконтурною. Перший контур забезпечує стабілізацію струму навантажування I випробуваних тягових електромашин, а другий – стабілізацію їх кутової швидкості ω . Обидва контури включають в себе: задатчики (струму ЗТ, кутової швидкості ЗУС), датчики (струму ДТ, кутової швидкості ДУС), ланки порівняння ЗС, астатичні елементи АЭ, ре-

гулятори (напруги РН, ослаблення поля РОП), обмотки двигуна та генератора ОДГ, обмотку збудження генератора ОВГ.

На рис. 33 наведено схему системи взаємного навантажування, що є раціональною для випробування допоміжних електричних машин тягового рухомого складу, які відрізняються відносно невеликою номінальною потужністю (до 40 кВт). Ця схема включає варіатор «В», за допомогою якого можна плавно регулювати коефіцієнт передачі кутової швидкості k_ω .

На рис. 34 зображено функціональну схему контуру автоматичного регулювання кутової швидкості ω за принциповою схемою, що наведено на рис. 33. Система автоматичного керування також є двоконтурною. Перший контур аналогічний тому, що наведено на рис. 32, а другий (рис. 34) відрізняється наявністю регулятора передаточного відношення РПО замість регулятора ослаблення поля.

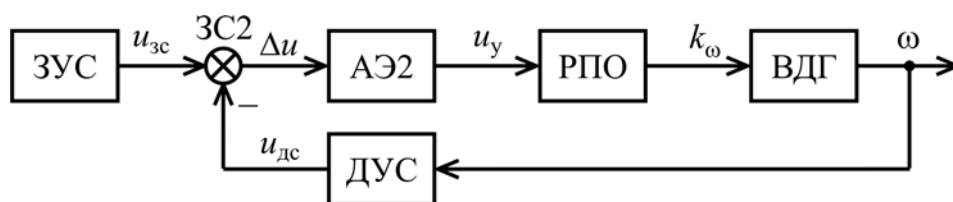


Рисунок 34 – Функціональна схема контуру регулювання кутової швидкості

На рис. 35 наведено схему системи взаємного навантажування, яка є раціональною для тягових електричних двигунів електропоїздів та тепловозів, що відрізняються середньою номінальною потужністю (до 300 кВт). Ця схема є гібридною і включає як перетворювач механічної потужності (редуктор), так і регулятор послаблення поля. З'єднання додаткового двигуна з валами випробуваних електромашин може бути виконано через коробку передач, яка буде забезпечувати можливість використання цієї схеми для випробувань тягових двигунів з одностороннім виходом валу, а також – ступеневе регулювання кутової швидкості. При цьому як додатковий двигун може використовуватися асинхронний привод загальнопромислового призначення.

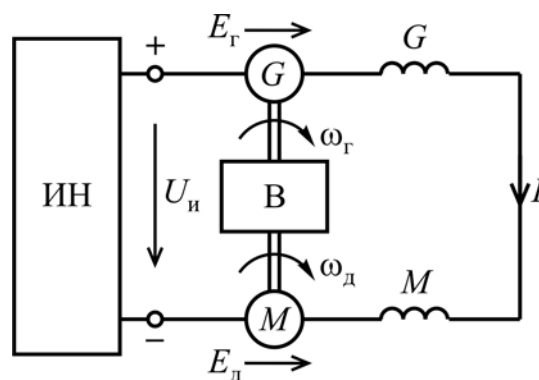


Рисунок 33 – Схема навантажування за варіантом «АІ»

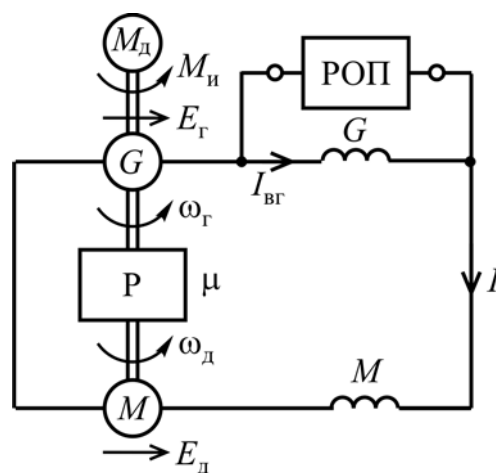


Рисунок 35 – Гібридна схема навантажування

Функціональну схему контуру регулювання струму навантажування тягових електромашин за схемою, зображеною на рис. 35, наведено на рис. 36. Вона включає задатчик та датчик струму, астатичний елемент, регулятор ослаблення поля та обмотку збудження генератора.

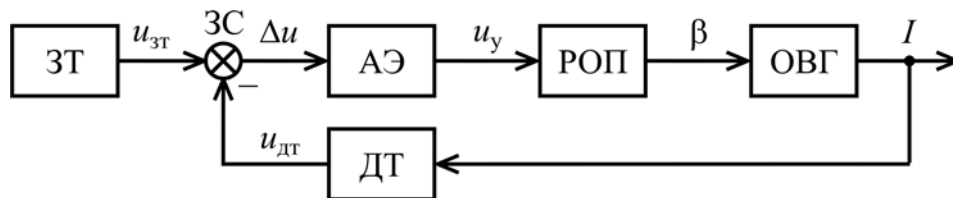


Рисунок 36 – Функціональна схема контуру регулювання струму

Режим навантажування випробуваних тягових електричних машин характеризується такими параметрами: напруга на колекторі; струм навантажування; коефіцієнт ослаблення поля; витрати охолоджувального повітря. Кожний з цих параметрів у дисертації розглянутий з точки зору можливості його впливу на раціональність режиму навантажування тягових електромашин під час їх випробування. Під час аналізу розглядалися ті ж самі критерії, що й під час вибору раціональної схеми навантажування.

На рис. 37 графічно наведено якісні залежності коефіцієнта енергетичної ефективності випробування на нагрів $k_{эфн}$ та питомої сумарної потужності джерел живлення системи взаємного навантажування $\sum \bar{p}_{и}$ від струму навантажування I .

У результаті аналізу цих залежностей зроблено висновок про те, що найбільш раціональним з точки зору мінімуму питомої потужності джерел живлення й максимуму енергетичної ефективності випробування на нагрів є навантажування тягових електромашин електрорухомого складу магістрального транспорту пусковим струмом. В аналізі враховано, що потужність джерел живлення станції для випробування тягових електромашин має бути розрахована на забезпечення пускового струму навантажування не залежно від вибраного режиму випробування на нагрів. Це зумовлено необхідністю виконання перевірки комутації відповідно до ГОСТ 2582-81.

Найбільш раціональним для випробування на нагрів тягових двигунів електрорухомого складу промислового транспорту (тягових агрегатів) є навантажування струмом п'ятнадцятихвилинного режиму, який для цього типу тягових двигунів є типовим параметром.

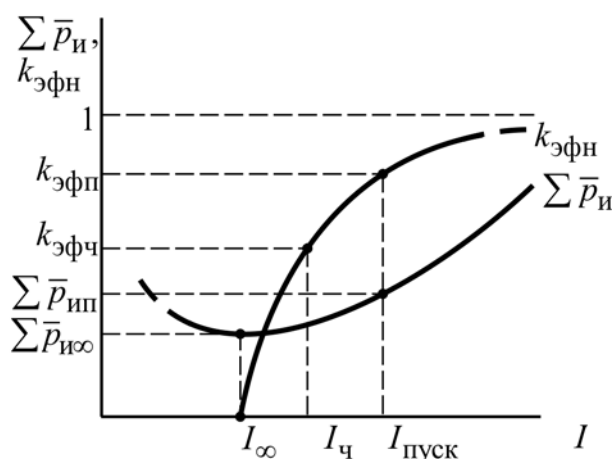


Рисунок 37 – Залежності $k_{эфн}(I)$ та $\sum \bar{p}_{и}(I)$

Аналіз залежностей $k_{\text{эфн}}(I)$ та $t_1(I)$ показує, що збільшення струму навантажування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту під час їх випробувань на нагрів до значень відповідно пускового та п'ятнадцятихвилинного режимів дозволяє збільшити коефіцієнт енергетичної ефективності випробувань майже в півтора рази, знизити витрати електроенергії приблизно на 30%, а також зменшити час випробування на нагрів у три – чотири рази.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науковою працею, у результаті виконаних теоретичних та експериментальних досліджень набули розвитку наукові основи вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму. Отримані результати в сукупності є вирішенням важливої науково-технічної проблеми вибору раціональних схем та режимів приймально-здавальних випробувань електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

Основні результати та висновки дисертаційної роботи такі.

1. Схеми та режими взаємного навантажування тягових електричних машин, які використовуються під час їх приймально-здавальних випробувань, є нераціональними. Існуючі станції з випробування тягових електричних машин, стан яких не відповідає сучасним вимогам організації технічного контролю, потребують модернізації, яка повинна бути направлена на зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної системи, підвищення енергетичної ефективності та якості випробувань.

2. Формалізація енергетичних принципів взаємного навантажування, яку запропоновано в дисертації, дозволяє розглядати компенсацію окремих видів втрат у системі взаємного навантажування непрямыми методами як процес забезпечення небалансної електромагнітної потужності випробуваних електромашин. Керування системами взаємного навантажування з непрямыми способами компенсації втрат зводиться до регулювання небалансної електромагнітної потужності випробуваних електромашин.

3. Формалізація електромеханічних принципів взаємного навантажування, яку запропоновано в дисертації, дозволяє розглядати функціонування будь-якої системи взаємного навантажування як результат забезпечення двох незалежних умов: умови протікання струму якорів та умови обертання валів випробуваних електромашин. Перша умова потребує компенсації падінь напруги в електричній частині, а друга – компенсації моментів опору в механічній частині системи.

4. На основі розроблених та науково обґрунтованих у дисертації принципів синтезу систем взаємного навантажування встановлено та систематизовано повний ряд з шістнадцяти основних та чотирьох додаткових варіантів електромеханічної схеми взаємного навантажування тягових електромашин постійного та пульсуючого струму послідовного збудження.

5. Виконаний в дисертації аналіз показав, що сумарна потужність джерел живлення системи взаємного навантажування, що характеризує її собівартість, визначається кількістю цих джерел, сумарними втратами потужності у випробуваних електромашинах та допустимою розбіжністю їх магнітних характеристик. Можлива розбіжність магнітних характеристик випробуваних тягових електромашин потребує суттєвого запасу встановленої потужності в системах з двома джерелами, якого не вимагається в системах з одним джерелом.

6. Завдяки введенню та формалізації поняття небалансної електромагнітної потужності випробуваних тягових електромашин у дисертації сформульовані та обґрунтовані загальні принципи керування режимами взаємного навантажування, за допомогою яких розроблені функціональні схеми систем автоматичного керування для всього ряду варіантів схеми взаємного навантажування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму.

7. Аналіз енергообмінних та теплових процесів, виконаний у дисертації, показав, що загальна енергетична ефективність процесу випробування електромашин на нагрів може бути представлено у вигляді добутку коефіцієнта енергетичної ефективності системи взаємного навантажування та коефіцієнта енергетичної ефективності процесу нагрівання обмоток тягових електромашин.

8. Використання критеріїв та методу вибору раціональних схем взаємного навантажування, розроблених у дисертації, дозволило встановити найбільш раціональні варіанти систем взаємного навантажування для тягових електродвигунів та допоміжних електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

9. Аналіз виразу для визначення коефіцієнту енергетичної ефективності нагрівання обмоток тягових електромашин, отриманого у дисертації, показує що найбільш раціональними при випробуванні на нагрів тягових двигунів електрорухомого складу магістрального та промислового транспорту є годинний струм та струм п'ятнадцятихвилинного режиму відповідно. Використання цих струмів навантажування дозволяє знизити витрати електроенергії на випробування на 20-30 % (порівняно з годинним режимом) без зниження якості випробувань, а також зменшує час випробувань на нагрів у три – чотири рази.

Основні положення й результати дисертації опубліковані в таких роботах.

Основні праці

1. Афанасов А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока: монография / А. М. Афанасов. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2012. – 248 с.
2. Афанасов А. М. Теоретический анализ энергетических процессов при взаимной нагрузке тяговых электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 258-262.
3. Афанасов А. М. К вопросу о выборе мощности источников питания стенда взаимной нагрузки тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 27. – С. 3-9.

4. Афанасов А. М. Энергетические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – С. 34-38.
5. Афанасов А. М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – С. 42-46.
6. Афанасов А. М. Компенсация электрических потерь при взаимной нагрузке тяговых электромашин по схеме Гопкинсона / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 28. – С. 34-37.
7. Афанасов А. М. Условия компенсации механических и магнитных потерь мощности при взаимной нагрузке тяговых электрических машин по схеме Потье / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – С. 59-62.
8. Афанасов А. М. Моделирование электромеханических процессов в стенде взаимной нагрузки тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Гірнича електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2010. – Вип. 84. – С. 210-217.
9. Афанасов А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока / А. М. Афанасов // Гірнича електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189.
10. Афанасов А. М. Качественный анализ электрических и магнитных потерь в якорях тяговых электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – № 36. – С. 13-18.
11. Афанасов А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 77-80.
12. Афанасов А. М. Выбор методов определения механических потерь в тяговых электродвигателях постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 32. – С. 151-154.
13. Афанасов А. М. Энергетические показатели электрического способа компенсации магнитных и механических потерь в тяговых электродвигателях при их взаимной нагрузке / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 65-68.
14. Афанасов А. М. Энергетические показатели механического способа компенсации электрических потерь в тяговых электродвигателях при их взаимной нагрузке / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 35. – С. 69-73.
15. Афанасов А. М. Регулирование магнитных потоков тяговых электрических машин при их взаимном нагружении / А. М. Афанасов // Зб. наук. пр. Держ. економіко-технологічного ун-ту транспорту. Сер. Транспортні системи і технології. – К.: ДЕТУТ, 2011. – Вип. 19. – С. 5-14.

- 16.Афанасов А. М. Регулирование небалансной электромагнитной мощности в системах взаимного нагружения тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2011. – Вип. 87. – С. 84-87.
 - 17.Афанасов А. М. Принципы автоматического управления системами взаимного нагружения тяговых электрических машин / А. М. Афанасов // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – 2012. – Вип. 29. – С. 205-211.
 - 18.Афанасов А. М. Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электромашин при приемо-сдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // Восточно-европейский журн. передовых технологий. – 2012. – № 5/8(59). – С. 6-9.
 - 19.Афанасов А. М. Расхождение тепловых факторов обмоток якорей тяговых электрических машин при испытании на нагрев методом взаимной нагрузки / А. М. Афанасов // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 16-19.
 - 20.Афанасов А. М. Выбор рациональных схем и режимов нагружения тяговых электрических машин при приемо-сдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // Локомотив-информ. – 2012. – № 10. – С. 12-14.
 - 21.Афанасов А. М. Взаимное нагружение тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками / А. М. Афанасов // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту ім. В. Даля – Луганськ : СУДУ, 2012. – Вип. 5(176). Ч.1. – С. 202-206.
 - 22.Афанасов А. М. Моделирование магнитных характеристик тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Залізн. трансп. України. – 2012. – № 6. – С. 29-31.
- Додаткові праці**
- 23.Пат. 50880 Україна МПК(2009) G01M 15/00. Стенд взаємного навантаження тягових електричних двигунів постійного струму / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – у 2009 13721; заявл. 28.12.09; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
 - 24.Пат. 50929 Україна МПК(2009) H02K 51/00. Стенд для випробування електричних машин постійного струму послідовного збудження / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – у 2009 13961; заявл. 30.12.09; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
 - 25.Пат. 51326 Україна МПК(2009) H02K 51/00. Стенд для випробування тягових електричних двигунів постійного струму / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – у 2010 00798; заявл. 27.01.10; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.
 - 26.Пат. 51327 Україна МПК(2009) H02K 51/00. Стенд взаємного навантаження електричних машин постійного струму послідовного збудження / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – у 2010 00804; заявл. 27.01.10; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.
 - 27.Пат. 75689 Україна МПК: H02K51/00. Пристрій для випробування електричних машин постійного струму послідовного збудження / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дн. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – у 2012 06491; заявл. 29.05.12; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23.

28. Пат. 76897 Україна МПК(2013.01) H02K 51/00. Система взаємного навантаження тягових електричних машин постійного струму / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2012 06484; заявл. 29.05.12; опубл. 25.01.13, Бюл. № 2.
29. Афанасов, А. М. Определение расхода электроэнергии на проведение приемо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин / А. М. Афанасов // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 1. – С.10-14.
30. Афанасов А. М. Выбор типовых параметров источников мощности системы взаимного нагружения тяговых электромашин с механическим способом компенсации потерь холостого хода / А. М. Афанасов // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 3. – С. 26-28.
31. Афанасов А. М. Проблемы и перспективы модернизации станций для испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Тези 69-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Д., 2009. – С.127.
32. Афанасов А. М. Пути снижения энергозатрат на испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Тези 3-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2009"». – Місхор, 2009. – С. 6-7.
33. Афанасов А. М. Выбор рациональных схем испытания тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2010"». – Д., 2010. – С. 7-8.
34. Афанасов А. М. Энергетические показатели способов компенсации потерь мощности в тяговых электромашинах при их взаимной нагрузке / А. М. Афанасов // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2010"». – Д., 2010. – С. 8-9.
35. Афанасов А. М. Влияние расхождения магнитных характеристик тяговых электромашин на типовые мощности источников питания стенда взаимной нагрузки / А. М. Афанасов // Тези 3-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті (ЕМС-R 2010)». – Д., 2010. – С. 56-57.
36. Афанасов А. М. Синтез систем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіки і технології». – К., 2011. – С. 6.
37. Афанасов А. М. Повышение информативности результатов тепловых испытаний тяговых электромашин методом взаимной нагрузки / А. М. Афанасов // Тези Міжнародної науково-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». – Д., 2011. – С. 37.
38. Афанасов А. М. Оценка энергетической эффективности послеремонтных испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Матеріали 2-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Ждениево, 2011. – С. 5.

- 39.Афанасов А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах / А. М. Афанасов // Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2011"». – Д., 2011. – С. 3.
- 40.Афанасов А. М. Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электрических машин при приемо-сдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // Матеріали 6-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2012"». – Мінськ, 2012. – С. 52-53.
- 41.Розробка пропозицій щодо зниження витрат електроенергії на випробування електричних машин тягового рухомого складу: отчет о НИР (заключит.) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Інв. № 0711U004914. – № ДР 0109U002982. – Д., 2010. – 195 с.
- 42.Експлуатаційні випробування електровозів 2ЭС6 № 147 і 2ЭС10 № 012 в умовах Львівської залізниці: отчет о НИР (заключит.) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № ДР 0112U003558. – Д., 2012. – 203 с.

АНОТАЦІЯ

Афанасов А. М. Развитие научных основ та вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями: 05.22.09 – електротранспорт; 05.22.12 – промисловий транспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2013.

Дисертація присвячена розвитку наукових основ та вдосконаленню енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту. У роботі проблема удосконалення системи приймально-здавальних випробувань тягових електромашин розглядається як комплексна і вирішується шляхом обґрунтування нових принципів визначення раціональних схем та режимів навантажування тягових електромашин.

Розроблено принципи синтезу систем взаємного навантажування тягових електромашин постійного та пульсуючого струму, на основі яких визначений повний ряд можливих варіантів схеми взаємного навантажування. Науково обґрунтовано універсальні принципи регулювання режимів взаємного навантажування тягових електромашин. Визначено раціональні схеми та режими взаємного навантажування тягових електромашин, які забезпечують зниження сумарної потужності джерел випробувальної станції, підвищення енергетичної ефективності та якості випробувань.

Ключові слова: тяговий рухомий склад, електричні машини, приймально-здавальні випробування, взаємне навантажування, принципи регулювання, нагрівання, автоматичне керування, енергетична ефективність, якість.

АННОТАЦИЯ

Афанасов А. М. Развитие научных основ и совершенствование энергоэффективных методов испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.22.09 – электротранспорт; 05.22.12 – промышленный транспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2013.

Диссертация посвящена развитию научных основ и совершенствованию энергоэффективных методов испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта. В данной работе проблема усовершенствования системы приемо-сдаточных испытаний тяговых электромашин рассматривается как комплексная и решается путем обоснования новых принципов определения рациональных схем и режимов нагружения тяговых электромашин.

Сформулированы энергетические и электромеханические принципы взаимного нагружения электромашин постоянного тока. Разработана методика синтеза систем взаимного нагружения, с помощью которой определен полный ряд принципиально возможных вариантов электромеханической схемы взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока последовательного возбуждения.

Научно обоснованы универсальные принципы управления режимами взаимного нагружения тяговых электромашин путем изменения параметров источников и преобразователей мощности, а также регулированием возбуждения испытываемых электромашин. Разработаны функциональные схемы систем автоматического управления стендами взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока.

Выполнен анализ влияния на режим взаимного нагружения пары испытываемых тяговых электромашин степени расхождения их магнитных характеристик. Установлено влияние на значение суммарной типовой мощности источников испытательной системы количества этих источников, к. п. д. испытываемых электромашин и нормируемого допустимого относительного отклонения частоты вращения их роторов в часовом режиме.

Получены аналитические выражения для определения степени влияния отдельных видов потерь в испытываемых электромашинах на превышение температуры их обмоток. Исследовано влияние на расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей и обмоток возбуждения пары испытываемых тяговых электромашин режимов взаимного нагружения, расхождения магнитных характеристик и удельных потерь мощности в электромашинах.

Выполнен анализ энергетических показателей систем и режимов взаимного нагружения тяговых электромашин. Энергетическая эффективность испытания электромашин на нагрев представлена в виде комплексного параметра, опреде-

ляемого энергетическими эффективностями системы взаимного нагружения и процесса нагревания. Получены аналитические выражения для определения энергетической эффективности косвенных методов компенсации потерь и процесса нагревания обмоток электромашин. Установлена зависимость энергетической эффективности нагревания обмоток испытуемых электромашин от величины тока нагрузки.

Выполнен анализ рациональных вариантов источников и преобразователей электрической и механической мощности, разработана методика определения характеристик и параметров источников и преобразователей мощности, которые могут быть применены в системах взаимного нагружения тяговых электрических машин.

Установлены основные направления повышения энергоэффективности и качества приемо-сдаточных испытаний тяговых электромашин. Определены рациональные схемы и режимы взаимного нагружения, обеспечивающие снижение суммарной мощности источников испытательной станции, повышение энергетической эффективности и качества испытаний электромашин тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: тяговой подвижной состав, электрические машины, приемо-сдаточные испытания, взаимная нагрузка, принципы регулирования, нагревание, автоматическое управление, энергетическая эффективность, качество.

ABSTRACT

Afanasov A. Development of scientific principles and methods for improving the energy efficiency of electric traction testing machines and pulsating DC current. - Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Science in specialties: 05.22.09 - electric, 05.22.12 - industrial trucks. - Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2013.

The thesis is devoted to the development of scientific bases and improve energy efficiency test methods traction electric machines and pulsating DC current of traction and rolling stock of main industrial railways. In this science work the problem of improving the system acceptance testing electric traction is seen as a complex and solved by determining the justification of new principles of rational schemes and modes of loading electric traction.

The principles of mutual fusion of electric traction load continuous and pulsed current, which is defined on the basis of a full range of possible schemes of mutual activity. Scientifically grounded universal principles of mutual adjustment mode loading electric traction. Rational schemes and modes relative loading of electric traction, to reduce the total power testing station sources, energy efficiency and quality testing.

Keywords: traction rolling stock, electric cars, acceptance testing, relative load regulation principles, heating, automatic control, energy efficiency, quality.

Афанасов Андрій Михайлович

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАННЯ
ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
ПОСТІЙНОГО ТА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

підписано до друку « 16 » травня 2013 року.

Формат 60x84 1/16.

Ум. др. арк. 1,95. Обл.-вид. арк. 1,95. Тираж 100 пр.

Зам. № ____.

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1315 від 31.03.03

Адреса університету і дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010