


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

ДРУБЕЦЬКИЙ АНТОН ЮХИМОВИЧ

УДК 621.333.024/.024.2(043.3)



**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ
ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО ТА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт
Галузь знань 27 – Транспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
АФАНАСОВ Андрій Михайлович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, декан факультету «Управління енергетичними процесами», м. Дніпро

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
СІНЧУК Олег Миколайович,
ДВНЗ «Криворізький національний університет», завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, м. Кривий Ріг;

кандидат технічних наук, доцент
ЦИПЛЕНКОВ Дмитро Володимирович,
ДВНЗ «Національний гірничий університет», доцент кафедри відновлюваних джерел енергії, м. Дніпро.

Захист дисертації відбудеться “24” квітня 2018 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.820.01 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, або на сайті за адресою: <http://ndch.diit.edu.ua/ua/sections/newzashchityd08-820-01/>

Автореферат розісланий “22” березня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор техн. наук, професор



А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тенденція до впровадження енергозберігаючих технологій поширюється на всі види господарської діяльності в Україні, зокрема й на залізничний транспорт, який є однією з найбільш енергоємною галуззю народного господарства. Однією із складових загальних витрат енергоресурсів на залізничному транспорті є витрати електроенергії на ремонт тягового та моторвагонного рухомого складу. Післяремонтні приймально-здавальні випробування тягових електричних двигунів (ТЕД) є невід'ємною частиною всього технологічного процесу їх ремонту, на яку витрачаються матеріальні та енергетичні ресурси. Від енергоефективності та якості післяремонтних випробувань тягових двигунів залежить кінцева собівартість ремонту та надійність рухомого складу в подальшій експлуатації. Як відомо, до 75% причин відмов тягових двигунів в експлуатації припадає на погіршення властивостей ізоляції через невиявлені при післяремонтних випробуваннях недопустимі перевищення температур їх обмоток.

На більшості існуючих станціях з випробування ТЕД використовуються системи взаємного навантаження (СВН) з електромашинними перетворювачі енергії. На багатьох випробувальних станціях не вирішена проблема заміни на статичний перетворювач лінійного генератора, до якого пред'являються дуже жорсткі вимоги з точки зору переважувальних властивостей. Варіанти схем взаємного навантаження без лінійного генератора, які пропонуються в останні часи, потребують обов'язкового використання систем автоматичного регулювання в зв'язку з їх електромеханічною нестійкістю. До сучасних СВН висуваються вимоги не тільки забезпечення максимальної енергоефективності, а також і максимальної якості випробувань, зокрема, й достовірності їх результатів.

До теперішнього часу проблема підвищення енергоефективності систем взаємного навантаження вирішувалася за допомогою вибору їх раціональних силових схем, типу джерел потужності, типу перетворювачів потужності та способу регулювання збудження випробовуваних двигунів. Не зважаючи на те, що питання підвищення енергоефективності за допомогою вищезазначених заходів розглянуто в цілому ряді відомих наукових досліджень, до наступного часу не визначений вплив на енергоефективність та достовірність результатів випробувань: прийнятих схемних рішень джерел живлення СВН, режимів їх роботи, схемних рішень та режимів роботи систем регулювання збудження випробовуваних ТЕД.

Таким чином, наукові дослідження направлені на вдосконалення системи взаємного навантаження шляхом визначення раціональної схеми взаємного навантаження, раціональних режимів роботи джерел живлення і системи регулювання збудження випробовуваних ТЕД, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 р. № 661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту».

2. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 18.08.2017, № 605-р.

3. НДР «Дослідження і аналіз показників експлуатаційної роботи та надійності електропоїздів подвійного живлення» (№ ДР 0113U005861), у якій автор був одним з виконавців.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення системи взаємного навантаження тягових двигунів постійного та пульсуючого струму шляхом науково обґрунтованого вибору її раціональної структури та режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі **завдання**.

1. Розробити математичну модель електромеханічних процесів в системі взаємного навантаження тягових електродвигунів постійного та пульсуючого струму.
2. Виконати математичне моделювання енергетичних процесів, що виникають при випробуваннях тягових електродвигунів.
3. Розробити універсальні методики визначення параметрів схеми заміщення тягових електродвигунів.
4. Виконати науково обґрунтований пошук та синтез раціональних схем джерела живлення для системи взаємного навантаження тягових електродвигунів.
5. Визначити раціональні режими роботи системи взаємного навантаження.
6. Експериментально підтвердити отримані результати.

Об'єкт дослідження – процес приймально-здавальних випробувань тягових електричних двигунів постійного та пульсуючого струму.

Предмет дослідження – структура та режими роботи системи взаємного навантаження тягових електричних двигунів постійного та пульсуючого струму.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження дисертаційної роботи базуються на математичному моделюванні роботи системи взаємного навантаження на основі математичної моделі машини постійного струму. При вирішенні задачі математичного моделювання використовувалися можливості пакету прикладного програмного забезпечення «MATLAB Simulink». Задача вибору та синтезу раціонального джерела живлення вирішувалася за допомогою кореляційно-регресійного та кластерного аналізу, а також методів векторної оптимізації. Визначення раціональних параметрів елементів схеми взаємного навантаження виконано за допомогою теоретичних положень та принципів системного підходу теоретичної електротехніки, теоретичної механіки та теорії перетворювачів. Експериментальне підтвердження отриманих теоретичних результатів виконувалось на стенді взаємного навантаження тягових двигунів РТ-51Д. Розбіжність теоретичних та експериментальних досліджень не перевищує загальноприйнятих значень.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше:

- науково обґрунтовано доцільність використання в якості джерела живлення системи взаємного навантаження тягових електричних двигунів двофазного імпульсного перетворювача постійної напруги із нульовою точкою, що надає можливість підвищити енергоефективність та якість випробувань;
- науково обґрунтовано метод вибору раціональних параметрів системи регулювання збудження випробуваних шляхом взаємного навантаження тягових електродвигунів, що дозволяє підвищити достовірність результатів випробувань;
- отримані універсальні вирази для розрахунку індуктивностей обмоток тягових електричних двигунів постійного та пульсуючого струму з врахуванням насичення їх магнітної системи та дії реакції якоря, використання яких дозволило розробити методику вибору раціональних параметрів джерел живлення системи взаємного навантаження тягових електродвигунів.

2. Удосконалено аналітичний вираз апроксимації магнітної характеристики тягових електродвигунів постійного та пульсуючого струму, який враховує дію реакції якоря в електромашині без компенсаційної обмотки, що дає змогу виконувати розрахунок магнітних характеристик та моделювання роботи таких електродвигунів в режимах з будь-яким ступенем ослаблення збудження.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено метод вибору та синтезу раціональної схеми джерела живлення, що відповідає вимогам, які висуваються до джерел живлення систем взаємного навантаження тягових електродвигунів, що дає можливість підвищити енергоефективність їх післяремонтних випробувань.

2. Розроблено методику розрахунку індуктивностей обмоток тягових електродвигунів будь-якого типу за допомогою лише типових параметрів, яка враховує насичення магнітопроводу та дію реакції якоря, і, тим самим, забезпечує більш точний вибір раціональних параметрів перетворювачів для живлення СВН, а отже й підвищення енергоефективності випробувань тягових електродвигунів.

3. Розроблено методику вибору раціональних режимів роботи блоку регулювання збудження системи взаємного навантаження та отримані вирази для визначення раціональних параметрів режиму регулювання збудження випробуваних ТЕД, що дозволяє підвищити достовірність результатів випробувань.

4. Розроблено методику розрахунку магнітних характеристик тягових електродвигунів для будь-якого значення ступеня ослаблення збудження, що дає можливість виконувати розрахунок магнітних характеристик некомпенсованих ТЕД для заданого ступеня ослаблення збудження й, тим самим, спрощує розрахунок та моделювання магнітних характеристик таких ТЕД в режимах послаблення збудження.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, які викладені в дисертаційній роботі, отримані дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать: [3] – розробка функціональної схеми системи автоматичного регулювання; [4] – розрахунок залежності відносної різниці магнітних потоків від відносної різниці струмів та залежності відносної різниці струмів від відносних втрат холостого ходу; [5] – розрахунок залежності теплового навантаження обмоток збудження від відносних втрат холостого ходу, [8] – розрахунок параметрів силової схеми перетворювача, [13–17] – вибір елементів функціональної схеми та розрахунок параметрів її елементів. Роботи [1, 2, 6, 7, 9, 10, 11, 12] написані та опубліковані без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 5-й Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості», м. Воловець, 2014 р., на 76-й та 77-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпро 2016–2017 рр., на 1-й Міжнародній науково-практичній конференції «Енергорациональні технології перевізного процесу», м. Моршин, 2016 р., на 9-й Міжнародній науково-практичній конференції «Транселектро–2016», м. Дніпро, 2016 р.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 17 наукових працях, з них: 6 – у фахових виданнях, 1 – у зарубіжному науковому журналі, 6 – у тезах доповідей та в матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій, 1 зареєстрований патент на корисну модель, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на методику розрахунку.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та 2 додатків. Основний текст роботи викладений на 151 сторінках, містить 54 рисунка і 8 таблиць. Рисунки та таблиці, розміщені на окремих сторінках, займають 10 сторінок. Список літературних джерел із 134 найменувань займає 17 сторінок. Додатки займають 13 сторінок. Повний обсяг дисертації складає 178 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, приведені основні наукові положення і результати, що винесені на захист, а також подані відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

У **першому розділі** було проведено аналіз програми приймально-здавальних випробувань тягових електродвигунів постійного та пульсуючого струму, порівняльний аналіз існуючих варіантів схем навантаження електромашин при їх випробуванні, варіантів існуючих схем джерел живлення систем взаємного навантаження, а також аналіз роботи в області удосконалення систем взаємного навантаження, їх автоматизації та математичного моделювання. В результаті аналізу стану проблеми дослідження були сформульовані мета та основні задачі дисертації.

Вирішенню проблем контролю якості ремонту та технічного діагностування електромашин присвячені роботи В. В. Артеменко, В. К. Волкова, М. Д. Глущенко, С. М. Должикова. Питання вдосконалення технологій діагностування окремих вузлів електромашин розглянуті в наукових роботах Н. В. Белоусова та А. В. Долгова.

Удосконаленню методів випробувань тягових електромашин присвячені роботи В. В. Артеменко, А. Б. Бабаніна, Л. В. Дубинця, П. О. Лози, О. М. Сінчука, Д. Л. Сушко. Теоретичному аналізу енергетичних та електромеханічних процесів в системах взаємного навантаження тягових електромашин, питанням їх синтезу та вибору раціональних схем систем взаємного навантаження присвячені роботи А.М. Афанасова.

Питання вдосконалення випробувальних систем та методів динамічного навантаження широко висвітлені в роботах Д. Й. Родькіна, А. І. Ломоноса, А. Л. Перекреста. Вирішенню проблем автоматизації випробувань електромашин методом взаємного навантаження присвячені роботи А. В. Красуліна та О. В. Сорокіна.

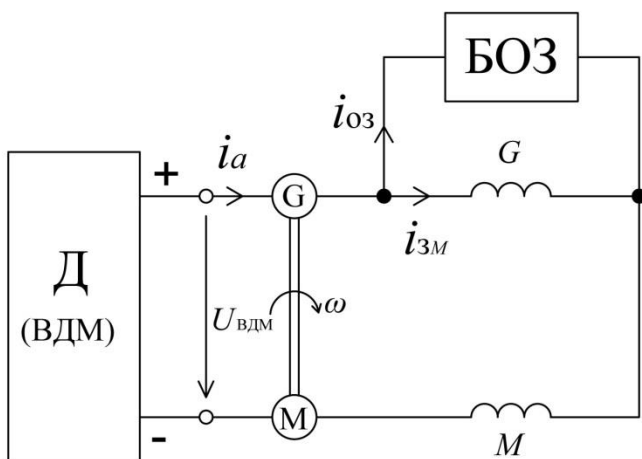


Рисунок 1 – Раціональна система взаємного навантаження (з покриттям усіх втрат електричним способом)

ПОМОГОЮ МОДЕЛЮВАННЯ.

В області математичного моделювання електромеханічних процесів у електричних машинах відомі роботи Б. Адкінса, М. Х. Бельмана, М. З. Жица, І. П. Копилова, Г. Крона, І. М. Постнікова, Д. Уайта, Г. Вудсона, Н. Шмитца, Д. Новотного, В.В. Фетісова. В області тягового електромашинобудування відомі роботи Г.К. Гетьмана, Д. Д. Захарченко, М. О. Ротанова, А. Б. Іоффе, О. С. Курбасова, М. Д. Находкіна, І. Я. Ранькіса, В. Ю. Скобелева, В. П. Феоктістова. Аналіз даних робіт дозволив зробити висновок, що існуюча різноманітність підходів до моделювання електромеханічних процесів в електричних машинах зумовлена, в першу чергу, різноманітністю самих задач, що вирішуються за до-

У другому розділі представлені результати математичного моделювання електромагнітних процесів в системі взаємного навантаження тягових електродвигунів постійного та пульсуючого струму. Розглянуті питання виникнення додаткових пульсаційних втрат в тягових двигунах, що випробовуються методом взаємного навантаження використанням з широтно-імпульсного регулювання напруги та ступеня ослаблення збудження.

Проаналізовані існуючі підходи до моделювання динамічних та квазіусталених режимів роботи електромашини постійного струму. За результатами даного аналізу, як модель машини постійного струму, була прийнята модель на основі системи рівнянь Фетісова–Сидельникова.

В якості досліджуваної системи взаємного навантаження було прийнято систему з покриттям усіх втрат електричним способом, в якій для створення небалансного електромагнітного моменту та регулювання частоти обертання випробовуваних ТЕД використовується ослаблення збудження генератора (рис. 1). Показано, що дана СВН є найбільш раціональною з точки зору енергетичної ефективності випробувань. На рисунку 1 зображено:

- Д – джерело напруги (вольтодобавочна машина ВДМ);
- G та M – якір та обмотка збудження генератора та двигуна відповідно;
- БОЗ – блок ослаблення збудження генератора.

Слід зазначити, що вибрана СВН електромеханічно нестійка, а тому потребує обов'язкового використання системи автоматичного керування, без якої вона непрацездатна. Система автоматичного керування повинна здійснювати регулювання мінімум по двом каналам: за струмом якорів ТЕД та частотою їх обертання. У зв'язку з цим автором спільно з науковим керівником була вирішена задача автоматизації вибраної системи взаємного навантаження. Було визначено, що для можливості регулювання частоти обертання БОЗ повинен реалізовувати плавне регулювання ступеню ослаблення збудження зі зворотним зв'язком за частотою обертання або напругою на колекторах ТЕД.

На базі вибраної моделі машини постійного струму та системи взаємного навантаження було складено розрахункову схему досліджуваних ТЕД (рис. 2). В якості досліджуваного ТЕД було вибрано тяговий електродвигун РТ-51Д.

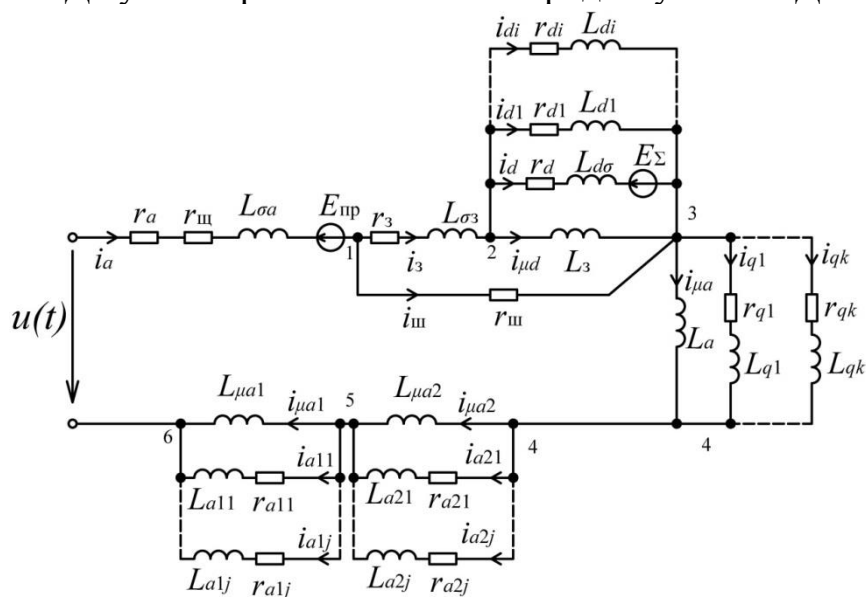


Рисунок 2 – Розрахункова схема заміщення досліджуваного ТЕД, який працює у складі СВН в режимі двигуна

Схему, що представлена на рисунку 2 описує система рівнянь (1).

$$\begin{cases}
 i_a - i_{\text{ш}} - i_3 = 0 \\
 i_3 - i_{\mu d} - i_d - i_{d1} - \dots - i_{dk} = 0 \\
 i_{\mu d} + i_d + i_{d1} + \dots + i_{dk} + i_{\text{ш}} - i_{\mu a} - i_{q1} - \dots - i_{qk} = 0 \\
 i_{\mu a} + i_{q1} + \dots + i_{qk} - i_{\mu a2} - i_{a21} - \dots - i_{a2j} = 0 \\
 i_{\mu a2} + i_{a21} + \dots + i_{a2j} - i_{\mu a1} - i_{a11} - \dots - i_{a1j} = 0 \\
 (r_a + r_{\text{ш}}) \cdot i_a + L_{\sigma a} \frac{di_a}{dt} + r_{\text{ш}} \cdot i_{\text{ш}} + L_a \frac{di_{\mu a}}{dt} + L_{\mu a2} \frac{di_{\mu a2}}{dt} + L_{\mu a1} \frac{di_{\mu a1}}{dt} = u(t) - E_{\text{пр}} \\
 r_3 \cdot i_3 + L_{\sigma 3} \frac{di_3}{dt} + L_3(i_{\mu d}, i_a) \frac{di_{\mu d}}{dt} - r_{\text{ш}} \cdot i_{\text{ш}} = 0 \\
 L_3(i_{\mu d}, i_a) \frac{di_{\mu d}}{dt} - r_d(i_a, \omega) \cdot i_d - L_{d\sigma} \frac{di_d}{dt} = E_{\Sigma}(i_{\mu a}, i_a, \omega) \\
 r_{d1} \cdot i_{d1} + L_{d1} \frac{di_{d1}}{dt} - r_d(i_a, \omega) \cdot i_d - L_{d\sigma} \frac{di_d}{dt} = E_{\Sigma}(i_{\mu a}, i_a, \omega) \\
 \dots \\
 r_{di} \cdot i_{di} + L_{di} \frac{di_{di}}{dt} - r_{di-1} \cdot i_{di-1} - L_{di-1} \frac{di_{di-1}}{dt} = 0 \\
 L_a \frac{di_{\mu a}}{dt} - r_{q1} \cdot i_{q1} - L_{q1} \frac{di_{q1}}{dt} = 0 \\
 \dots \\
 r_{qk} \cdot i_{qk} + L_{qk} \frac{di_{qk}}{dt} - r_{qk-1} \cdot i_{qk-1} - L_{qk-1} \frac{di_{qk-1}}{dt} = 0 \\
 L_{\mu a2} \frac{di_{\mu a2}}{dt} - r_{a21} \cdot i_{a21} - L_{a21} \frac{di_{a21}}{dt} = 0 \\
 \dots \\
 r_{a2j} \cdot i_{a2j} + L_{a2j} \frac{di_{a2j}}{dt} - r_{a2j-1} \cdot i_{a2j-1} - L_{a2j-1} \frac{di_{a2j-1}}{dt} = 0 \\
 L_{\mu a1} \frac{di_{\mu a1}}{dt} - r_{a11} \cdot i_{a11} - L_{a11} \frac{di_{a11}}{dt} = 0 \\
 \dots \\
 r_{a1j} \cdot i_{a1j} + L_{a1j} \frac{di_{a1j}}{dt} + r_{a1j-1} \cdot i_{a1j-1} - L_{a1j-1} \frac{di_{a1j-1}}{dt} = 0
 \end{cases}, \tag{1}$$

де: i_3, i_a – струми обмотки збудження та якоря; $i_{\mu d}, i_{\mu a}$ – намагнічуючі струми обмотки збудження та якоря; $i_{\mu a1}, i_{\mu a2}, i_{\mu k}$ – намагнічуючі струми пазового розсіювання двошарової обмотки якоря та компенсаційної обмотки; i_d – приведений еквівалентний струм, що враховує дію комутаційних контурів; $i_{d1}, i_{di}, i_{q1}, i_{qk}, i_{a11}, i_{a1j}, i_{a21}, i_{a2j}, i_{k1}, i_{kj}$ – приведені еквівалентні струми, що враховують дію вихрових контурів; $L_{\sigma 3}, L_{\sigma a}$ – індуктивності розсіювання обмотки збудження та якоря; $L_3(i_{\mu d}, i_a), L_a$ – власні індуктивності обмотки збудження та якоря; $L_{\mu a1}, L_{\mu a2}, L_{\mu k}$ – власні індуктивності пазового розсіювання двошарової обмотки якоря та компенсаційної обмотки; L_{d1}, L_{di} ,

$L_{q1}, L_{qk}, L_{a11}, L_{a1j}, L_{a21}, L_{a2j}, L_{k1}, L_{kj}$ – приведені індуктивності еквівалентних вихрових контурів; r_3, r_a – активні опори обмотки збудження та кола якоря; $r_d(i_a, \omega)$ – приведений активний опір комутаційного контуру; $r_{d1}, r_{di}, r_{q1}, r_{qk}, r_{a11}, r_{a1j}, r_{a21}, r_{a2j}, r_{k1}, r_{kj}$ – приведені активні опори еквівалентних вихрових контурів; $r_{щ}$ – активний опір щіток; $E_\Sigma = E'_k(i_{\mu a}, i_a, \omega) - E'_r(i_a, \omega) - E'_T$, де $E'_k(i_{\mu a}, i_a, \omega)$, $E'_r(i_a, \omega)$ та E'_T – приведені значення середніх за період комутації комутаційної, реактивної та трансформаторної ЕРС відповідно; $E_{пр}(\Phi_{dq}, \omega)$ – проти-ЕРС, де $\Phi_{dq}(i_{\mu a}, i_a)$ – основний магнітний потік, ω – кутова частота обертання; $u(t)$ – напруга живлення обмотки якоря.

Для отримання результатів із задовільною точністю для діапазону частот від нуля до 1000 Гц число віток, що враховують дію вихрових струмів по поздовжній та поперечній осі в схемі заміщення ТЕД, було прийнято 31.

В якості параметрів моделі були взяті параметри тягового двигуна РТ-51Д. Результати моделювання квазіусталеного режиму були порівняні з результатами експериментальних досліджень (табл. 1), проведених в лабораторії кафедри «Електро рухомий склад» на стенді взаємного навантаження тягових двигунів РТ-51Д під час живлення силової схеми від ІППН (рис. 3).

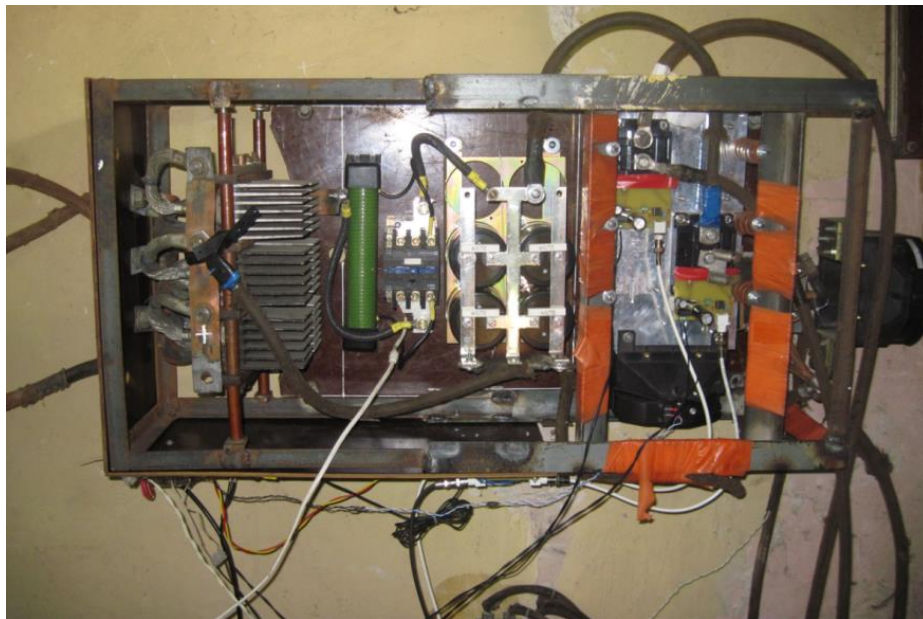


Рисунок 3 – Загальний вигляд імпульсного перетворювача постійної напруги, розробленого для експериментальних досліджень системи взаємного навантаження

Таблиця 1 – Результати моделювання та експериментальні дані роботи СВН у квазіусталеному режимі

	Струм, А	Частота обертання, об/хв	Коефіцієнт пульсацій при 30 Гц	Коефіцієнт пульсацій при 122 Гц	Коефіцієнт пульсацій при 490 Гц
Моделювання	249,2	907,2	6,209	2,058	0,635
Експеримент	240	906,5	6,058	1,952	0,61
Розходження, %	3,83	0,077	2,43	5,43	3,94

Як критерій оцінки ступеню впливу додаткових пульсаційних втрат на нагрівання елементів ТЕД прийнято умову, що при величині додаткових пульсаційних

втрат, менше 1 % від основних втрат в міді, їх дією на нагрівання елементів ТЕД можна знехтувати

$$\delta P_d = \frac{\Delta P_d}{\Delta P_m} \cdot 100 \% \leq 1 \% . \quad (2)$$

За результатами моделювання встановлено, що мінімальна частота імпульсного перетворювача, при якій додаткові пульсаційні втрати в ТЕД суттєво не впливають на його нагрів, становить 500 Гц (табл. 2, рис. 4). При використанні трифазного керованого мостового випрямляча додаткові пульсаційні втрати не впливають на нагрів ТЕД на всьому діапазоні значень вихідної напруги.

Таблиця 2 – Результати моделювання додаткових пульсаційних втрат тягового двигуна РТ-51Д

Частота струму, Гц	Додаткові пульсаційні втрати δP_d , % від ΔP_m			
	$I_a = 100$ А	$I_a = 200$ А	$I_a = 240$ А	$I_a = 300$ А
50	–	15,86	10,46	7,38
150	–	2,17	1,81	1,23
300	2,57	0,67	0,46	0,31
300 (трифазний керований мостовий випрямляч)	–	–	0,2	0,13
500	1,03	0,29	0,21	0,13

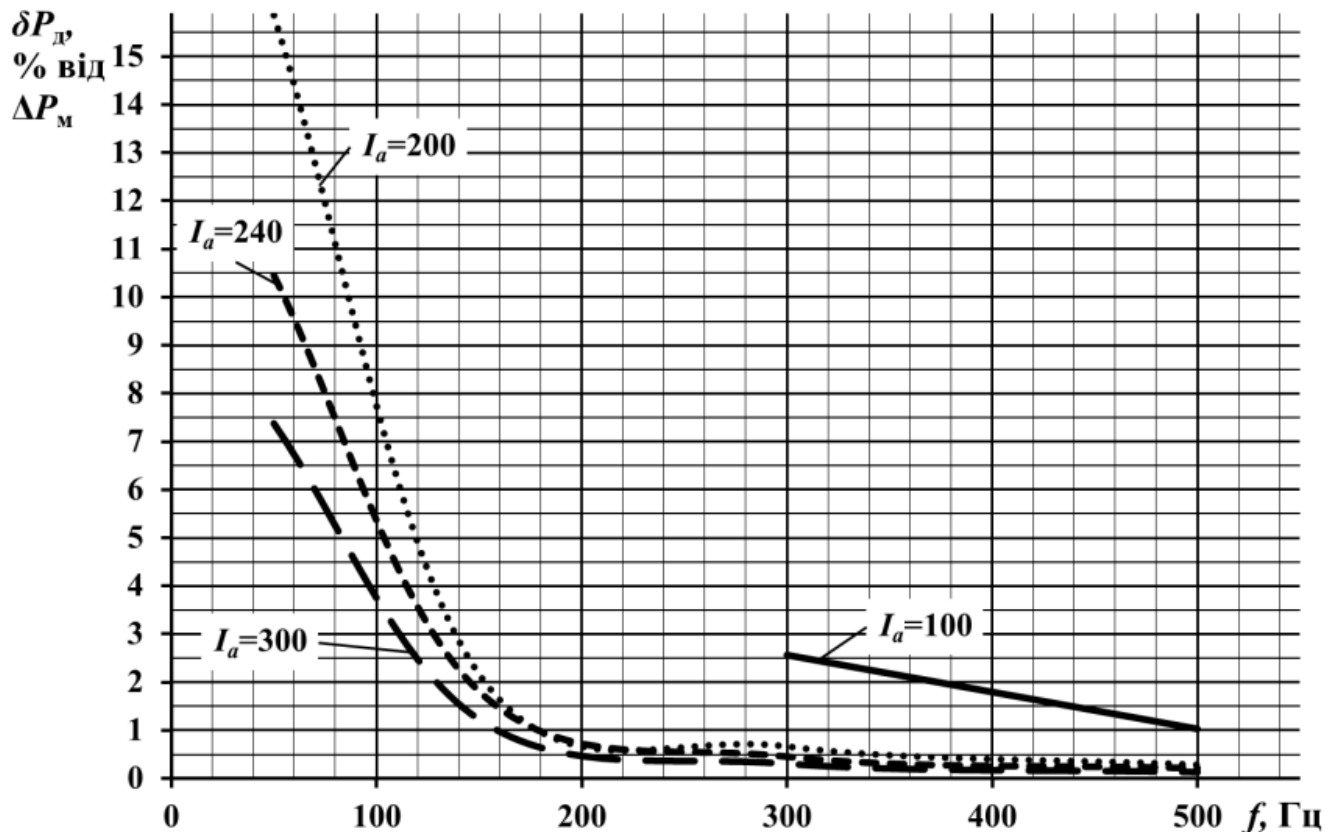


Рисунок 4 – Залежність додаткових пульсаційних втрат від частоти і сили струму якоря при живленні схеми взаємного навантаження від ПППН

Така залежність додаткових пульсаційних втрат від частоти струму обумовлена тим, що вони залежать від частоти у першій степені, а від амплітуди пульсаційної складової індукції – у другій, тобто виконується умова

$$\Delta P_d \sim f \cdot B_m^2. \quad (3)$$

У свою чергу, амплітуда пульсацій магнітної індукції прямо пропорційна амплітуді пульсацій струму, або, при незмінній постійній складовій, коефіцієнту пульсації струму k_{pi} , що й підтверджується експериментальними дослідженнями (рис. 6).

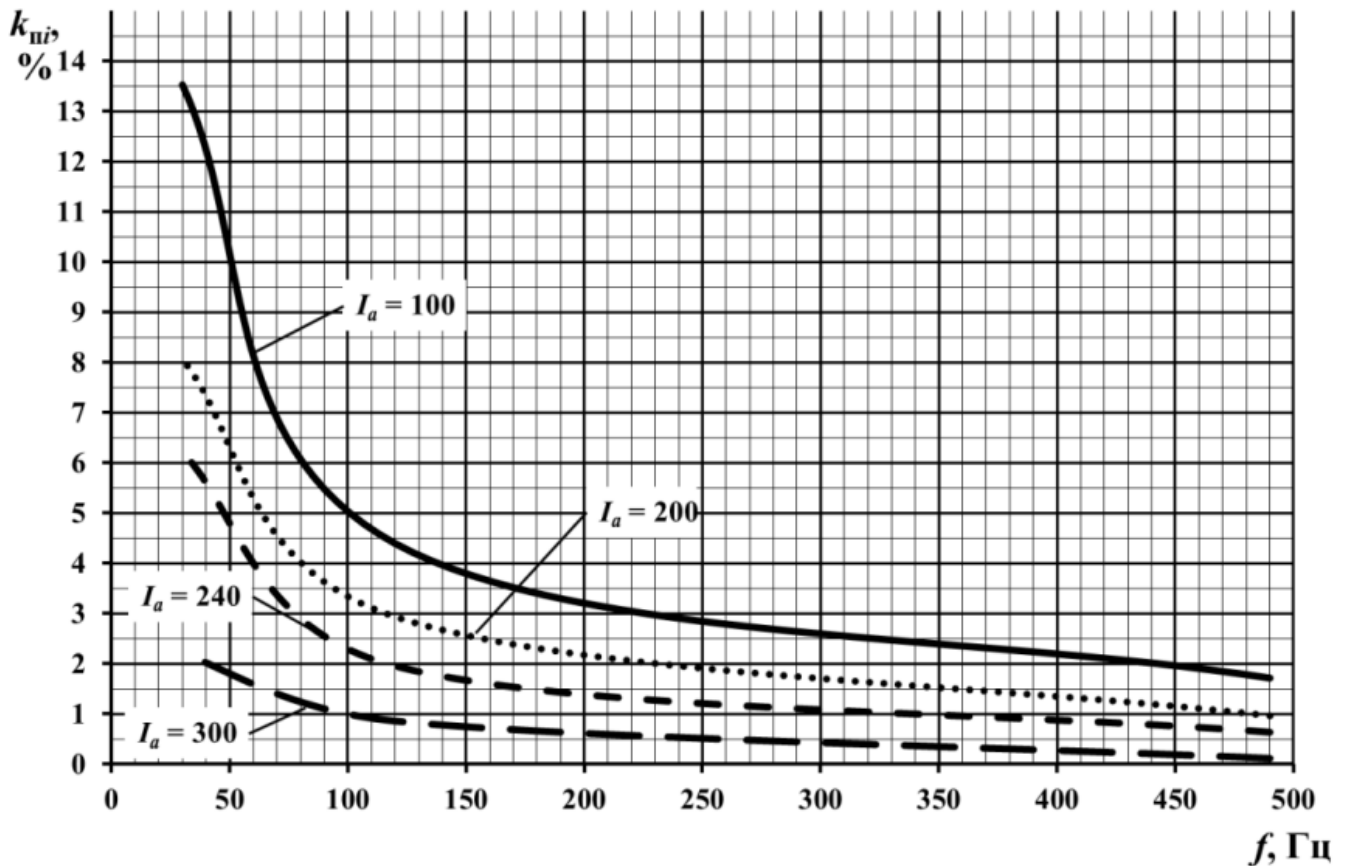


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнту пульсацій струму якоря від частоти пульсацій (при незмінному середньому значенні струму) за результатами експериментальних досліджень

У **третьому розділі** наведено обґрунтування вибору раціональної схеми джерела живлення системи взаємного навантаження тягових електродвигунів.

При застосуванні методу експертних оцінок були сформовані показники, за яким проводився вибір:

- рівень пульсацій випрямленої напруги;
- можливість регулювання випрямленої напруги;
- рівень пульсації випрямленого струму;
- наявність трансформатора;
- наявність зрівнювального дроселя;
- наявність компенсаційного пристрою;
- ступінь використання трансформатора;
- кількість керованих напівпровідникових приладів (НПП);
- зворотна напруга на НПП;
- частота роботи НПП відносно частоти пульсацій вихідної напруги;
- кількість використовуваних проводів мережі;
- максимальне значення вихідної напруги.

Для показників, що представляють собою значення номінальної та максимальної вихідної напруги перетворювача, були визначені їх кількісні значення.

Номинальна напруга визначалася за умови покриття втрат джерелом живлення (ВДМ) при режимі випробувань із годинним струмом, та при двох еквівалентних режимах: із пусковим та подвійним часовим струмом

$$U_{\text{ВДМ}} = 2 \cdot (1 - \eta) \frac{P_d}{I_a \cdot 0,94}, \quad (4)$$

де I_a , P_d , η – струм якоря, потужність та ККД двигуна відповідно.

За результатами розрахунків для відомих типів тягових двигунів електрорухомого складу було встановлено, що середнє значення напруги при випробуваннях із пусковим та подвійним пусковим струмом становить 241 В та 253 В відповідно. Враховуючи, що режими випробування з пусковим та подвійним годинним струмом є більш раціональними з точки зору енергетичної ефективності випробувань, номінальною напругою джерела живлення було прийнято значення 250 В.

Максимальна напруга визначалася з умови забезпечення можливості регулювання частоти обертання випробовуваних ТЕД у всьому діапазоні можливих струмів при електромеханічних перехідних процесах з умови компенсації додаткового моменту, обумовленого моментами інерції якорів випробовуваних ТЕД. Рівняння механічного та електричного балансу для досліджуваної СВН виглядає як

$$\Delta M(\Delta\Phi) = C_M \cdot \Delta\Phi \cdot I_a = 2 \cdot \left(M_{\text{гальм}} + J_a \frac{d\omega}{dt} \right), \quad (5)$$

$$U_{\text{ВДМ}}(\Delta\Phi) = \Delta E + 2 \cdot I_a \cdot r_a + I_a \cdot r_3 \cdot (\beta_M + \beta_G) = \\ = C_M \cdot \Delta\Phi \cdot \omega + 2 \cdot I_a \cdot r_a + I_a \cdot r_3 \cdot (\beta_M + \beta_G), \quad (6)$$

де $M_{\text{гальм}}$ – гальмівний момент, спричинений втратами холостого ходу;

β_M – ступінь ослаблення збудження ТЕД, який працює в режимі двигуна;

β_G – ступінь ослаблення збудження ТЕД, який працює в режимі генератора; $\beta_G < \beta_M$ за рахунок роботи БОЗ;

J_a – момент інерції якоря ТЕД,

З даного рівняння можна визначити обмеження по частоті обертання з умов можливості її регулювання при заданих струмові якоря, ступеню ослаблення збудження, різниці магнітних потоків та максимальній напрузі джерела живлення

$$\omega_{\text{max}} = \frac{U_{\text{ВДМmax}} - (2 \cdot I_a \cdot r_a + I_a \cdot r_3 \cdot (\beta_M + \beta_G))}{C_M \cdot \Delta\Phi}. \quad (7)$$

В результаті розрахунків було визначено, що зона стійкої роботи з точки зору можливості регулювання частоти обертання у всьому діапазоні можливих струмів може бути тільки при напрузі 500 В, або близькій до неї.

Далі, у третьому розділі, було проаналізовано можливі схеми джерел живлення і виділено такі, на базі яких можуть бути побудовані всі інші схеми:

- 1) трифазний некерований випрямляч (схема Міткевича);
- 2) трифазний керований випрямляч (схема Міткевича);
- 3) трифазний некерований мостовий випрямляч (схема Ларіонова);
- 4) трифазний керований мостовий випрямляч (схема Ларіонова);
- 5) компенсаційний випрямляч;
- 6) ступеневий випрямляч;
- 7) випрямляч з регулюванням напруги на високій стороні;
- 8) імпульсний перетворювач постійної напруги без випрямляча.

На базі цих схем була сформована множина можливих схем джерел живлення СВН. До неї увійшли розглянуті вище схеми, а також схеми, що були отримані на основі їх комбінації. Для подальших розрахунків кожна схема з ряду можливих отримала позначення від ω_1 до ω_{22} . Тоді множину можливих схем можна представити у вигляді:

$$\Omega = \{ \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7, \omega_8, \omega_9, \omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}, \omega_{14}, \omega_{15}, \omega_{16}, \omega_{17}, \omega_{18}, \omega_{19}, \omega_{20}, \omega_{21}, \omega_{22} \}. \quad (8)$$

Далі був виконаний розв'язок задачі вибору раціональної схеми з множини можливих. Для цього за методами кореляційно-регресійного аналізу була проранжована за ступенем важливості множина показників $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, за якими проводився вибір (табл. 3).

Таблиця 3 – Проранжована множина показників за ступенем важливості

№ п/п	Показник
1	Можливість регулювання випрямленої напруги
2	Пульсації випрямленого струму при різних рівнях вихідної напруги
3	Максимальна вихідна напруга
4	Наявність трансформатора
5	Наявність зрівнювального дроселя
6	Наявність компенсаційного пристрою
7	Ступінь використання трансформатора
8	Кількість керованих НПП
9	Зворотна напруга на НПП
10	Частота переключення НПП відносно частоти пульсацій вихідної напруги
11	Пульсації випрямленої напруги
12	Кількість використовуваних проводів мережі

Таблиця 4 – Склад кластерів

№ кластера	Опис кластера	Склад кластера
1	Можливість регулювання напруги; додаткові втрати при номінальній напрузі відсутні або ними можна знехтувати; максимальна вихідна напруга 500 В і більше	$\omega_4, \omega_{20}, \omega_{21}, \omega_{22}$
2	Можливість регулювання напруги; додатковими втратами при номінальній напрузі можна знехтувати тільки при частоті 500 Гц і більше; максимальна вихідна напруга 500 В і більше	ω_{16}, ω_{17}
3	Можливість регулювання напруги; додаткові втрати при номінальній напрузі відсутні або ними можна знехтувати; наявність трансформатора; максимальна вихідна напруга 500 В і більше	$\omega_6, \omega_7, \omega_{12}, \omega_{13}$
4	Можливість регулювання напруги; додатковими втратами при номінальній напрузі можна знехтувати, а при застосуванні імпульсного джерела, тільки при частоті 500 Гц і більше; наявність трансформатора, зрівнювального дроселя або компенсаційного пристрою; максимальна вихідна напруга менша за 500 В	$\omega_2, \omega_9, \omega_5, \omega_{14}, \omega_{10}, \omega_{15}, \omega_{18}, \omega_{19}$
5	Неможливість регулювання вихідної напруги	$\omega_1, \omega_3, \omega_8, \omega_{11}$

У результаті аналізу кластера № 1 були вибрані дві схеми незрівняні по Парето. Цими схемами є ω_4 та ω_{22} . Для визначення раціональної схеми за обраними показниками вирішено задачу векторної оптимізації

$$\begin{pmatrix} y_1(\omega_n) \\ y_2(\omega_n) \\ \dots\dots\dots \\ y_m(\omega_n) \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad (9)$$

у результаті якої було з'ясовано, що вибрані схеми за заданими показниками вибору є рівноцінними.

Для остаточного вирішення задачі вибору найбільш раціональної схеми джерела живлення СВН було сформовано додаткові показники вибору:

- ціна перетворювача;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої вхідної напруги K_U згідно з ГОСТ 13109-97.

За результатами розрахунку вартості перетворювачів, розбіжність ціни не перевищує 6 %. Тобто ціна перетворювачів приблизно однакова і зробити висновок за даним показником про доцільність використання тієї або іншої схеми не можна.

Для визначення коефіцієнта K_U було проведено моделювання роботи двох перетворювачів із вихідним струмом 370 А (пусковий струм РТ-51Д) і активним опором фази джерела 0,1 Ом (табл. 5).

З результатів моделювання видно, що коефіцієнт спотворення напруги у трифазного керованого мостового випрямляча в 2,5 рази більше, ніж той, що отриманий для схеми ω_{22} . Причому, як показало подальше моделювання, із ростом струму і наближенням його до гранично можливого значення для ТЕД – 1100...1700 А (ЕД141-У1, ДТК-800А, ДТК-820), різниця K_U збільшується до 5 разів.

Таблиця 5 – Результати моделювання для визначення коефіцієнту спотворення напруги

Діючі значення гармонік напруги, В	Схема ω_4	Схема ω_{22}
$K_U, \%$	3,79	1,49

Таким чином, зважаючи на результати порівняння за додатковими показниками зроблено висновок, що при приблизно однаковій вартості, схема ω_{22} має кращі показники за коефіцієнтом спотворення напруги. Тому схему ω_{22} (рис. 7) можна рекомендувати як найбільш раціональну для живлення схеми взаємного навантаження.

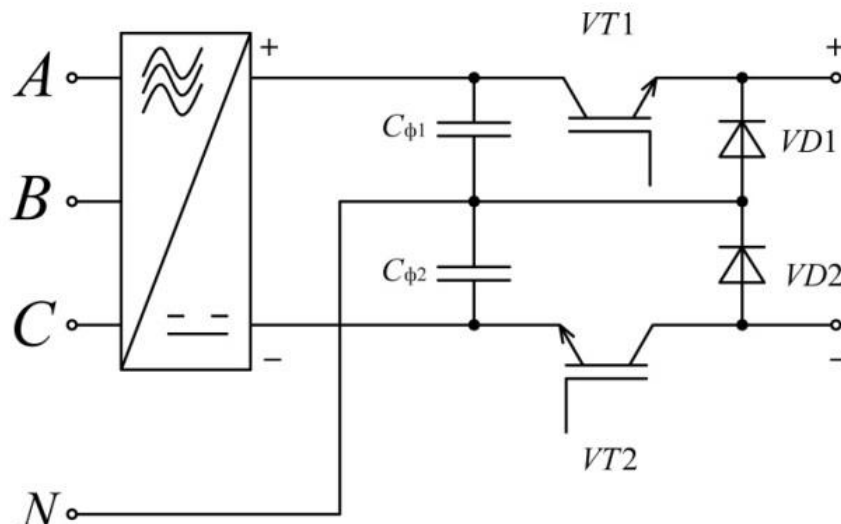


Рисунок 7 – Двофазний ПППН із нульовою точкою

Слід зазначити, що у даній схемі коефіцієнт пульсації вихідного струму наближується до нуля при номінальній напрузі 250 В. В цьому можна переконались порівнявши результати розрахунків пульсацій вихідного струму для звичайного (однофазного) та двофазного ІППН із нульовою точкою. Розрахунки проведено за такими виразами:

$$\Delta I_{1\phi} = \frac{D_{1\phi} (1 - D_{1\phi}) U_d}{L_n f_{1\phi}} \text{ – для звичайного ІППН};$$

$$\Delta I_{2\phi} = \begin{cases} \frac{D_{1\phi} (1 - 2D_{1\phi}) U_d}{L_n f_{1\phi}} & \text{при } 0 \leq \gamma_{1\phi} < 0,5 \\ \frac{(1 - D_{1\phi}) (1 - 2(1 - D_{1\phi})) U_d}{L_n f_{1\phi}} & \text{при } 0,5 \leq \gamma_{1\phi} < 1 \end{cases} \text{ – для двофазного ІППН із нульовою точкою,}$$

де $D_{1\phi}$ – коефіцієнт заповнення імпульсів однофазного ІППН (одного силового елемента двофазного ІППН);

U_d – випрямлена напруга на виході вхідного випрямляча (для шестипульсового мостового випрямляча $U_d \approx 536$ В);

$f_{1\phi}$, $f_{2\phi}$ – вихідна частота відповідно однофазного та двофазного ІППН;

L_n – індуктивність кола навантаження.

В якості вхідних даних взято максимальні, мінімальні та середні значення вихідної напруги перетворювача при різних режимах випробувань: із годинним, пусковим та подвійним годинним струмом (табл. 6).

Ще одним наслідком розрахунків, що приведені у табл. 6, є більша відповідність результатів випробувань вимогам ГОСТ 2582-81 для двофазного ІППН ніж однофазного при одній і тій же вихідній частоті. Так, за даними табл. 6, при однаковій вихідній частоті, пульсації вихідного струму двофазного ІППН будуть на 26 – 92 % менші ніж у однофазного, тобто можна вважати, що випробування виконуються фактично при постійному струмі.

Таблиця 6 – Результати розрахунку пульсацій струму для однофазного та двофазного ІППН

	$U_{\text{вих}}$	$\Delta I_{1\phi}$	$\Delta I_{2\phi}$	$1 - \Delta I_{2\phi} / \Delta I_{1\phi}$, %
$I_{\text{год}}$	$U_{\text{вих min}} = 109$ В	$86,95 / L_n f_{1\phi}$	$64,8 / L_n f_{1\phi}$	26
	$U_{\text{вих max}} = 255$ В	$133,7 / L_n f_{1\phi}$	$15,3 / L_n f_{1\phi}$	88
	$U_{\text{вих ср}} = 185$ В	$120,9 / L_n f_{1\phi}$	$55,5 / L_n f_{1\phi}$	54
$I_{\text{пуск}}$	$U_{\text{вих min}} = 202$ В	$125,8 / L_n f_{1\phi}$	$48,7 / L_n f_{1\phi}$	61
	$U_{\text{вих max}} = 277$ В	$133,5 / L_n f_{1\phi}$	$11,1 / L_n f_{1\phi}$	92
	$U_{\text{вих ср}} = 241$ В	$132,5 / L_n f_{1\phi}$	$24,1 / L_n f_{1\phi}$	82
$2 \times I_{\text{год}}$	$U_{\text{вих min}} = 218$ В	$128,7 / L_n f_{1\phi}$	$39,3 / L_n f_{1\phi}$	70
	$U_{\text{вих max}} = 295$ В	$132,8 / L_n f_{1\phi}$	$29,5 / L_n f_{1\phi}$	78
	$U_{\text{вих ср}} = 253$ В	$134,1 / L_n f_{1\phi}$	$15,2 / L_n f_{1\phi}$	89

Частота роботи ключових елементів двофазного ІППН у 2 рази менша ніж частота роботи ключових елементів однофазного ІППН, що дозволяє вдвічі знизити динамічні втрати (P_d) у ключах, оскільки вони прямо пропорційні частоті. В свою чергу, середнє значення струму ключових елементів двофазного ІППН вдвічі менше середнього значення вихідного струму, що також дозволяє вдвічі знизити статичні втрати ($P_{ст}$) у них.

Також слід враховувати той факт, що при цьому загальний рівень втрат у перетворювачі не знижується, оскільки у двофазного ІППН ключових елементів вдвічі більше, ніж у однофазного. Проте, завдяки особливостям роботи двофазного ІППН, існує можливість суттєвого зниження втрат у ключових елементах в межах області його можливих вихідних напруг. Тобто, у випадку, якщо рівень пульсацій струму однофазного ІППН такий, що вони не впливають на нагрів ТЕД, вихідну частоту двофазного ІППН при тому ж рівні пульсацій, а отже і частоту роботи ключових елементів, можна знизити теоретично до нуля, а практично в 1,3-13 раз (табл. 7). Таким чином, при наближенні вихідної напруги перетворювача до значення $U_d/2$, відношення сумарних втрат у перетворювачі до та після зменшення вихідної частоти

$$\Delta_P = \frac{P_{ст} + P_d}{P_{ст} + \frac{P_d}{n}}, \quad (10)$$

де n – відношення вихідних частот однофазного та двофазного ІППН $f_{1\phi}/f_{2\phi}$, при одних і тих же пульсаціях, асимптотично наближується до значення

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_P = \frac{P_{ст} + P_d}{P_{ст} + \frac{P_d}{n}} = 1 + \frac{P_d}{P_{ст}}. \quad (11)$$

В залежності від співвідношення $\frac{P_d}{P_{ст}}$, втрати у перетворювачі можна знизити в середньому в 2-3 рази у порівнянні із однофазним ІППН і, тим самим, підвищити енергоефективність системи взаємного навантаження.

Таблиця 7 – Результати розрахунку зниження частоти ключових елементів двофазного ІППН по відношенню до однофазного

	$U_{вих}$	$f_{1\phi}/f_{2\phi}$
$I_{год}$	$U_{вих\ min} = 109\text{ В}$	1,3
	$U_{вих\ max} = 255\text{ В}$	8,8
	$U_{вих\ ср} = 185\text{ В}$	2,2
$I_{пуск}$	$U_{вих\ min} = 202\text{ В}$	2,6
	$U_{вих\ max} = 277\text{ В}$	13
	$U_{вих\ ср} = 241\text{ В}$	5,5
$2 \times I_{год}$	$U_{вих\ min} = 218\text{ В}$	3,3
	$U_{вих\ max} = 295\text{ В}$	5,5
	$U_{вих\ ср} = 253\text{ В}$	8,8

В четвертому розділі визначені раціональні режими функціонування системи взаємного навантаження за вибраною силовою схемою, зокрема визначені раціональна частота роботи електронного комутатора та величина опору шунтуючого резистора блока ослаблення збудження, при якій можливе регулювання в повному діапазоні струмів і не виникають недопустимі перенапруження на елементах СВН. Також було розроблено методику розрахунку магнітних характеристик тягових двигунів при довільному ступені ослаблення збудження та універсальні формули для розрахунку індуктивностей обмоток ТЕД.

В основі методики розрахунку магнітних характеристик та універсальних формул для розрахунку індуктивностей лежить вдосконалена універсальна магнітна характеристика (УМХ).

Суть вдосконаленої УМХ полягає в апроксимації УМХ, запропонованої проф. Находкіним М. Д., виразом, який представляє собою рівняння двох змінних (у відносних одиницях), одна з яких: магніторушійна сила (МРС) обмотки збудження або струм якоря, а друга – МРС реакції якоря. Остаточний вираз для залежності магнітного потоку від МРС обмотки збудження у відносних одиницях має вигляд

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{dq}(\tilde{F}_3) = & \frac{p_1}{2 \cdot 0,316} \left[(\beta + 0,316) \operatorname{arctg}(p_2 \tilde{F}_3 (\beta + 0,316)) - (\beta - 0,316) \times \right. \\ & \left. \times \operatorname{arctg}(p_2 \tilde{F}_3 (\beta - 0,316)) - \frac{1}{2 \cdot p_2 \tilde{F}_3} \ln \left(\frac{1 + p_2^2 (\tilde{F}_3 (\beta + 0,316))^2}{1 + p_2^2 (\tilde{F}_3 (\beta - 0,316))^2} \right) \right] + p_3 \tilde{F}_3 \beta, \end{aligned} \quad (12)$$

де $\tilde{\Phi}_{dq}$ – основний магнітний потік у відносних одиницях;

\tilde{F}_3 – МРС обмотки збудження в відносних одиницях;

p_1, p_2, p_3 – коефіцієнти апроксимації: $p_1 = 0,6431392636, p_2 = 5,4546969368, p_3 = 0,1075124679$;

β – ступінь ослаблення збудження для якого виконується розрахунок магнітної характеристики.

Це дало змогу побудувати сімейство магнітних характеристик для некомпенсованих ТЕД для довільного ступеня ослаблення збудження (рис. 8).

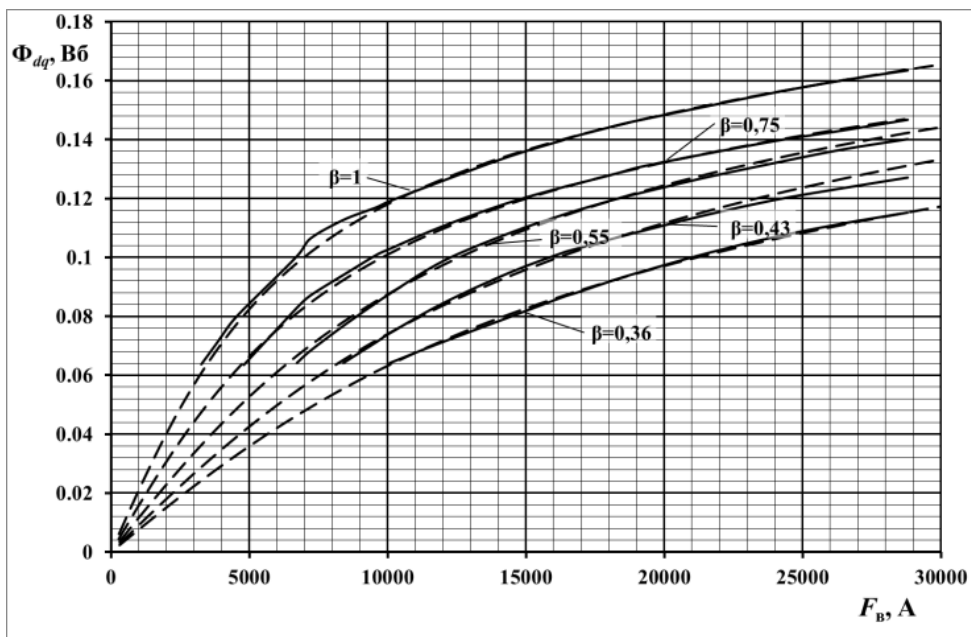


Рисунок 8 – Магнітні характеристики НБ-406, побудовані за виразом (12)

Побудова магнітних характеристик для довільних ступенів збудження за виразом (12) зменшує розходження між побудованими та знятими експериментально характеристиками до 5 %, на відміну від 20–25 % при побудові характеристик за виразом, що не враховує реакцію якоря. Це, в свою чергу, підвищує точність моделювання магнітних характеристик на 15–20 %.

На базі виразу (10), використовуючи вирази індуктивностей в абсолютних одиницях, визначених проф. М. Х. Бельманом, були отримані універсальні формули для розрахунку індуктивностей обмотки збудження та якоря для некомпенсованих ТЕД у відносних одиницях. Індуктивність обмотки збудження:

$$\tilde{L}_3(\tilde{F}_3) = 2pw_3^2 \left(\frac{p_1}{2\tilde{F}_3 \cdot 0,316} (\arctg(p_2\tilde{F}_3(\beta + 0,316)) - \arctg(p_2\tilde{F}_3(\beta - 0,316))) + p_3 \right), \quad (13)$$

де w_3 – число витків обмотки збудження.

Індуктивність обмотки якоря

$$\tilde{L}_{aq}(\tilde{F}_3) = 2p(w_3 \cdot 0,316)^2 \left(\frac{p_1}{p_2(\tilde{F}_3 \cdot 0,316)^2} \left(1 + \frac{p_2^2\tilde{F}_3^2 - 1}{2p_2\tilde{F}_3 \cdot 0,316} (\arctg(p_2\tilde{F}_3(\beta + 0,316)) - \arctg(p_2\tilde{F}_3(\beta - 0,316))) - \frac{1}{2 \cdot 0,316} \ln \left(\frac{1 + p_2^2(\tilde{F}_3(\beta + 0,316))^2}{1 + p_2^2(\tilde{F}_3(\beta - 0,316))^2} \right) \right) + \frac{p_3}{3} \right). \quad (14)$$

Універсальні формули для розрахунку індуктивності обмотки збудження компенсованих ТЕД були отримані на базі виразу для апроксимації УМХ, що був отриманий проф. Г. К. Гетьманом

$$\tilde{\Phi}_d(\tilde{F}_3) = b_1 \arctg(b_2\tilde{F}_3) + b_3\tilde{F}_3. \quad (15)$$

де b_1 , b_2 , b_3 – коефіцієнти апроксимації $b_1 = 0,634174$, $b_2 = 5,451962$, $b_3 = 0,116353$.

Індуктивність обмотки збудження компенсованих ТЕД у відносних одиницях

$$\tilde{L}_3(\tilde{F}_3) = 2pw_3^2 \left(\frac{b_1 \cdot b_2}{(b_2\tilde{F}_3)^2 + 1} + b_3 \right). \quad (16)$$

Розходження між значеннями індуктивностей, розрахованими за виразами (14) та (16) та визначеними експериментально не перевищують 9,5 %.

Далі, у четвертому розділі, було визначено раціональну величину опору шунтуючого резистора БОЗ. Раціональна величина опору шунтуючого резистора являє собою величину, яка знаходиться в деякому діапазоні значень. Верхня границя цього діапазону визначається із умови обмеження величини комутаційних перенапружень електричною міцністю ізоляції обмотки збудження та допустимою напругою напівпровідникового ключа, що її шунтує. Отримано вираз для залежності максимальної величини перенапружень від значення опору постійного шунтуючого резистора:

$$U_{\max}(r_{\text{шп}}) = (r_{\text{шп}} + r_3) \frac{r_{\text{шп}}^2 \cdot (2 \cdot r_{\text{шз}} + r_3) + 2 \cdot r_{\text{шз}} \cdot r_{\text{шп}} \cdot r_3}{r_{\text{шп}}^2 \cdot (r_{\text{шз}} + r_3) + 2 \cdot r_{\text{шз}} \cdot r_{\text{шп}} \cdot r_3 + r_3^2 \cdot (r_{\text{шп}} + r_3)} \cdot J_a, \quad (17)$$

де r_3 – опір обмотки збудження;

$r_{шз}$ – опір шунтуючого резистора, що включений послідовно з напівпровідниковим ключем;

$r_{шп}$ – опір постійного шунтуючого резистора;

J_a – струм обмотки якоря.

Нижня границя визначається з умови можливості регулювання частоти обертання. Для цього визначається механічний момент опору на валу випробовуваних ТЕД у відносних одиницях за виразом

$$\Delta\tilde{m}_{\text{мех}} = a \cdot \tilde{\omega} + b, \quad (18)$$

де $\tilde{\omega}$ – відносна кутова частота обертання якоря машини;

a та b – коефіцієнти апроксимації (для машин із самовентиляцією:

$a = 0,65, b = 0,35$; для машин із незалежною вентиляцією:

$a = 0,35, b = 0,65$).

За величиною механічного моменту в абсолютних одиницях визначається необхідна величина різниці магнітних потоків, а по ній величина шунтуючого резистора

$$r_{шп} = \frac{\Delta\beta}{1 - \Delta\beta} \cdot r_3 \cdot \beta, \quad (19)$$

де $\Delta\beta$ – необхідна різниця між ступенями ослаблення збудження випробовуваних тягових електродвигунів.

Задача вибору раціональної частоти роботи БОЗ була вирішена за допомогою імітаційного моделювання роботи системи взаємного навантаження при різних значеннях частоти електронного комутатора для двох варіантів джерел живлення: імпульсного перетворювача та трифазного керованого мостового випрямляча.

Було визначено ступінь впливу роботи БОЗ на гармонійний склад струму. Для цього виконано порівняння коефіцієнту гармонік струму якорів при включеному замість БОЗ постійному резисторі ослаблення поля, з опором, який еквівалентний роботі БОЗ, із коефіцієнтом заповнення імпульсів 0,5 (THD_{f_0}), з даними, що отримані при включеному БОЗ з різними частотами ($THD_{f_{\text{БОЗ}}}$)

$$K = \frac{|THD_{f_0} - THD_{f_{\text{БОЗ}}}|}{THD_{f_0}} \cdot 100 \% . \quad (20)$$

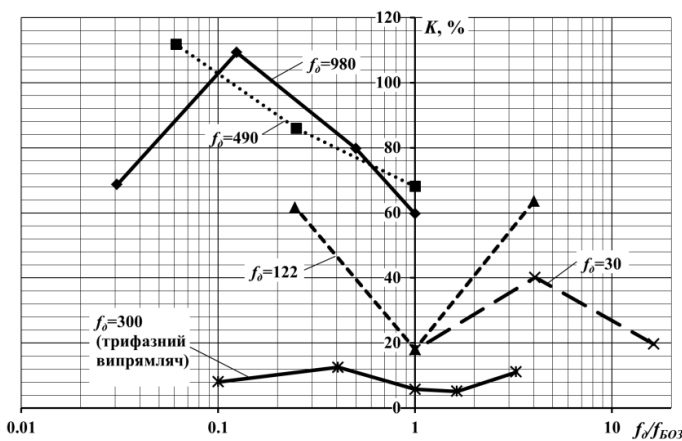


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнту гармонік струму якорів ТЕД від відношення частот роботи джерела живлення СВН та БОЗ

У результаті моделювання було визначено, що оптимальною частотою (з точки зору мінімізації спотворення кривої струму) є частота роботи БОЗ, що рівна частоті роботи джерела живлення СВН (рис 9).

Також було визначено вплив роботи БОЗ на роботу каналу регулювання частоти обертання випробовуваних машин. Було визначено, що при частотах, які рівні та більше частоти джерела живлення системи взаємного навантаження, робота

БОЗ не впливає на роботу каналу регулювання швидкості. Але, при частотах роботи БОЗ нижче, ніж частота роботи джерела живлення СВН, виникають субгармонійні коливання струму.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є закінченою науковою працею, в якій на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-технічна задача покращення характеристик системи взаємного навантаження тягових двигунів постійного та пульсуючого струму. Отримані результати в сукупності мають суттєве значення для галузі електричного транспорту, зокрема - для системи післяремонтних випробувань тягових електродвигунів. У результаті досліджень одержано такі основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації.

1. Сучасний стан рішення проблеми удосконалення систем взаємного навантаження має суттєві результати в області вдосконалення систем взаємного навантаження та вибору раціональних методів випробувань для класичної схеми із лінійним генератором та вольтодобавочною машиною. У свою чергу, не вирішені питання щодо визначення раціональних параметрів СВН за новими схемами з одним джерелом живлення.

2. Під час аналізу відомих методів моделювання машин постійного струму було визначено, що найбільш доцільним для вирішення задачі моделювання електромагнітних процесів та додаткових пульсаційних втрат у тягових електродвигунах, що випробуються методом взаємного навантаження, є використання моделі електромашини постійного струму, що базується на системі рівнянь Фетісова–Сидельникова. Дана модель дозволяє моделювати додаткові пульсаційні втрати із відповідною для даних розрахунків відносною похибкою до 6 %.

3. За результатами моделювання на імітаційній моделі додаткових пульсаційних втрат в випробовуваних шляхом взаємного навантаження ТЕД з живленням від імпульсного перетворювача було визначено, що мінімальна частота струму, яка забезпечує зменшення додаткових пульсаційних втрат до рівня, при якому їхнім впливом на нагрівання ТЕД можна знехтувати, має значення 500 Гц. При живленні від трифазного керованого випрямляча додаткові пульсаційні втрати мінімальні у всьому реальному діапазоні значень середньої вихідної напруги.

4. В результаті кластерного аналізу множини можливих варіантів схем джерела живлення СВН в якості раціональної вибрано схему двофазного імпульсного перетворювача напруги із нульовою точкою. Залежно від режиму роботи втрати потужності в даному перетворювачі можуть бути знижені у 2–3 рази в порівнянні із однофазним імпульсним перетворювачем. Пульсації вихідного струму двофазного імпульсного перетворювача на 26 – 92 % менші ніж однофазного при одній і тій же частоті струму.

5. Використання в розрахунках та моделюванні роботи тягових електродвигунів розробленої в дисертації методики побудови магнітних характеристик некомпенсованих ТЕД дозволяє збільшити точність розрахунків та результатів моделювання для режимів ослабленого поля таких ТЕД на 15–20 %.

6. Методика та удосконалені універсальні вирази для індуктивностей обмоток ТЕД, що запропоновані в дисертації, дозволяють визначати ці індуктивності лише за заданим значенням коефіцієнту насичення в номінальному режимі та числом витків обмотки збудження, а за рахунок врахування насичення магнітопроводу та дії реакції якоря забезпечують мінімальне розходження між дійсними та розрахунковими значеннями індуктивностей, яке не перевищує 9,5 %.

7. В результаті моделювання режимів регулювання ослаблення поля випробувального генератора розроблено метод визначення раціональної величини опору постійного шунтуючого резистора блока ослаблення збудження та встановлено, що нижню границю допустимих значень цього опору слід розрахувати за умови забезпечення можливості регулювання частоти обертання в діапазоні від нуля до максимального значення. Верхня границя опору постійного шунтуючого резистора розраховується з умови обмеження величини комутаційних перенапружень в випробуваних тягових двигунах.

8. В результаті моделювання електромеханічних процесів в системі взаємного навантаження визначено, що для зменшення впливу імпульсного регулювання ослаблення збудження випробувального генератора на гармонійний склад струму випробовуваних тягових електродвигунів та роботу системи керування, частота імпульсного регулювання ослаблення збудження повинна дорівнювати частоті основної гармоніки струму навантаження.

Основні положення і результати дисертації опубліковані у виданнях, які індексовані в Index Copernicus і є фаховими:

1. А. Drubetsky «Determination of inductive parameters of the uncompensated DC machines taking into account the reaction of the armature.» *Problemy kolejnictwa (Railway reports)*, vol. 60, issue 173, pp. 9-17, Dec. 2016.

у фахових виданнях:

2. А.Е. Друбецкий. «Автоматизированный измерительный комплекс для проведения приемо-сдаточных испытаний тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока.» *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, № 6 (66), сс. 88-95, 2016.

3. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий. «Регулирование небалансного электромагнитного момента в системе взаимного нагружения тяговых электрических двигателей постоянного тока.» *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, № 12, сс. 19-23, 2016.

4. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий, А.С. Мясников. «Покрытие потерь холостого хода в системе взаимного нагружения тяговых двигателей с одним источником электрической мощности.» *Електрифікація транспорту*, № 10, сс. 44-48, 2015.

5. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий. «Определение расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения взаимно нагруженных тяговых электромашин.» *Електрифікація транспорту*, № 11, сс. 71-74, 2016.

6. А.Е. Друбецкий. «Аппроксимация универсальной магнитной характеристики для моделирования тяговых электрических машин.» *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, № 1 (67), сс. 106-116, 2017.

7. А.Е. Друбецкий. «Расчет магнитных характеристик тягового электродвигателя с помощью усовершенствованной универсальной магнитной характеристики.» *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, № 3 (69), сс. 66-76, 2017.

Додаткові праці:

що є патентами та авторськими свідоцтвами:

8. А.М. Афанасов, А.Ю. Друбецкий «Перетворювач трифазної змінної напруги.» Патент України № 117876 МПК H02M 9/06 (2006.01), липень, 10, 2017.

9. А.Ю. Друбецкий «Комп'ютерна програма “Керування окремими функціями автоматизованого випробувального стенду тягових двигунів постійного струму (для

магістральних електровозів)» Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №74304, жовтень, 20, 2017 р.

10. А.Ю. Друбецький «Літературний твір наукового характеру “Методика розрахунку магнітних характеристик некомпесованих тягових електродвигунів”» Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №74321, жовтень, 20, 2017 р.

11. А.Ю. Друбецький «Літературний твір наукового характеру “Методика розрахунку індуктивних параметрів некомпесованих тягових електродвигунів”» Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №74320, жовтень, 20, 2017 р.

тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:

12. А.Е. Друбецкий «Аппроксимация универсальной магнитной характеристики» в матеріалах *IX Міжнародної науково-практичної конференції ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ «ТРАНСЕЛЕКТРО 2016»*, Дніпро, 2016, с. 42.

13. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий «Автоматизированный стенд для выполнения приемо-сдаточных испытаний тяговых электродвигателей» в матеріалах *V Международной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ И В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»*, Воловец, 2014, сс 6–7.

14. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий «Выбор рациональных схем взаимного нагружения электрических машин тягового и моторвагонного подвижного состава», в матеріалах *V Международной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ И В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»*, Воловец, 2014, сс. 7–8.

15. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий., А.С. Мясников «Импульсное регулирование ослабления поля тяговых двигателей электроподвижного состава» в матеріалах *76 Міжнародної науково-практичної конференції «ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ»*, Дніпро, 2016, сс. 87-88.

16. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий, С.В. Арпуль, А.В. Войтенко «Определение магнитных потерь в тяговых электрических машинах постоянного и пульсирующего тока», в матеріалах *77 Міжнародної науково-практичної конференції «ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ»*, Дніпро, 2017, сс. 138–139.

17. А.М. Афанасов, А.Е. Друбецкий, Н.С. Гайваненко, М.В. Войтенко «Повышение энергетической эффективности приемо-сдаточных испытаний тяговых электромашин», в матеріалах *77 Міжнародної науково-практичної конференції «ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ»*, Дніпро, 2017, сс. 139–140.

АНОТАЦІЯ

Друбецький, А.Ю. Удосконалення системи взаємного навантаження тягових двигунів постійного та пульсуючого струму. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми вдосконалення системи взаємного навантаження за рахунок науково обґрунтованого вибору її структури та режимів роботи.

Визначено ступінь впливу на енергоефективність різних схем джерел живлення системи взаємного навантаження. Також визначено їх раціональні режими роботи.

Сформовано множину показників для вирішення задачі вибору раціональної схеми джерела живлення системи взаємного навантаження. Визначено номінальний та максимальний рівень напруги джерела живлення.

Виконано математично обґрунтований синтез та вибір раціональної схеми джерела живлення системи взаємного навантаження.

Розроблено методику розрахунку магнітних характеристик некомпенсованих ТЕД для довільного ступеня ослаблення збудження за допомогою вдосконаленої універсальної магнітної характеристики.

Розроблено методику розрахунку індуктивностей обмоток ТЕД, що враховує насичення та дію реакції якоря, лише за довідковими даними.

Визначено діапазон раціональних значень величини опору шунтуючого резистора блока ослаблення збудження системи взаємного навантаження.

Визначено раціональні режими роботи блока ослаблення збудження системи взаємного навантаження.

Ключові слова: удосконалення, тяговий електродвигун, випробування, взаємне навантаження, моделювання, силовий перетворювач, раціональні режими.

ABSTRACT

Drubetskyi A. Yu. Improvement of the system of mutual loading of traction motors of DC and pulsating current. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy), specialty 05.22.09 – electric transport. – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2018.

The thesis is devoted to the solution of the actual task of improving the system of mutual loading of traction motors of constant and pulsating current due to the choice of its rational structure and operating modes. The choice of the replacement scheme of the DC machine is fulfilled, which most fully meets the requirements for it. Modeling of electro-mechanical and power processes in the traction motor is performed while working in the system of mutual loading. As a result of the simulation, rational modes of operation of the mutual load system for various power supply schemes have been selected. The indicators for solving the problem of choosing a rational power supply scheme for the mutual load system are determined. The nominal and maximum voltages of the power supply are determined. Using the methods of correlation-regression analysis, the ranking of the selection indicators is performed. The circuits of power supplies are analyzed and among them are chosen such, from which other circuits can consist. With the help of a number of basic circuits, many possible power supply schemes for the mutual load system have been obtained. To solve the problem of choosing a rational source scheme, using cluster analysis methods, the set of possible schemes is divided into clusters according to selected indicators, from the best to the worst for a given task.

A cluster analysis is performed, which consists of the best schemes. As a result, two schemes incomparable in Pareto were chosen. For the chosen schemes, the vector optimization problem was solved. As a result, it was determined that for the available selection indicators, these schemes are the same, therefore additional indicators were generated. Analyzing these circuits for additional indicators, the best one was chosen. This is a scheme of a two-phase DC-DC pulsed voltage converter with neutral point.

To simplify the calculation of the parameters of the circuit for replacing the DC machine, as well as to improve the accuracy of modeling, methods for calculating the mag-

netic characteristics of uncompensated DC machines have been developed and universal formulas for calculating the inductances of their windings have been obtained. The methods for calculating the magnetic characteristics are based on an improved universal magnetic characteristic.

They make it possible to calculate the magnetic characteristics of uncompensated machines for any degree of attenuation of the excitation taking into account the effect of the anchor reaction using only the saturation coefficient of the machine. The formulas for calculating the inductances of the motor windings take into account the saturation of the magnetic circuit, as well as the effect of the armature reaction. To calculate the inductances from these formulas, it is only necessary to know the reference data of the traction motors (saturation factor and number of turns of the excitation winding).

The limits of the permissible range of the magnitude of the shunting resistance for the field attenuation block are determined. These limits are determined from the condition of the possibility of regulating the speed of rotation over the entire range of permissible currents, and also from the condition for ensuring the limitation of the switching overvoltage.

It is determined that the rational mode of the excitation-weakening unit is a mode with a frequency that coincides with the frequency of the power source of the mutual load system

Keywords: improvement, traction electric motor, tests, loading-back, modeling, power converter, rational regimes.

АННОТАЦИЯ

Друбецкий А.Ю. Усовершенствование системы взаимной нагрузки тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктор философии), специальность 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр, 2018 год.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы усовершенствования системы взаимного нагружения за счет научно обоснованного выбора ее структуры и режимов работы.

Определена степень влияния на энергоэффективность различных схем питания системы взаимного нагружения. Также определяются их рациональные способы работы.

Выполнены математически обоснованный синтез и выбор рациональной схемы источника питания системы взаимного нагружения.

Разработана методика расчета магнитных характеристик некомпенсированных тяговых электродвигателей для произвольной степени релаксации возбуждения с помощью усовершенствованной универсальной магнитной характеристики.

Разработана методика расчета индуктивностей обмоток тяговых электродвигателей, учитывающая насыщение и действие реакции якоря используя только коэффициент насыщения машины

Определен диапазон рациональных значений сопротивления шунтирующего резистора для ослабления возбуждения системы взаимного нагружения.

Определены рациональные режимы работы блока ослабления возбуждения системы взаимного нагружения.

Ключевые слова: усовершенствование, тяговой электродвигатель, испытания, взаимная нагрузка, моделирование, силовой преобразователь, рациональные режимы.