

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Карпенко Надія Петрівна

УДК 629.4:629.423:621.3:025

**Вдосконалення колекторних тягових двигунів
для рухомого складу при пульсуючій та
імпульсній напрузі живлення**

05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2002

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. В умовах зростаючого дефіциту енергоресурсів та збільшення їх вартості нагальною потребою є зниження енерговитрат на залізничному транспорті, що є одним з основних споживачів електроенергії. Розвиток напівпровідникової техніки дозволяє вирішити проблему електрифікації залізниць на змінному струмі з живленням тягових двигунів пульсуючим струмом. В наш час з'явилась можливість застосування імпульсного регулювання напруги тягових двигунів на рухомому складі постійного струму замість енерговитратного резисторного, що використовується зараз. Вирішення проблеми енергозбереження в значній мірі пов'язане з забезпеченням надійної роботи тягових електричних двигунів (ТЕД) при пульсуючому або імпульсному їх живленні. Вказаний напрямок подальшого розвитку тягового рухомого складу відповідає Концепції та Програмі реструктуризації залізничного транспорту України та Комплексній державній програмі енергозбереження, що схвалені Кабінетом Міністрів України.

Актуальність роботи. Прийняті раніше при створенні двигунів пульсуючого струму заходи є недостатніми, лише 60% тягових колекторних двигунів рухомого складу змінного струму витримують міжремонтні терміни експлуатації. При імпульсному живленні умови роботи ТЕД ще більш ускладнюються. При однофазному випрямленні змінного струму або при імпульсному регулюванні напруги на тягових двигунах струм у колі якоря має сталу та змінну складові. Остання ускладнює роботу ТЕД, особливо потужних, які використовуються на електровозах ВЛ- 11, ВЛ- 80, а також нових вітчизняних електровозах ДЕ1, ДЕ2, що обумовлено появою вихрових струмів у магнітному колі додаткових полюсів (ДП). При цьому комутація виходить за межі допустимих значень, які встановлені нормативними документами, що має прояв в підвищенні іскріння на колекторі, зносі щіток і колектора, зниженні потенціальної стійкості двигуна. Так, досвід експлуатації рухомого складу метрополітену з тиристорно-імпульсною системою регулювання напруги на двигунах виявив, що поряд з економією електроенергії (до 30%) значно (майже у 4 рази) збільшуються виробка колектора та знос щіток. Для зменшення пульсацій струму застосовують згладжуючі реактори. Однак габарити, маса та вартість реактора швидко зростають з ростом коефіцієнта згладжування. Зважаючи на те, що енергоємність, а отже, розміри і вартість реактора залежать від періоду пульсацій, особливо при імпульсному живленні тягових двигунів, досягти зниження пульсацій нижче 25% на практиці не вдається.

Наведене підтверджує актуальність теми дисертаційної роботи, присвяченій науковому обґрунтуванню та перевірці запропонованих

рішень для підвищення експлуатаційної надійності нових та існуючих ТЕД для рухомого складу при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних напрямків розвитку галузі згідно з Концепцією та Програмою реструктуризації на залізничному транспорті, затвердженою Постановою Кабінету Міністрів України № 769 від 02.06.1998р., Комплексною державною програмою енергозбереження України, затвердженою Постановами Кабінету Міністрів №148 від 05.02.1997р. та №1040 від 27.06.2000р., Державною програмою електрифікації залізниць на 1994-2004 роки, затвердженою Постановою Кабінету Міністрів України №115 від 22.09.1994р., Постановою Кабінету Міністрів України №480 від 26.06.93р. “Про розробку і виробництво у 1993-2000роках магістральних вантажних і пасажирських електровозів”, планом НДР Харківської державної академії залізничного транспорту (ХарДАЗТ) - договір №25/5.99 від 01.02.99 "Модернізація тягових електродвигунів постійного струму" між ХарДАЗТ та ДНВО “Харківський електромеханічний завод” (“ХЕМЗ”), (держ.реєстрація №ДРО101U002456, 2000, 107с.).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення колекторних тягових двигунів шляхом покращення їх комутаційних властивостей на основі використання активних методів компенсації реакції вихрових струмів для підвищення ефективності і надійності функціонування рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- обґрунтувати необхідність та удосконалити методику розрахунку магнітної системи в цілому, та додаткових полюсів зокрема, тягових колекторних двигунів для рухомого складу при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення;
- дослідити особливості зміни магнітного поля в масивних ланках магнітної системи ТЕД з урахуванням впливу вихрових струмів на величину магнітного поля ;
- встановити функціональну закономірність зміни магнітних полів у ТЕД при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення з уточненням чисельних розрахунків магніторушійних сил (МРС) вихрових струмів у магнітних полях реальних конструкцій ТЕД;
- розробити систему форсованої зміни збудження ДП та знайти реальне конструктивне рішення з розміщення її елементів у магнітній системі ТЕД та силовій схемі рухомого складу.

Об'єкт дослідження: процес удосконалення колекторних тягових двигунів для рухомого складу при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення.

Предмет дослідження: магнітне коло тягових двигунів.

Методи дослідження: для розв'язання завдань дисертації використовувались математичне і фізичне моделювання, положення теорії електромагнітного поля, методи теорії електричних кіл, конформних відображень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше визначені нові особливості зміни магнітного поля в станині ТЕД пульсуючого струму, які враховують неоднорідність граничних умов, інтегральну залежність від параметрів магнітного кола ДП, та особливості впливу сполучених магнітних полів головних та додаткових полюсів на комутуючий магнітний потік;
- розроблено математичну модель магнітного кола ДП, що враховує особливості зміни магнітних полів, у тому числі і від вихрових струмів, яка використовується при удосконаленні методики розрахунку магнітного кола ДП при пульсуючому та імпульсному живленні;
- вперше встановлена узагальнена залежність між рівнем впливу вихрових струмів у магнітному колі ДП на комутуючі магнітні потоки та комутацією ТЕД;
- запропоновано новий схемно-конструкційний метод компенсації реакції вихрових струмів, практична реалізація якого захищена патентом.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується використанням фундаментальних положень та законів з математики, фізики, теорій електромагнітного поля, електричних кіл, методів математичного і фізичного моделювання, що підтверджено збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Отримані дані не суперечать опублікованим результатам науково-дослідних робіт у цьому напрямку.

Наукове значення роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні впливу вихрових струмів в масивних ланках магнітного кола ДП на комутуючий магнітний потік, що є основою для розробки пристроїв по його усуненню. Теоретичне значення роботи полягає в розробці математичної моделі магнітного кола ДП, розрахунок реального магнітного поля при цьому в двигунах пульсуючого струму зводиться до того, що складне електромагнітне поле розкладається умовними межами на локальні ланки, кількість яких залежить від конструктивних особливостей машини.

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність результатів роботи полягає у використанні удосконаленої методики розрахунку магнітного кола ДП колекторних ТЕД при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення. Використання цієї методики та відповідної математичної моделі дозволяє прогнозувати характеристики і комутаційну надійність роботи таких ТЕД в експлуатації ще на стадії створення або їх модернізації.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи, а також отриманий патент передані для впровадження до ДНВО “ХЕМЗ” і використовуються при створенні та модернізації тягових електродвигунів постійного струму.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту при викладанні відповідних дисциплін та дипломному проектуванні студентів спеціальностей “Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту”, “Електричний транспорт”.

Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи на виробництві та в навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача. Автору дисертації належать основні ідеї запропонованих нових технічних рішень, що отримані разом зі співавторами, а саме: в [3] – методика розрахунку магнітної системи ДП при пульсуючому та імпульсному живленні; в [4] – досліджено вплив вихрових струмів на величину магнітного поля в масивних ланках магнітної системи ТЕД; в [5] – запропоновано конструктивне рішення з розміщення пристрою форсованої зміни збудження в реальних ТЕД; в [6,7] – запропоновано використання вітчизняного тягового двигуна постійного струму на електровозі змінного струму та зроблено відповідні розрахунки. Роботи [1,2] написані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на:

- щорічних науково-технічних конференціях Харківської державної академії залізничного транспорту в 1996-2001 роках;
- семінарах Наукової Ради НАН України "Напівпровідникові і мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту" (м. Харків, 1999 - 2001 р.),
- міжнародній конференції “Проблеми рейкового транспорту” (Ялта, Крим, Україна, 2001).
- Повністю робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри “Системи електричної тяги” ХарДАЗТу у грудні 2001 року.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи висвітлено у семи основних наукових публікаціях в наукових фахових виданнях.

Структура роботи. Дисертаційна робота має вступ, 4 розділи, висновки, список використаної літератури, який включає 96 найменувань та додатки. Сторінок основного тексту 123, таблиць - 3, рисунків – 45, додатки на 25 с.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми згідно з науковими програмами, планами. Визначено об'єкт та предмет досліджень, визначені методи досліджень, сформульована мета роботи, показана її наукова новизна та виявлено практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі показано, що в існуючому парку локомотивів залізниць України застосовують тільки колекторні двигуни постійного і пульсуючого струму. Незважаючи на пошукові роботи щодо створення альтернативних локомотивів з асинхронним приводом, у найближчому майбутньому колекторні двигуни залишаться основними. Тому проблема модернізації існуючих ТЕД при переводі їх на імпульсне живлення є актуальною.

Серед робіт, присвячених особливостям роботи ТЕД при пульсуючому та імпульсному живленні, найбільш важливі результати отримані в працях вчених В.Е.Скобелева, М.Д.Находкіна, Д.Д.Захарченка, І.П.Копилова, О.С.Курбасова, С.П.Калініченка, В.О.Яковенка, Р.В.Василенка, В.О.Вінокурова, В.С.Хвостова, І.П.Ісаєва. В них вказується, що основною причиною погіршення надійності машин є підгар колектора і знос щіток. Забезпечити безіскрові режими роботи при пульсуючому живленні не вдається внаслідок демпфіювання комутуючого магнітного потоку вихровими струмами і появи, у зв'язку з цим, некомпенсованої електрорушійної сили (ЕРС). Аналізується вплив на величину некомпенсованої ЕРС конструктивного виконання магнітної системи ТЕД. Показано, що навіть при цілком розшарованій магнітній системі забезпечити надійну роботу ТЕД не завжди вдається, крім того відбувається зниження його потужності та міцності. З аналізу робіт видно, що забезпечити задовільний режим роботи ТЕД на рухомому складі, що експлуатується, вдалося, завдяки розшаруванню осердя ДП, наявності компенсаційної обмотки, шунтуванню обмотки збудження постійним резистором. Перевід електрорухомого складу постійного струму на імпульсне регулювання напруги на ТЕД може призвести до серйозних порушень комутації в силу конструктивних особливостей існуючих ТЕД. З аналізу робіт зазначених вище авторів видно, що використання ТЕД постійного струму без їхньої модернізації і застосування нових схемних рішень неможливо. Це і визначило основний напрямок досліджень у

дисертаційній роботі, присвяченій розробці активного методу компенсації реакції вихрових струмів у ТЕД, що викликало необхідність проведення досліджень фізичних процесів, які відбуваються в ТЕД пульсуючого струму.

У другому розділі розглянута демпфуюча дія вихрових струмів на магнітні потоки ДП при пульсуючому живленні і визначається їх МРС. При розрахунку вихрових магнітних полів у магнітних колах ТЕД використовується закон повного струму в інтегральній формі, що враховує зв'язок ланок вихрового поля з іншими ланками магнітного кола.

$$\oint \underline{H} d\underline{l} = \int_S \underline{j} dS. \quad (1)$$

де \underline{H} – вектор напруженості магнітного поля; $d\underline{l}$ – елемент шляху та його направлення при обході контуру МРС; \underline{j} – вектор щільності струму; dS – елемент поверхні, через яку проходить струм.

При розрахунку магнітного кола магнітна проникність μ' використана у вигляді

$$\mu' \approx Yl/S, \quad (2)$$

де l - середня довжина магнітної силової лінії в ділянці вихрового поля; S - площа поперечного перерізу цієї ділянки; Y - повна магнітна провідність магнітного кола ДП потоку вихрових струмів ТЕД.

Остання враховує структуру магнітного кола та вплив повітряних зазорів на процеси зміни магнітних потоків.

Осердя ДП у ТЕД електрорухомого складу постійного струму виконують масивними, а в ТЕД пульсуючого струму їх змушені виконувати розшарованими. Таким чином, конструкція магнітного кола ДП двигунів пульсуючого струму має, як правило, одну ділянку вихрового поля - станину. Якщо виконати і осердя ДП масивними, то забезпечити нормальні умови комутації не вдасться, тому що має місце "перекидання" комутуючого потоку, компенсувати яке існуючими рішеннями не вдається.

Пульсуюче магнітне поле в станині описується рівнянням, що зв'язує просторову і тимчасову зміну магнітної індукції, рішення якого знаходиться в операторному вигляді методом Дирихле для прямокутника. При нульових початкових умовах перетворене за Лапласом рівняння набуває вигляду

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} = p \cdot \frac{\mu'}{\rho} \cdot B, \quad (3)$$

де B - магнітна індукція в області комплексної змінної; p – оператор Лапласа, ρ - питомий електричний опір матеріалу.

Згідно з методом Дирихле, знаходиться сума двох складових загального рішення, яка враховує зміну магнітного поля від внутрішньої до зовнішньої оболонок станини, а також зміну уздовж осьової довжини станини. Перше рішення може бути визначене при відомих значеннях індукції на границях внутрішньої і зовнішньої оболонок станини. Традиційно вони приймаються однаковими і змінюються пропорційно МРС чи струму збудження. Однак дослідження, які проводилися раніше, та дослідження фізичної моделі магнітного кола ДП показали, що в станині поблизу внутрішньої і зовнішньої поверхні має місце різко виражена неоднорідність зміни магнітного поля. При стрибкоподібному прикладенні МРС збудження в перший момент часу біля зовнішньої границі станини магнітного поля практично немає, а близько внутрішньої границі в початковий момент часу магнітна індукція може значно перевищувати своє стале значення. На бічних границях станини граничні умови будуть змінюватися протягом перехідного процесу від початкового значення на внутрішній границі до значення сталого на всіх границях після завершення перехідного процесу. Математично граничні умови визначались законом проходження електромагнітної хвилі крізь товщу станини від внутрішньої до зовнішніх оболонок. Дані розрахунку граничного значення магнітної індукції для фізичної моделі ДП підтвержені дослідними випробуваннями. Рішення для повного магнітного потоку ДП з урахуванням демпфуючого впливу вихрових струмів знаходиться за теоремою згортки в області комплексної змінної у вигляді

$$\Phi_m \cdot = \cdot pi(p) \cdot Y_p(p), \quad (4)$$

де $pi(p)$ - функція похідної струму якоря; $Y_p(p)$ - перехідна магнітна провідність кола ДП повному потоку, який існує в станині.

При пульсуючому або імпульсному живленні струм у колі якоря має сталу та змінну складові. Основну гармоніку останньої враховують при оцінці комутації двигунів пульсуючого струму. Вона визначається як

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi), \quad (5)$$

де I_m – амплітудне значення струму; ψ - початкова фаза.

У символічному вигляді з урахуванням вказаної зміни струму визначається комплексна магнітна провідність з урахуванням особливостей граничних умов у станині. Її значення залежить від двох параметрів: ωT (T – стала часу вихрових струмів) та співвідношення сторін поперечного перетину станини λ . У знайденому рішенні для магнітного

потоків знаходиться його періодична складова, а аперіодична складова, що залежить від початкової фази до уваги не береться. Магнітний потік, який створюється змінною складовою струму якоря, знаходиться через комплексну магнітну провідність у вигляді закону Ома:

$$\dot{Y}_s = \dot{\Phi}_{ms} / I_m, \quad (6)$$

або

$$\dot{Y}_s = \dot{Y}_a - j\dot{Y}_b, \quad (7)$$

Амплітуда \dot{Y}_s і фаза φ комплексної магнітної провідності кола ДП визначається за значеннями Y_a і Y_b відомими способами:

$$\dot{Y}_s = \sqrt{Y_a^2 + Y_b^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{Y_a}{Y_b}. \quad (8)$$

За допомогою розрахунків на ПЕОМ отримані графічні залежності комплексної перехідної магнітної провідності від двох параметрів ωT і λ . Реальне співвідношення сторін поперечного перетину станини в тягових машинах залежить від ширини залізничної колії і завжди має значення більш ніж 5, у машинах загальнопромислового призначення цей показник ще більший. У цих умовах перехідна магнітна провідність практично від нього не залежить і є загальною без відносного конкретного виду машин.

За значенням змінної складової магнітного потоку визначена МРС вихрових струмів у станині \dot{F}_m :

$$\dot{F}_m = \frac{Y_i I_m - \dot{Y}_s I_m}{Y_m}, \quad (9)$$

де Y_i - магнітні провідності кола ДП у сталому режимі; \dot{Y}_s - магнітна провідність кола ДП змінної складової магнітного потоку; Y_m - базова магнітна провідність.

Особливістю розрахунку магнітного потоку в колі ДП двигунів пульсуючого струму, крім врахування неоднорідності зміни магнітного поля та залежності магнітної проникності від структури магнітного кола, є врахування впливу сполученості потоків головних і додаткових полюсів у станині. У результаті проведених досліджень виявлено, що магнітна проникність для змінної складової магнітного потоку істотно знижується по мірі магнітного насичення станини. При значенні магнітної індукції поля головних полюсів у станині менше 0,4 Тл зазначена залежність

виявляється слабо. Це явище не вдалося достатньо вивчити, тому для його врахування використані відомі експериментальні залежності.

При розрахунку вихрових струмів в осерді ДП використовуються рівняння електромагнітного поля, рішення яких визначаються з однаковими граничними умовами для всіх сторін поперечного перерізу осердя.

Рішення для повного магнітного потоку при демпфюванні його в осерді ДП подано у вигляді згортки функцій похідної струму і перехідної магнітної провідності

$$\Phi_m = p i(p) Y_{pw}(p). \quad (10)$$

Магнітний потік в осерді ДП при гармонійній зміні струму поданий у вигляді

$$\dot{\Phi}_{ms} = I_m \cdot \dot{Y}_{sw}. \quad (11)$$

Комплексна магнітна провідність \dot{Y}_{sw} розрахована на ПЕОМ і є функцією двох параметрів: відносного часу ωT_w і співвідношення сторін поперечного перерізу осердя. При чому останній виявляється при співвідношенні сторін більше ніж 5, що в реальних конструкціях машин завжди має місце. T_w – стала вихрових струмів в осерді ДП.

З розрахункових кривих значення МРС вихрових струмів в осерді визначається у вигляді

$$\dot{F}_{wi} = \frac{Y_i I_m - \dot{Y}_{swi} I_m}{Y_m}. \quad (12)$$

де Y_i , Y_m - згідно з (9); Y_{swi} - магнітна провідність кола ДП ланки, де має місце змінна складова магнітного потоку

У третьому розділі розроблено і подано математичну модель магнітного кола ДП, а також подано методику його розрахунку.

Магнітне коло ДП являє собою складний магнітопровід зі збудженням від обмоток, по яких протікає струм кола якоря. Комутуюче магнітне поле ДП повинне змінюватись пропорційно струму якоря, у зв'язку з цим, в робочому діапазоні навантажень магнітне коло ДП повинно бути з лінійними властивостями. При пульсуючому живленні лінійність магнітного кола порушується внаслідок впливу вихрових струмів. Для кількісного врахування цього явища магнітні потоки ДП

пропонується розраховувати з використанням схем заміщення. Універсальна схема заміщення подана на рис. 1.

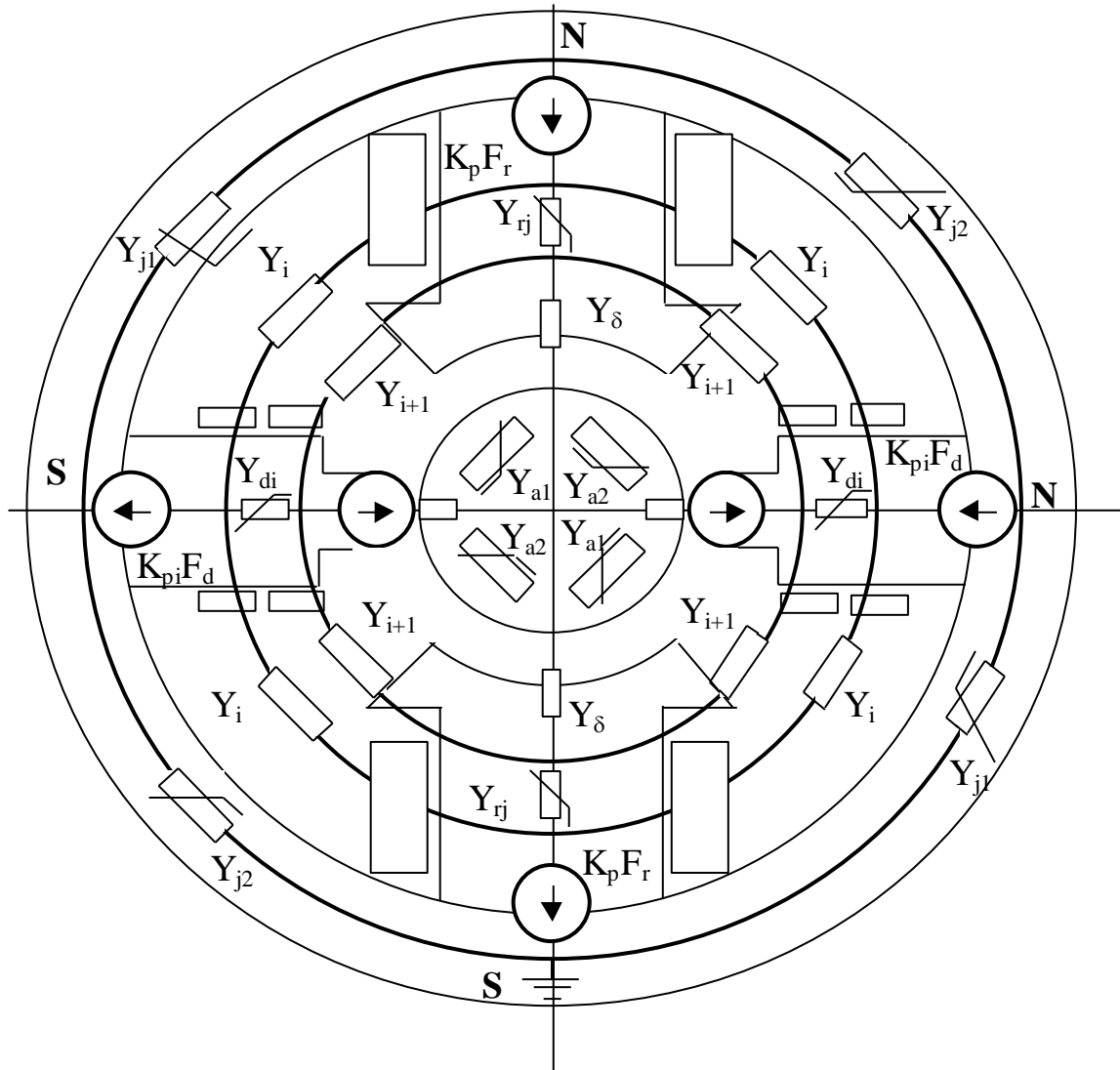


Рис. 1. Універсальна схема заміщення магнітного кола ТЕД

Елементами схеми заміщення є магнітні провідності ланок магнітного кола, кількість яких вибирається в залежності від бажаної точності розрахунку. Розподілені магнітні поля в ланках магнітного кола, представленими гілками схеми заміщення, замінюються магнітними потоками (Φ) у цих гілках. Джерела МРС (F) включаються в схему заміщення в залежності від місця їхнього розташування в реальному магнітному колі. МРС вихрових струмів враховуються в масивних ланках магнітного кола, тобто там, де вони наводяться. Розподілені джерела МРС замінюються зосередженими джерелами, що помножують на коефіцієнти

розподілу. МРС обмотки збудження стає лінійно розподіленою на поверхні полюса.

При розрахунках універсальна схема заміщення може бути подана з застосуванням правил переносу джерел МРС в електричних колах схемою з двома вузлами (рис. 2).

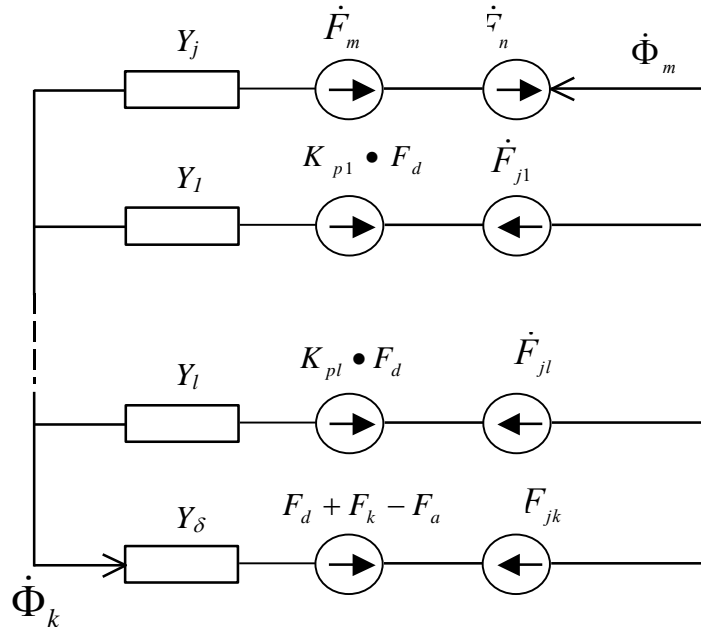


Рис.2. Схема заміщення магнітного кола ДП ТЕД:

$Y_l \dots Y_l$ - магнітні провідності потоків розсіювання;

Y_j - магнітна провідність між осердям ДП і станиною;

Y_δ - магнітна провідність повітряного зазору;

F_m, F_n, F_j - МРС вихрових струмів в станині, в прокладках та в осерді ДП;

F_a, F_k, F_d - МРС в обмотках якоря, компенсаційній та в осерді ДП;

Φ_m, Φ_k - повний і комутуючий магнітні потоки

Точність розрахунку магнітного кола ДП значною мірою залежить від точності визначення її параметрів. При визначенні параметрів схеми заміщення пропонується використовувати метод конформних відображень, заснований на перетворенні Кристоффеля-Шварца.

Провідності магнітних зазорів полюсів і шляхів потоків розсіювання визначаються розрахунком потенційного магнітного поля, коли осердю ДП задано магнітний потенціал U_m . Для розрахунку потоків у середині багатокутної області $Z_1 Z_2 Z_3 Z_4 Z_5 Z_6 Z_{14} Z_{13} Z_7 Z_8 Z_9 Z_{10} Z_{11} Z_{12} Z_1$ площини Z , що відповідає міжполюсному вікну, вона відображається на верхню напівплощину t (рис. 3). При цьому границя багатокутної області переходить у дійсну вісь площини t , де вузли $t_1 \dots t_{14}$ відповідають вершинам $Z_1 \dots Z_{14}$ з аналогічними індексами.

Визначення 11 невідомих $t_1 \dots t_{11}$ виконано числовим методом, суть якого полягає в ітераційному уточненні спочатку обраних значень $t_1 \dots t_{14}$. Потім за допомогою перетворення відображається верхня частина площини \dot{t} у смугу комплексних потенціалів площини \dot{W} (рис. 3).

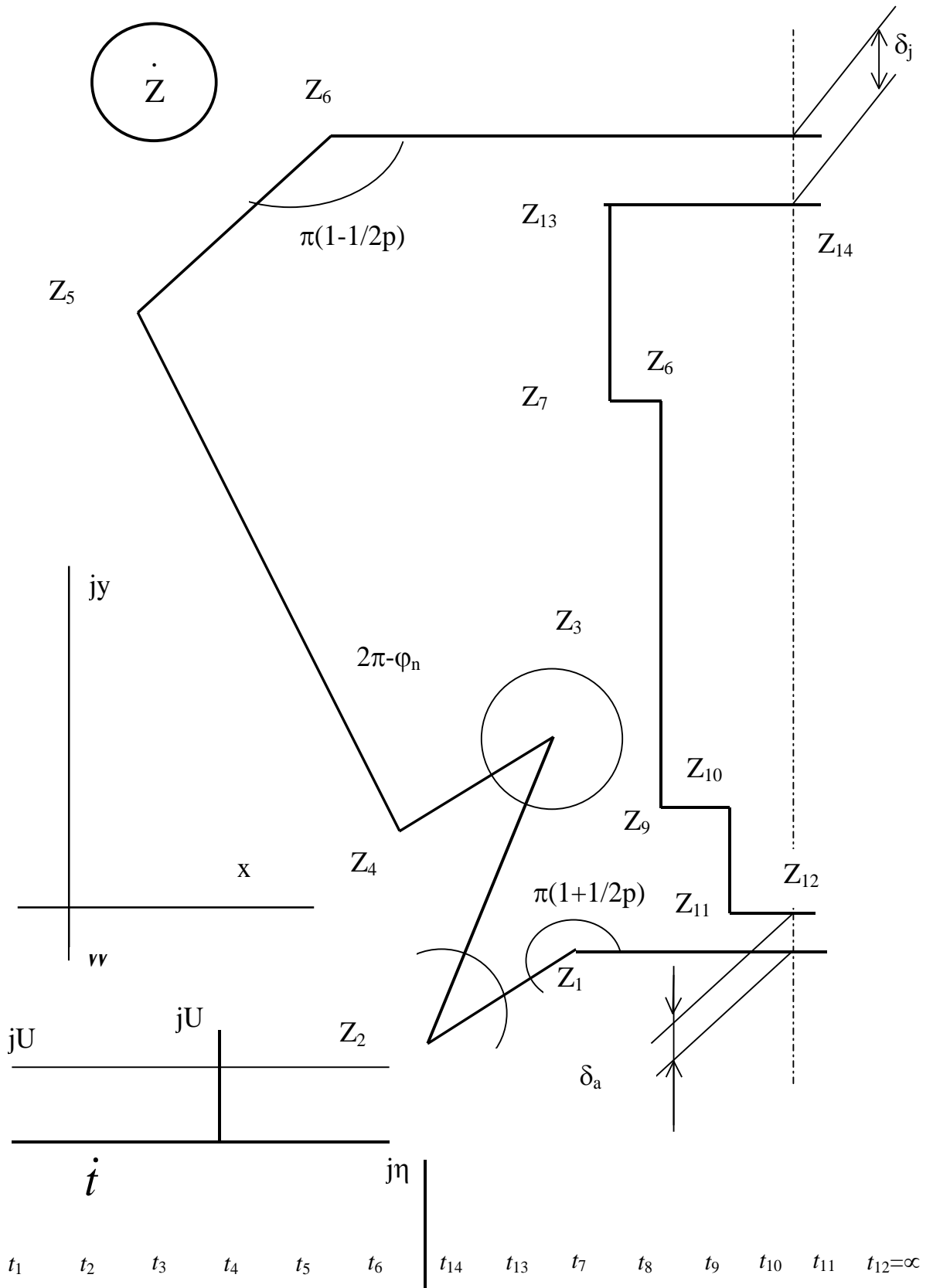


Рис. 3. Ескіз області міжполюсного вікна ТЕД при визначенні параметрів магнітного кола ДП методом конформних відображень

При зображенні схеми заміщення контур осердя ДП $Z_{14}Z_{13}Z_7Z_8Z_9Z_{10}Z_{11}Z_{12}$ розбивається на ділянки Z_i, Z_{i+1} , відповідні ланкам схеми заміщення (рис.2). При $U_m = I_j$ потік i -ї гілки Z_i, Z_{i+1} чисельно дорівнює її провідності, тому

$$Y_i = \frac{l}{|U_m|} \left| \int_{z_i}^{z_{i+1}} B(t) dz \right| = \frac{l}{|U_m|} \left| \int_{z_i}^{z_{i+1}} B(t) \frac{dz}{dt} dt \right| = \frac{\mu_0 l}{\pi} \left| \int_{i_i}^{i_{i+1}} \frac{dt}{t} \right|, \quad (13)$$

або

$$Y_i = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \left| \frac{i_{i+1}}{i_i} \right|. \quad (14)$$

З урахуванням визначених провідностей та вихрових струмів визначаються магнітні потоки ДП. Вони мають дві складові: перша залежить від струму збудження, друга - від вихрових струмів. Зокрема, комутуючий магнітний потік визначається у вигляді

$$\dot{\Phi}_k = \left(\frac{W_d - W_k}{a_d} - W_a - \gamma Y_i^* \right) Y_\delta \cdot i - Y_\delta \frac{1}{1 + \gamma} \left\{ \dot{F}_m + \dot{F}_n + \dot{F}_{jk} \left[1 + \gamma (1 - Y_\delta^*) \right] - \gamma (F_{j1} \cdot Y_1^* + \dots + F_{jl} \cdot Y_l^*) \right\}, \quad (15)$$

де w_d, w_k, w_a - кількість витків обмотки додаткового полюса, компенсаційної обмотки та обмотки якоря; a_d - кількість паралельних гілок обмотки додаткового полюса; $\gamma = Y_B / Y_j$, Y_B - магнітна провідність по периметру осердя ДП за винятком ділянки немагнітного зазору. * позначено відповідні магнітні провідності, що віднесені до Y_B .

У четвертому розділі наведені результати апробації методики розрахунку магнітного кола ДП на фізичних моделях магнітної системи додаткових полюсів, серійних тягових двигунах з різними варіантами виконання магнітного кола ДП, а також проведено порівняльний аналіз розрахункових і дослідних значень комутуючого магнітного потоку.

Модель, що відбиває фізичні процеси, які існують у магнітному колі ДП, являє собою П-подібне осердя та ярмо, на стрижнях осердя якої розміщені дві обмотки збудження. За допомогою розробленої моделі визначена величина магнітної індукції при різних варіантах конструкцій фізичної моделі: масивне ярмо і розшаровані осердя; розшароване ярмо і масивне осердя. Також на моделі досліджено закономірність зміни магнітної індукції біля границь області, що розглянуто в другому розділі.

Дослідження моделей проводилося при пульсуючому живленні на лінійній ділянці характеристики намагнічування. Струм в обмотках збудження і магнітна індукція в повітряному зазорі реєструвались

осцилографом. Похибки результатів розрахунку та досліду не перевищували 10%.

Методика також була перевірена на двох двигунах, що є аналогами ТЕД: НБ-418 (масивна станина і розшароване осердя ДП) і НБ-406 (масивна станина і масивне осердя ДП). Перший двигун досліджувався при частоті пульсацій струму 100 Гц, дослідження другого двигуна проводилось при різній частоті пульсуючого струму з метою оцінки рівня демпфіювання комутуючого магнітного потоку в двигунах з масивною конструкцією осердя ДП. У двигуні П141-6, починаючи з частоти 1 Гц, уже було помітне значне демпфіювання. По мірі зростання частоти струму також зростало демпфіювання, яке виявлялось зниженням амплітуди та відставанням фази комутуючого потоку від попередніх значень. При частоті більш ніж 7 Гц виникло “перекидання” потоку. Робота досліджуваних двигунів характеризувалась інтенсивним іскрінням щіткового контакту, що викликало підгар робочої поверхні колектора та щіток. Нескомпенсована ЕРС перевищувала допустимі межі в 1,7 – 2 рази. Нормальна робота в цих умовах була неможливою. Для рішення проблеми комутації перший двигун було модернізовано з використанням запропонованого схемно-конструкційного методу (ел. схема форсованого збудження ДП ТЕД подана на рис. 4)

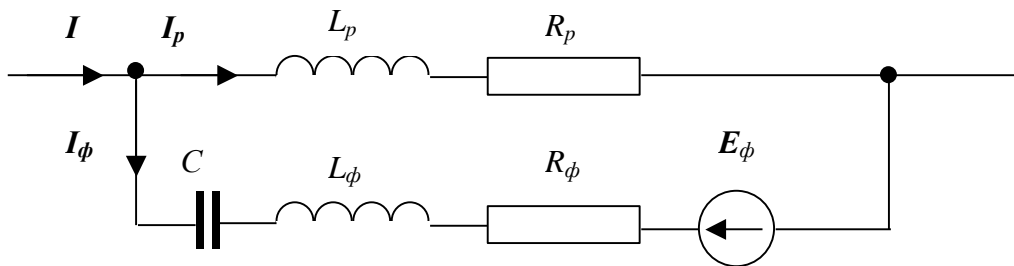


Рис. 4. Електрична схема форсованого збудження ТЕД

Струм у форсуючій обмотці в цьому разі визначався за формулою:

$$\dot{I}_\phi = \frac{(R_p + j\omega L_p)\dot{I} - \dot{E}_\phi}{j\omega\left(L_\phi + L_p - \frac{1}{C\omega^2}\right) + (R_\phi + R_p)}, \quad (16)$$

де E_ϕ - ЕРС, яка протидіє струму форсування, залежить від місця розміщення форсуючої обмотки. В даному випадку її було розміщено на осерді ДП ближче до якоря.

Встановлено, що варіацією параметрів вказаної схеми та кількістю витків форсуючої обмотки досягається значне покращення комутації. Розроблено програму, що дозволяє за заданими параметрами ТЕД

розраховувати необхідні параметри форсуючого пристрою з метою отримання оптимальних значень амплітуди та фази комутуючого магнітного потоку при пульсуючій або імпульсній напрузі живлення.

Апробація запропонованого методу показала його високу ефективність, некомпенсовану ЕРС практично було ліквідовано, комутація стала безіскровою.

ВИСНОВКИ

Дисертація містить отримані автором наукові результати, що у сукупності дають можливість зробити висновок про те, що їхнє застосування дозволить вирішити наукову задачу вдосконалення колекторних тягових двигунів рухомого складу при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення, тим самим підвищити ефективність та надійність функціонування електрорухомого складу залізниць. На підставі проведених у дисертації досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Вирішення проблеми підвищення експлуатаційної ефективності електрорухомого складу залізниць за рахунок переведення його на імпульсне регулювання замість енерговитратного резисторного, безвідривно пов'язане з забезпеченням надійності роботи тягових двигунів при імпульсній та пульсуючій напрузі живлення. Зниження надійності функціонування пояснюється демпфіюванням комутуючого магнітного потоку вихровими струмами, що призводить до появи некомпенсованої електрорушійної сили в комутуючих секціях і, як наслідок, до зниження комутаційної стійкості, іскріння та підвищеного зносу колектора та щіток.
2. На підставі закону повного струму в інтегральній формі (що враховує зв'язок ланок вихрового поля з іншими ланками магнітного кола) розроблено методику розрахунку вихрових магнітних полів у магнітних колах ТЕД.
3. Встановлена узагальнена функціональна залежність між рівнем впливу вихрових струмів в магнітному колі ДП на комутуючі магнітні потоки та комутацією ТЕД, яка дозволяє розраховувати значення МРС вихрових струмів з достовірністю 85-92%.
4. Розроблена математична модель магнітного кола тягових колекторних двигунів з урахуванням реакції вихрових струмів, яка може використовуватися для оцінки експлуатаційної можливості ТЕД для конкретних умов.
5. Доведені теоретично та підтверджені експериментально нові особливості розподілу магнітного поля в ланках магнітного кола ТЕД дозволяють побудувати тактику модернізації ТЕД з можливістю нормального функціонування останніх у нових для них умовах при підвищеному рівні пульсацій струму.

6. Розроблено (на основі теоретичних досліджень) новий схемно-конструкційний метод активної компенсації реакції вихрових струмів, який захищений Патентом України. Застосування даного методу на практиці дозволить збільшити міжремонтний пробіг колекторних ТЕД не менше ніж в 1,2 – 1,4 рази при експлуатації їх в умовах пульсуючої та імпульсної напрузі живлення.
7. Запропоновані схемотехнічні рішення дозволяють застосувати їх як при проектуванні та виготовленні нових зразків тягових колекторних двигунів для рухомого складу, так і при модернізації та вдосконаленні ТЕД, котрі знаходяться в експлуатації.
8. Результати досліджень і розробок впроваджено на ДНВО “ХЕМЗ” та в навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту. Очікуваний економічний ефект від модернізації тягового двигуна в експлуатації складає 83 тис.грн за розрахунковий термін.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Карпенко Н.П. Универсальный тяговый двигатель для магистральных электровозов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –1999. -№3. – С.80-82.
2. Карпенко Н.П. Коллекторные двигатели пульсирующего тока с форсированным возбуждением добавочных полюсов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2001. - №3. – С.15-17.
3. Калиниченко С.П., Калиниченко Ю.С., Карпенко Н.П. Особенности расчета магнитной цепи добавочных полюсов тяговых двигателей // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2000. - №1. – С.12-15.
4. Калиниченко С.П., Калиниченко Ю.С., Карпенко Н.П. Оценка состояния коммутации тяговых электродвигателей в переходных режимах и при пульсирующем питании // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –1999. -№1. – С.66-68.
5. Патент №35022А. Машина постоянного тока. Авторы Калиниченко Ю.С., Карпенко Н.П. Зарегистрирован в Госреестре Украины. 15.03.01. Бюл.№2.
6. Калиниченко С.П., Карпенко Н.П. Тяговый двигатель для украинских магистральных электровозов переменного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1998. - №5. – С.13-15.
7. Калініченко С.П., Калінінченко Ю.П., Карпенко Н.П. Компенсаційна обмотка двигуна постійного струму при пульсуючому живленні // Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електричних

системах транспорту. Збірник наукових праць ХарДАЗТу. -2000. – Вип.39. – С.55-60.

АНОТАЦІЯ

Карпенко Н.П. Вдосконалення колекторних тягових двигунів для рухомого складу при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.22.07 – рухомий склад та тяга поїздів. Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2002.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню колекторних двигунів шляхом покращення їх комутаційних властивостей. у роботі виконано наукове обґрунтування, пророблення та перевірка нових активних методів підвищення експлуатаційної надійності тягових двигунів.

Розроблено математичну модель магнітного кола додаткових полюсів за допомогою якої проведено аналіз фізичних процесів у тяговому двигуні при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення. На підставі проведеного аналізу удосконалено методіку розрахунку магнітного кола додаткових полюсів з урахуванням реакції вихрових струмів. Знайдено нові рішення для підвищення надійності двигунів, в основу яких покладено метод форсування збудження додаткових полюсів. Ефективність запропонованих рішень підтверджено експериментальними дослідженнями. Виконана робота дозволяє прогнозувати експлуатаційну надійність нових та модернізованих тягових двигунів для рухомого складу залізниць. Результати роботи впроваджено на ДНВО "ХЕМЗ" та в навчальному процесі ХарДАЗТу, що підтверджено відповідними актами.

Ключові слова: електричний колекторний двигун, пульсуючий струм, додаткові полюси, магнітне коло, магнітна провідність, некомпенсована ЕРС.

АННОТАЦИЯ

Карпенко Н.П. Совершенствование коллекторных тяговых двигателей для подвижного состава при пульсирующем и импульсном напряжении питания. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07- подвижной состав железных дорог и тяга поездов. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2002.

Диссертационная работа посвящена совершенствованию коллекторных тяговых двигателей путем улучшения их коммутационных

качеств. Из анализа работ, в которых исследуются особенности работы тяговых двигателей при пульсирующем и импульсном питании видно, что основной причиной ухудшения надежности двигателей в эксплуатации является подгар коллектора и износ щеток. Обеспечить безискровые режимы работы при пульсирующем питании не удастся вследствие демпфирования коммутирующего магнитного потока вихревыми токами и появлением в связи с этим нескомпенсированной ЭДС. При импульсном питании условия работы тяговых двигателей еще более усложняются. В работе выполнено научное обоснование, проработка и проверка новых активных методов повышения эксплуатационной надежности тяговых двигателей. Разработана математическая модель магнитной цепи добавочных полюсов, с помощью которой проведен анализ физических процессов в тяговом двигателе при пульсирующем и импульсном напряжении питания. При этом установлены новые особенности изменения магнитного поля в станине тягового двигателя, учитывающие неоднородность граничных условий, интегральную зависимость от параметров магнитной цепи и сопряженность магнитных полей главных и добавочных полюсов. Получена обобщенная зависимость между уровнем демпфирования коммутирующего магнитного потока вихревыми токами и коммутационной надежностью двигателя. На основании проведенного анализа усовершенствована методика расчета магнитной цепи добавочных полюсов с учетом реакции вихревых токов. Найдены новые решения для повышения надежности двигателя, в основу которых положен метод форсирования возбуждения добавочных полюсов. Эффективность предложенных решений подтверждена экспериментальными исследованиями на физических моделях и серийных двигателях с различными вариантами исполнения магнитной системы добавочных полюсов. В работе выполнена оценка технико-экономической эффективности модернизации существующих тяговых двигателей постоянного тока, которая подтвердила ее целесообразность.

Выполненная работа позволяет прогнозировать эксплуатационную надежность новых и модернизируемых тяговых двигателей для подвижного состава железных дорог. Результаты диссертационной работы использованы и внедрены в учебном процессе Украинской государственной академии железнодорожного транспорта и на Харьковском электромеханическом заводе.

Ключевые слова: электрический коллекторный двигатель, пульсирующий ток, добавочные полюса, магнитная цепь, магнитная проводимость, нескомпенсированная ЭДС.

ABSTRACT

Karpenko N. P. Improvement of commutator propulsion motors for

rolling stock under pulsating and impulse supply voltage. — Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 05.22.07 — railway rolling stock and hauling operation. — Ukrainian State Academy of Rail Transport, Kharkiv, 2002.

The dissertation is devoted to improving commutator propulsion motors by means of enhancement of their commutation performance. A mathematical model of magnetic circuit of auxiliary (commutating) poles is developed to analyze physical processes in a propulsion motor under pulsating and impulse supply voltage. On the basis of the conducted computations, a technique for calculating magnetic circuit of auxiliary poles is advanced to take into account eddy currents reaction. New approaches for increasing commutator propulsion motor reliability are suggested, the approaches based on the auxiliary pole superexcitation method. Efficiency of the suggested approaches is demonstrated with experimental investigations of an operating commutator propulsion motor. The accomplished research allows predicting performance reliability of new and redesigned commutator propulsion motors for railway rolling stock. The research results have been utilized and implemented in Ukrainian State Academy of Rail Transport and in Electromechanical Plant (Kharkiv).

Key words: electric commutator motor, pulsating current, auxiliary poles, magnetic circuit, magneto conductivity, noncompensated electromotive force.

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту на кафедрі "Системи електричної тяги", Міністерство транспорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук

Калініченко Сергій Петрович, Українська державна академія залізничного транспорту, кафедра "Системи електричної тяги", професор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Колесник Іван Кузьмич, Українська державна академія залізничного транспорту, професор кафедри "Експлуатація та ремонт рухомого складу"

кандидат технічних наук, доцент

Далека Василь Хомич, Харківська державна академія міського господарства, Міністерство освіти і науки України, завідувач кафедри "Міський електричний транспорт"

Провідна установа: Східноукраїнський національний університет

ім. Володимира Даля, кафедра "Залізничний транспорт",
Міністерство науки і освіти України, м. Луганськ

Захист відбудеться " ____ " _____ 2002 р. о ____ год. у конференцзалі на засіданні вченої ради Д 64.820.04 при Українській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту, 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7

Автореферат розісланий " ____ " _____ 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Запара В.М.

Карпенко Надія Петрівна

Вдосконалення колекторних тягових двигунів для рухомого складу при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення

АВТОРЕФЕРАТ

дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Друкується згідно оригіналу автора

Підписано до друку " " 2002 р
Формат паперу 60x84 1/16 Папір офсетний
Умовн.-друк.арк. 1,0 Обл.-вид. арк. 1,25
Замовлення № ____ . Тираж 100 прим.

Видавництво ХарДАЗТу, свідоцтво ДК №112 від 06.07.2000 р.
Друкарня ХарДАЗТу
61050, Харків-50, пл. Фейєрбаха, 7