

$$x = \ker D + x_0 = \{x^* + C(t)x^*\} = \{ x^*(1 + C(t)) \}$$

$$x(t) = \left(1 + \int_{\alpha}^t f(\tau)(x^*(\tau))^{-1} d\tau \right) x^*(t), \quad x^*(t) = \lambda e^{-\int_{\alpha}^t a(\tau) d\tau}.$$

Припустимо коефіцієнт $a(\tau)$ потерпає стрибок в деякій точці t_0 проміжку визначення (α, β) . Точку t_0 будемо називати *точкою нерегулярності*. Формула (5), що виражає загальний розв'язок рівняння 1-го порядку, не втрачає сенсу також якщо коефіцієнт $a(\tau)$ потерпатиме стрибок при $t = t_0$. Більш того, функція x у лівій частині виразу опиниться неперервною при $t = t_0$ та диференційованою при $t \neq t_0$. Не обмежуючи спільності, таку функцію будемо вважати *розв'язком лінійного диференційного рівняння 1-го порядку з кусково-неперервним коефіцієнтом $a(\tau)$* . Таке визначення справді узагальнює поняття звичайного диференційного рівняння, оскільки розв'язок $x(t)$ є неперервна функція при $t = t_0$, тобто диференційованість розв'язку у точці нерегулярності, взагалі кажучи, порушується (поняття звичайного диференційного рівняння базується суто на класичному понятті похідної).

Лінійний диференційний оператор 2-го порядку з кусково-неперервними коефіцієнтами може бути визначено як композицію відповідних операторів 1-го порядку. Причому в якості внутрішнього компонента виступає звичайний диференційний оператор $-D_2$, а в якості зовнішнього композиту – оператор з кусково-неперервним коефіцієнтом D_1 : $L = D_1 D_2$. У роботі вирішено питання про структуру ядра оператора L . Поряд із цим питанням постає ще одне цілком природне питання – питання про можливість виразити коефіцієнти оператора L через коефіцієнти операторів - компонентів $-D_1, D_2$.

[1] Арнольд В. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения, 4-ое издание: учебное руководство – Ижевск, Ижевская республиканская типография, 2000 – 368 с.

[2] Александров, В. А. Обобщенные функции: учебное пособие / В. А. Александров// Новосибирск, Новосибирский гос. ун-т, 2005 – 46 с.

[3] Понтрягин, Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения: учебное пособие /Л. С. Понтрягин// М.: Наука, 1965 – 332 с.

[4] Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги: Монография в 2 т. / Г.К.Гетьман – Дн-вск: Изд-во Маковецький, 2011. Т.1. – 456 с.

[5] Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги: Монография в 2 т. / Г.К.Гетьман – Дн-вск: Изд-во Маковецький, 2011. Т.2. – 364 с.

УДК 629.423

МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПРИМІСЬКОГО СПОЛУЧЕННЯ

MODERNIZATION OF TRACTION ENGINES OF SUBURBAN ELECTRIC TRAINS

канд. техн. наук Н.П. Карпенко, М.М. Одегов

Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)

N. Karpenko, PhD (Tech.), M. Odiehov

Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)

Парк електропоїздів приміського сполучення в Україні старіє, використання електропоїздів нового покоління носить одиничний характер. Тому особливої важливості набуває модернізація тягових електричних двигунів (ТЕД) електропоїздів постійного струму, що були спроектовані багато років тому і мають недосконалу конструкцію. Такі двигуни мають підвищений магнітний шум, невисоку потенціальну стійкість, що разом з коливаннями напруги в контактній мережі приводить до їх відмов. Відмовлення через колові вогні по колектору складають приблизно 50% [1-7], тому пропонуються наступні шляхи модернізації таких двигунів:

- застосування компенсаційної обмотки;
- зміна геометрії наконечника головного полюса;
- застосування тиристорно-імпульсної системи керування ТЕД.

Застосування компенсаційної обмотки дозволить підвищити потенціальну стійкість тягового двигуна. Були проведені електромагнітні розрахунки з метою встановлення компенсаційної обмотки на двигун УРТ-110. Модернізація магнітної системи дозволяє зберегти опір обмотки збудження і всі ступені ослаблення поля, тобто модернізований двигун буде цілком взаємозамінним з існуючим. Встановлення компенсаційної обмотки приводить до зниження максимальної міжламельної напруги більш ніж на 35% та економії обмотувальної міді.

Збільшення полюсної дуги з 265 до 278 мм дозволяє виключити причини магнітного шуму і магнітної вібрації, що викликані при зубчаті осердя якоря.

Магнітна вібрація має зубцеву частоту якоря і в деякій смузі частот обертання викликає резонансні хитання остова ТЕД, при котрих нормальна робота становиться неможливою. Крім того, вібрація збільшує можливість пошкодження ізоляції обмотки, що приводить до збільшення відмов ТЕД. Усунути резонансне коливання можна правильним вибором кількості пазів на полюсну дугу.

Відомо, що сила, діюча в електромагнітній системі, підключеної до джерела струму, визначається швидкістю зміни електромагнітної енергії за узагальненою координатою [2]. В ТЕД сили взаємодії між осердям головних полюсів і осердям якоря визначаються похідною магнітної енергії у проміжку під головним полюсом за координатою повітряного проміжку:

$$F = \partial W / \partial \delta, \quad (1)$$

де $W = \int_v w dv$ - енергія магнітного поля;

δ - повітряний проміжок;

$w = BH / 2 = B^2 / 2\mu_0$ - питома магнітна енергія;

B - магнітна індукція.

Сила, що діє на один полюс у радіальному напрямку, визначається як

$$F \cong \frac{l}{2\mu_0} \int_{-\alpha\tau/2}^{\alpha\tau/2} B^2(x,t) dx, \quad (2)$$

де τ, l, α - полюсне ділення, довжина осердя якоря, коефіцієнт полюсного перекриття.

Магнітна індукція в повітряному проміжку визначається у вигляді двох складових:

$$B(x, t) \cong B_0 \left[1 + B_m^* \cos\left(\frac{2\pi}{p\tau} x - \omega t\right) \right], \quad (3)$$

- постійна складова B_0 , що дорівнює середньому значенню;

- змінна складова $B_m^* = B_m / B_0$, що викликає із-за конструктивних особливостей якоря.

Колова частота ω визначається частотою обертання якоря n [об/хв] :

$$\omega = \frac{\pi \cdot z \cdot n}{60}, \quad (4)$$

де z - кількість пазів якоря;

p - кількість пар полюсів;

x, t - просторова і часова координата.

Інтегрування залежності для сили по полюсній дузі дає три складові сили:

$$F_0 = \frac{\alpha d}{2\mu_0} B_0^2 \left[1 + \frac{(B_m^*)^2}{2} \right], \quad (5)$$

$$F' = \frac{\alpha d B_0^2}{\mu_0} \cdot \frac{(B_m^*)^2}{4} \cdot \frac{\sin(\alpha z \pi / p)}{\alpha z \pi / p} \cos 2\omega t; \quad (6)$$

$$F_z = \frac{\alpha d \cdot B_0^2 \cdot B_m^*}{\mu_0} \cdot \frac{\sin(\alpha z \pi / 2p)}{\alpha z \pi / 2p} \cos \omega t. \quad (7)$$

Дві перші складові не викликають однобічного тяжіння тому що, діють на протилежні полюси в різних напрямках, третя складова викликає однобічне магнітне тяжіння зубцевої частоти.

При непарній кількості пазів у чотириполюсних машинах, як у нашому випадку ($z=51$ у тягового двигуна УРТ-110), протилежні полюси зрушені за фазою в часі (координата ωt) на величину кута $\pm\pi$.

Отже, сили F_z під зазначеними полюсами будуть діяти в одну сторону по діаметральній вісі, що збігається з віссю протилежних головних полюсів. Амплітудне значення сили, як впливає з формули для F_z , залежить від кількості зубців, що припадають на полюсну дугу: при цілому числі зубців сила відсутня; при цілому з половиною вона максимальна.

При ексцентричному проміжку з розкриттям $\delta_{\text{кр}} / \delta_{\text{ц}} = 2 \div 3$ ($\delta_{\text{кр}}$ - проміжок під краєм полюса, $\delta_{\text{ц}}$ - проміжок під центром полюса) амплітудне значення сили знижується приблизно в 2 рази [1,2].

Таким чином, усунути резонансне коливання можна правильним вибором кількості пазів на полюсну дугу. У зв'язку з цим, при модернізації тягового

двигуна УРТ-110 електропоїзду постійного струму серії ЕР-2 передбачається вибрати ціле число кількості зубців на полюсну дугу, рівне 8, замість 7,6.

Третій шлях модернізації передбачає застосування тиристорно-імпульсної системи керування на ТЕД. Переваги імпульсного регулювання напруги тягових двигунів відомі і не викликають сумніву [2], а до недоліків варто віднести появу пульсацій струму в їх силовому колі. Пульсації струму викликають виникнення вихрових струмів у магнітній системі, які ускладнюють комутацію, що має прояв в іскрінні і підвищеному зносі щіток.

Для рішення цієї проблеми пропонується форсоване збудження додаткових полюсів, що здійснюється додатковою (форсуючою) обмоткою, розташованою на осерді разом з основною обмоткою додаткового полюса [2-4]. Форсуюча обмотка підключається паралельно обмотці згладжуючого реактора таким чином, щоб її полярність збігалася з полярністю основної обмотки додаткових полюсів. У разі необхідності послідовно в коло форсуючої обмотки вмикається ємність. Магнітний потік від форсуючої обмотки повинен створити таку електрорушійну силу (ЕРС), яка забезпечить повну компенсацію небалансної ЕРС в комутуючій секції обмотки якоря та тим самим поліпшить комутацію.

Таким чином, запропоновані шляхи модернізації тягових двигунів можуть бути рекомендовані при реконструкції рухомого складу приміського сполучення.

[1] Карпенко Н. П. Одегов М.М. Уніфікований тяговий двигун для електропоїздів постійного та змінного струму // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на - Харків: УкрДУЗТ, 2016. – С. 46.

[2] Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.

[3] Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги Монографія [Текст] в 2т./Г.К. Гетьман – Дн-вск: Вид-во Маковецький, 2011.Т1.-456с.

[4] Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги Монографія [Текст] в 2т./Г.К. Гетьман – Дн-вск: Вид-во Маковецький, 2011.Т2.-364с.

[5] Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. - М. Транспорт, 1995.

[6] Правила тяговых расчетов для поездной работы, Транспорт, 1985.

[7] Б.К. Просвириин Электрпоезда постоянного тока с электрическим торможением.- М.: "ТРАНСИЗДАТ", 2000 г. – 328 с.

УДК 656.073

ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

AN APPROACH TO DETERMINING EFFECTIVE MEASURES TO IMPROVE THE QUALITY OF RAILWAY TRANSPORT OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Кіріцева О.В.¹, канд. техн. наук Клецька О.В.¹, Новак Г.Л.²
¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (м. Маріуполь)
²Маріупольський механіко-металургійний коледж

O.V. Kiritseva¹, O.V. Kletska¹, PhD (Tech.), G.L. Novak²
¹The State Higher Education Institution "Pryazovskyi State Technical University" (Mariupol)
²Mariupolskiy mehaniko-metalurgiyiniy koledg