

УДК 629.4:629.423:621.3:025

*Канд. техн. наук Н.П. Карпенко,
В.С. Колісник*

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ДОДАТКОВИХ ПОЛЮСІВ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПРИ ПУЛЬСУЮЧОМУ ТА ІМПУЛЬСНОМУ ЖИВЛЕННІ

Представив д-р техн. наук, професор Ю.І. Гусевський

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. У 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 значною мірою пов'язане з забезпеченням надійної роботи тягових електричних двигунів (ТЕД) при пульсуючому або імпульсному їх живленні. При однофазному випрямленні змінного струму або при імпульсному регулюванні напруги на тягових двигунах струм у колі якоря має стати змінну складові.

Відомо [1], що наявність пульсації струму призводить до появи в комутуючій секції змінних складових реактивної, комутуючої та трансформаторної електрорушійних сил (ЕРС). Безіскрові режими тягових двигунів відбуваються при компенсації усіх ЕРС в комутуючій секції. У той же час пульсації струму призводять до демпфіювання комутуючого магнітного

потoku вихровими струмами і появи у зв'язку з цим некомпенсованої ЕРС, рівень якої не повинен перевищувати $0,5 \div 0,7 B$. Слід зазначити, що величина некомпенсованої ЕРС залежить від конструктивного виконання магнітної системи тягового двигуна. При цілком розшарованій магнітній системі величина некомпенсованої ЕРС була б мінімальною, однак внаслідок умов міцності для тягових двигунів остов завжди виконують масивним. Для визначення величини некомпенсованої ЕРС необхідно розрахувати магнітне коло додаткових полюсів (ДП) тягового двигуна за допомогою схем заміщення [1].

Традиційно вихрове магнітне поле розраховують з використанням рівнянь електромагнітного поля [2], розв'язання яких виконується при відомих значеннях індукції на межах внутрішньої та зовнішньої поверхонь станини тягового двигуна, а значення магнітної індукції приймаються однаковими і змінюються пропорційно струму збудження. Однак дані експериментальних досліджень [3] свідчать, що значення магнітної індукції на тягових електродвигунах (наприклад типу НБ-418К6 та РТ-51Д, що використовуються на електровозах ВЛ-80 та електропоїздах ЕР-9) має змінний характер. Це визначає необхідність урахування зміни магнітного поля в станині, що має вагоме значення в

розрахунках магнітних потоків додаткових полюсів.

На першому етапі для вивчення особливостей зміни магнітної індукції поблизу границь поперечного перерізу станини тягового двигуна було досліджено фізичну модель, яка являла собою П-подібне, розшароване осердя, на стержнях якого розташовані дві обмотки збудження

На цій моделі ярмо імітувало станину тягового двигуна, а осердя – додаткові полюси. В якості демпфуючої ланки було обрано масивне феромагнітне ярмо, виконане роз'ємним. У місці роз'єму обидві його половинки були міцно стиснуті, а на одній з них профрезеровано пази глибиною 3 мм, які розподілили площу роз'єму на 16 площинок. Навколо кожної площинки та навколо поперечного перерізу ярма встановлювалися вимірю-

вальні витки, які призначені для реєстрації часткових і повного магнітного потоків.

Дослідження моделі проводилось при ненасиченому стані феромагнетиків вмиканням обмотки збудження на пульсуюче живлення. Датчиком змінної складової пульсуючого струму був пояс Роговського, сигнал з якого інтегрувався на RC-ланцюжки. Сигнали з вимірювальних витків повного та часткових потоків інтегрувалися аналогічно. Кутові фази змінних магнітних потоків відліковувалися від фази змінної складової струму збудження. Обробка осцилограм виконувалась у відносних одиницях (в.о.). За одиницю змінного струму приймалось його амплітудне значення, за одиницю повного та часткового потоків приймалися значення, які б мали місце при встановленому струмі, що дорівнює амплітудному значенню змінного струму (рис. 1).

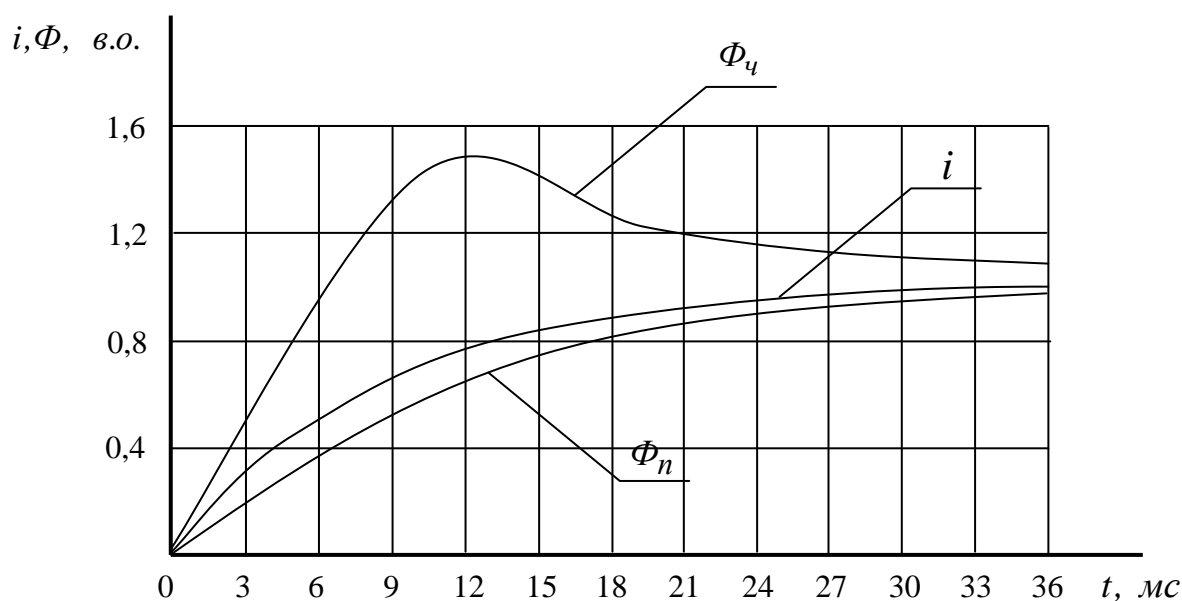


Рис. 1. Зміна струму (i), повного (Φ_n) та часткового (Φ_q) магнітних потоків залежно від часу

Аналіз експериментальних даних показав, що головною особливістю перехідного процесу в ярмі є динамічна зміна магнітного поля (потік Φ_q) поблизу внутрішньої поверхні. Зміна магнітних

потоків у цій області значно перевищує свої встановлені значення (потік Φ_n).

Проведені дослідження моделі додаткових полюсів дозволили на другому етапі встановити відповідні граничні умови проведення розрахункових досліджень.

Виявлено, що проникнення електромагнітної хвилі у станину проходить з боку внутрішньої поверхні, тому саме граничні умови можуть бути поданими в наведеному нижче вигляді.

У перший момент часу на зовнішній границі станини при стрибкоподібному струмі збудження магнітне поле відсутнє. На внутрішній границі в початковий момент часу магнітна індукція може значно перевищувати своє значення. На бокових границях перерізу граничні умови будуть змінюватися протягом перехідного процесу від початкового значення на внутрішній границі до значення, встановленого на усіх границях після завершення перехідного процесу.

При розрахунку вихрових магнітних полів у магнітних полях ТЕД використовується закон повного струму в інтегральній формі, що враховує зв'язок ланок вихрового поля з іншими ланками магнітного поля:

$$\oint \underline{H} dl = \int_s \underline{j} dS, \quad (1)$$

де \underline{H} – вектор напруженості магнітного поля;

dl – елемент шляху та його направлення при обході контуру МРС;

\underline{j} – вектор щільності струму;

dS – елемент поверхні, через яку проходить струмо.

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 перетворення 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.

При цьому вони визначаються з припущенням демпфіювання магнітного поля в напрямку падіння хвилі, тобто за віссю y . На межах області станини значення індукції при $y=0$ та $y=b$ не залежать від координати x . Рівняння електромагнітного поля для поставленої задачі мають такий вигляд:

$$\operatorname{rot} \frac{B_0}{\mu} = \underline{j}, \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} \underline{E} = \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (5)$$

де B_0 – граничне значення магнітної індукції;

μ – магнітна проникність середовища;

\underline{j} – щільність вихрових струмів;

\underline{E} – напруженість електричного поля.

Закон Ома в диференціальній формі пов'язує між собою напруженість електромагнітного поля і щільність вихрових струмів:

$$\underline{E} = \rho \cdot \underline{j}, \quad (6)$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу.

З урахуванням останнього диференціальне рівняння для граничних значень магнітної індукції в перетвореному за Лапласом вигляді буде таким:

$$\frac{\partial B_0}{\partial y^2} = \rho \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot B_0, \quad (7)$$

де ρ – оператор Лапласа.

Рішення рівняння (4) визначається сумою прямої та відображеної хвилі.

В окремому випадку, при одиничному стрибку струму збудження, значення магнітної індукції в області дійсної змінної визначається за формулою

$$B_0 = \frac{b \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}}{\sqrt{\pi \cdot t}} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} e^{\frac{(y+k \cdot b)^2 \cdot \frac{\mu}{\rho}}{4t}}, \quad (8)$$

де b – товщина станини;

y – координата в напрямку падіння хвилі;

t – час перехідного процесу.

Якщо струм збудження здійснюється за другим законом, то граничне значення магнітної індукції визначається за інтегралом Дюамеля.

З використанням формули (8) для моделі магнітопроводу додаткових полюсів було проведено розрахунок граничних значень магнітної індукції в масивному ярмі. Результати цих розрахунків подані на

рис. 2 у вигляді графіків зміни магнітної індукції в ярмі для дискретних моментів часу.

З рис. 2 видно, що за результатами уточнених розрахунків зміна граничних значень магнітної індукції в ярмі для різних моментів часу суттєво відрізняється від постійних значень, що приймаються в традиційних розрахунках (пряма 3).

Для підтвердження доцільності уточнених розрахунків значень магнітної індукції в ярмі за одержаними кривими були проведені розрахунки магнітного потоку $\Phi_{\text{ч}}$. Співставлення отриманих результатів з наведеними на рис. 2 даними експериментальних досліджень підтвердило, що найбільше відхилення в значеннях $\Phi_{\text{ч}}$ поблизу внутрішньої границі станини не перевищує 5 %.

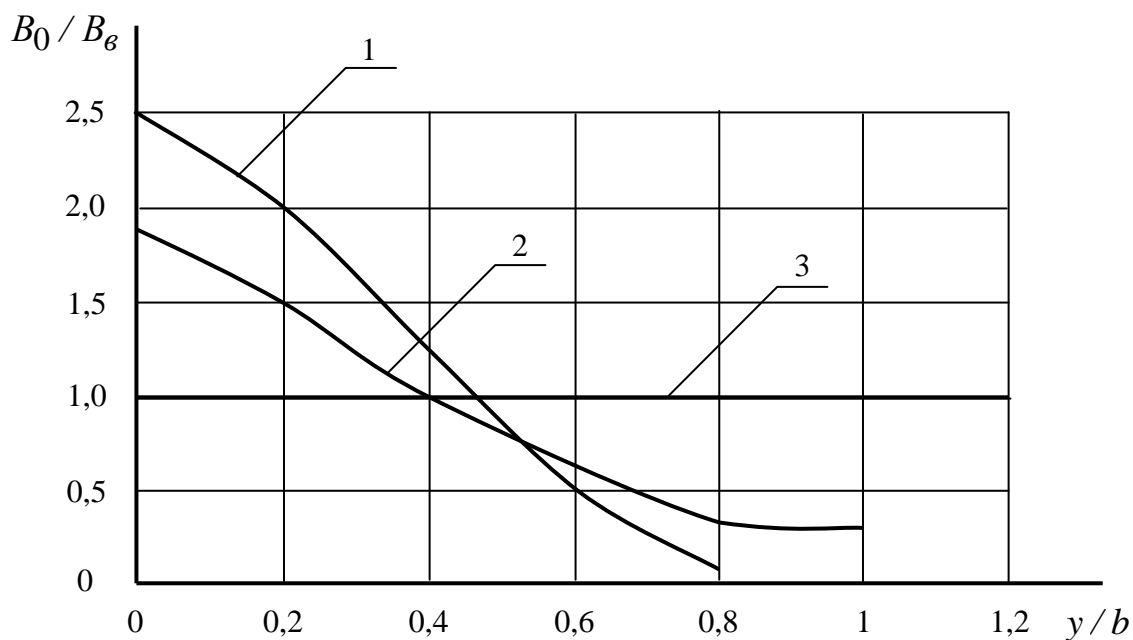


Рис. 2. Граничне значення магнітної індукції в ярмі моделі для моментів часу: 1 – 0,002 с ; 2 – 0,004 с ; 3 – умовно постійні значення (приймаються в традиційних методиках розрахунків)

Таким чином, дослідні випробування фізичної моделі підтверджено розрахунковими граничними значеннями магнітної індукції.

Магнітне коло ДП являє собою складний магнітопровід зі збудженням від обмоток, по яких протікає струм кола якоря. Комутуюче магнітне поле ДП повинно змінюватись пропорційно струму якоря, у зв'язку з цим у 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 розрахувати з використанням схем заміщення (рис. 3).

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 з магнітним насиченням станини. При значенні магнітної індукції поля головних полюсів у станині менше 0,4 Тл зазначена залежність проявляється слабо. Це явище

не вдалось достатньо вивчити, тому для його врахування використані відомі експериментальні залежності. Точність розрахунку магнітного кола ДП значною мірою залежить від точності визначення їх параметрів.

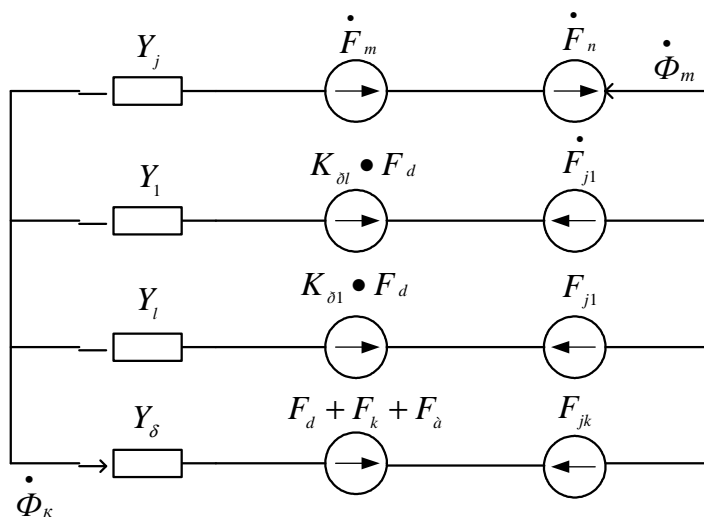


Рис. 3. Схема заміщення магнітного кола ДП ТЕД:

$Y_1 \dots Y_l$ – магнітні провідності потоків розсіювання; Y_j – магнітна провідність між осердями ДП і станиною; Y_δ – магнітна провідність повітряного зазору; $\dot{F}_m, \dot{F}_n, F_j$ – МРС вихрових струмів в станині, в прокладках та осерді ДП; F_a, F_k, F_d – МРС в обмотках якоря, компенсаційній та в осерді ДП; $\dot{\Phi}_m, \dot{\Phi}_\kappa$ – повний і комутуючий магнітні потоки

При визначенні параметрів схеми заміщення можна використовувати різноманітні методи: аналітичні (наприклад, метод конформних відображень), чисельні, графоаналітичні, графічні.

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

$$\hat{O}_k = \left(\frac{W_d - W_k}{a_d} - W_a - \gamma Y_s^* \right) Y_\delta \cdot \dot{\Phi}_\kappa - Y_\delta \frac{1}{1 + \gamma} \left\{ \dot{F}_m + \dot{F}_n + \dot{F}_{jk} \left[1 + \gamma \left(1 + Y_\delta^* \right) \right] \right\} - \gamma \left(F_{ji} \cdot Y_l^* + \dots + F_{jl} \cdot Y_l^* \right), \quad (9)$$

де w_d, w_k, w_a – кількість витків обмотки додаткового полюса, компенсаційної обмотки та якоря;

a_d – кількість паралельних гілок обмотки додаткового полюса;

$\gamma = Y_A / Y_j$, Y_A – магнітна провідність по периметру осердя ДП за винятком ділянки магнітного зазору;

* – позначено відповідні магнітні провідності, що віднесені до Y_A .

Апробацію методу розрахунку магнітного кола додаткових полюсів з урахуванням впливу вихрових струмів проведено на фізичних моделях магнітної системи додаткових полюсів, серійних тягових двигунів з різними варіантами виконання магнітного кола ДП, а також проведено порівняльний аналіз розрахункових і дослідних значень комутуючого магнітного потоку.

Дані експериментів і розрахунків відрізняються не більше, ніж на 10 %.

Таким чином, у магнітному колі ДП в загальному випадку існує три джерела вихрових струмів: у станині, осерді ДП та в прокладках. Магніторушійні сили (МРС) цих струмів визначаються у вигляді зосереджених МРС, які розташовані у відповідних гілках схеми заміщення магнітного кола. Розрахунок магнітних

потоків проводиться розв'язанням рівнянь, які випливають зі схеми заміщення з урахуванням всіх складових магніторушійних сил, включаючи і МРС вихрових струмів. Реально найбільш важливим є рішення з урахуванням вихрових струмів у станині у зв'язку з тим, що застосування в двигунах пульсуючого струму масивних осердь ДП не бажано.

Наведені матеріали свідчать про доцільність урахування особливостей розподілу електромагнітного поля в станині тягових двигунів пульсуючого струму. При цьому некомпенсована ЕРС від демпфіювання комутуючого процесу магнітного потоку вихровими струмами може бути визначена більш точно, що дозволяє удосконалити метод розрахунку комутації тягових двигунів пульсуючого струму. Це дозволить проводити різноманітні дослідження, спрямовані на удосконалення конструкції та поліпшення експлуатаційних характеристик двигунів тягового рухомого складу. Для вирішення таких завдань, може бути використаний запропонований в роботі підхід.

Список літератури

1. Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
2. Поливанов, К.М. Теория электромагнитного поля [Текст] / К.М. Поливанов. – М.: Энергия, 1975. – 207 с.
3. Калиниченко, С.П. Оценка состояния коммутации тяговых электродвигателей в переходных режимах и при пульсирующем питании [Текст] / С.П. Калиниченко, Н.П.Карпенко // Информационно-управляемые системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – № 1. – С. 66-68.

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

Анотації

Проведено аналіз фізичних процесів у тяговому двигуні при пульсуючій та імпульсній напрузі живлення. На підставі проведеного аналізу удосконалено методику розрахунку магнітного кола додаткових полюсів з урахуванням реакції вихрових струмів.

Апробацію проведено на фізичних моделях магнітної системи додаткових полюсів, серійних тягових двигунів з різними варіантами виконання магнітного кола ДП, а також проведено порівняльний аналіз розрахункових і дослідних значень комутуючого магнітного потоку.

Дані експериментів і розрахунків відрізняються не більше, ніж на 10 %.

Проведен анализ физических процессов в тяговом двигателе при пульсирующем и импульсном напряжении питания. На основании проведенного анализа усовершенствована методика расчета магнитной цепи дополнительных полюсов с учетом реакции вихревых токов.

Апробация проведена на физических моделях магнитной системы дополнительных полюсов, серийных тяговых двигателях с различными вариантами выполнения магнитно цепи ДП, а также проведен сравнительный анализ расчетных и опытных значений коммутирующего магнитного потока.

Данные экспериментов и расчетов отличаются не больше, чем на 10 %.

The analysis of physical processes in the traction motor with pulsed and pulsed voltage. Based on the analysis of the improved method of calculating the additional poles of the magnetic circuit, taking into account the reaction of eddy currents.

Testing conducted on physical models of the magnetic system of additional poles, serial traction motors with various embodiments of the magnetic circuit PD, as well as the comparative analysis of calculated and experimental values of the switching of the magnetic flux.

Experimentation data and calculations differ by no more than 10%.