

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ ТЕПЛОВОЇ МОДЕЛІ ТЕД

Представив д-р техн. наук, професор Я.В. Щербак

Постановка проблеми. Параметри тягового двигуна, у тому числі і номінальні, з часом експлуатації і кількістю ремонтів погіршуються. Дослідження підтверджують, що після ремонту тягові двигуни в силу різних причин суттєво змінюють свої електротехнічні параметри [1]. Більш того, можна стверджувати, що після ремонту тягових двигунів служби експлуатації отримують останні з новими, іншими від попередніх (до ремонту) параметрами.

Тому безпосередньою задачею побудови математичної теплової моделі тягового електричного двигуна є визначення температури активних частин машини з метою перевірки виконання вимог за допустимим рівнем нагріву обмоток машини. Тепловий розрахунок електричної машини виконується, як правило, для її номінального режиму роботи при сталому стані нагріву. Проте в ряді випадків потрібні розрахунки і для нестационарних режимів нагріву, у тому числі при навантаженнях, відмінних від номінальної. У результаті розрахунку можуть бути визначені температурні поля в найбільш нагрітих зонах активних частин машини, до яких передусім належать обмежувальні вимоги.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Загально відомі методи визначення перегріву ТД [2] базуються на визначенні середньої температури обмотки, яка може бути визначена непрямим методом за формулою

$$\Delta\vartheta = (r_n - r_x) \frac{(235 + \vartheta_x)}{r_x} + \vartheta_x - \vartheta_0, \quad (1)$$

де ϑ_x – температура обмотки в практично холодному стані;

ϑ_0 – температура охолоджуючого середовища;

r_n, r_x – відповідно опір обмотки в нагрітому і практично холодному стані.

Однак оцінка температури міді обмотки і, відповідно, температури ізоляції на підставі виразу, (1) призводить до маскування температури найбільш нагрітих ділянок у пазах за рахунок нерівномірного охолодження пазової і лобової частин. Для більш точного визначення температури міді обмотки, ізоляції і сталі для випадку сталого тепловиділення можна використовувати статичну теплову схему заміщення, що дозволяє визначити розподіл теплових потоків у сталому режимі [3].

Теплові моделі машин постійного струму були розглянуті в роботах [3, 4]. Однак у роботі [3] якір ЕМ розглядається як якась ціла мідь, відсутнє визначення локальних місць перегріву обмотки по пазу якоря. У роботі [4] тіло якоря не розділяється на ділянки по довжині і не врахований вплив втрат на поверхні колектора на лобову частину обмотки якоря, що для тягових двигунів ТРС не припустимо.

І в цьому випадку температури найбільш нагрітих ділянок, які можуть виникнути при локальному пошкодженні пакета сталі якоря, при пошкодженні обмоток у пазовій частині, лобовій або за рахунок нерівномірного охолодження, є прихованими.

Мета роботи. Тепловий розрахунок ТД виконується з метою оцінки локальної температури якоря і, як наслідок,

визначення теплового стану ізоляції обмотки якоря по всій довжині.

Основний матеріал. З огляду на особливості теплових процесів у машинах постійного струму викладених у роботі [3] можна розглядати теплові процеси з урахуванням:

– наступних джерел тепла: втрати в пазовій міді обмотки якоря $\Delta P_{м.п}$; втрати в лобовій міді обмотки якоря $\Delta P_{м.л}$; втрати в сталі коронок зубців $\Delta P_{кз}$; втрати в сталі зубців ΔP_z ; втрати в тілі пакета сталі якоря ΔP_m ;

– теплопроводностей: теплопровідність пакета сталі уздовж аркушів $\lambda_{ст.1}$; теплопровідність пакета сталі поперек аркушів $\lambda_{ст.2}$; теплопровідність міді λ_m ; теплопровідність пазового клина $\lambda_{и.до}$; теплопровідність пазової ізоляції $\lambda_{и.н}$;

– тепловіддачі: тепловіддача від коронок зубців до повітря $\alpha_{кз}$; тепловіддача від пазового клина до повітря $\alpha_з$.

Теплові потоки в тяговому електродвигуні постійного струму зображені на рис. 1.

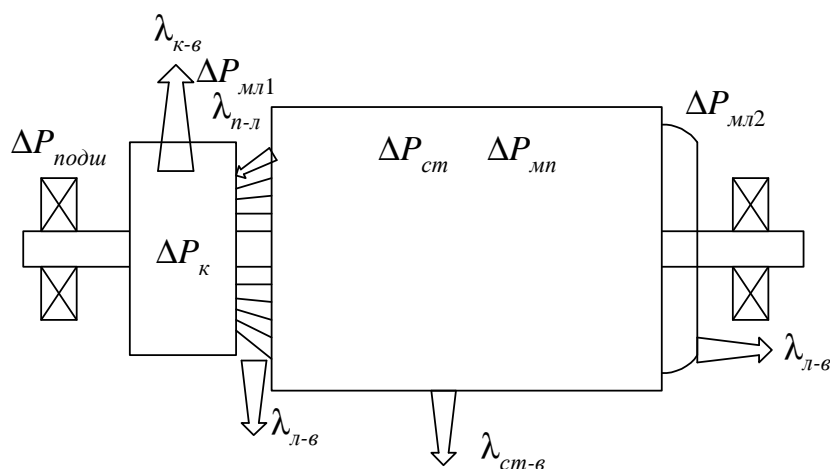


Рис. 1. Теплові потоки в тяговому двигуні постійного струму

Для спрощення моделювання з урахуванням рекомендацій [5] уведемо такі допущення: якор умовно розділяється на N елементів по довжині; втрати в міді приймаються рівномірно розподіленими по довжині обмотки; суміжні зубці не впливають один на одного; температура повітря в зазорі постійна; пакет сталі якоря однорідний у всьому обсязі.

З урахуванням уведених допущень можна розглядати при побудові теплової моделі суміжні зубці і пазову частину обмотки якоря між ними, а також сегмент сердечника пакета сталі якоря, що знаходиться під цією групою зубців (рис. 1).

Оскільки, суміжні зубці не впливають один на одного, то можна розглядати половину одного зубця, паз і половину

другого зубця. Тобто розглядати сегмент АОВ (рис. 2). При цьому втрати в половинах зубців також приймаються половинними.

Теплові розрахунки електричних машин засновані на методах розрахунку температурних полів. Активні частини машин – обмотки, осердя, контактні вузли – є джерелами втрат і розглядаються як тіла з внутрішніми розподіленими джерелами теплоти, які контактують між собою і з неактивними деталями конструкції. Всі нагріті елементи машин, стикаючись із зовнішнім охолоджуючим середовищем або з проміжним теплоносієм, віддають теплоту з поверхні.

Метод теплових схем заснований на широкому використанні теплових опорів,

які з'єднуються в теплову сітку, що імітує реальні колії передачі теплових потоків у машині.

Загальна структура теплової моделі якоря наведена на рис. 3.

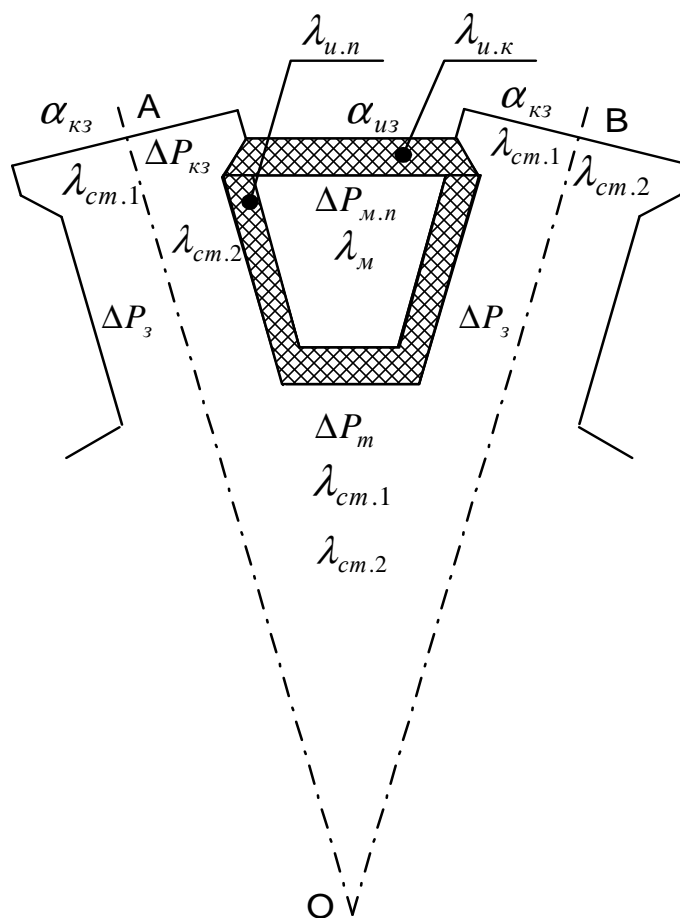


Рис. 2. Теплова схема сегмента якоря

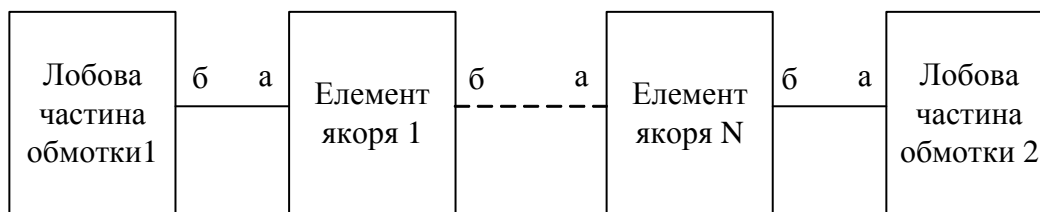


Рис. 3. Загальна структура теплової моделі якоря

Зубець і пазова частина обмотки розділені по довжині якоря на елементарні ділянки з номерами $i=1, \dots, N$, де N – кількість елементів якоря по його довжині.

Загальна кількість вузлів у схемі $M=3N+3$, з них вузол з номером M

відповідає зосередженим втратам у сталі сердечнику якоря, вузли з номерами $M+1, M+2$ відповідають лобовим частинам обмотки [5].

Складемо двовимірну теплову модель тягового двигуна для кожного елемента структурної моделі (див. рис. 4-6).

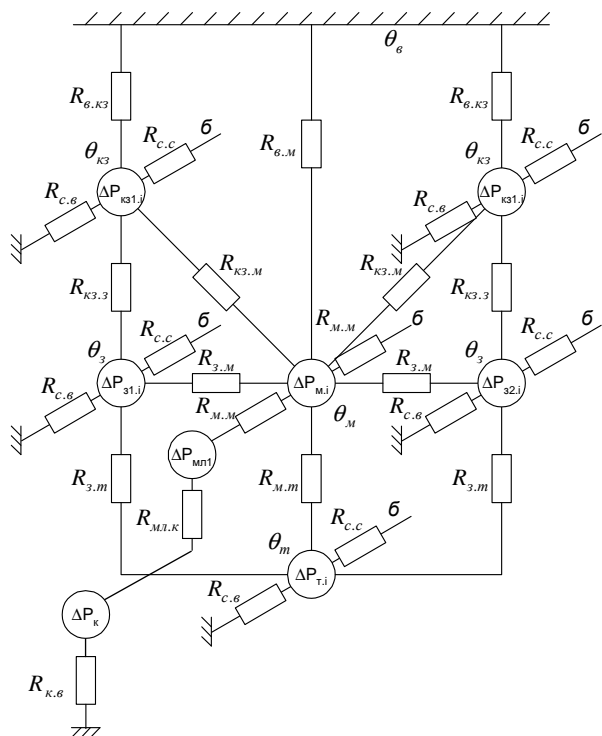


Рис. 4. Теплова модель лобової частини 1

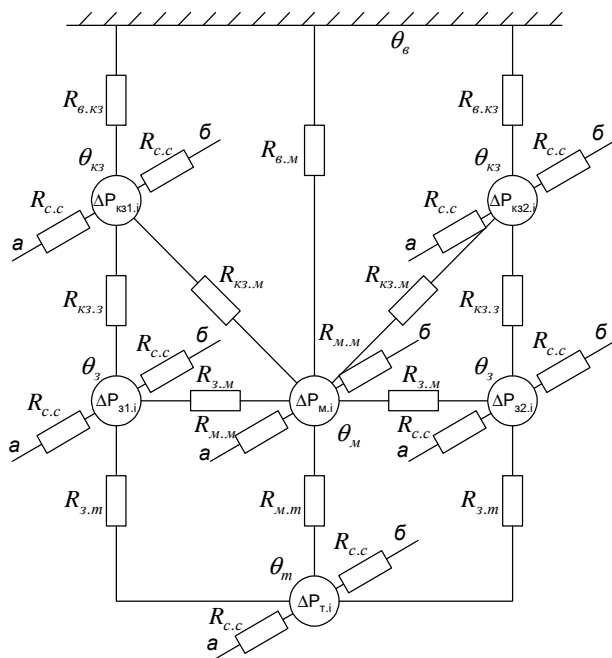


Рис. 5. Тепловий елемент ядра

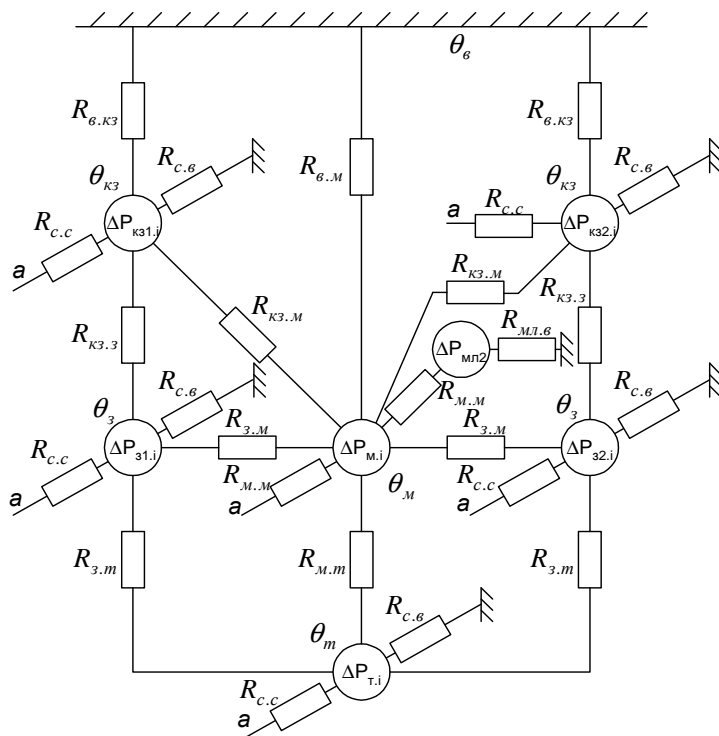


Рис. 6. Теплова модель лобового сектора 2

Втрати у вузлах теплової схеми заміщення для одного перетину визначаються на підставі таких залежностей:

$$\Delta P_{кз1.i} = \Delta P_{кз2.i} = \frac{\Delta P_{кз}}{2ZN} - \text{втрати в}$$

коронці одного зубця;

$$\Delta P_{з1.i} = \Delta P_{з2.i} = \frac{\Delta P_з}{2ZN} - \text{втрати в сталі}$$

одного зубця;

$$\Delta P_{т.i} = \frac{\Delta P_т}{Z} - \text{втрати в сталі сегмента}$$

сердечника якоря;

$$\Delta P_{м.i} = \frac{\Delta P_м(1-k_л)}{ZN} - \text{втрати в міді}$$

одного паза,

де Z – кількість зубців;

N – кількість елементів по довжині якоря;

$$k_л = \frac{l_л}{l_л + l_я} - \text{коефіцієнт лобової}$$

частини обмотки;

$l_л, l_я$ – довжина лобової і пазової частин обмотки.

Теплові опори визначаються в такий спосіб:

$$R_{в.кз} = \frac{1}{\alpha_{кз} d_я b_z} - \text{опір «коронка}$$

зубця – повітря»;

$$R_{в.м} = \frac{1}{\alpha_{из} d_я b_п} + \frac{h_{кл}}{12\lambda_{и.к} d_я b_п} - \text{опір}$$

«повітря – активна мідь паза»;

$$R_{з.м} = \frac{h_п}{12\lambda_{и.л} d_я b_п} - \text{опір «сталі}$$

зубця – активна мідь паза»;

$$R_{з.т} = \frac{h_z}{12\lambda_{ст1} d_я b_z} - \text{опір «сталі}$$

зубця – сталі сектора сердечника»;

$R_{м.м} = R_{з.м}$ – опір «активна мідь паза – сталі сектора сердечника»;

де $d_я = \frac{l_я}{N}$ – довжина елемента якоря в

подовжньому напрямку;

b_z, b_n – ширина зубця і паза, відповідно;

$h_{кл}$ – товщина ізоляційного клина;

h_n – товщина пазової ізоляції;

$P_n = 2(h_z + b_n)$ – периметр паза;

h_z – висота зубця;

$S_м$ – перетин міді в пазу.

$$\Delta P_{мл1} = \Delta P_{мл2} = \frac{\Delta P_м k_л}{Z} - \text{втрати в}$$

міді лобової частини обмотки якоря;

$$R_{м.м} = \frac{d_я}{12\lambda_м S_м} - \text{опір при}$$

телопередачі від міді одного елемента до міді іншого елемента по довжині провідника;

$$R_{с.с} = \frac{d_я}{12\lambda_{ст2} h_z b_z} - \text{опір при тепло-}$$

передачі від сталі одного елемента до сталі іншого елемента по довжині провідника.

Аналіз теплової моделі можна виконати матричним методом при цьому рішення системи рівнянь (матриця температур) має вид для [3]

$$\Theta = -\Lambda^{-1}P, \quad (2)$$

де Λ – звернена матриця теплових провідностей;

P – матриця потужності втрат і тепловіддачі до повітря в зазорі.

Висновки:

1. Побудована математична теплова модель якоря ТЕД дозволяє оцінити перевищення температури міді, а також перевищення температури сталі зубця по всій довжині якоря.

2. Використання даної математичної теплової моделі можливо з метою

контролю теплового стану ТЕД для визначення номінального струму з урахуванням експлуатаційних умов електрифікованого транспорту, що на

відміну від відомих моделей, дозволить прогнозувати номінальну навантажувальну здатність ТД.

Список літератури

1. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях [Текст] / Д.И. Родькин. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
2. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин [Текст] / О.Д. Гольдберг.– М.: Высш. школа, 1990.– 255 с.
3. Сипайлов, Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах [Текст] / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высш. школа, 1989. – 239 с.
4. Хараджян, А.А. Определение и разделение потерь в стали машин постоянного тока [Текст] / А.А. Хараджян // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Наукові праці КДПУ. – 2001. – Вип. 2/2001(11). – С. 64-66.
5. Сінчук, О.М. Побудова математичної теплової моделі тягового електричного двигуна постійного струму [Текст] / О.М. Сінчук, Д.Л. Сушко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Технічні науки. Серія Транспорт. – 2005. – №8(90) – Ч. 2. – С.50-54.

Ключові слова: тяговий двигун постійного струму, тепла модель, контроль теплового стану.

Анотація

У статті представлені результати побудови математичної теплової моделі якоря тягового двигуна постійного струму. Використання даної моделі можливо з метою контролю теплового стану ТЕД.

В статье представлены результаты построения математической тепловой модели якоря тягового двигателя постоянного тока. Использование данной модели возможно с целью контроля теплового состояния ТЕД.

In article presented results of construction of mathematical thermal model of anchor of hauling engine of direct current. An use of this model is possible with the purpose of control of thermal state of TED.