

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
ЗАКРИТОГО ВИКОНАННЯ, ЩО ОБДУВАЄТЬСЯ,
З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕПЛОВІ, ГІДРАВЛІЧНІ ТА АЕРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ»

для студентів спеціальності 7.050702
«Електричні машини і апарати»
денної та заочної форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою радою
НТУ «ХП»,
протокол №2 від 06.12.12.

Харків
НТУ «ХП»
2013

Тепловий розрахунок асинхронного двигуна закритого виконання, що обдувається, з короткозамкненим ротором. Методичні вказівки до розрахунково-графічного завдання з дисципліни «Теплові, гідравлічні та аеродинамічні процеси в електричних машинах» для студентів спеціальності 7.050702 «Електричні машини і апарати» денної та заочної форм навчання / уклад. Галайко Л.П., Гаєвська Н.О. – Х. : НТУ «ХП», 2012. – 30 с.

Укладачі: Л.П. Галайко
Н.О. Гаєвська

Рецензент А.Г. Мірошніченко

Кафедра електричних машин

ВСТУП

Допустимі температури активних частин належать до числа важливих факторів, що обмежують потужність електричних машин і впливають на підвищення їх надійності та досягнення найбільшої одиничної потужності. Тому теплові розрахунки електричних машин є невід'ємною частиною їх проектування. А фахівець у галузі розробки та виготовлення електричних машин повинен володіти усіма відомими методами теплових розрахунків, уміти аналізувати їх переваги і недоліки та вибрати оптимальний метод для кожного конкретного випадку.

У теперішній час набувають поширення комп'ютерні технології проектування. Застосовуються пакети прикладних програм, кількість яких невпинно зростає. Але в області теплових розрахунків вони ще не набули широкого розповсюдження в інженерній практиці.

Найчастіше використовують метод еквівалентних теплових схем заміщення. Цей метод пройшов значну апробацію як у наукових дослідженнях, так і в інженерній практиці. Метод базується на великій кількості дослідних даних, оброблених за допомогою теорії подібності. Результати теплових розрахунків методом еквівалентних теплових схем заміщення мають високий ступінь достовірності, перш за все, для електричних машин типових конструкцій.

Для теплових розрахунків нових електричних машин, конструкція яких суттєво відрізняється від типових, краще використовувати сучасні пакети прикладних програм (наприклад ANSYS, COMSOL), які дозволяють проводити розрахунок тривимірного температурного поля, а також поєднувати тепловий та вентиляційний розрахунки. Очевидно, такі розрахунки потребують комп'ютерної техніки з великими можливостями.

У даному завданні необхідно виконати тепловий розрахунок асинхронного двигуна типової конструкції, для цього застосовують метод еквівалентних теплових схем заміщення.

1. ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВОГО ЗАВДАННЯ

Виконати тепловий розрахунок асинхронного двигуна (АД) закритого виконання, що обдувається, з короткозамкненим ротором методом еквівалентних теплових схем (ТС) заміщення.

Перелік необхідних вхідних даних до розрахунку наведено в підрозділі 3.1. Конкретні значення даних студент отримує при виконанні випускного проекту бакалавра.

Необхідно виконати наступне:

- 1) ознайомитись з ТС даного типу АД (дивись [1] та розділ 2);
- 2) розрахувати потужності джерел тепловиділення;
- 3) розрахувати теплові опори ТС;
- 4) розрахувати перевищення температури у вузлах ТС;
- 5) виконати порівняння перевищення температури обмотки статора по методу ТС та по методу, застосованому у дипломному проекті бакалавра.

2. ОПИС ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АД

2.1. Опис повної теплової схеми заміщення АД

На рис. 2.1 наведено усі теплові зв'язки в двигуні, які доцільно враховувати під час попереднього розгляду задачі до внесення спрощень в ТС. Елементи двигуна, які мають власні джерела тепловиділення, позначені кружками з буквами, елементи конструкції без цих джерел – точками з цифрами, відгалуження схеми – точками без цифр.

Пазова частина обмотки статора s віддає теплоту зубцям ts і спинці ys осердя; до зубців також надходить через повітряний проміжок теплота від ротора r . З'єднавшись зі втратами в зубцях P_{ts} і спинці осердя P_{ys} , тепловий потік надходить до середньої ділянки станини 3. Паралельно цьому теплота надходить від лобових частин sh' і sh'' до навколишнього повітря $air i'$ та $air i''$. Сюди ж надходять теплові потоки від короткозамкнених кілець ротора r' та r'' . Джерела теплоти P'_{airi} та P''_{airi} складаються з вентиляційних втрат потужності, які створюються лопатками ротора. Теплота від повітря передається крайнім ділянкам станини 4 і 2 та підшипниковим щитам 5 і 1, до яких також надходять теплові потоки від втрат у підшипниках $bear$.

Істотну роль у загальному процесі відіграють теплові потоки, що проходять уздовж провідників обмоток статора і ротора. В обмотці статора вони зазвичай спрямовані від лобових частин до пазової, в обмотці ротора – навпаки. Завдяки цим потокам теплота перерозподіляється між центральним шляхом тепловідведення ($r-3$) і бічними шляхами від r' і r'' до 4, 5, 2, 1, і відбувається деяке вирівнювання температур.

Короткозамкнена обмотка ротора не ізольована від осердя, тому тепловим опором між ними можна знехтувати і втрати в обмотці та зубцях враховувати спільними.

Усі теплові потоки від джерел теплоти, що знаходяться всередині корпусу машини, віддаються навколишньому повітрю з його поверхні. Основна частина теплоти знімається повітряним потоком зовнішнього обдування зі щитів і обребреної станини. На ТС (рис. 2.1) це показано опорами із стрілками, що відходять від точок 1–5.

Найкращі умови тепловідведення мають місце на початковій ділянці обдування, де повітря ще не нагріте теплотою, що знімається, має максимальну швидкість і високий рівень турбулентності. На шляху повітряного потоку до кінця станини знижується його швидкість унаслідок розсіювання, зменшується рівень турбулентності, що призводить до підвищення температури

охолоджуваної поверхні і «перекосу» кривих розподілу температури довжиною двигуна.

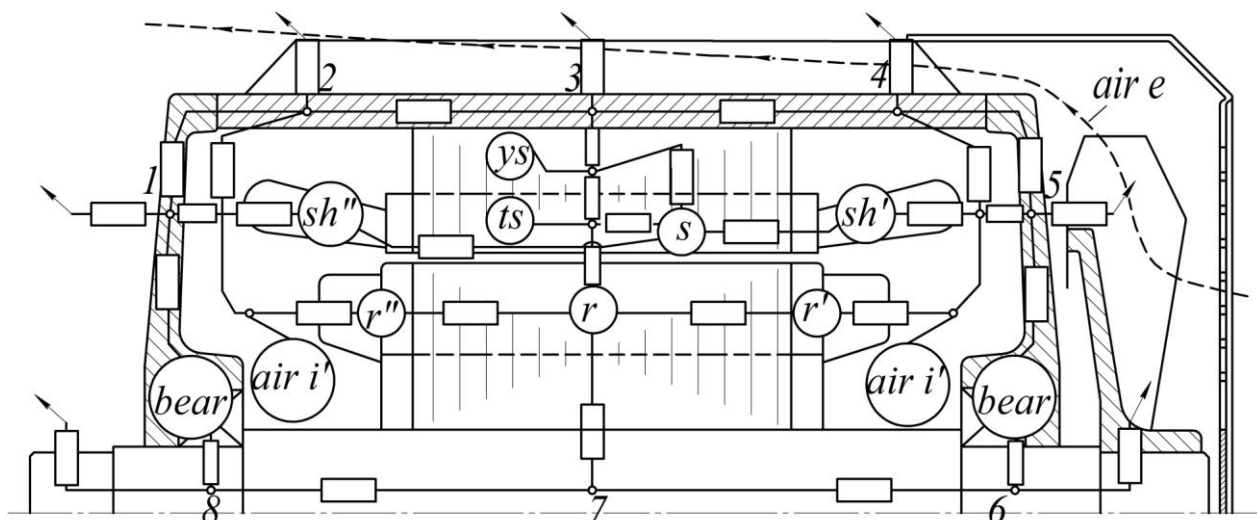


Рисунок 2.1 – Розріз короткозамкненого асинхронного двигуна закритого виконання, що обдувається, і його повна теплова схема

Теплопровідність корпусу створює умови для вирівнювання його температури за рахунок перерозподілу в ньому теплових потоків, які поступають зсередини до вузлів 1–5 теплової схеми, що враховується за допомогою теплової провідності, яка включена між цими вузлами.

2.2. Опис спрощеної теплової схеми заміщення АД

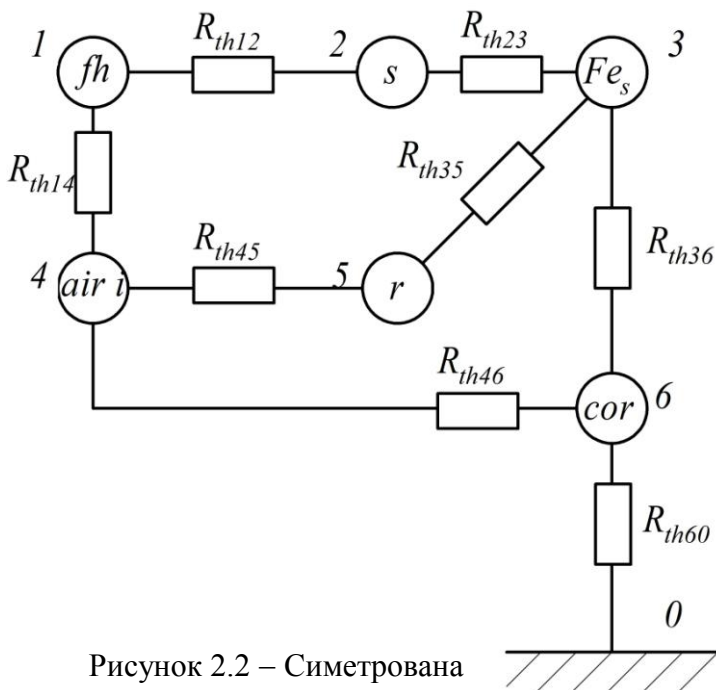


Рисунок 2.2 – Симетрована схема АД

На рис. 2.2 наведена симетрована схема АД без внутрішнього контуру циркуляції повітря. У загальний вузол *cor* об'єднані усі вузли корпусу, і у вузол *Fe_s* – зубці та спинка статора.

Симетрування – це об'єднання правої і лівої сторін теплової схеми. Це можливо не лише за симетричних умов охолодження, але й при помітно вираженій несиметрії, так як похибка розрахунку середньої температури, що виникає при цьому, в машинах малої і сере-

дньої потужності не більше 5% і може компенсуватися деяким збільшенням опорів схеми. При симетруванні ТС лобові частини ліворуч і праворуч об'єднуються в один елемент з сумарними втратами. Попарно об'єднуються щити (вузли 5 і 1), крайні ділянки станини (4 і 2), об'єми внутрішнього повітря (*air i'* та *air i''*) (рис.2.1). Вважається також, що температура об'єданого вузла дорівнює середньоарифметичній від температур початкових вузлів.

Метою розрахунку спрощених ТС є визначення середньої температури обмотки статора. Температура короткозамкненого ротора має невелику інформаційну цінність, тому усі три вузли r , r' , r'' об'єднуються в один. Похибки, що виникають при цьому, відносяться, в основному, до температури ротора.

3. ОПИС МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ

3.1. Вхідні дані для розрахунку

Вхідні дані для розрахунку з використанням спрощеної ТС наведені в таблиці 3.1. Розміри, необхідні для розрахунку, вказані на рисунках 3.1–3.4.

Таблиця 3.1 – Перелік вхідних даних для розрахунку

Назва вихідного параметра	Позначення параметра
Внутрішній діаметр осердя статора, м	d_s
Зовнішній діаметр осердя ротора, м	d_r
Довжина повітряного проміжку, м	δ
Зовнішній діаметр осердя статора, м	d_{se}
Довжина осердя статора, м	l_s
Довжина однієї лобової частини котушки, м	l_{fh}
Довжина вильоту лобової частини обмотки, м	l_{fs}
Кількість пазів статора, од.	Q_s
Висота паза статора, м	h_s
Висота паза статора без шліца, м	h_{scu}
Менша ширина паза, м	b_{s2}
Більша ширина паза, м	b_{s3}
Ширина зубця статора, м	b_{ts}
Висота спинки статора, м	h_{ys}
Діаметр ізолюваного дроту, м	d_{scis}
Діаметр неізолюваного дроту, м	d_{sc}
Кількість ефективних провідників у пазі, од.	z_{Qs}

Продовження таблиці 3.1

Товщина корпусної ізоляції, м	$b_{is\ fr}$
Висота клина, м	h_w
Довжина лопаток, м	b_{bl}
Довжина кільця, м	l_{fhr}
Висота лопаток, м	h_{bl}
Висота кільця, м	h_{fhr}
Кількість лопаток, од.	n_{bl}
Номінальна частота обертання, об/хв	n_N
Кількість пар полюсів, од.	p
Зовнішній діаметр корпусу, м	d_{cor}
Довжина корпусу, м	l_{cor}
Довжина ребер, м	l_v
Висота ребер, м	h_v
Кількість ребер, од.	N_v
Товщина ребер, м	b_v
Ширина міжреберного каналу, м	b_{kv}
Товщина щита, м	h_{sh}
Зовнішній діаметр вентилятора, м	$d_{vent\ e}$
Зовнішній діаметр машини, м	d_{he}
Електричні втрати в обмотці статора, Вт	P_{els}
Електричні втрати в обмотці ротора, Вт	P_{elr}
Магнітні втрати в осерді статора, Вт	P_{mags}
Механічні втрати, Вт	P_{mech}
Додаткові втрати, Вт	P_{ad}

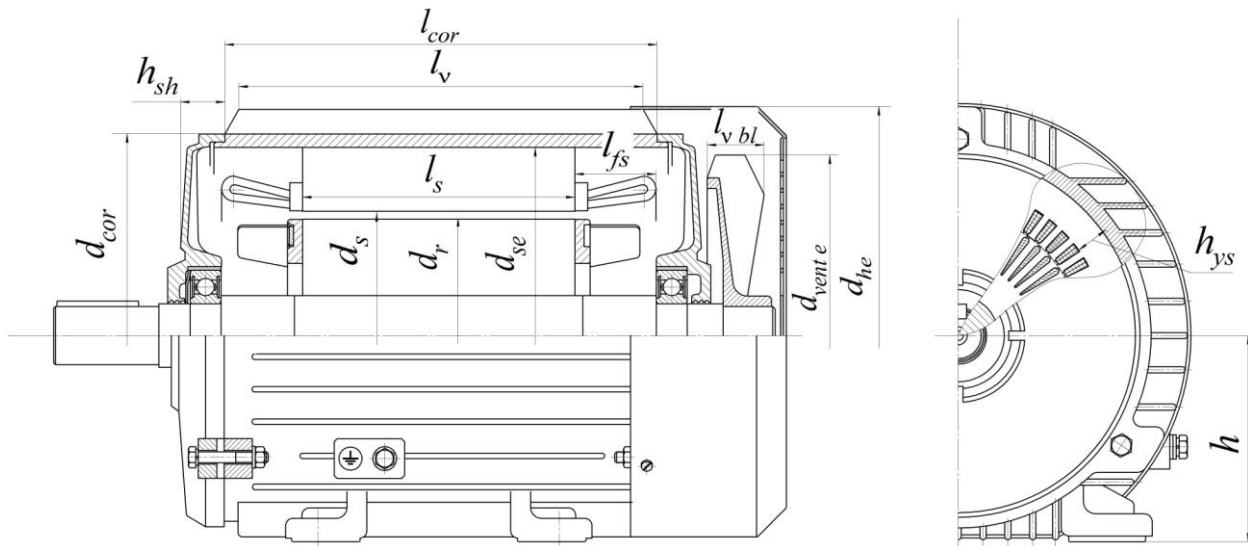


Рисунок 3.1 – Розміри короткозамкнутого асинхронного двигуна для теплового розрахунку

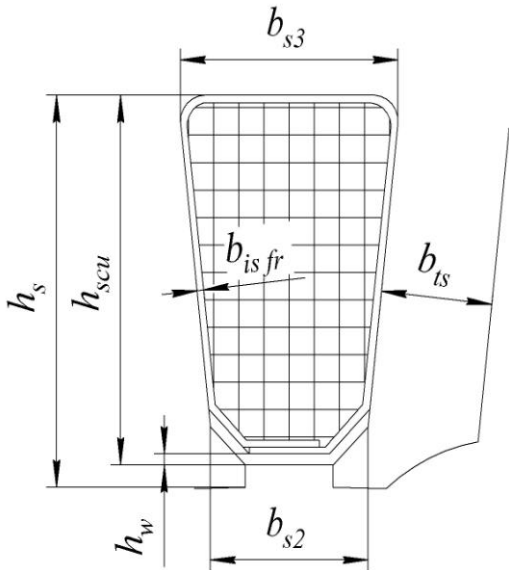


Рисунок 3.2 – Розміри паза статора

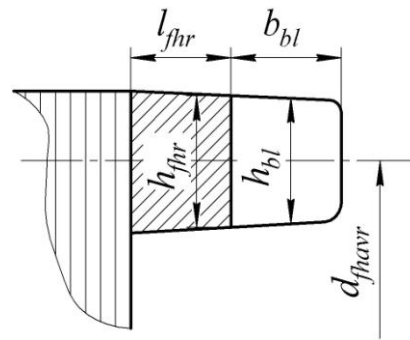


Рисунок 3.3 – Розміри короткозамикаючих кілець ротора

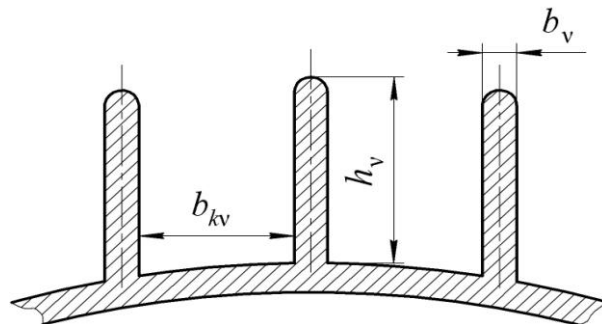


Рисунок 3.4 – Розміри міжреберних каналів станини

3.2. Розрахунок потужності джерел теплоти

Втрати в лобових частинах, Вт,

$$P_1 = \frac{P_{els} \cdot l_{fh}}{(l_s + l_{fh})}. \quad (1)$$

Втрати в пазовій частині, Вт,

$$P_2 = P_{els} - P_1. \quad (2)$$

Втрати в осерді статора, Вт,

$$P_3 = P_{mags} + 0,5 \cdot k_d \cdot P_{ad}. \quad (3)$$

Втрати в роторі, Вт,

$$P_5 = P_{elr} + 0,5 \cdot k_d \cdot P_{ad}. \quad (4)$$

Втрати у внутрішньому повітрі та корпусі, Вт,

$$P_4 = P_6 = \frac{P_{mech}}{4}. \quad (5)$$

Сумарні втрати, Вт,

$$\Sigma P = P_{els} + P_{elr} + P_{mags} + k_d \cdot P_{ad} + P_{mech}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^6 P_i = \Sigma P - 0,5 \cdot P_{mech}, \quad (7)$$

де k_d – коефіцієнт додаткових втрат, який враховує відношення реальних додаткових втрат у короткозамкнених двигунах до стандартних (0,5% від P_{in} , де P_{in} – вхідна потужність). Якщо номінальна потужність $P_N < 30$ кВт та кількість пар полюсів $p = 1$ або $p = 4$, тоді $k_d = 6$. Якщо $P_N < 30$ кВт та кількість пар полюсів $p = 2$, тоді $k_d = 4$. Якщо $P_N < 30$ кВт та кількість пар полюсів $p = 3$, тоді $k_d = 5$.

3.3. Розрахунок тепловіддачі корпуса та його температури

Окружна швидкість вентилятора, м/с,

$$v_{vent} = \frac{\pi \cdot d_{vent} \cdot n_N}{60}. \quad (8)$$

Середня швидкість повітряного потоку при вході в міжреберні канали, м/с,

$$\omega_v = 0,45 \cdot v_{vent}. \quad (9)$$

Витрати повітря в системі зовнішнього обдування, м³/с,

$$Q_v = \omega_v \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (d_{he}^2 - d_{cor}^2). \quad (10)$$

Підігрів повітря при зовнішньому обдуванні, °С,

$$\Delta\theta_v = \frac{0,7 \cdot \Sigma P}{(1100 \cdot Q_v)}. \quad (11)$$

Ефективна швидкість обдування станини на вхідній ділянці потоку, м/с,

$$\omega_{eff} = \sqrt{(0,5 \cdot v_{vent})^2 + \omega_v^2}. \quad (12)$$

Еквівалентний гідравлічний діаметр міжреберного каналу, м,

$$d_h = \frac{4 \cdot (b_{kv} \cdot h_v)}{(2 \cdot h_v + b_{kv})}. \quad (13)$$

Середня розрахункова температура охолоджувального потоку, °С,

$$\vartheta_m = \vartheta_0 + 0,5 \cdot \Delta\theta_v, \quad (14)$$

де ϑ_0 – температура зовнішнього повітря, $\vartheta_0 = 40$ °С.

Кінематичну в'язкість повітря ν_{air} , м²/с, і коефіцієнт теплопровідності λ_{air} , Вт/(м·°С), визначаємо з таблиці А1 для температури ϑ_m .

Число Рейнольдса

$$Re_{eff} = \frac{\omega_{eff} \cdot d_h}{\nu_{air}}. \quad (15)$$

Число Нусельта на вхідній ділянці визначаємо за формулою (3.43) [2] :

$$Nu_{in} = 0,626 \cdot Re_{eff}^{0,522}. \quad (16)$$

Коефіцієнт тепловіддачі (КТВ) на вхідній ділянці, Вт/(м²·°С),

$$\alpha_{in} = \frac{Nu_{in} \cdot \lambda_{air}}{d_h}. \quad (17)$$

Коефіцієнт зменшення КТВ за довжиною станини

$$\gamma = 0,04 + 0,036 \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{d_{cor}}{d_h} - 6 \right)}{24} \right). \quad (18)$$

Середній КТВ станини, Вт/(м²·°С),

$$\alpha_{cor} = \alpha_{in} \cdot d_h \cdot \left(\frac{1 - e^{-\frac{\gamma \cdot l_{cor}}{d_h}}}{\gamma \cdot l_{cor}} \right). \quad (19)$$

Коефіцієнт тепловіддачі підшипникових щитів з боку вентилятора й приводу відповідно визначаємо за експериментальними формулами, Вт/(м²·°С),

$$\alpha_{sh1} = 20 + 14,3 \cdot v_{vent}^{0,6}; \quad (20)$$

$$\alpha_{sh2} = 20 + 2,6 \cdot v_{vent}^{0,9}.$$

Площа поверхні станини без ребер, м²,

$$S_{cor} = \pi \cdot d_{cor} \cdot l_{cor}. \quad (21)$$

Площа поверхні ребер, м²,

$$S_v = 2 \cdot N_v \cdot h_v \cdot l_v. \quad (22)$$

Коефіцієнт поля

$$mh = h_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{cor}}{(b_v \cdot \lambda_{cor})}}, \quad (23)$$

де λ_{cor} – теплопровідність корпусу [1], для алюмінієвого сплаву АК10 $\lambda_{cor} = 118$ Вт/(м · °С).

Коефіцієнт ефективності ребра

$$k_{eff} = \frac{1}{mh} \cdot \left(1 - \frac{2}{e^{2mh} + 1} \right). \quad (24)$$

Площа поверхні підшипникового щита, м²,

$$S_{sh} = \pi \cdot d_{cor} \cdot (0,25 \cdot d_{cor} + 0,8 \cdot h_{sh}). \quad (25)$$

Загальний тепловий опір між корпусом та охолоджувальним потоком, К/Вт,

$$R_{th60} = \frac{1}{\left[(S_{cor} + k_{eff} \cdot S_v) \cdot \alpha_{cor} + S_{sh} \cdot (\alpha_{sh1} + \alpha_{sh2}) \right]}. \quad (26)$$

Перевищення температури корпусу, °С,

$$\Delta\theta_6 = R_{th60} \cdot \sum_{i=1}^6 P_i + 0,5 \cdot \Delta\theta_v. \quad (27)$$

3.4. Розрахунок внутрішніх теплових опорів схеми заміщення

Тепловий опір між лобовою та пазовою частинами обмотки статора, К/Вт,

$$R_{th12} = \frac{l_s + l_{fh}}{12 \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}}, \quad (28)$$

де λ_{Cu} – КТП міді, $\lambda_{Cu} = 390$ Вт/(м · °С), S_{Cu} – площа перерізу провідників обмотки, м²,

$$S_{Cu} = Q_s \cdot z_{Qs} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot d_{sc}^2. \quad (29)$$

Розраховуємо тепловий опір між обмоткою і сталлю статора.

Периметр зіткнення обмотки зі стінками паза, м,

$$\Pi = 2h_s + b_{s3} - 2h_w - 6b_{isfr}. \quad (30)$$

Тепловий опір пазової ізоляції з урахуванням проміжку від розшихтовки (0,2 мм), К/Вт,

$$R_{thpi} = \frac{1}{\Pi \cdot Q_s \cdot l_s} \left[\frac{b_{is\ fr}}{\lambda_{pi}} + \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,03 + (\lambda_f - 0,03) \cdot k_p \cdot (2 - k_p)} \right], \quad (31)$$

де коефіцієнти теплопровідності пазової ізоляції класу F $\lambda_{pi}=0,14$ Вт/(м·К), просочувального лака $\lambda_f = 0,14$ Вт/(м·К); k_p – коефіцієнт просочення, приймаємо для вакуумного просочення лаком $k_p = 0,9$.

Еквівалентний КТП обмотки з круглого проводу, Вт/(м · °С),

$$\lambda_{eq} = 0,17 \cdot \{1 + 0,81 \cdot d_{sc\ is}^2 + d_{sc\ is} \cdot (1 - 1,15 \cdot (1 - k_p)^2)\}. \quad (32)$$

Коефіцієнт форми паза, що характеризує двовимірне температурне поле (розміри в мм)

$$\xi = \frac{(b_{s2} + b_{s3})}{(4 \cdot h_s - b_{s2})}. \quad (33)$$

Тепловий опір ізоляції провідників в пазу, К/Вт,

$$R_{thpeq} = \frac{\xi \cdot (1 - 0,5 \cdot \xi)}{6 \cdot Q_s \cdot l_s \cdot \lambda_{eq}}. \quad (34)$$

Тепловий опір між обмоткою і сталлю статора, К/Вт,

$$R_{th23} = R_{thpi} + R_{thpeq}. \quad (35)$$

Розраховуємо тепловий опір між осердям статора і станиною.

Тепловий опір зубців на половину висоти, К/Вт,

$$R_{thz} = \frac{h_s}{2 \cdot Q_s \cdot b_{ts} \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \lambda_{Fe}}, \quad (36)$$

де λ_{Fe} – теплопровідність сталі, приймаємо рівною 31 Вт/(м · °С).

Тепловий опір ярма, К/Вт,

$$R_{thys} = \frac{h_{ys}}{3,14 \cdot (d_{se} - h_{ys}) \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \lambda_{Fe}}. \quad (37)$$

Тепловий опір проміжку між статором і станиною, К/Вт,

$$R_{th\Delta} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 3 \cdot d_{se})}{\pi \cdot d_{se} \cdot l_s}. \quad (38)$$

Тепловий опір між осердям статора і станиною, К/Вт,

$$R_{th36} = R_{thz} + R_{thys} + R_{th\Delta}. \quad (39)$$

Розраховуємо тепловий опір між лобовими частинами і внутрішнім повітрям. Площа поверхні тепловіддачі лобових частин, м²,

$$S_{fh} = 14 \cdot l_{fs} \cdot \left[d_s + 1,4 \cdot h_{scu} + k_s \cdot Q_s \cdot (h_s - b_{ts}) \right], \quad (40)$$

де $k_s = 0,05; 0,09; 0,1; 0,11$ для 2, 4, 6, 8-полюсних двигунів відповідно.

Окружна швидкість ротора, м/с,

$$v_r = \pi \cdot d_r \cdot n_N / 60. \quad (41)$$

Коефіцієнт тепловіддачі лобових частин, Вт/(м² · °С),

$$\alpha_{fh} = 13 + \left[\frac{19 \cdot (v_r \cdot d_r)^{0,8}}{d_{se}} \right]. \quad (41)$$

З урахуванням опору ізоляції проводів тепловий опір між лобовими частинами та внутрішнім повітрям визначаємо за формулою, К/Вт,

$$R_{th14} = \frac{1}{\alpha_{fh} \cdot S_{fh}} + \frac{1,5 \cdot R_{thpeq} \cdot l_s}{p \cdot l_{fh}}. \quad (42)$$

Розраховуємо тепловий опір між внутрішнім повітрям та корпусом. Вільна площа внутрішньої поверхні корпуса, м²,

$$S_{cor} = \pi \cdot d_{se} \cdot \left(l_{cor} - l_s + h_{sh} + \frac{d_{se}}{2} \right). \quad (43)$$

Коефіцієнт тепловіддачі повітря – корпус, Вт/(м² · °С),

$$\alpha_{cori} = 0,8 \cdot \alpha_{fh}. \quad (44)$$

Тепловий опір між внутрішнім повітрям та корпусом, К/Вт,

$$R_{th46} = \frac{1}{\alpha_{cori} \cdot S_{cor}}. \quad (45)$$

Розраховуємо тепловий опір повітряного проміжку між ротором і статором. Коефіцієнт тепловіддачі для ламінарного режиму течії, Вт/(м² · °С),

$$\alpha_{lam\delta} = \frac{3,9 \cdot 10^{-2}}{\delta}, \quad (46)$$

Коефіцієнт тепловіддачі для турбулентного режиму течії, Вт/(м² · °С),

$$\alpha_{tur\delta} = 1,82 \cdot \frac{\sqrt{v_r}}{\sqrt[4]{\delta \cdot d_r}}. \quad (48)$$

Із двох отриманих значень КТВ обираємо більше значення α_δ .

Розраховуємо тепловий опір повітряного проміжку між ротором і статором

$$R_{th35} = \frac{1}{\alpha_\delta \cdot \pi \cdot d_r \cdot l_s}. \quad (49)$$

Розраховуємо тепловий опір між торцями ротора і внутрішнім повітрям.

Поверхня тепловіддачі короткозамикаючих кілець і лопаток, м²,

$$S_r = 2\pi \cdot (d_r - h_{fhr}) \cdot (2 \cdot l_{fhr} + h_{fhr}) + 4 \cdot n_{bl} \cdot h_{bl} \cdot b_{bl}. \quad (50)$$

Коефіцієнт тепловіддачі торців ротора, Вт/(м²·°C),

$$\alpha_r = 8 + \left(\frac{11 \cdot v_r^{0,8}}{d_r^{0,2}} \right). \quad (51)$$

Тепловий опір між торцями і внутрішнім повітрям, К/Вт,

$$R_{th45} = \frac{1}{\alpha_r \cdot S_r}. \quad (52)$$

3.5 Розрахунок теплової схеми та перевищень температур в її вузлах

Шляхом перетворення теплової схеми з використанням методик перетворення, наведених в роботі [1], одержано наступні формули для розрахунку:

$$R_{th13} = R_{th12} + R_{th23}; \quad (53)$$

$$R_{th24} = R_{th12} + R_{th14}; \quad (54)$$

$$R'_{th34} = R_{th14} + R_{th13} = R_{th24} + R_{th23}; \quad (55)$$

$$R''_{th34} = R_{th35} + R_{th45}; \quad (56)$$

$$R_{th34} = \frac{R'_{th34} \cdot R''_{th34}}{R'_{th34} + R''_{th34}}; \quad (57)$$

$$P'_3 = P_3 + \frac{P_2 \cdot R_{th24} + P_1 \cdot R_{th14}}{R'_{th34}} + \frac{P_5 \cdot R_{th45}}{R''_{th34}}; \quad (58)$$

$$P'_4 = P_4 + \frac{P_2 \cdot R_{th23} + P_1 \cdot R_{th14}}{R'_{th34}} + \frac{P_5 \cdot R_{th35}}{R''_{th34}}; \quad (59)$$

$$\Delta\theta'_3 = P'_3 \cdot R_{th36}; \quad (60)$$

$$\Delta\theta'_4 = P'_4 \cdot R_{th46}; \quad (61)$$

$$R_{th\Delta} = R_{th36} + R_{th46} + R_{th34}; \quad (62)$$

Перевищення температури осердя статора, °C,

$$\Delta\theta_3 = \frac{[\Delta\theta'_3 \cdot (R_{th46} + R_{th34}) + \Delta\theta'_4 \cdot R_{th36}]}{R_{th\Delta}} + \Delta\theta_6. \quad (63)$$

Перевищення температури внутрішнього повітря, °С,

$$\Delta\theta_4 = \frac{[\Delta\theta'_4 \cdot (R_{th36} + R_{th34}) + \Delta\theta'_3 \cdot R_{th46}]}{R_{th\Delta}} + \Delta\theta_6. \quad (64)$$

Розрахунок перевищень температури обмотки статора, °С,

$$\Delta\theta'_1 = P_1 \cdot R_{th14} + \Delta\theta_4; \quad (65)$$

$$\Delta\theta'_2 = P_2 \cdot R_{th23} + \Delta\theta_3. \quad (66)$$

Перевищення температури лобової частини обмотки статора, °С,

$$\Delta\theta_1 = \frac{(\Delta\theta'_1 \cdot R_{th13} + \Delta\theta'_2 \cdot R_{th14})}{R'_{th34}}. \quad (67)$$

Перевищення температури пазової частини обмотки статора, °С,

$$\Delta\theta_2 = \frac{(\Delta\theta'_2 \cdot R_{th24} + \Delta\theta'_1 \cdot R_{th23})}{R'_{th34}}. \quad (68)$$

Середнє перевищення температури обмотки статора, °С,

$$\Delta\theta_{Cu} = \frac{(\Delta\theta_2 \cdot l_s + \Delta\theta_1 \cdot l_{fh})}{(l_s + l_{fh})}. \quad (69)$$

Перевищення температури ротора, °С,

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_5 = \frac{(\Delta\theta_3 \cdot R_{th45} + \Delta\theta_4 \cdot R_{th35} + P_5 \cdot R_{th45} \cdot R_{th35})}{R''_{th34}}. \quad (70)$$

3.6. Порівняння значень середнього перевищення температури обмотки статора за формулою (69) та за методикою з дипломного проекту бакалавра.

Значення середнього перевищення температури за формулою (69) та значення середнього перевищення температури за методикою з дипломного проекту бакалавра заносимо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2. – Середні перевищення температури обмотки статора

За формулою (69)	За методикою з дипломного проекту

Висновки: Середнє перевищення температури обмотки статора за формулою (69) повинно бути меншим, ніж отримане за методикою розрахунку з дипломного проекту. Різниця результатів обумовлена більш високою точністю методу теплових схем заміщення. Ця методика дозволяє отримувати результати більш наближені до експериментальних. Недоліком методики є більший об'єм розрахунків.

4. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Для прикладу розрахунку був прийнятий асинхронний двигун зі ступенем захисту від впливу зовнішнього середовища IP44 та за типом охолодження IC0141 потужністю 5 кВт і частотою обертання 960 об./хв. Вхідні дані до розрахунку наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вхідні дані для розрахунку

Назва вихідного параметра	Позначення параметра	Значення параметра
Внутрішній діаметр осердя статора, м	d_s	0,134
Зовнішній діаметр осердя ротора, м	d_r	0,1334
Довжина повітряного проміжку, м	δ	0,0003
Зовнішній діаметр осердя статора, м	d_{se}	0,191
Довжина осердя статора, м	l_s	0,15
Довжина однієї лобової частини котушки, м	l_{fh}	0,1376
Довжина вильоту лобової частини обмотки, м	l_{fs}	0,048
Кількість пазів статора, од.	Q_s	54
Висота паза статора, м	h_s	0,0143
Висота паза статора без шліца, м	h_{scu}	0,0138
Менша ширина паза, м	b_{s2}	0,00392
Більша ширина паза, м	b_{s3}	0,00548
Ширина зубця статора, м	b_{ts}	0,00397
Висота спинки статора, м	h_{ys}	0,0142
Діаметр ізолюваного дроту, м	d_{scis}	0,00128
Діаметр неізолюваного дроту, м	d_{sc}	0,0012
Кількість ефективних провідників у пазі, од.	z_{Qs}	19

Продовження таблиці 4.1

Товщина корпусної ізоляції, м	$b_{is\ fr}$	0,00025
Висота клина, м	h_W	0,00087
Довжина лопаток, м	b_{bl}	0,035
Довжина кільця, м	l_{fhr}	0,007
Висота лопаток, м	h_{bl}	0,02
Висота кільця, м	h_{fhr}	0,03
Кількість лопаток, од	n_{bl}	10
Номинальна частота обертання, об./хв	n_N	966
Кількість пар полюсів, од.	p	3
Зовнішній діаметр корпусу, м	d_{cor}	0,21
Довжина корпусу, м	l_{cor}	0,25
Довжина ребер, м	l_v	0,215
Висота ребер, м	h_v	0,0207
Кількість ребер, од.	N_v	32
Товщина ребер, м	b_v	0,0033
Ширина міжреберного каналу, м	b_{kv}	0,0155
Товщина щита, м	h_{sh}	0,02
Зовнішній діаметр вентилятора, м	$d_{vent\ e}$	0,199
Зовнішній діаметр машини, м	d_{he}	0,26
Електричні втрати в обмотці статора, Вт	P_{els}	539
Електричні втрати в обмотці ротора, Вт	P_{elr}	151,3
Магнітні втрати в осерді статора, Вт	P_{mags}	167
Механічні втрати, Вт	P_{mech}	13,3
Додаткові втрати, Вт	P_{ad}	25

Результати розрахунку зведено до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати теплового розрахунку асинхронного двигуна

№ формули	Розрахункова формула	Результат
(1)	$P_1 = \frac{P_{els} \cdot l_{fh}}{(l_s + l_{fh})} = \frac{539 \cdot 0,1376}{(0,15 + 0,1376)}$	257,88 Вт
(2)	$P_2 = P_{els} - P_1 = 539 - 257,88$	281,12 Вт
(3)	$P_3 = P_{mags} + 0,5 \cdot k_d \cdot P_{ad} = 167 + 0,5 \cdot 5 \cdot 25$ $k_d = 5$	223,5 Вт
(4)	$P_5 = P_{elr} + 0,5 \cdot k_d \cdot P_{ad} = 151,3 + 0,5 \cdot 5 \cdot 25$	213,8 Вт
(5)	$P_4 = P_6 = \frac{P_{mech}}{4} = \frac{13,3}{4}$	3,33 Вт
(6)	$\Sigma P = P_{els} + P_{elr} + P_{mags} + k_d \cdot P_{ad} + P_{mech} = 539 + 151,3 + 167 + 5 \cdot 25 + 13,3$	995,6 Вт
(7)	$\sum_{i=1}^6 P_i = \Sigma P - 0,5 \cdot P_{mech} = 995,6 - 0,5 \cdot 13,3$	988,95 Вт
(8)	$v_{vent} = \frac{\pi \cdot d_{vent} \cdot n_N}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,199 \cdot 960}{60}$	10 м/с
(9)	$\omega_v = 0,45 \cdot v_{vent} = 0,45 \cdot 10$	4,5 м/с
(10)	$Q_v = \omega_v \cdot (\pi/4) \cdot (d_{he}^2 - d_{cor}^2) = 4,5 \cdot (3,14/4) \cdot (0,26^2 - 0,21^2)$	0,083 м ³ /с
(11)	$\Delta\theta_v = \frac{0,7 \cdot \Sigma P}{(1100 \cdot Q_v)} = \frac{0,7 \cdot 995,6}{(1100 \cdot 0,083)}$	7,6 °С
(12)	$\omega_{eff} = \sqrt{(0,5 \cdot v_{vent})^2 + \omega_v^2} = \sqrt{(0,5 \cdot 10)^2 + 4,5^2}$	6,73 м/с
(13)	$d_h = \frac{4 \cdot (b_{kv} \cdot h_v)}{(2 \cdot h_v + b_{kv})} = \frac{4 \cdot (0,0155 \cdot 0,0207)}{(2 \cdot 0,0207 + 0,0155)}$	0,0226 м
(14)	$\vartheta_m = \vartheta_0 + 0,5 \cdot \Delta\theta_v = 40 + 0,5 \cdot 7,6$ $\vartheta_0 = 40$	43,8 °С
(15)	$Re_{eff} = \frac{\omega_{eff} \cdot d_h}{v_{air}} = \frac{6,73 \cdot 0,0226}{17,34 \cdot 10^{-6}}$ $v_{air} = 17,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	8748,08
(16)	$Nu_{in} = 0,626 \cdot Re_{eff}^{0,522} = 0,626 \cdot 8748,08^{0,522}$	71,49

Продовження таблиці 4.2

(17)	$\alpha_{in} = \frac{Nu_{in} \cdot \lambda_{air}}{d_h} = \frac{71,49 \cdot 2,79 \cdot 10^{-2}}{0,0226}$ $\lambda_{air} = 2,79 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$	88,4 Вт/(м ² ·°C)
(18)	$\gamma = 0,04 + 0,036 \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{d_{cor}}{d_h} - 6 \right)}{24} \right) = 0,04 +$ $+ 0,036 \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{0,21}{0,0226} - 6 \right)}{24} \right)$	7,27 · 10 ⁻²
(19)	$\alpha_{cor} = \alpha_{in} \cdot d_h \cdot \left(\frac{1 - e^{-\frac{\gamma \cdot l_{cor}}{d_h}}}{\gamma \cdot l_{cor}} \right) = 88,4 \cdot 0,0226 \times$ $\times \left(\frac{1 - e^{-\frac{7,27 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25}{0,0226}}}{7,27 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25} \right)$	60,7 Вт/(м ² ·°C)
(20)	$\alpha_{sh1} = 20 + 14,3 \cdot v_{vent}^{0,6} = 20 + 14,3 \cdot 10^{0,6}$	76,9 Вт/(м ² ·°C)
(20)	$\alpha_{sh2} = 20 + 2,6 \cdot v_{vent}^{0,9} = 20 + 2,6 \cdot 10^{0,9}$	40,6 Вт/(м ² ·°C)
(21)	$S_{cor} = \pi \cdot d_{cor} \cdot l_{cor} = 3,14 \cdot 0,21 \cdot 0,25$	0,165 м ²
(22)	$S_v = 2 \cdot N_v \cdot h_v \cdot l_v = 2 \cdot 32 \cdot 0,0207 \cdot 0,215$	0,285 м ²
(23)	$mh = h_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{cor}}{(b_v \cdot \lambda_{cor})}} = 0,0207 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 60,7}{(0,0033 \cdot 118)}}$ $\lambda_{cor} = 118 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$	0,366
(24)	$k_{eff} = \frac{1}{mh} \cdot \left(1 - \frac{2}{e^{2mh} + 1} \right) = \frac{1}{0,366} \cdot \left(1 - \frac{2}{e^{2 \cdot 0,366} + 1} \right)$	0,958
(25)	$S_{sh} = \pi \cdot d_{cor} \cdot (0,25 \cdot d_{cor} + 0,8 \cdot h_{sh}) =$ $= 3,14 \cdot 0,21 \cdot (0,25 \cdot 0,21 + 0,8 \cdot 0,02)$	0,0452 м ²

Продовження таблиці 4.2

(26)	$R_{th60} = \frac{1}{\left[(S_{cor} + k_{eff} \cdot S_v) \cdot \alpha_{cor} + S_{sh} \cdot (\alpha_{sh1} + \alpha_{sh2}) \right]} =$ $= \frac{1}{\left[(0,165 + 0,958 \cdot 0,285) \cdot 60,7 + 0,0452 \cdot (76,9 + 40,6) \right]}$	0,0314 К/Вт
(27)	$\Delta\theta_6 = R_{th60} \cdot \sum_{i=1}^6 P_i + 0,5 \cdot \Delta\theta_v = 0,0314 \cdot 988,95 + 0,5 \cdot 7,6$	34,8 °С
(28)	$R_{th12} = \frac{l_s + l_{fh}}{12 \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \frac{0,15 + 0,1376}{12 \cdot 390 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3}}, \lambda_{Cu} = 390 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$	0,053 К/Вт
(29)	$S_{Cu} = Q_s \cdot z_{Q_s} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot d_{sc}^2 = 54 \cdot 19 \cdot \left(\frac{3,14}{4} \right) \cdot 0,0012^2$	$1,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
(30)	$\Pi = 2h_s + b_{s3} - 2h_w - 6b_{isfr} = 2 \cdot 0,0143 + 0,00548 -$ $- 2 \cdot 0,00087 - 6 \cdot 0,00025$	0,0308 м
(31)	$R_{thpi} = \frac{1}{\Pi \cdot Q_s \cdot l_s} \left[\frac{b_{isfr}}{\lambda_{pi}} + \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,03 + (\lambda_f - 0,03) \cdot k_p \cdot (2 - k_p)} \right] =$ $= \frac{1}{0,0308 \cdot 54 \cdot 0,15} \left[\frac{0,00025}{0,15} + \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,03 + (0,14 - 0,03) \cdot 0,9 \cdot (2 - 0,9)} \right]$ <p style="text-align: center;">$\lambda_{pi} = 0,14 \text{ Вт/(м К)}; \lambda_f = 0,14 \text{ Вт/(м К)}; k_p = 0,9$</p>	0,0129 К/Вт
(32)	$\lambda_{eq} = 0,17 \cdot \{1 + 0,81 \cdot d_{scis}^2 + d_{scis} \cdot (1 - 1,15 \cdot (1 - k_p)^2)\} =$ $= 0,17 \cdot \{1 + 0,81 \cdot 0,00128^2 + 0,00128 \cdot (1 - 1,15 \cdot (1 - 0,9)^2)\}$	0,17 Вт/(м · °С)
(33)	$\xi = \frac{(b_{s2} + b_{s3})}{(4 \cdot h_s - b_{s2})} = \frac{(0,00392 + 0,00548)}{(4 \cdot 0,0143 - 0,00392)}$	0,18
(34)	$R_{thpeq} = \frac{\xi \cdot (1 - 0,5 \cdot \xi)}{6 \cdot Q_s \cdot l_s \cdot \lambda_{eq}} = \frac{0,18 \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,18)}{6 \cdot 54 \cdot 0,15 \cdot 0,17}$	0,0194 К/Вт
(35)	$R_{th23} = R_{thpi} + R_{thpeq} = 0,0129 + 0,0194$	0,0323 К/Вт
(36)	$R_{thz} = \frac{h_s}{2 \cdot Q_s \cdot b_{ts} \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \lambda_{Fe}} = \frac{0,0143}{2 \cdot 54 \cdot 0,00397 \cdot 0,15 \cdot 0,97 \cdot 31}$ <p style="text-align: center;">$\lambda_{Fe} = 31 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$</p>	0,0074 К/Вт

Продовження таблиці 4.2

(37)	$R_{thys} = \frac{h_{ys}}{3,14 \cdot (d_{se} - h_{ys}) \cdot l_s \cdot k_{Fe} \cdot \lambda_{Fe}} =$ $= \frac{0,0142}{3,14 \cdot (0,191 - 0,0142) \cdot 0,15 \cdot 0,97 \cdot 31}$	0,0057 К/Вт
(38)	$R_{th\Delta} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 3 \cdot d_{se})}{\pi \cdot d_{se} \cdot l_s} = \frac{4,5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,191)}{3,14 \cdot 0,191 \cdot 0,15}$	0,0079 К/Вт
(39)	$R_{th36} = R_{thz} + R_{thys} + R_{th\Delta} = 0,0074 + 0,0057 + 0,0079$	0,021 К/Вт
(40)	$S_{fh} = 14 \cdot l_{fs} \cdot [d_s + 1,4 \cdot h_{scu} + k_s \cdot Q_s \cdot (h_s - b_{ts})] =$ $= 14 \cdot 0,048 \cdot [0,134 + 1,4 \cdot 0,0138 + 0,1 \cdot 54 \cdot (0,0143 - 0,00397)]$	0,141 м ²
(41)	$v_r = \pi \cdot d_r \cdot n_N / 60 = 3,14 \cdot 0,1334 \cdot 960 / 60$	6,70 м/с
(42)	$\alpha_{fh} = 13 + \left[\frac{19 \cdot (v_r \cdot d_r)^{0,8}}{d_{se}} \right] = 13 + \left[\frac{19 \cdot (6,7 \cdot 0,1334)^{0,8}}{0,191} \right]$	104,0 Вт/(м ² · °С)
(43)	$R_{th14} = \frac{1}{\alpha_{fh} \cdot S_{fh}} + \frac{1,5 \cdot R_{thpeq} \cdot l_s}{p \cdot l_{fh}} = \frac{1}{104 \cdot 0,141} + \frac{1,5 \cdot 0,0194 \cdot 0,15}{3 \cdot 0,1376}$	0,0791 К/Вт
(44)	$S_{cor} = \pi \cdot d_{se} \cdot \left(l_{cor} - l_s + h_{sh} + \frac{d_{se}}{2} \right) = 3,14 \cdot 0,191 \times$ $\times \left(0,25 - 0,15 + 0,02 + \frac{0,191}{2} \right)$	0,129 м ²
(45)	$\alpha_{cori} = 0,8 \cdot \alpha_{fh} = 0,8 \cdot 104$	83,2 Вт/(м ² · °С)
(46)	$R_{th46} = \frac{1}{\alpha_{cori} \cdot S_{cor}} = \frac{1}{83,2 \cdot 0,129}$	0,093 К/Вт
(47)	$\alpha_{lam\delta} = \frac{3,9 \cdot 10^{-2}}{\delta} = \frac{3,9 \cdot 10^{-2}}{0,0003}$	130,0 Вт/(м ² · °С)
(48)	$\alpha_{tur\delta} = 1,82 \cdot \frac{\sqrt{v_r}}{\sqrt[4]{\delta \cdot d_r}} = 1,82 \cdot \frac{\sqrt{6,7}}{\sqrt[4]{0,0003 \cdot 0,1334}}$	59,24 Вт/(м ² · °С)
	$\alpha_{\delta} - \text{найбільше значення між } \alpha_{lam\delta} \text{ та } \alpha_{tur\delta}$	130,0 Вт/(м ² · °С)
(49)	$R_{th35} = \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot \pi \cdot d_r \cdot l_s} = \frac{1}{130 \cdot 3,14 \cdot 0,1334 \cdot 0,15}$	0,122 К/Вт
(50)	$S_r = 2\pi \cdot (d_r - h_{fhr}) \cdot (2 \cdot l_{fhr} + h_{fhr}) + 4 \cdot n_{bl} \cdot h_{bl} \cdot b_{bl} =$ $= 2 \cdot 3,14 \cdot (0,1334 - 0,03) \cdot (2 \cdot 0,007 + 0,03) + 4 \cdot 10 \cdot 0,02 \cdot 0,035$	0,0566 м ²

Продовження таблиці 4.2

(51)	$\alpha_r = 8 + \left(\frac{11 \cdot \nu_r^{0,8}}{d_r^{0,2}} \right) = 8 + \left(\frac{11 \cdot 6,7^{0,8}}{0,1334^{0,2}} \right)$	83,39 Вт/(м ² ·°С)
(52)	$R_{th45} = \frac{1}{\alpha_r \cdot S_r} = \frac{1}{83,39 \cdot 0,0566}$	0,212 К/Вт
(53)	$R_{th13} = R_{th12} + R_{th23} = 0,053 + 0,0323$	0,0853 К/Вт
(54)	$R_{th24} = R_{th12} + R_{th14} = 0,053 + 0,0791$	0,1321 К/Вт
(55)	$R'_{th34} = R_{th14} + R_{th13} = R_{th24} + R_{th23} = 0,0791 + 0,0853$	0,1644 К/Вт
(56)	$R''_{th34} = R_{th35} + R_{th45} = 0,122 + 0,212$	0,334 К/Вт
(57)	$R_{th34} = \frac{R'_{th34} \cdot R''_{th34}}{R'_{th34} + R''_{th34}} = \frac{0,1644 \cdot 0,334}{0,1644 + 0,334}$	0,1102 К/Вт
(58)	$P'_3 = P_3 + \frac{P_2 \cdot R_{th24} + P_1 \cdot R_{th14}}{R'_{th34}} + \frac{P_5 \cdot R_{th45}}{R''_{th34}} =$ $= 229,5 + \frac{281,12 \cdot 0,1231 + 257,88 \cdot 0,0791}{0,1644} + \frac{213,8 \cdot 0,212}{0,334}$	714,83 Вт
(59)	$P'_4 = P_4 + \frac{P_2 \cdot R_{th23} + P_1 \cdot R_{th14}}{R'_{th34}} + \frac{P_5 \cdot R_{th35}}{R''_{th34}} =$ $= 3,33 + \frac{281,12 \cdot 0,0323 + 257,88 \cdot 0,0791}{0,1644} + \frac{213,8 \cdot 0,122}{0,334}$	260,94 Вт
(60)	$\Delta\theta'_3 = P'_3 \cdot R_{th36} = 714,83 \cdot 0,021$	15,0 °С
(61)	$\Delta\theta'_4 = P'_4 \cdot R_{th46} = 260,94 \cdot 0,093$	24,3 °С
(62)	$R_{th\Delta} = R_{th36} + R_{th46} + R_{th34} = 0,021 + 0,093 + 0,1102$	0,2242 К/Вт
(63)	$\Delta\theta_3 = \frac{[\Delta\theta'_3 \cdot (R_{th46} + R_{th34}) + \Delta\theta'_4 \cdot R_{th36}]}{R_{th\Delta}} + \Delta\theta_6 =$ $= \frac{[15 \cdot (0,093 + 0,1102) + 24,3 \cdot 0,021]}{0,2242} + 34,8$	50,7 °С
(64)	$\Delta\theta_4 = \frac{[\Delta\theta'_4 \cdot (R_{th36} + R_{th34}) + \Delta\theta'_3 \cdot R_{th46}]}{R_{th\Delta}} + \Delta\theta_6 =$ $= \frac{[24,3 \cdot (0,021 + 0,1102) + 15 \cdot 0,093]}{0,2242} + 34,8 =$	55,2 °С

Закінчення таблиці 4.2

(65)	$\Delta\theta'_1 = P_1 \cdot R_{th14} + \Delta\theta_4 = 257,88 \cdot 0,0791 + 55,2$	75,6 °C
(66)	$\Delta\theta'_2 = P_2 \cdot R_{th23} + \Delta\theta_3 = 281,12 \cdot 0,0323 + 50,7$	59,8 °C
(67)	$\Delta\theta_1 = \frac{(\Delta\theta'_1 \cdot R_{th13} + \Delta\theta'_2 \cdot R_{th14})}{R'_{th34}} = \frac{(75,6 \cdot 0,0853 + 59,8 \cdot 0,0791)}{0,1644}$	68,0 °C
(68)	$\Delta\theta_2 = \frac{(\Delta\theta'_2 \cdot R_{th24} + \Delta\theta'_1 \cdot R_{th23})}{R'_{th34}} = \frac{(59,8 \cdot 0,1231 + 75,6 \cdot 0,0323)}{0,1644}$	62,9 °C
(69)	$\Delta\theta_{Cu} = \frac{(\Delta\theta_2 \cdot l_s + \Delta\theta_1 \cdot l_{fh})}{(l_s + l_{fh})} = \frac{(62,9 \cdot 0,15 + 68 \cdot 0,1376)}{(0,15 + 0,1376)}$	65,3 °C
(70)	$\Delta\theta_r = \Delta\theta_5 = \frac{(\Delta\theta_3 \cdot R_{th45} + \Delta\theta_4 \cdot R_{th35} + P_5 \cdot R_{th45} \cdot R_{th35})}{R''_{th34}} =$ $= \frac{(50,7 \cdot 0,212 + 55,2 \cdot 0,122 + 213,8 \cdot 0,212 \cdot 0,122)}{0,334}$	68,9 °C

Таблиця 3.2 – Середнє перевищення температури обмотки статора

За формулою (69)	За методикою з дипломного проекту
65,3 °C	82,0 °C

Висновки: В результаті розрахунку отримано середнє перевищення температури обмотки статора за формулою (69) меншим, ніж отримане за методикою розрахунку з дипломного проекту. Різниця результатів обумовлена більш високою точністю методу теплових схем заміщення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан – М. : Высш. шк., 1989. – 239 с.

2. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев – М. : Энергия, 1986. – 560 с.

Додаток А

Таблиця А1 – Теплофізичні властивості повітря

Температура, °С	Кінематична в'язкість $\nu_{air} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{air} \cdot 10^2, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$
- 20	11,56	2,28
0	13,28	2,44
20	15,06	2,59
40	16,96	2,76
60	18,97	2,90
80	21,09	3,05

Зміст

Вступ	3
1. Зміст розрахункового завдання	4
2. Опис теплової схеми заміщення АД	5
2.1. Опис повної теплової схеми заміщення АД	5
2.2. Опис спрощеної теплової схеми заміщення АД	7
3. Опис методики теплового розрахунку	8
3.1. Вхідні дані для розрахунку	8
3.2. Розрахунок потужності джерел теплоти	11
3.3. Розрахунок тепловіддачі корпусу та його температури	11
3.4. Розрахунок внутрішніх теплових опорів схеми заміщення	14
3.5. Розрахунок теплової схеми та перевищень температур у її вузлах	17
3.6. Порівняння значень середнього перевищення температури обмотки статора за формулою (69) та за методикою з дипломного проекту бакалавра	18
4. Приклад розрахунку	19
Література	27
Додаток А	28

Навчальне видання
**Тепловий розрахунок асинхронного двигуна закритого виконання,
що обдувається, з короткозамкненим ротором**
Методичні вказівки до розрахунково-графічного завдання
з дисципліни «Теплові, гідравлічні і аеродинамічні процеси
в електричних машинах»
для студентів спеціальності 7.050702
«Електричні машини і апарати»
денної та заочної форм навчання

Укладачі: ГАЛАЙКО Лідія Петрівна
ГАСВСЬКА Наталія Олександрівна

Роботу до видання рекомендував В.І. Мілих
Редактор Ю.І. Гуренко

План 2013 р., поз. 28
Підп. до друку 13 Формат 60x84 1/16 Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. Наклад 60 прим. Зам. №
Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»
вул. Фрунзе, 21, Харків - 2, 61002

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.