

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Яцкевич Володимир Юрійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування математичної моделі теплових процесів асинхронного двигуна
з короткозамкненим ротором
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Яцкевич В. Ю.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Голубенко Анна Анатоліївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

ст. викладач кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Консультат

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Яцкевич В.Ю. Обґрунтування математичної моделі теплових процесів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Метою роботи є розвиток теорії контролю теплових режимів роботи електродвигунів у складі загальнопромислового частотно-регульованого електроприводу засобами системи управління перетворювача частоти в процесі експлуатації.

Для досягнення зазначеної мети в роботі було поставлено та вирішено завдання вибору теплової моделі асинхронного електродвигуна, придатної для використання стосовно частотно-регульованого електроприводу.

Ключові слова: тепла модель, асинхронний двигун, частотно-регульований електропривід.

ABSTRACT

Yatskevich V. Yu. Justification of the mathematical model of thermal processes of an asynchronous motor with a short-circuited rotor. Qualifying work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The purpose of the work is the development of the theory of control of the thermal modes of operation of electric motors as part of a general industrial frequency-regulated electric drive by means of the control system of the frequency converter during operation.

To achieve the specified goal, the task of choosing a thermal model of an asynchronous electric motor, suitable for use in connection with a frequency-regulated electric drive, was set and solved in the work.

Keywords: thermal model, asynchronous motor, frequency-regulated electric drive.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	7
1.1 Методи контролю теплових процесів електродвигуна	7
1.2 Одномасова тепла модель	9
1.3 Теплова схема заміщення (багатомасова тепла модель)	11
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДВОХМАСОВОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	17
2.1 Двомасова тепла модель	17
2.2 Математичний опис двомасової термодинамічної моделі	20
2.3 Врахування особливостей двигуна закритого виконання	26
Висновки по розділу 2	29
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАХИСТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	31
Висновки по розділу 3	40
ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

ВСТУП

Сьогодні асинхронні електроприводи споживають близько 60% всієї електроенергії. Експлуатація електроприводів в Україні та Європі здійснюється з різним ступенем навантаженості. Коефіцієнт використання у Європі приймається рівним $0,6 \div 0,7$, а в Україні він дорівнює $0,3 \div 0,4$. Це веде до збільшення втрат і, отже, зниження ККД.

Сьогодні більша частина електроприводів, що вводяться в експлуатацію, з асинхронним електродвигуном є частотно-регульованими. Основними проблемами у плані надійності для цього сучасного електроприводу є вибір потужності у процесі проектування та його тепловий захист у процесі роботи.

Сучасні перетворювачі частоти вітчизняних та зарубіжних фірм мають вбудований часовострумний захист, що забезпечує відключення двигуна у разі його перегріву в результаті перевантаження або неправильного налаштування законів частотного регулювання. У відомих (описаних у літературі) вітчизняних рішеннях теплова модель зводиться до аперіодичної ланки, на вхід якої подається квадратичне значення струму, нормоване щодо номінального значення. Аперіодична ланка може змінювати постійну часу в залежності від вихідної частоти, щоб правильно відображати зміну тепловіддачі, яка пов'язана зі зміною частоти обертання двигуна, що самовентильюється. У зарубіжних перетворювачах частоти відомих фірм застосовуються рішення, які за зовнішніми ознаками оперують точнішою моделлю, проте опис моделей відсутній у відкритій літературі, оскільки є «ноу-хау» компаній.

Облік теплових втрат, нагрівання частин електродвигуна можна виконувати за електричною моделлю електроприводу та тепловою моделлю електродвигуна при відомому законі регулювання, струмах фаз та швидкості обертання (можливий і варіант рішення без датчика швидкості), що дозволить оцінити тепловий стан електродвигуна в процесі експлуатації з метою його захисту від перегріву. Розвиток обчислювальних можливостей мікроконтролерів систем керування електроприводів дозволяє застосувати

методи чисельного інтегрування для прорахунку електричних та теплових моделей у реальному часі.

Таким чином, розвиток теорії захисту частотно-регульованого асинхронного електроприводу від перегріву засобами системи управління перетворювача частоти з використанням чисельних методів є актуальним завданням та дозволяє сформулювати мету кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є розвиток теорії контролю теплових режимів роботи електродвигунів у складі загальнопромислового частотно-регульованого електроприводу засобами системи управління перетворювача частоти в процесі експлуатації.

Для досягнення зазначеної мети в роботі було поставлено та вирішено такі завдання:

1. Вибір теплової моделі асинхронного електродвигуна, придатної для використання стосовно частотно-регульованого електроприводу.
2. Розробка методики експериментального визначення параметрів теплової моделі.
3. Розробка методики оцінки теплового стану частотно-регульованого асинхронного електродвигуна, що підходить для теплового захисту асинхронного електродвигуна засобами системи керування перетворювача частоти.
4. Перевірка адекватності розробленої теплової моделі та методів оцінки теплового стану.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі завдань використовувалися: теорія електроприводу, теоретичні основи електротехніки, теорія узагальненої електромеханічної машини.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Яцкевич В.Ю. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Студентські наукові читання : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських

наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 березня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 129 с.

Гончаренко Ю. П., Яцкевич В.Ю. АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАХИСТІВ
ДЛЯ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Студентські наукові читання : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 березня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 134 с.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

На відміну від силових трансформаторів та кабелів, нормативні документи щодо розрахунку теплових процесів в електродвигунах практично відсутні. Існують лише найпростіші рекомендації для визначення температур їх різних елементів. Докладніше розглядаються методи вимірювання температур.

1.1 Методи контролю теплових процесів електродвигуна

У [6] наведено три методи контролю теплових процесів електродвигуна:

- метод опору;
- метод вбудованих датчиків температури;
- метод термометра.

У методі опору використовується залежність електричного опору обмоток двигуна від температури. Виконується непрямий вимір середньої температури обмотки як при знятій, так і при поданій напрузі. Основний недолік даного методу - значні апаратні витрати у випадку двигунів, що працюють під напругою[6].

Другий метод передбачає наявність вбудованих датчиків температури в статорних обмотках. Це можливо лише на етапі виготовлення двигуна. Лише небагато з наявних в експлуатації двигунів мають такі датчики.

У методі термометра здійснюється контроль температури поверхні двигуна. При цьому інформація про його внутрішні температури відсутня.

За темою математичного моделювання теплових процесів в електродвигунах є чимало наукових публікацій. Наведені в них методики можна розділити на два класи: які використовують сіткові методи та ті які використовують малу кількість теплових однорідних тіл.

Перший клас методик передбачає наявність докладних відомостей про внутрішні конструктивні елементи електродвигуна та великий обсяг обчислень за допомогою спеціальних комп'ютерних програм, таких як ANSYS, що реалізують розрахунок теплових полів на основі сіткових методів. В [2]

розглядаються особливості конвективних повітряних потоків в охолоджуючих каналах двигуна. Наводяться відповідні критеріальні рівняння та розрахункові співвідношення для числа Нуссельта за природної та примусової конвекції. Розрахунки надані лише для стаціонарних теплових процесів. У [3] методом кінцевих елементів вирішується завдання моделювання нестаціонарних теплових процесів у статорі двигуна. Наведено результати експериментальних досліджень, що показують, що математична модель має низьку похибку у статиці, але у динаміці дає помилку до 10 °С.

Другий клас методик розрахунку теплових процесів та у двигуні базується на низці суттєвих припущень, але при цьому не має значних вимог до обчислювальних потужностей і може застосовуватись у програмному забезпеченні промислових приладів. Так у [5] розглядається чотиримасова модель двигуна для нестаціонарного теплового режиму, що враховує вплив найвищих гармонічних складових струмів статора. Розрахункові співвідношення для обліку температури зовнішнього середовища, що охолоджує, не наводяться. У [5] запропоновано математичну модель нестаціонарних теплових процесів двигуна AIP160S4 як системи з 16 однорідних тіл. Система диференціальних рівнянь вирішена методом Адамса. Побудовано часові залежності для різних вузлів двигуна. Результатів експериментальних досліджень у статті відсутні. У [6] розглянуто теплову модель двигуна як системи з 17 однорідних тіл, що враховує механічні втрати в підшипниках. Дано порівняння розрахункових та вимірних значень температур статора та підшипникового щита двигуна. У [18] розроблено методику експериментального визначення параметрів двомасової теплової моделі двигуна. Методика потребує значної кількості випробувань.

В цілому, можна відзначити, що при підвищенні порядку математичної моделі зростає точність розрахунків, але зростають вимоги до обчислювальних потужностей пристрою, особливо для нестаціонарних теплових процесів. Це ускладнює реалізацію систем контролю теплових процесів у двигуні в реальному часі. Математичні моделі з малою кількістю однорідних теплових

тіл досить просто реалізуються в апаратній частині, але дають високі похибки по відношенню до реальних теплових процесів у двигуні. Отже, завдання розробки математичної моделі двигуна, що дозволяє розраховувати температури його вузлів у реальному часі та реалізується на основі мікропроцесорної техніки, є актуальним.

Розроблятимемо математичну модель для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором як мають відносно просту конструкцію та широке поширення в електротехніці.

Таким чином, метою роботи є створення математичної моделі теплових процесів асинхронного електродвигуна, що дозволяє в режимі реального часу виконувати розрахунок температур його внутрішніх елементів.

При частотному регулюванні електродвигун, як правило, експлуатується при змінних потоці, тепловіддачі та співвідношеннях втрат у статорному та роторному ланцюгах. Разом з тим найбільш критичною до нагрівання частиною асинхронного електродвигуна є ізоляція обмотки статора [19]. За даними [20] частка відмов унаслідок пошкодження обмоток для асинхронних електродвигунів потужністю понад 5 кВт становить 85-95%.

1.2 Одномасова тепла модель

В основу найпростішої теплової моделі покладено рівняння теплового балансу [1, 13]. При побудові даної моделі робляться такі припущення - електродвигун представляється як однорідна маса з рівномірно розподіленими джерелами тепла, з нескінченною внутрішньою теплопровідністю, з тепловіддачею, пропорційної різниці температури двигуна та навколишнього середовища.

Рівняння теплового балансу даної теплової моделі представлено так [1]:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (1.1)$$

де ΔP – потужність втрат,

A – коефіцієнт тепловіддачі,

C - теплоємність,

$\tau = \theta_{\text{дв}} - \theta_{\text{нс}}$ – різниця температури двигуна та навколишнього середовища.

Розділивши (1.1) на $A d\tau$, отримаємо

$$\tau + T_T \frac{d\tau}{dt} = \tau_{\text{кін}}, \quad (1.2)$$

де $T_T = C/A$ – теплова постійна нагріву,

$\tau_{\text{кін}} = \Delta P/A$ – усталене значення перегріву.

Одержаний вираз відповідає інерціальній ланці. При постійних втратах в двигуну і постійній тепловіддачі в зовнішнє середовище перевищення температури змінюється по експоненціальному закону (рисунок 1.1):

$$\tau = (\tau_{\text{поч}} - \tau_{\text{кін}}) \cdot e^{-t/T_T} + \tau_{\text{кін}}, \quad (1.3)$$

де $\tau_{\text{поч}}$ – перегрів в початковий момент часу.

Даним рівнянням відповідає структурна схема динамічної теплової моделі, яка приведена на рисунку 1.2. Теплова модель представляється в вигляді аперіодичної ланки, на вхід якої подається потужність втрат, і на виході котрої — перегрів.

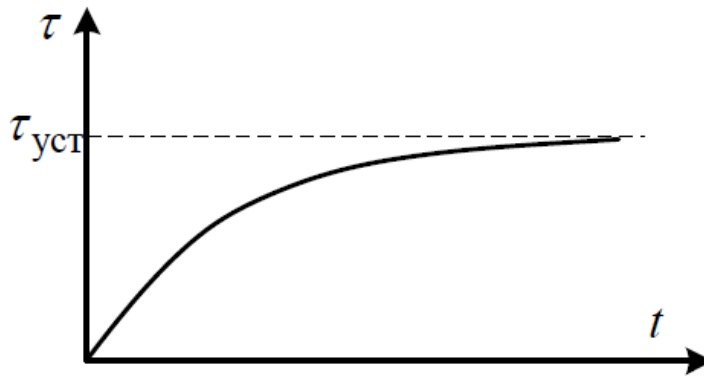


Рисунок 1.1 – Зміна перегріву для одномасової теплової моделі

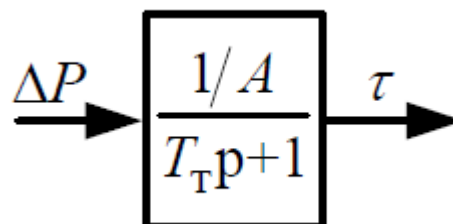


Рисунок 1.2 – Структурна схема динамічної теплової моделі

У класичних непрямих методах перевірки електродвигуна за нагріванням (метод середніх втрат і метод еквівалентних величин) використовується саме дана теплова модель електродвигуна.

До переваг одномасової моделі можна віднести її простоту і надійність оцінки теплового стану двигуна при його роботі з постійною потужністю (втрати в двигуні і тепловий потік в двигуні постійні) і незмінною температурою навколишнього середовища. Параметри такої моделі можна опосередковано розрахувати з паспортних даних електричного двигуна.

Одномасова модель має такі недоліки:

- модель розрахована на постійне співвідношення втрат у статорі та роторі;
- дуже грубі припущення, що застосовуються для складання одномасової моделі, можуть спричинити помилку в розрахунках оцінки теплового стану;
- модель погано застосовна для більшості частотно-регульованих застосувань, де регулювання швидкості здійснюється в широкому діапазоні з нелінійним налаштуванням кривої напруги функції частоти.

1.3 Теплова схема заміщення (багатомасова теплова модель)

У загальному випадку електричний двигун є сукупністю елементів (обмотки, магнітопровід і механічні вузли), кожен з яких має своє джерело тепла, мають різну теплоємність, з різною тепловіддачею і нагріваються до різних температур [4].

При побудові такої теплової моделі необхідно дотримуватись припущень, що застосовуються і для одномасової теплової моделі: кожен обраний елемент електродвигуна є однорідним тілом з рівномірно розподіленими джерелами тепла та з нескінченною внутрішньою теплопровідністю. Вся теплова система машини замінюється еквівалентною електричною системою.

Створення її засноване на аналогії теплових потоків та електричних струмів, теплових та електричних опорів.

$$Q = \Delta\tau/R_T, \quad (1.4)$$

$$I = \Delta U / R_E, \quad (1.5)$$

де Q - тепловий потік, еквівалентний струму I ;

Δt – перепад температур, еквівалентний ΔU – різниці потенціалів;

R_T – тепловий опір, еквівалентний електричному опору R_E .

Робиться заміна всіх ділянок двигуна (однорідних у тепловому відношенні) еквівалентними тепловими опорами [5] і для них записується система рівнянь теплового балансу. Цей спосіб найчастіше використовується в проектуванні.

Приклади таких схем заміщення представлені рисунки 1.3 і 1.4. У першому випадку статор розбивають на три однорідних в тепловому відношенні тіла, що є джерелами тепла:

- пазова та лобова частини обмотки із втратами в них P_L, P_{II} ;
- сталеве осердя із втратами P_{OC} .

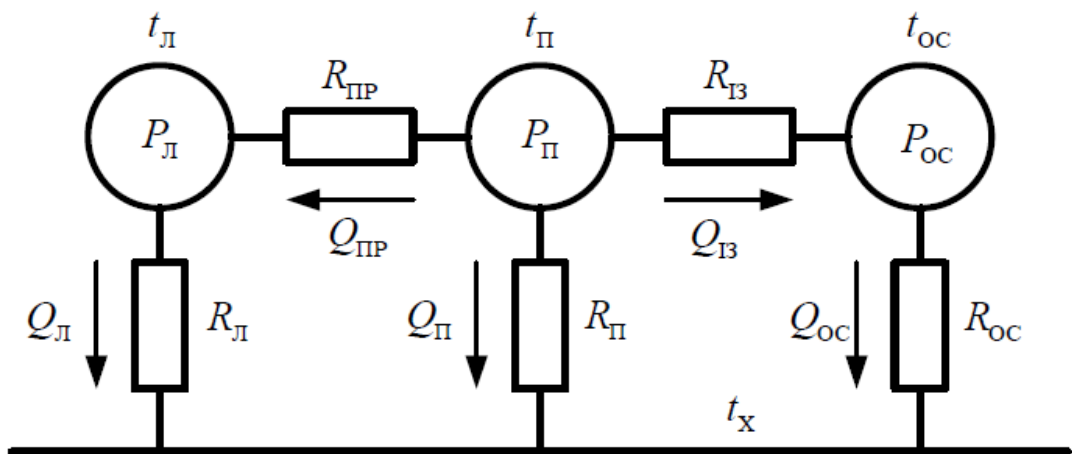


Рисунок 1.3 – Схема заміщення статора для трьох джерел тепла

На рисунку 1.3 показані середні температури джерел тепла (пазової частини обмотки t_{II} , лобових частин t_L і осердя статора t_{OC}), теплові опори (лобових частин обмотки R_L , пазової частини R_{II} і сердечника R_{OC} , між пазової та лобової частинами обмотки $R_{IIП}$, між пазовою частиною обмотки та осердям R_{OC}), теплові потоки в двигуні (Q_L , $Q_{IIП}$, Q_{II} , Q_{OC} , Q_{OC}) та температура навколишнього середовища t_x .

У другому випадку [18] асинхронний двигун розглядається як система з наступних теплових однорідних тіл: ротор, повітряний зазор, статор, корпус і

внутрішнє охолоджувальне середовище, зовнішнє охолоджувальне середовище.

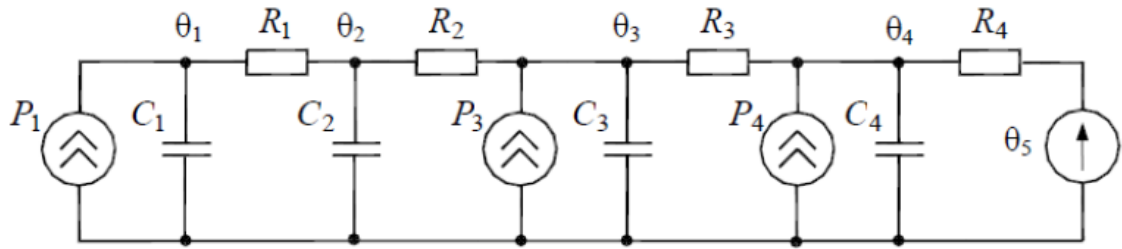


Рисунок 1.4 – Теплова схема заміщення асинхронного двигуна для чотирьох елементів

На рисунку 1.4 прийнято такі позначення: $\theta_1 - \theta_5$ – температури відповідних однорідних тіл, $R_1 - R_4$ – теплові опори відповідних однорідних тіл, $C_1 - C_4$ – теплоємності відповідних однорідних тіл, а P_1 – втрати активної потужності в роторі, P_3 – у статорі, P_4 – у корпусі.

Наприклад, [18] представлена теплова схема заміщення асинхронного двигуна, що містить п'ять активних елементів: корпус двигуна, ротор, пазову частину статора обмотки, сталь статора і лобову частину статора обмотки.

Автори пропонують використовувати цю теплову модель для релейного захисту від навантаження асинхронного двигуна. До кожного елемента складається рівняння теплового балансу, що враховує теплові властивості кожного елемента.

Вирішивши систему таких рівнянь, розраховують значення температур вибраних елементів машини.

На рисунку 1.5 зображено у загальному вигляді таку еквівалентну теплову схему асинхронного двигуна з прив'язкою параметрів до основних елементів машини.

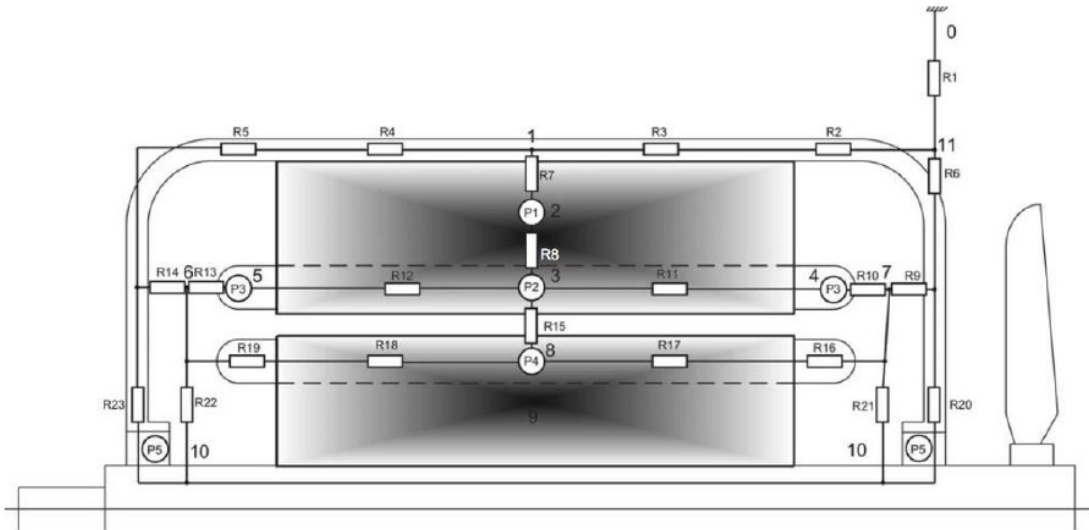


Рисунок 1.5 -Еквівалентна теплова схема асинхронного двигуна

Для підтвердження точності розрахунку температури за допомогою багатомасової моделі у статті представлені отримана в ході експерименту крива нагріву обмотки статора та криві нагріву обмоток для одномасової та п'ятимасової теплової моделі у повторно-короткочасному режимі роботи (рисунок 1.6).

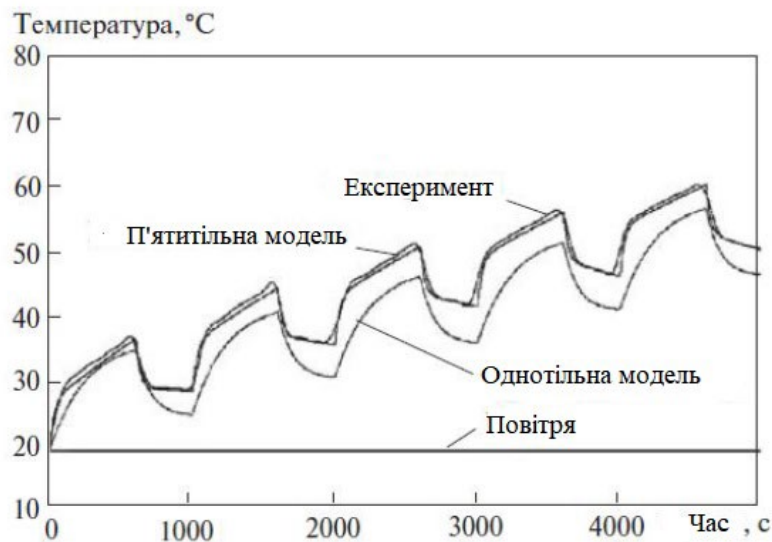


Рисунок 1.6 – Крива нагріву обмотки статора АД та розрахункові криві для повторно-короткочасного режиму

У [19] для частотно-регульованого асинхронного електродвигуна розглядаються нестационарні теплові стани, які можливі під час роботи двигуна

- для розрахунку стану моделі необхідно знати специфічні параметри електродвигунів та повні дані щодо використовуваних матеріалів (маси міді, сталі та інше), які зазвичай відомі тільки заводам-виробникам;
- необхідно з високою точністю вимірювати температуру у різних точках двигуна за допомогою впроваджених датчиків температури;
- за великої кількості компонентів дуже складно встановити параметри такої моделі експериментальним чи розрахунковим шляхом у режимі реального часу;
- розв'язання системи рівнянь теплового балансу для кожного елемента схеми асинхронного двигуна - складне завдання і займає досить великий час.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДВОХМАСОВОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

При побудові багатомасової термодинамічної моделі (ТДМ) для розрахунку її параметрів потрібен великий обсяг інформації про двигун. Така інформація, як правило, доступна тільки при проектуванні електричної машини. Фахівці, які працюють в галузі електроприводу, в більшості випадків не мають доступу до повної інформації, необхідною для розрахунку параметрів скільки-небудь складної ТДМ. Це дозволяє зробити висновок про те, що особливе значення в практичному плані набуває двомасова ТДМ АД. Така модель потребує невеликого обсягу інформації для визначення своїх параметрів, але, на відміну від одномасової моделі, дозволяє значно точніше відтворювати динаміку температури найбільш критичних до нагрівання частин артеріального тиску за рахунок виділення цих частин в окремий вузол [13, 14]. Цей висновок визначає необхідність розробки способів визначення параметрів двомасової ТДМ АД при обмеженому обсязі інформації про двигун. Додатковий інтерес до визначення параметрів двомасових моделей АД викликає і можливість використання їх для побудови засобів захисту електродвигуна [15, 16].

Таким чином, постає завдання отримання простих аналітичних співвідношень, придатних для розрахунку параметрів двомасової ТДМ АД при обмежений обсяг вихідних даних. Тут найбільшу складність становить визначення теплових провідностей цієї моделі.

2.1 Двомасова теплова модель

Розрахункова практика та експериментальні дослідження показують, що задовільні моделі нагрівання електричних машин для попереднього вибору електродвигуна та перевірки їх за тепловим режимом можна отримати, прийнявши деякі спрощення, що не спотворюють фізичну картину процесів нагріву [20].

Для цього випадку двигун представляється сукупністю двох однорідних елементів із нескінченно великою внутрішньою теплопровідністю. Це дозволяє суттєво спростити розрахунки. Може здатися, що спрощення розрахунків погіршує точність оцінки температур і зрештою захисту електродвигуна, проте це так, лише за умови, що всі параметри складнішої системи рівнянь опису теплового стану машини відомі. Спрощення дозволяє дійти такого числа параметрів, визначити значення яких стає можливим за мінімальне розумне число експериментів та/або розрахунків. У літературі пропонуються такі методи поділу на маси.

2.1.1 Сталь статора та ротора, обмотки статора та ротора

[3] пропонується розділяти електричну машину на дві маси, одна з яких представляє обмотки двигуна з теплоємністю C_1 , а інша - сталь корпусу і магнітопроводів машини з теплоємністю C_2 . Приймається, що в будь-який момент часу температура в межах кожної мас однакова, тобто теплопровідність міді і сталі нескінченна. Різниця температур між цими двома масами визначається наявністю теплового опору ізоляції між міддю та сталлю.

Структурна схема даного поділу на маси представлена на рисунку 2.1.

Для такого поділу записується система з двох рівнянь, що описують тепловий стан моделі. Рішенням для такої системи є рівняння для перегріву першої та другої мас. Варіюючи співвідношення вхідних в отримані рівняння параметрів, можна провести аналіз теплових режимів, що встановилися, для двигунів з різними типами систем охолодження та при різних співвідношеннях втрат, що викликають нагрівання мас.

На рисунку 2.1 прийнято такі позначення: ΔP_M – втрати у міді, ΔP_C – втрати в сталі, C_1 – теплоємність першої маси, C_2 – теплоємність другої маси, τ_1, τ_2 – перегрів першої та другої мас відповідно, A_1 – коефіцієнт тепловіддачі першої маси, A_2 – коефіцієнт тепловіддачі другої маси, A_{12} – коефіцієнт теплопередачі між міддю та сталлю.

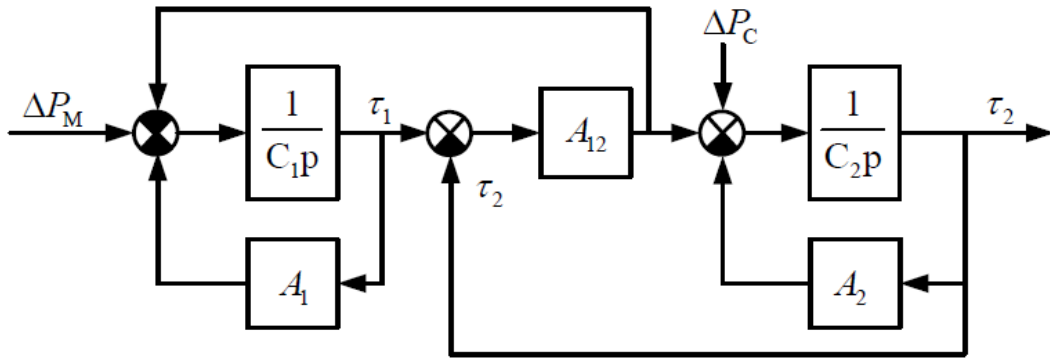


Рисунок 2.1 – Структурна схема двоступінчастої теплової моделі двигуна

2.1.2 Обмотки та сталь статора, обмотки та сталь ротора

У [2] пропонується модель з поділом на масу статора та ротора, яка є більш підходящою для частотно-регульованого приводу.

На відміну від одномасової теплової моделі дана модель включає втрати ротора і теплообмін між ротором і статором.

Така тепла модель використовує опори ротора як показник температури ротора і, отже, теплових умов роботи двигуна, а також корелює температуру статора обмотки з температурою ротора шляхом моделювання їх відносин з тепловим опором в повітряному зазорі. Вона здатна відстежувати температури обмотки статора під час роботи, перевантажень і, отже, забезпечує адекватний захист від перегріву.

Теплова модель із зосередженими тепловими ємностями та резисторами першої та другої мас, призначена для захисту гарячої точки обмотки статора від перегріву під час роботи в умовах перевантаження представлена на рисунку 1.10.

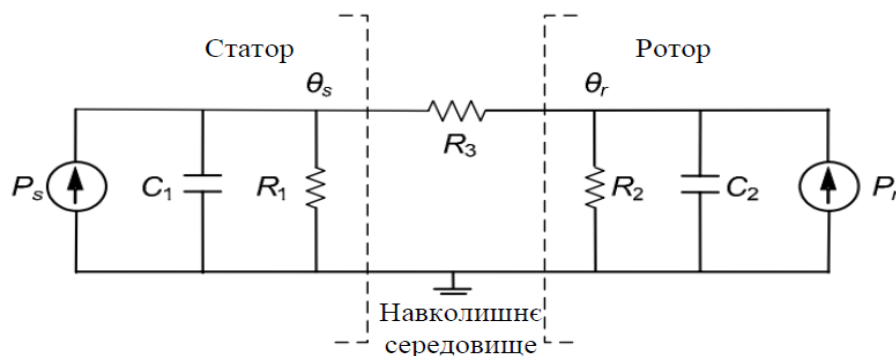


Рисунок 2.2 – Теплова модель асинхронного двигуна із зосередженими тепловими ємностями та резисторами:

P_s – втрати у статорі, P_r – втрати у роторі; Θ_s – перегрів статора щодо навколишнього середовища, Θ_r – перегрів ротора щодо навколишнього середовища, C_1 – теплова ємність статора, C_2 – теплова ємність ротора, R_1 – тепловий опір статора, R_2 – тепловий опір ротора, R_3 – тепловий опір, що з теплопередачею від ротора до статора через повітряний зазор.

Структурна схема даного поділу на маси представлена малюнку 2.3.

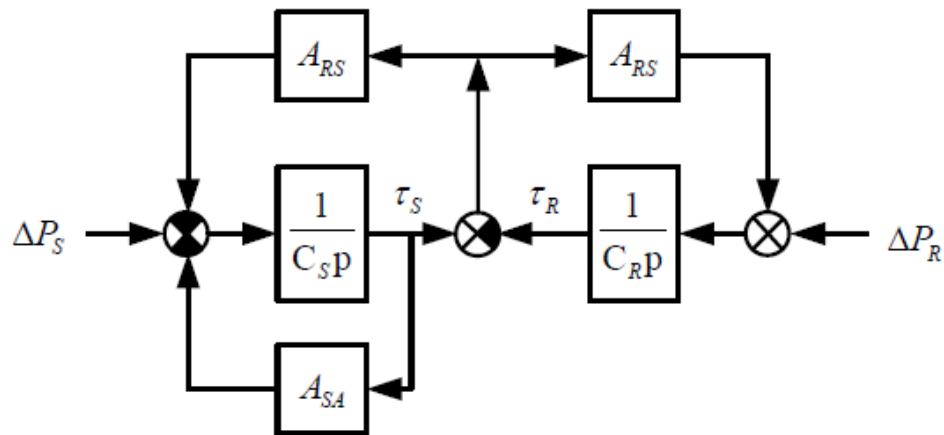


Рисунок 2.3 – Структурна схема теплової моделі

На рисунку 2.3 прийняті такі позначення: ΔP_s – втрати у статорі, ΔP_r – втрати у роторі, C_s – теплоємність статора, C_r – теплоємність ротора, τ_s, τ_r – перегріви статора та ротора відповідно, A_{SA} – коефіцієнт тепловіддачі в довкілля, A_{RS} – коефіцієнт теплопередачі між статором та ротором.

2.2 Математичний опис двомасової термодинамічної моделі

Розглянемо двомасову модель АТ, в котрій перший вузол є обмоткою статора, а другий - решту машини. Теплові процеси в такій моделі описуються двома диференціальними рівняннями, отриманими з рівнянь термодинамічного балансу:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \lambda_{11}\tau_1 - \lambda_{12}\tau_2 &= \Delta P_1; \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \lambda_{21}\tau_1 - \lambda_{22}\tau_2 &= \Delta P_2, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де C_1 та C_2 – теплоємності елементів, віднесених до першого та другого вузла моделі; ΔP_1 та ΔP_2 – потужності втрат у цих вузлах; τ_1 та τ_2 – перевищення

температури відповідних вузлів над температурою охолоджуючого середовища; λ_{12} – теплова провідність між першим та другим вузлом (тут вважаємо, що $\lambda_{21} = \lambda_{12}$); $\lambda_{11} = \lambda_{10} + \lambda_{12}$; $\lambda_{22} = \lambda_{20} + \lambda_{12}$; λ_{10} та λ_{20} – теплові провідності від вузлів моделі до охолоджуючого середовища.

Системі рівнянь (2.1) відповідає структурна схема, показанная на рисунку 2.4.

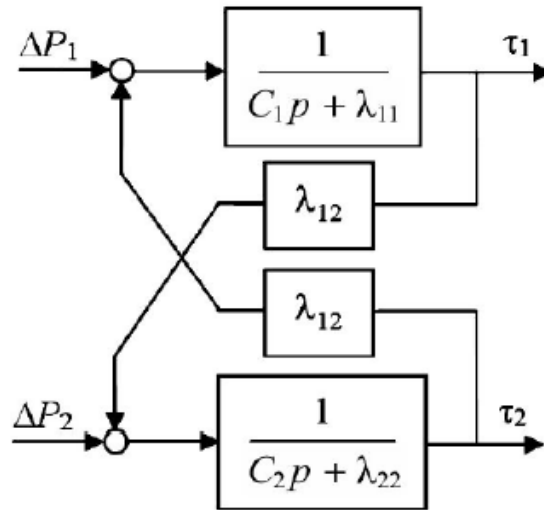


Рисунок 2.4 – Структурная схема двомасової термодинамічної моделі АД

Якщо знехтувати впливом температури на теплоємності та теплопровідності моделі, то система (2.1) може розглядатися як лінійна. В цьому випадку для незмінних у часі потужностей втрат її аналітичне рішення виглядає таким чином[4]:

$$\tau_1 = A_1 \exp(-1/T_1) + A_2 \exp(-1/T_2) + \tau_{1уст}; \quad (2.2)$$

$$\tau_2 = A_3 \exp(-1/T_1) + A_4 \exp(-1/T_2) + \tau_{2уст}. \quad (2.3)$$

де A_1, A_2, A_3, A_4 – постійні, що залежать від початкових умов та потужності втрат; $\tau_{1уст}$ - усталене значення перевищення температури першого вузла моделі (обмотки статора) над температурою охолоджуючого середовища[4]

$$\tau_{1уст} = (\lambda_{12}\Delta P_2 + \lambda_{22}\Delta P_1)(\lambda_{11}\lambda_{22} - \lambda_{12}^2)^{-1}; \quad (2.4)$$

$\tau_{2уст}$ - значення перевищення температури другого вузла моделі над температурою охолоджуючого середовища

$$\tau_{2ycm} = (\lambda_{12}\Delta P_1 + \lambda_{11}\Delta P_2)(\lambda_{11}\lambda_{22} - \lambda_{12}^2)^{-1}; \quad (2.5)$$

T_1 і T_2 - постійні часу ($T_2 > T_1$).

Значення постійних часу T_1 і T_2 визначаються модулем зворотної величини коренів характеристичного полінома системи (2.1) [5]:

$$T_1 = 2C_1C_2[\lambda_{22}C_1 + \lambda_{11}C_2 + D]^{-1} \quad (2.6)$$

$$T_1 = 2C_1C_2[\lambda_{22}C_1 + \lambda_{11}C_2 - D]^{-1} \quad (2.7)$$

де

$$D = (C_2^2\lambda_{11}^2 - 2C_1C_2\lambda_{11}\lambda_{22} + C_1^2\lambda_{22}^2 + 4C_1C_2\lambda_{12}^2)^{0,5}.$$

Співвідношення для визначення параметрів двомасової ТДМ

Рішенням системи (2.1) для номінального усталеного режиму, що встановився, є величини τ_{1ycTN} і τ_{2ycTN} . В якості τ_{1ycTN} прийемо допустиму величину перевищення температури обмотки за ДСТУ.

Тоді τ_{2ycTN} можемо виразити як $\tau_{2ycTN} = \vartheta_N \tau_{1ycTN}$, що дає можливість записати рішення системи (2.1) для номінального встановленого режиму у вигляді [4]

$$\begin{aligned} \lambda_{11} - \lambda_{12}\vartheta_N &= \Delta P_{1N} / \tau_{1ycmN}; \\ \lambda_{22}\vartheta_N - \lambda_{12} &= \Delta P_{1N} / \tau_{2ycmN}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

У систему (2.8) входять три невідомі величини теплових провідностей, крім того, вона не містить інформацію про величини теплоємностей C_1 та C_2 , що визначають динамічні властивості моделі. Величина ϑ_N також у загальному випадку незвідома. Отже, для визначення всього необхідного набору двомасових параметрів ТДМ потрібна додаткова інформація.

Врахуємо, що для ТДМ в електроприводі дуже важливо забезпечити адекватне відтворення моделлю динаміки зміни температури при перехідних процесах. Тому для доповнення інформації, що міститься в рівняннях (2.6), користуємося виразами для постійних часу (2.4) та (2.5).

Наслідуючи [18] можна застосувати теорему Віста до характеристичного рівняння системи (2.1), зв'язавши коефіцієнти цього рівняння з постійними часу

системи, що дає можливість представити систему рівнянь (2.4), (2.5) та (2.8) у більш компактній формі[18]:

$$\begin{aligned}\lambda_{11} - \lambda_{12} \mathcal{G}_N &= \Delta P_{1N} / \tau_{1ycmN}; \\ \lambda_{22} \mathcal{G}_N - \lambda_{12} &= \Delta P_{1N} / \tau_{2ycmN}; \\ \lambda_{11} C_1^{-1} + \lambda_{22} C_2^{-1} &= T_1^{-1} + T_2^{-1}; \\ \lambda_{11} + \lambda_{22} - \lambda_{12}^2 &= C_1 C_2 T_1^{-1} T_2^{-1}.\end{aligned}\tag{2.9}$$

Система (2.9) дозволяє визначити чотири невідомих параметрів. Однак цього недостатньо навіть за відомих величин теплоємностей. Тому потрібне додаткове рівняння. У літературі, зокрема в [19], показано, що найбільша постійна часу при моделюванні нагрівання двигуна з використанням багатомасової термодинамічної схеми залишається практично однаковою для процесів у всіх елементи цієї моделі. Фізично це пояснюється процесами перерозподілу тепла між елементами двигуна [20], тривалість якого при незмінній величині втрат визначається в кінцевому рахунку елементами з найбільшою тепловою інерцією.

Постійна часу системи n тіл, від котрій залежить загальна тривалість теплових перехідних процесів у цій системі, визначається наступним чином [21]

$$T = \sum_{i=1}^n C_i R_i,\tag{2.10}$$

де C_i - теплоємність i -го тіла; R_i - тепловий опір від i -го тіла до охолоджувального середовища[21].

$$R_i = \lambda_0^{-1} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\delta_k}{l_k F_k} + \frac{\delta_i}{2l_i F_i} \right),\tag{2.11}$$

де δ_i та δ_k - характерний розмір тіла в напрямі теплового потоку; l_i і l_k - питома теплопровідність матеріалу відповідного тіла; F_i і F_k - площа поверхні тіла; λ_0 - тепловіддача безпосередньо в охолоджуючому середовищі. У виразах (2.10) та (2.11) використана нумерація, що починається від охолоджуваної поверхні.

Що стосується термодинамічних модлей, де всі елементи розглядаються як точкові, вираз для теплового опору R_i (2.10) можна записати з використанням теплових провідностей між тілами[20]:

$$R_i = \lambda_0^{-1} + \sum_{k=1}^{i-1} (\lambda_{i,k}^{-1}), \quad (2.13)$$

де доданок $\sum_{i=1}^n (\lambda_{i,k}^{-1})$ представляє суму теплових провідностей від i -го тіла до охолоджувального середовищі по всіх шляхах.

Підставивши (2.12) до (2.10), отримаємо[20]:

$$T = \lambda_0^{-1} \sum_{i=1}^n C_i + \sum_{k=1}^{i-1} \left(C_i \sum_{k=1}^{i-1} \lambda_{i,k}^{-1} \right). \quad (2.14)$$

Сума у виразі (2.14) існує лише для $i > 1$. З урахуванням того, що нумерація індексів у виразі (2.14) йде від охолоджувального середовища до i -го елементу можна констатувати, що стосовно двомасової ТДМ у другому доданку цього виразу будуть присутні тільки ті складові, які містять теплоємність, що відповідає обмотці двигуна, тобто C_1 при використанні системи індексації величин, прийнятої нами у цій роботі.

У двомасової ТДМ з виділенням обмотки статора в окремий вузол $C_1 \ll C_2$. Теплові провідності між міддю обмотки та сталлю статора, як показують розрахунки, перевищують величину тепловіддачі від двигуна у зовнішнє охолоджувальне довкілля. Наведені факти означають, що для такої двомасової ТДМ буде виконуватися умова $\lambda_0^{-1} \sum_{i=1}^n C_i \gg \sum_{k=1}^{i-1} \left(C_i \sum_{k=1}^{i-1} \lambda_{i,k}^{-1} \right)$ [20] і постійна часу T , що визначає загальну тривалість теплового перехідного процесу, повинна бути близька за величиною до першої частини виразу (2.14), яка збігається з виразом для постійного часу нагрівання одномасової ТДМ.

Викладене вище дає можливість у доповнення до системи (2.9) отримати ще одне рівняння для визначення параметрів теплової схеми заміщення. Просумувавши рівняння системи (2.1) та вважаючи $\tau_1 = \tau_2 = \tau$, отримаємо наступне рівняння теплових процесів в одномасовій ТДМ, записане через параметри двомасової моделі[5]:

$$(C_1 + C_2) \frac{d\tau}{dt} + (\lambda_{11} + \lambda_{22} - 2\lambda_{12})\tau = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (2.15)$$

Рішення рівняння (2.14) містить одну експоненту з постійного часу T , що визначається зворотною величиною кореня характеристичного рівняння:

$$T = (C_1 + C_2)(\lambda_{11} + \lambda_{22} - 2\lambda_{12})^{-1}. \quad (2.16)$$

Введемо коефіцієнт $k_T = T_2/T$. З урахуванням цього коефіцієнта, значення якого для двигуна закритого виконання можна прийняти

рівним одиниці, отримаємо з (2.16) додаткове рівняння, що використовується для знаходження параметрів двомасової ТДМ шляхом нескладних перетворень із системи, що містить рівняння (2.9) і (2.16), можна виключити постійні часу T_1 і T_2 , перейшовши до системи з трьох рівнянь[20]:

$$\begin{aligned} \lambda_{11} - \lambda_{12} \vartheta_N &= \Delta P_{1N} / \tau_{1ycmN}; \\ \lambda_{22} \vartheta_N - \lambda_{12} &= \Delta P_{1N} / \tau_{2ycmN}; \\ k_T \frac{\lambda_{11} \lambda_{22} - \lambda_{12}^2}{\lambda_{11} + \lambda_{22} - \lambda_{12}^2} &= \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \left[\frac{\lambda_{11}}{C_1} + \frac{\lambda_{22}}{C_2} - \frac{\lambda_{11} + \lambda_{22} - 2\lambda_{12}}{k_T (C_1 + C_2)} \right]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Виконаємо оцінку величини ϑ_N на основі багатомасовий ТДМ АД. Для цього використовуємо вираз, що встановлює співвідношення між середньозваженими значеннями перевищень температури вузлів багатомасової моделі, що входять до складу першого ($\bar{\tau}_{1ycmN}$) і другого ($\bar{\tau}_{2ycmN}$) вузлів двомасової ТДМ при роботі в установившому номінальному режимі:

$$\vartheta = \bar{\tau}_{2ycmN} / \bar{\tau}_{1ycmN}. \quad (2.18)$$

На рис. 2.5 і 2.6 представлені величини ϑ , розраховані за (2.18) з використанням п'ятимасової ТДМ для деяких двигунів серії 4А закритого виконання (позначено: $2p$ - число полюсів). З цих рисунків випливає, що явно вираженої залежності від габаритів і числа полюсів АД закритого виконання немає. Значення ϑ в середньому близькі до 0,8. Аналогічні значення ϑ виходять і для двигунів закритого виконання інших серій, наприклад для двигуна МТКФ012-6 величина ϑ становить 0,84. При визначенні параметрів двомасової

ТДМ можна вважати, що $\vartheta_N = \vartheta$ і орієнтуватися для АД закритого виконання на наведені вище значення.

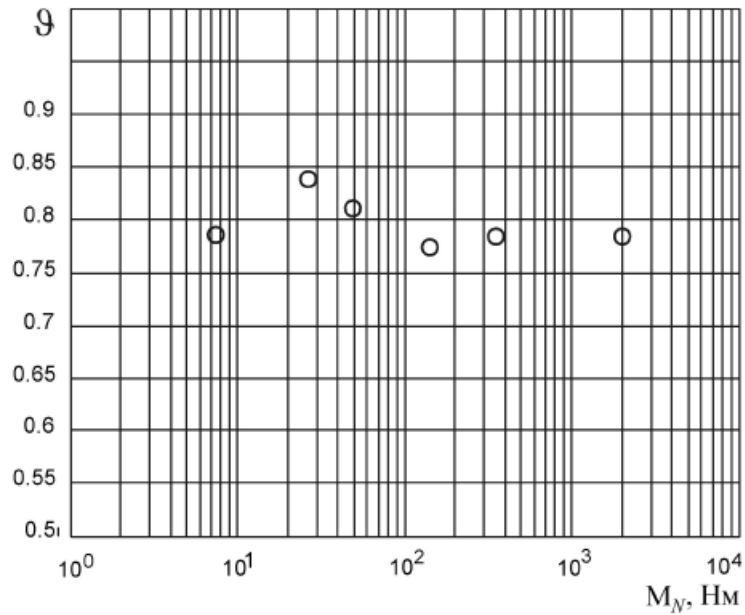


Рисунок 2.5. Залежність ϑ від номінального моменту для двигунів 4A80A4, 4A100L4, 4A132S4, 4A180S4, 4A225M4, 4A355M4

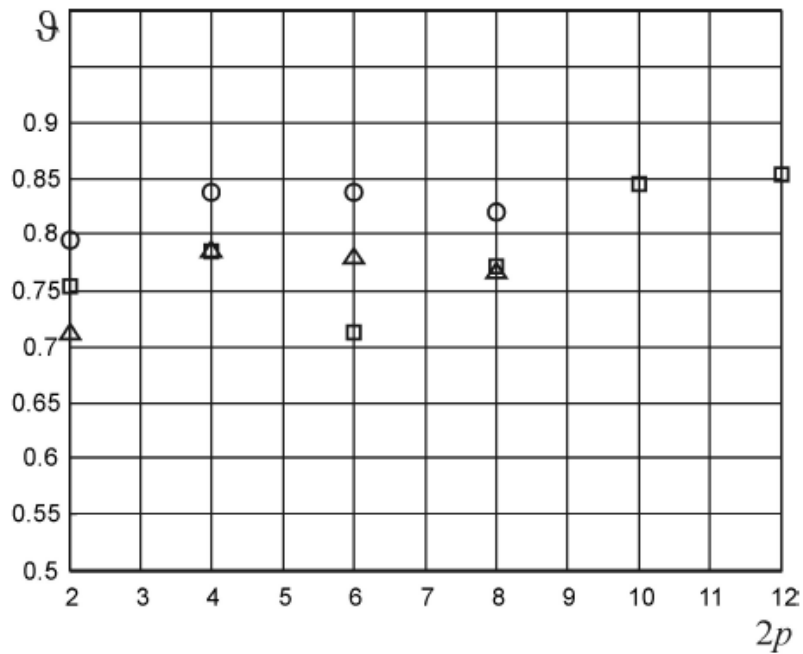


Рисунок 2.6. Залежність ϑ от числа полюсів для двигунів серії 4А з висотою осі 100 мм (o), 225 мм (Δ) та 355 мм (\square)

2.3 Врахування особливостей двигуна закритого виконання

Особливістю процесів нагрівання закритих АД є те, що тепловий потік від обмотки статора до охолоджуючого середовища йде через внутрішній корпус, тобто проходить через другий вузол двомасової ТДМ. Саме цей факт і робить велику постійну часу T_2 цієї моделі близькою за величиною до постійної T одномасової моделі. Використання рівності $T_2 = T$, закладеної в систему рівнянь (2.17), призводить і до наявності певних співвідношень між теплоємкостями та тепловими провідностями двохмасової термодинамічної моделі, тобто величинами, від яких відповідні постійні часу залежать. Запишемо третє рівняння системи (2.14) через λ_{10} та λ_{20} при $k_T = 1$ [18]:

$$\frac{\lambda_{10}\lambda_{20} + (\lambda_{10} + \lambda_{20})\lambda_{12}}{\lambda_{11} + \lambda_{22} - \lambda_{12}^2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \left[(\lambda_{10} + \lambda_{20}) \frac{C_2}{C_1} + (\lambda_{20} + \lambda_{12}) \frac{C_1}{C_2} + 2\lambda_{12} \right]. \quad (2.18)$$

Введем позначення: $l = \lambda_{10}/\lambda_{20}$ та $c = C_1/C_2$ з урахуванням котрих вираз (2.18) запишеться наступним чином

$$l = \frac{l}{1+l} \lambda_{20} + \lambda_{12} = \frac{c}{(1+c)^2} \left[\frac{1+c^2}{c} \lambda_{20} + \frac{c^2+2c+1}{c} \lambda_{12} \right] \quad (2.19)$$

Із (2.17) шляхом простих перетворень одержуємо рівність $l = c$, тобто

$$\lambda_{10} C_2 = \lambda_{20} C_1. \quad (2.20)$$

Виразивши теплову провідність λ_{10} (2.20) через λ_{20} та теплоємності, отримуємо можливість звести кількість невідомих у системі (2.16) до двох (при відомих значеннях C_1 та C_2). Це дає можливість використовувати для знаходження теплових провідностей лише перші два рівняння в системі (2.16), записавши їх наступним чином [19]:

$$\begin{aligned} \lambda_{20} C_1 C_2^{-1} + (1 - \mathcal{G}_N) \lambda_{12} &= \Delta P_{1N} / \tau_{1ycmN}; \\ \lambda_{20} \mathcal{G}_N - (1 - \mathcal{G}_N) \lambda_{12} &= \Delta P_{2N} / \tau_{2ycmN}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Вирішуючи систему (2.19) відносно λ_{10} та λ_{20} , одержимо вираз для всіх теплових провідностей двомасової моделі:

$$\lambda_{20} = \frac{C_2}{C_1 + \mathcal{G}_N C_2} \cdot \frac{\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}}{\tau_{1ycmN}}; \quad (2.22)$$

$$\lambda_{10} = \frac{C_1}{C_1 + \vartheta_N C_2} \cdot \frac{\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}}{\tau_{1ycmN}}; \quad (2.23)$$

$$\lambda_{12} = \frac{\vartheta_N C_2 \Delta P_{1N} - C_1 \Delta P_{2N}}{\tau_{1ycmN} (1 - \vartheta_N) (C_1 + \vartheta_N C_2)}. \quad (2.24)$$

Скориставшись виразами (2.6) та (2.7) для постійних часу, при виконанні умови (2.20) отримаємо:

$$T_1 = (\lambda_{22}/C_2 + \lambda_{12}/C_1)^{-1}; \quad (2.25)$$

$$T_2 = C_2/\lambda_{20}. \quad (2.26)$$

Оскільки $\lambda_{22}/C_2 \ll \lambda_{12}/C_1$, із (2.25) випливає наближене співвідношення: $T_1 \approx C_1/\lambda_{12}$. Цей результат добре відповідає виразу (2.13) з врахуванням того факту, що тепловіддача в оточуюче довкілля від обмотки статора в двигунах закритого виконання мала в порівнянні з тепловою провідністю до елементів, що становлять другу масу двомасової ТДМ, що попереджає співвідношення $\lambda_{10} \ll \lambda_{12}$.

Проаналізуємо взаємозв'язки відношення перевищення температур у номінальному режимі роботи (ϑ_N) з параметрами двомасової ТДМ. Запишемо вирази (2.4) і (2.5) для номінального режиму у вигляді[20]:

$$\tau_{1ycmN} = \frac{\Delta P_{1N} \lambda_{20} + (\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}) \lambda_{20}}{\lambda_{10} \lambda_{20} + (\lambda_{10} + \lambda_{20}) \lambda_{12}}; \quad (2.27)$$

$$\tau_{2ycmN} = \frac{\Delta P_{2N} + \tau_{1ycmN} \lambda_{12}}{\lambda_{20} + \lambda_{12}}. \quad (2.28)$$

Із (2.27) та (2.28) одержимо:

$$\vartheta_N = \frac{\tau_{2ycmN}}{\tau_{1ycmN}} = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{20} + \lambda_{12}} + \frac{\Delta P_{2N}}{\lambda_{20} + \lambda_{12}} \cdot \frac{\lambda_{20} \lambda_{10} + (\lambda_{20} + \lambda_{10}) \lambda_{12}}{\Delta P_{1N} \lambda_{20} + (\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}) \lambda_{12}}. \quad (2.29)$$

Для аналізу залежності ϑ_N від параметрів двомасової ТДМ введемо відносні одиниці. В якості базисних величин прийmemo: $\lambda_{\sigma} = \lambda_{\Sigma 0} = \lambda_{10} + \lambda_{20}$; $\Delta P_{\sigma} = \Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}$. В цьому у разі вираз (2.29) може бути перетворено до вигляду[20]:

$$\vartheta_N = \frac{\lambda_{12}^*}{1 - \lambda_{10}^* + \lambda_{12}^*} + \frac{\Delta P_{1N}^*}{1 - \lambda_{10}^* + \lambda_{12}^*} \cdot \frac{\lambda_{10}^* + (1 - \lambda_{10}^*)\lambda_{12}^*}{\Delta P_{1N}^* (1 - \lambda_{10}^*) + \lambda_{12}^*}. \quad (2.30)$$

З (2.30) видно, що при $\lambda_{10}^* \leq \Delta P_{1N}^*$ завжди $\vartheta_N < 1$. Оскільки для двигунів закритого виконання λ_{10}^* дуже мала, а потужність втрат в обмотці статора становить істотну частку сумарної потужності втрат у номінальному режимі, для закритих АД завжди виконується співвідношення $\vartheta_N < 1$.

На рис. 2.7 наведено криві нагрівання двигуна 4A100L4. Тут 1 і 2 – температури лобових (2.1) та пазових (2.2) частин обмотки статора, розраховані з використанням п'ятимасової ТДМ, 3 – перевищення температури для першого вузла двомасової моделі з тепловими провідностями, розрахованими (2.22), (2.23) і (2.24) при $N = 0,80$ [20].

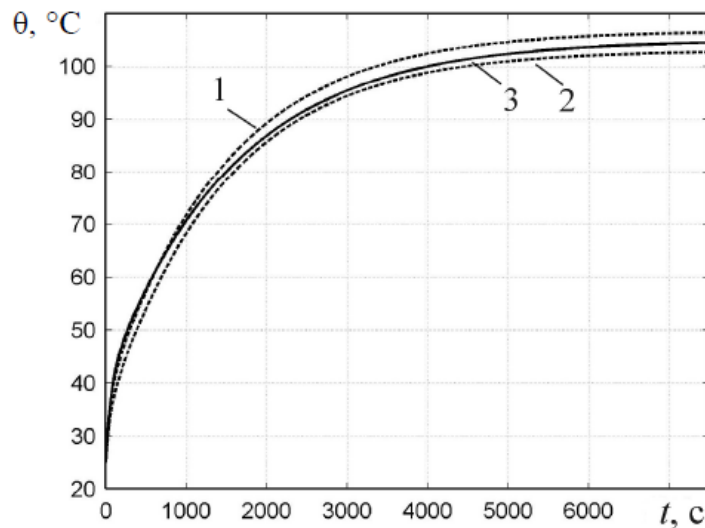


Рисунок 2.7. Криві нагріву двигуна 4A100L4

Висновки другому розділу

1. Обґрунтовано доцільність використання у завданнях електроприводу для оцінки теплового стану АД двомасової термодинамічної моделі з виділенням як окремий вузол обмотки статора.

2. Отримано математичний опис двомасової термодинамічної моделі та виконано його аналіз.

3. Отримано аналітичні співвідношення, придатні для визначення теплових провідностей двомасової термодинамічної моделі асинхронного двигуна закритого виконання при мінімальному наборі вихідних даних.

АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАХИСТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

У даний час для захисту низьковольтних електричних машин від перегріву обмотки статора використовують автоматичні вимикачі із тепловими розчіплювачами [22]. У випадку застосування магнітних пускачів для управління роботою ЕМ цю роль виконують теплові реле. Захист високовольтних ЕМ від перегріву здійснюється з допомогою захистів від перевантаження і підвищеного напруги з використанням електромагнітних або мікропроцесорних реле.

Автоматичні вимикачі з тепловим розчіплювачем (для захисту від навантаження); АЕ 1031-М2, А3114, А3712Б, ВА5731-33 [22,23].

Захист від струмів навантажень виконує тепловий розчіплювач (рис. 3.1). Тепловий розчіплювач представляє собою біметалеву пластинку з двох металів з різними коефіцієнтами подовження. При проходженні струму через нагрівач пластинка нагрівається і, згинаючи, при певному значенні струму розмикає ланцюг. Контакт 2 головного ланцюги замикають вручну кнопкою або рукояткою. У замкненому становищі він утримується засувкою 3. При проходженні по ланцюги струму, величина якого менше певної величини, пластина 7 нагрівається слабо і вигин її недостатній для того, щоб передати зусилля на засувку 3. Коли по спіралі нагрівача 6 буде проходити струм, величина якого перевищить певне значення, то через деяке час правий кінець пластини 7 вигнутий настільки, що штифт 11 приводить в дію приводний важіль 5 і штовхач 4 підніме важіль засувки 3 і під дією пружини 1 розімкнеться контакт 2 [22].

Тепловий розчіплювач не має постійного часу відключення автомата, його час спрацьовування залежить від величини струму навантаження.

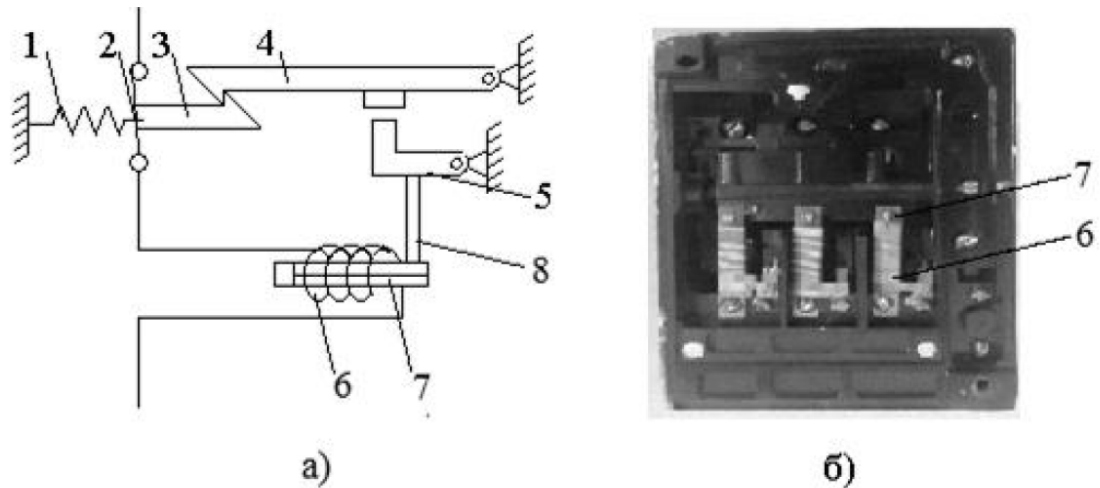


Рисунок 3.1. Автоматичний вимикач з тепловим розчіпувачем

Для захисту від перевантаження вибираються автоматичні вимикачі з тепловим або комбінованим рацепітелем. Правильно налаштований захист від перевантажень не повинен спрацьовувати при пусках і самозапущу електродвигунів. Тому для АД з умовою пуску 2 - 7 секунд струм спрацювання вибирається за виразом [22]:

$$I_{\text{спрац.}} = I_{\text{ном}} \cdot k_{\text{відс}} / k_{\text{в}} = (1,25 - 1,4) I_{\text{ном}} \quad (3.1)$$

Для автоматичних вимикачів АЗ100, АЗ700, АП-50 з тепловим та комбінованим розчеплювачем $k_{\text{відс}} = 1,25$ $k_{\text{в}} = 1$.

Для АД з умовами пуску 20 секунд та більше струм спрацювання вибирається за виразом:

$$I_{\text{спрац.}} \geq (1,4-1,7) I_{\text{ном}} \quad (3.2)$$

Таблиця 3.1. Характеристики автоматичних вимикачів [22]

Тип вимикача	Номінальний струм, А	Струм уставки теплового розчіпювача, А	Граничний струм відключення, кА
АП50Б 3Т	50	1,6, 2,5, 4, 6,3, 10, 16,25, 40, 50, 63	0.3-6
АЗ114	100	15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 85, 100	1-12
АЗ712Б	630	250, 300, 400, 500, 630	5.5-40
АЕ2043Т	31.5, 40, 50, 63	31.5, 40, 50, 63	4
ВА5731-33	1200	400, 800, 1200	6-40
Е06	250,400,630,800	250,400,630,800	5-60

Магнітним пускачем називається автоматичний контактор, призначений для пуску, зупинки, захисту від навантаження і для автоматичного відключення електродвигуна при зникненні напруги. Конструктивно будь-який магнітний пускач складається зі стаціонарно закріпленої частини та рухомого якоря як показано на рисунку 3.2, де 1 - стаціонарні контакти, 2 і 3 сердечники магнітопроводу, 4 - котушка з обмоткою, 5 – пружина, 6 – рухливий якір, 7 - контакт рухомого якоря.

Так же магнітний пускач - низьковольтний комутаційний апарат, призначений для дистанційного управління АД.

Він поєднує у собі функції апарату управління та захисту. У комплекті з тепловим реле пускач виконує захист електродвигуна від навантаження. На рисунку 3 показано принципова схема магнітного пускача теплового реле.

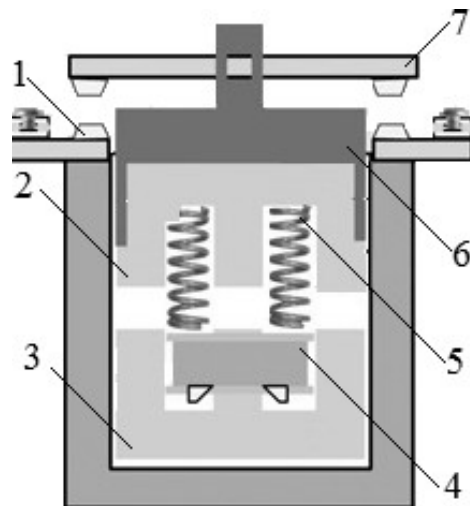


Рисунок 3.2. Принцип пристрої магнітного пускача [22]

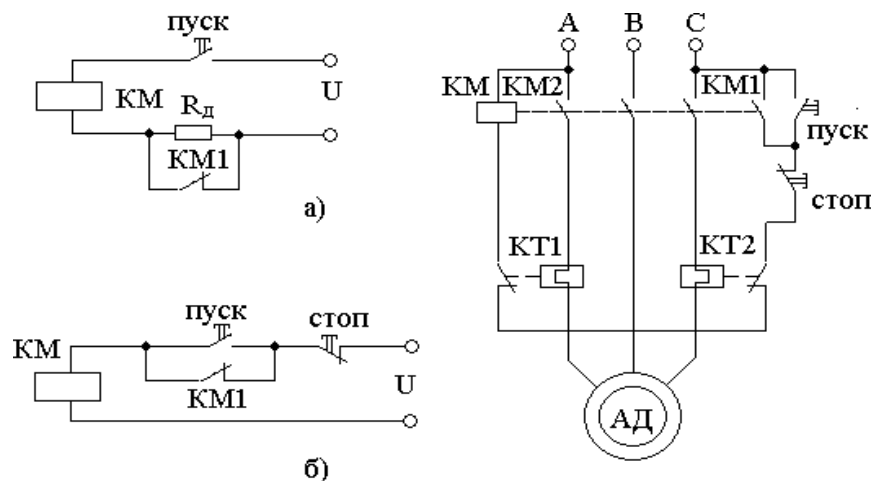


Рисунок 3.3. Принципова схема магнітного пускача [22]

При зникненні напруги або її зниженні на 40-60% від номінальної, силові контакти розмикаються (здійснюється нульовий захист).

Нереверсивний електромагнітний пускач складається з одного триполюсного контактора і триелементного теплового реле.

Реверсивний електромагнітний пускач складається із двох контакторів та теплового реле. Реверсивні пускачі мають механічне блокування для виключення одночасного включення двох контакторів. Найбільш поширені електромагнітні пускачі серії ПМЛ, ПМА, ПМЕ.

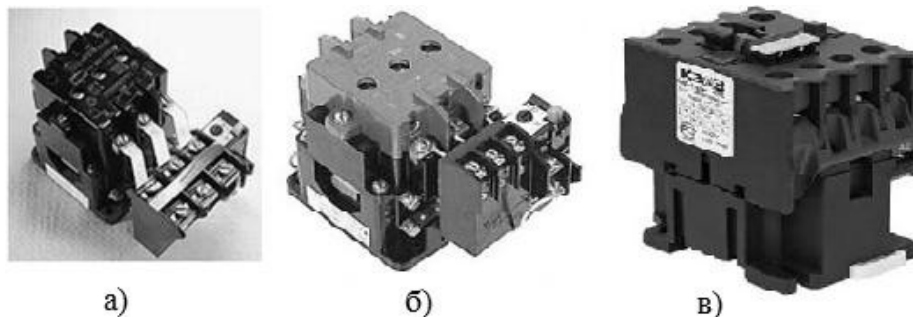


Рисунок 3.4. Магнітні пускачі [23]

Електромагнітні пускачі і контактори обирають по номінальній напрузі, номінальному струму, за напругою котушки і по конструктивному виконання.

За ступенем захисту від навколишнього середовища магнітні пускачі випускаються:

- відкритого виконання;
- захищеного виконання;
- пилу-вологозахищеного виконання.

за електричним виконанням магнітні пускачі виконуються:

1. Нереверсивний, без теплового реле.
2. Нереверсивний, з тепловим реле.
3. Реверсивний, без теплового реле.
4. Реверсивний, з тепловим реле.

Пускачі електромагнітні малогабаритні серії ПМЛ призначені для застосування в стаціонарних установках для дистанційного пуску безпосереднім підключенням до мережі, зупинки і реверсування трифазних АД з короткозамкнутим ротором на напругу до 660 У змінного струму 50 та 60 Гц [22].

Таблиця 3.2. Характеристики магнітних пускачів серії ПМЛ [22]

Тип пускача	Номинальний струм	Наявність теплового реле	Гранична потужність АД при напрузі 380В, кВт
ПМЛ 1100	10	Ні	5,5
ПМЛ - 2201	25	РТЛ	11
ПМЛ - 4160	63	Ні	30
ПМЛ-4260ДІМ	80	РТЛ	37

Магнітні пускачі серій ПМА призначені для дистанційного пуску безпосереднім підключенням до мережі і відключення трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором. При наявності триполюсних теплових реле серій РТТ і РТЛ пускачі, здійснюючи захист керованих АД від перевантажень неприпустимої тривалості і від струмів, виникаючих при обриві однієї з фаз. Пускачі придатні для роботи в системах керування із застосуванням мікропроцесорної техніки при шунтуванні котушки, що включає пристроєм подавлення перешкод або при тиристорному управлінні [3].

Пускач електромагнітний серії ПМА 3000 ПМА 4000 ПМА 5000 ПМА 6000
Технічні Характеристики Номинальний струм (А)

40-ПМА 3000,

63-ПМА 4000,

100-ПМА 5000,

160-ПМА 6000

Структурне позначення магнітних пускачів серії ПМА, прикла ПМА –

3210:3 – величина пускачів в залежності від номінального струму;

2 – наявність теплового реле;

1 – ступінь захисту;

0 - рід струму ланцюги керування.

Пускачі серій ПМЕ - призначені для дистанційного пуску за рахунок безпосереднього підключенням до мережі і відключення трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором. Захист АД від перегріву здійснюється при допомозі теплового реле ТРН.

Таблиця 3.3. Вибір пускача серії ПМЕ в залежності від потужності АД

Напруга мережі. В	Потужність керованих АД, кВт					
	220	3	5,5	11	18,3	30
380	4	11	18.5	30	45	75
440			22	33	50	
500		15	25	37	55	100
660	3,7	11	22	33		
Величина	I	II	III	IV	V	VI

Структурне позначення магнітних пускачів серії ПМЕ X1 X2 X3 X1 – величина пускача;

X2 - ступінь захисту;

X3 - наявність теплового реле.

Без магнітних пускачів теплове реле використовувати не рекомендується. Дія теплового реле засновано на згинанні біметалевої пластинки при її нагрівання, біметалічна пластина є накладним одна на одного і зварені між собою дві смужки з металів із різними коефіцієнтами лінійного розширення. При нагріванні біметалічні пластини подовжуються неоднаково у свою чергу, нагріваючись за рахунок виділеного струмом тепла, пластини згинаються, і при певному значенні струму наводить в дію контакт реле. Порядок включення магнітного пускача разом з тепловим реле показано на рисунку 3.5, де: 1 - АД, 2 - теплове реле, 3 - магнітний пускач, 4 – вводний автомат, 5 - кнопка пуску і відключення.

У тепловому реле струм захищеного двигуна пропускає через себе спеціальний нагрівальний елемент, або через біметалеву пластину, а іноді і комбіновано, через нагрівальний елемент і через біметалічні пластини.

Очевидно, що чим більший струм, тим більше і швидше вигинається пластина, і тим самим спрацьовує теплове реле [4].

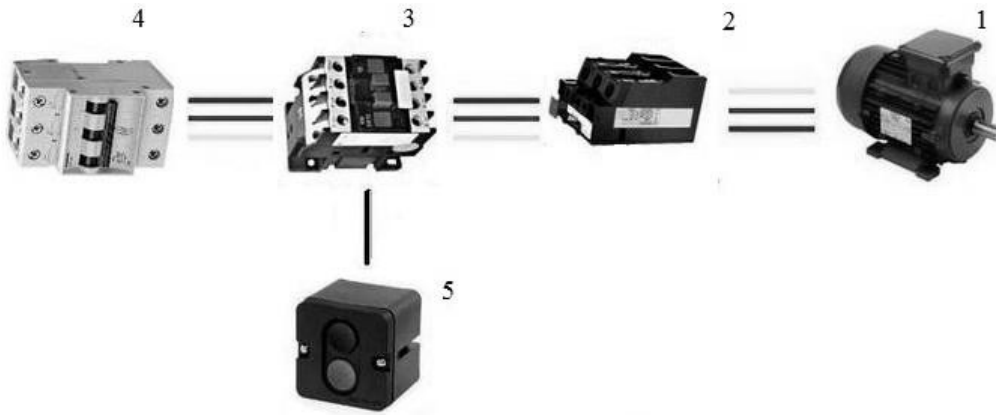


Рисунок 3.5. Порядок включення захисту АД

Теплове реле має кілька можливостей такі як реле з прямим нагріванням біметалевої пластини які мають малі постійного часу, реле з непрямим і нагріванням інший є характером нагрівання ніж у обмотці стартера.

Теплове реле без котакторів або пускачів не використовується в таких як ТРН, РТЛ і РТТ.

Реле серії ТРН - з температурною компенсацією призначені для захисту електроустановок від перевантажень при тривалих режимах роботи.

Реле розраховані для роботи в мережах змінного струму частоти 50Гц і 60Гц з напругою до 500В (ТРН-10), 660В (ТРН-25, ТРН-40) та постійного струму на напругу до 440В [5].

Теплові елементи, використовуються в реле, мають наступні номінальні струми: 0,5А 0,63А 0,8А 1,0А 1,25А 1,6А 2А, 2,5А 3,2А 4А 5А 6,3А 8А 10А 12,5А 16А 20А 25А 32А 40А

Реле не захищають від коротких замикань, і відповідно самим реле необхідний такий захист.

Реле використовуються в відкритих і закритих комплектних пристроях станцій керування електроприводами. Конструкція та розміри реле забезпечують їх комплектне вбудовування в пускачі серії ПМЕ і типу ПА-300 (ПАС-300).

Теплове реле ТРН як показано на рисунку 3.6 складається з 1 - засувки, 2- штанги розчіплювача, 3 – контактів реле, 4 - пружини, 5 – нагрівальних елементів, 6 - штовхача, 7 - біметалевої пластина, 8 - температурного компенсатора, 9 - регулятора струму спрацьовування [22]

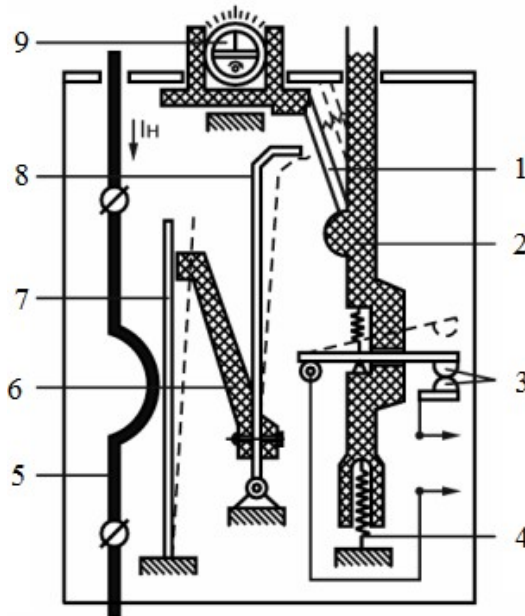


Рисунок 3.6. Теплове реле

Межі регулювання номінального струму уставки (при крайніх положеннях регулятора) складають:

$(0,8-1,2) \pm 0,08 I_n$ - для реле ТРН-8А, ТРН-10А;

$(0,75-1,3) \pm 0,08 I_n$ - для реле інших типів.

Струм уставки відноситься до будь-якої температури навколишнього повітря та будь-якого положення регулятора Уставки. Завдяки наявності в реле температурної компенсації струм уставки практично не залежить від температури повітря в місці встановлення реле і може змінюватися в межах $\pm 3\%$ від номінального струму [6].

Уставки на кожні 10°C зміни температури навколишнього повітря від $+20^\circ\text{C}$ [7].

Захисні характеристики теплових реле ТРН показано на рисунку 3.7 час спрацьовування T в залежності від значення навантаження k , де: а) - захисні характеристики ТРН - 10, б) - захисні показники ТРН - 60.

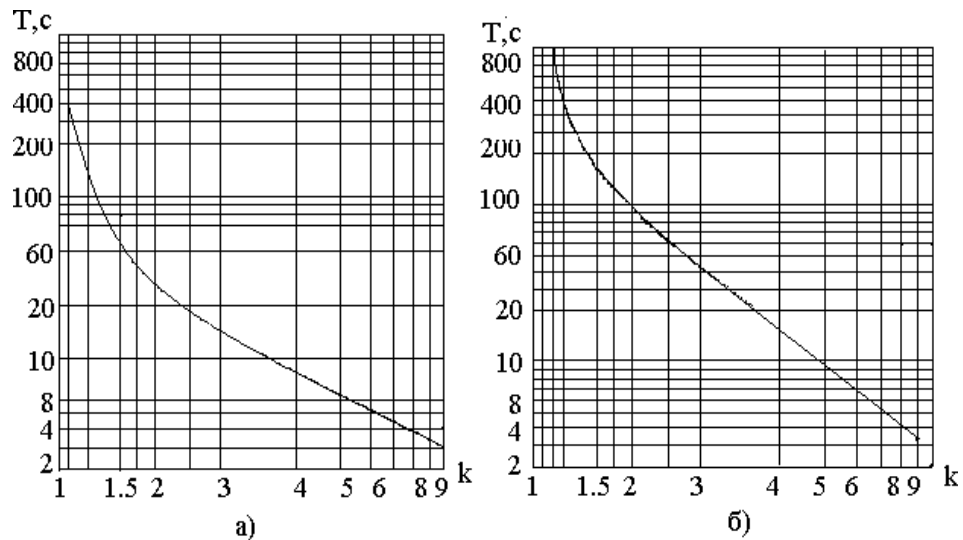


Рисунок 3.7. Захисні Характеристики теплових реле ТРН [22]

Теплові реле застосовуються для АД тривалого режиму роботи (робочий період яких продовжується не менше 30 хв, з метою захисту їх від нагріву до небезпечних температур при тривалих перевантаженнях. Часто теплові реле об'єднують з лінійним контактором у один апарат - агнітний пускач [8; 9].

Реле теплові РТЛ, РТТ призначені для захисту трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором від тривалих перевантажень, а також від перевантажень, виникаючих при обриві однієї із фаз.

Таблиця 3.4. Характеристики теплових реле серії РТТ і РТЛ [24]

Тип виконання	Номинальний струм, А	Номинальна напруга, У		Діапазон номінальних струмів теплового елемента, А
		змін. струму	постій. струму	
РТЛ-1	25	до 660	до 440	0,1 -25,0
РТЛ-2	80	до 660	до 440	23,0-86,0
РТТ-5-10	10	до 660	до 440	0,2-10,0
РТТ-1	25	до 660	до 440	0,20-25,0
РТТ-2	40	до 660	до 440	10,0-63,0
РТТ-3	160	до 660	до 440	80,0-160

Таблиця 3.5. Типи реле, використовувані з пускачами ПМЛ, ПМ12, ПМЕ, ПМА

ПМЛ12-010	РТТ-5-10
ПМЛ 1000	РТЛ-1...
ПМЛ 2100, 3100, 4100	РТЛ-2...
ПМ12-025	РТТ-141
ПМЕ 20	РТТ-111 або РТТ-141

ПМА 3100 і ПМ12-040	РТТ-2
ПМ12-100, ПМА 6000	РТТ-321

Таблиця 3.6. Межі регульованих струмів реле РТТ

Номинальний струм теплових елементів, А	Діапазон регулювання номінального струму, А	Номинальний струм теплових елементів, А	Діапазон регулювання номінального струму, А
10,0	8,5-11,5	32,0	27,2 - 36,8
12,5	10,6-14,3	40,0	34,0 - 46,0
16,0	13,6-18,4	50,0	42,5-57,5
20,0	17,0-23,0	63,0	53,5-63,7
25,0	21,2-28,7		

Висновки по третьому розділу

У цьому розділі розглядається захист асинхронних двигунів (АД) з напругою до 1000 В. Їх основні характеристики та параметри. Автоматичні вимикачі з тепловим розчіплювачем, види теплових реле, а також їх переваги та основні недоліки. З'ясовано також, що для захисту від перегріву використовується теплове реле магнітного пускача або тепловий розчіплювач автоматичного вимикача. Однак ці захисти не завжди адекватно реагують на перегрів обмотки статора через те, що їх робота ґрунтується на вимірюванні струму АД.

ВИСНОВКИ

Проведений в роботі аналіз показав, що на сьогодні одномасова теплова модель, що використовувалася в класичних методах перевірки електродвигуна, мало застосовна, оскільки розрахована на незмінне співвідношення втрат у статорі та роторі, що не виконується в сучасному частотно-регульованому електроприводі. Однією з проблем для частотно-регульованого електроприводу стає неконтрольований перегрів роторного ланцюга при зміні намагніченості електричної машини на різних швидкостях обертання.

Крім того, слід враховувати погіршення тепловіддачі між статором і ротором через знижену швидкість обертання частотно-регульованого електродвигуна, роторні лопатки на низьких швидкостях обертання гірше перемішують повітря і охолоджують лобові частини обмоток статора, зниженою швидкістю погіршується тепловіддача в довкілля. Тому одномасова модель непридатна для якісного контролю за тепловим станом електродвигуна для частотно-регульованого електроприводу.

Багатомасові моделі в роботі визнані такими, що не задовольняють поставленій меті і завдань, оскільки визначення їх параметрів повинно супроводжуватися точним знанням геометрії, конструкції та матеріалів, застосованих у машині. Крім того, багатомасові моделі не можна розраховувати в реальному часі, що обмежує їх застосування як моделі для організації теплового захисту в системах управління перетворювачів частоти.

Спрощена двомасова модель найбільше підходить для визначення теплового стану електричної машини через простоту не тільки її обчислення, а й через простоту визначення самих параметрів моделі шляхом проведення відносно нескладних експериментів та/або розрахунків.

Обрана оптимізована двомасова теплова модель асинхронного електродвигуна придатна для чисельного моделювання теплових процесів при частотному керуванні. Дана модель враховує процес роздільного нагрівання ротора та статора, що дозволяє будувати захист не тільки статорних, а й роторних ланцюгів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Діагностика теплоенергетичного устаткування теплових та атомних електричних станцій: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. А. Пешко, О. Ю. Черноусенко, Д. В. Риндюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 81 с.

2. Зубенко Д. Ю. 3-94 Інтелектуальні системи діагностики теплового стану електродвигуна : монографія / Д. Ю. Зубенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 203 с.

3. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Математична модель теплового стану асинхронного електродвигуна у нестационарних режимах. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки. Харків, 2016. Вип. 175: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 140-142.

4. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Теплова модель асинхронного електродвигуна в стаціонарних режимах. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки. Харків, 2015. Вип. 164: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 118-120.

5. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Нестерчук Д. М. Математична модель теплового стану асинхронного електродвигуна у стаціонарних режимах. Сучасні наукові дослідження на шляху до Євроінтеграції: матеріали міжнар. наук.-практ. форуму (21-22 червня 2019 р.): у 2-х ч. Мелітополь, 2019. Ч. 1. С. 230-233.

6. О.В. Губаревич, С.М. Голубєва Державний університет інфраструктури та технологій Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів

7. Худий Є.Г. Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин /Є.Г. Худий, І.І. Пельтек//Сб. научн. трудов "Вестник НТУ "ХПИ":

Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. №28 - Вестник НТУ "ХПИ", 2010. С.549-550.

8. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.

9. Теорія електропривода: Підручник / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.

10. Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / В. І. Колотіло, О. В. Донець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с. Режим доступу https://eprints.kname.edu.ua/57522/1/76Л_Консп_Лекцій_2019%20печ.pdf

11. Безрученко В. М. Теорія електроприводу [Електронний ресурс] : підручник. Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2011. Режим доступу <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/402>

12. ДСТУ EN 60034-1:2016 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (EN 60034-1:2010; EN 60034-1:2010/AC:2010, IDT)

13. Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник / П. О. Василега. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 290 с. 7. Електроп

14. <https://prk.com.ua/ua/a479225-kak-sohranit-rabotosposobnost.html>

15. <https://chastotnik.ua/ru/a-neispravnosti-elektrodvigatelya-i-sposobi-ego-zashchiti>

16. <https://gazteh.com.ua/articles/zashhita-elektrodvigatelya/>

17. <https://eco-system.com.ua/promyshlennoe-oborudovanie/upravlenie-i-zashchita-dvigatelya/>

18. С. О. Квітка Математична модель теплового стану асинхронного електродвигуна у нестационарних режимах. 2019. Мелітополь: ТДАТУ// oai:<http://elar.tsatu.edu.ua:123456789/8134>

19. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Теплова модель асинхронного електродвигуна в стаціонарних режимах// Таврійський державний агротехнологічний університет

20. Значення усталеного перевищення температури обмоток статора асинхронного електродвигуна / О. Ю.Вовк, С. О. Квітка, В. Ф. Яковлєв // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів". – Суми : СНАУ, 2011. – №8(23). – С.114–116.

21. Вовк О. Ю. Аналіз усталеного теплового режиму асинхронного електродвигуна в експлуатації / О. Ю. Вовк // Праці ТДАТУ. – Мелітополь : ТДАТУ, 2005. – Вип. 32. – С. 33-39.

22.<https://danube.pto.org.ua/index.php/component/k2/item/182-tema-6-6-avtomatichni-vimikachi>

23. promservis.cn.ua/ua/avtomat-a-3726.html

24. <http://promservis.cn.ua/ua/avtomat-a-3726.html>