

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Шилов Володимир Васильович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оцінка впливу міжвиткового короткого замикання на якість роботи
асинхронного двигуна
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Шилов В. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Цивенкова Наталія Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Шилов В. В. Оцінка впливу міжвиткового короткого замикання на якість роботи асинхронного двигуна. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою роботи є оцінка впливу міжвиткового короткого замикання на якість роботи асинхронного двигуна

Об'єкт дослідження – . фізична модель узагальненої електричної машини на основі трифазного асинхронного двигуна

Ключові слова: електрична машина, асинхронний двигун, обмотка статора.

ABSTRACT

Shilov V. V. Assessment of the influence of interturn short circuit on the quality of operation of an asynchronous motor. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of the work is to assess the influence of interturn short circuit on the quality of operation of an asynchronous motor

Object of research - . physical model of a generalized electric machine based on a three-phase asynchronous motor

Keywords: electric machine, asynchronous motor, stator winding.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 4 |
| РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ НА ОСНОВІ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА | 7 |
| 1.1 Перехід від трифазної машини до узагальненої електричної машини | 7 |
| 1.2 Співвідношення параметрів і величин обмоток узагальненої електричної машини та трифазного АД | 13 |
| Висновки по розділу 1 | 23 |
| РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ВПЛИВУ МІЖВИТКОВОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА | 24 |
| 2.1 Системи диференціальних рівнянь для дослідження міжвиткових коротких замикань в одній із фаз ротора | 25 |
| 2.2 Чисельне моделювання режиму міжвиткового короткого замикання в роторі | 29 |
| Висновки по розділу 2 | 32 |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ | 34 |
| 3.1 Аналіз дефектів обмоток статора | 34 |
| 3.2 Основні методи контролю ізоляції | 38 |
| Висновки по розділу 3 | 47 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 48 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 50 |

ВСТУП

У наш час асинхронні двигуни знаходять широке застосування в багатьох галузях промисловості та господарства. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором використовуються як приводні двигуни в деревообробній промисловості, підйомно-транспортних установках, компресорних і вентиляторних, будівельних інструментах та побутових приладах. За статистикою, асинхронні двигуни споживають 40 % виробленої електроенергії. Таке широке розповсюдження асинхронних двигунів зумовлено простотою, дешевизною і відносно високою надійністю машин подібного типу. Проте, як будь-яка складна технічна система, асинхронна машина схильна до відмов. Для аналізу причин відмов асинхронних двигунів звернемося до статистики.

Згідно з дослідженнями, описаними в різних джерелах, відмови асинхронних машин розподіляються наступним чином: 31 % припадає на відмову обмотки статора, 46 % – на відмову підшипників, 7 % виходять з ладу через дефекти ротора і 16 % з інших причин. Виходячи з даних результатів, можна зробити висновок, що найбільше схильні до відмов обмотка статора і підшипникові вузли. Причому вихід з ладу будь-якої з цих ланок призведе до відмови машини, що спричинить необхідність ремонту або заміни двигуна. Крім витрат на ремонт, відмова машини виліється в простій обладнання, на яке працює двигун. У зв'язку з цим, а також з широким розповсюдженням асинхронних двигунів, забезпечення безвідмовної роботи машин даного типу – важливе завдання не тільки технічно, а й економічно.

У цементному виробництві в якості елемента електропривода тарілчастих живильників сировинних млинів, клінкерних транспортерів, шламових насосів, печей випалювання використовуються високовольтні асинхронні двигуни як з фазним, так і з короткозамкненим ротором. Причини виникнення несправностей асинхронних двигунів мають різну природу. Однією з найбільш поширених причин аварій у подібних виробництвах є робота

двигуна в умовах високого забруднення. Крім того, аварії є результатом недосконалості технологічних процесів виробництва, недотримання умов експлуатації.

Згідно зі статистикою, капітальному ремонту піддається приблизно 20 % електродвигунів, в інших випадках несправності виникають на більш ранніх термінах експлуатації. У 70–80 % випадків виходу з ладу асинхронних двигунів причиною є пошкодження обмоток. У свою чергу, вихід з ладу обмоток у 93 % випадків обумовлений міжвитковим замиканням. Виникаючі дефекти стають причиною виникнення різного роду несиметрій в електричних і магнітних колах електродвигунів.

При цьому міжвиткові короткі замикання є одними з найбільш важко виявляємих пошкоджень. Найбільш ефективні методи (аналіз спектра модулів векторів Парка, аналіз магнітного потоку, вимірювання часткових розрядів, сигнатурний аналіз електричних сигналів електродвигуна та ін.) засновані на виявленні характерних частотних складових сигналу, які свідчать про наявність даного виду несправності. Однак на практиці джерелом таких частотних складових може виступати невеликий дисбаланс напруги живлення, який неминучий при експлуатації, або зміни в привідному механізмі. Тому за даним критерієм досить важко розрізнити міжвиткове коротке замикання і, наприклад, несиметрію напруги живлення.

Метою роботи є оцінка впливу міжвиткового короткого замикання на якість роботи асинхронного двигуна

Об'єкт дослідження – фізична модель узагальненої електричної машини на основі трифазного асинхронного двигуна

Предмет дослідження – вплив міжвиткового короткого замикання на якість роботи асинхронного двигуна

Методологія та методи досліджень. У роботі використано теорію електричних та магнітних кіл, аналізу теплових процесів, спектральний аналіз процесів на основі перетворень Фур'є.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Шилов В. В. ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ НА ОСНОВІ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 195-198.

Олішевська А. С., Шилов В. В. РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ У МЕРЕЖАХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 201-204.

Здорик О. П., Шилов В. В. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНОГО КРИТЕРІЮ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЮ ДВИГУНІВ.

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 208-210.

РОЗДІЛІ

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ НА ОСНОВІ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Основи математичної теорії узагальненої електричної машини сформульовано у 1920 – 1940 роки в роботах Р. Парка, А.А. Горєва, Г. Крона, Г.М. Петрова, Д. Уайта, Г. Вудсона та інших, де розглядаються питання перетворення координат, наводяться математичні моделі та рівняння узагальненої електричної машини. Однак основна увага приділяється перетворенню струмів і напруг [1,11].

У даному розділі проводиться аналіз математичної моделі узагальненої електричної машини, за допомогою якого отримано співвідношення не тільки величин струмів і напруг, але й конструктивних параметрів узагальненої електричної машини та трифазного асинхронного двигуна. Отримані співвідношення дозволяють скласти інженерний образ гіпотетичної узагальненої електричної машини.

Застосування теорії узагальненої електричної машини до електричних машин змінного струму дозволяє перейти від систем диференціальних рівнянь у фазних осях, що містять змінні коефіцієнти, до систем диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами, а стосовно до трифазних машин – також скоротити кількість рівнянь математичної моделі. Основним принципом перетворення координат є принцип інваріантності миттєвої потужності. Існують різні варіанти перетворення координат [1], деякі з них виконуються формально без збереження величини магнітного потоку, що припадає на один полюс. Збереження величини магнітного потоку одного полюса важливе для подальшого врахування насичення магнітопроводу.

1.1 Перехід від трифазної машини до узагальненої електричної машини

В ході перетворення координат від трифазної машини переходимо до узагальненої електричної машини, для якої традиційно вводяться наступні допущення:

- 1) число пар полюсів дорівнює одиниці;
- 2) число фаз обмоток статора і ротора дорівнює двом;
- 3) кожна фаза обмоток має синусоїдальний розподіл витків вздовж повітряного зазору;
- 4) магнітна індукція розподілена вздовж розточки статора за синусоїдальним законом;
- 5) магнітні втрати в магнітопроводах статора і ротора відсутні;
- 6) магнітопроводи статора і ротора є гладкими, тобто не враховується зубчастість статора і ротора.

Домовимось виконувати перетворення координат з урахуванням перелічених вище допущень, додатково дотримуючись наступних принципів:

- 1) ефективне число витків фази обмотки узагальненої машини дорівнює ефективному числу витків фази обмотки трифазної машини;
- 2) результуюча магніторушійна сила (МРС), створювана двофазною обмоткою узагальненої машини, дорівнює результуючій МРС, створюваній трифазною обмоткою.

Кількість витків фази обмотки асинхронної машини w та ефективна кількість витків w_e пов'язані між собою за допомогою обмоткового коефіцієнта $k_{об}$:

$$w_e = k_{об} w ; k_{об} = k_y k_p k_c , \quad (1.1)$$

де k_y – коефіцієнт укорочення; k_p – коефіцієнт розподілу; k_c – коефіцієнт скосу пазів.

Зосереджена двофазна діаметральна обмотка з числом витків w_e електричної машини з однією парою полюсів має амплітуду першої гармоніки МРС на один полюс

$$F_{m1} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{I_m w_e}{2} \sin \varphi d\varphi = \frac{2 I_m w_e}{\pi} = 0,6366 \cdot I_m w_e,$$

де I_m – амплітудне значення струму, що протікає по обмотці.

Якщо використовується діюче значення струму I , то

$$F_{1m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot I w_e = 0,9 \cdot I \cdot w_e.$$

Для машини з m -фазною обмоткою

$$F_{1m} = 0,45mIw_e.$$

Якщо маємо справу з m -фазною обмоткою електричної машини, що має p_n пар полюсів, то

$$F_{1m} = 0,45 \frac{mIw_e}{p_n}.$$

Для електричної машини з числом пар полюсів p_n , обмотка якої має синусоїдальний розподіл витків, можемо записати

$$F_{1m} = \frac{1}{2} \frac{I_m w_{\sin}}{p_n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I w_{\sin}}{p_n} \text{ або } F_{1m} = \frac{m}{2\sqrt{2}} \frac{I w_{\sin}}{p_n}.$$

Обмотковий коефіцієнт синусної обмотки $k_{\sin} = 4/\pi = 0,7854$.

Число витків еквівалентної синусної обмотки

$$w_{\sin} = \frac{w_e}{k_{\sin}}. \quad (1.2)$$

У більшості випадків обмотки електричних машин виконуються таким чином, що між обмотковими коефіцієнтами дотримується співвідношення $k_{об} > k_{\sin}$.

Розглянемо як приклад двошарову обмотку статора трифазного асинхронного двигуна зі скороченим кроком, параметри якої наводяться в табл. 1.

Розрахункові параметри обмотки статора визначено з використанням методики, наведеної в роботі [3], а також на підставі виразів (1), (2).

Аналіз виразів (1.1), (1.2) та даних табл. 1 дозволяє зробити наступний висновок: за умови, що $k_{об} > k_{\sin}$, ефективна кількість витків фази обмотки менша, а кількість витків еквівалентної синусної обмотки більша за кількість витків фази обмотки трифазної машини.

На рис. 1.1 показано поперечний розріз трифазного асинхронного двигуна (АД). Зазначимо, що можливий варіант конструктивного виконання АД, в якому відсутня маточина з немагнітного матеріалу 6 (рис. 1).

Таблиця 1 Параметри обмотки статора

| Найменування параметрів, одиниці вимірювання | Позначення, розрахункова формула | Значення |
|--|---|----------|
| Исходные данные | | |
| Число пазів | Z_1 | 24 |
| Число пар полюсів | p_n | 2 |
| Число фаз | m_1 | 3 |
| Число витків фази обмотки | w_1 | 88 |
| Шаг обмотки по пазам | y_1 | 5 |
| Розрахункові параметри | | |
| Полюсне ділення, зубцевих ділень | $\tau = \frac{Z_1}{2p_n}$ | 6 |
| Відносний шаг обмотки | $\beta = \frac{y_1}{\tau}$ | 0,833 |
| Коефіцієнт укорочення шагу обмотки | $k_{y1} = \sin(\beta \cdot 90^\circ)$ | 0,965 |
| Число пазів на полюс і фазу | $q_1 = \frac{Z_1}{2p_n m_1}$ | 2 |
| Пазовий кут, ел. град. | $\gamma = \frac{360p_n}{Z_1}$ | 30 |
| Коефіцієнт розподілення обмотки | $k_{p1} = \frac{\sin(0,5q_1\gamma)}{q_1 \sin(0,5\gamma)}$ | 0,965 |
| Обмотковий коефіцієнт | $k_{o\delta 1} = k_{y1} k_{p1}$ | 0,933 |
| Ефективне число витків фази обмотки | $w_e = k_{o\delta} w_1$ | 82 |
| Число витків синусної обмотки | $w_{\sin} = \frac{w_e}{k_{\sin}}$ | 104 |

На рис. 1.2 показано діаграму розподілу МРС фази А статора вздовж повітряного зазору АД з двошаровою обмоткою та укороченим кроком (табл. 1.1). Тут же наведено діаграму основної гармоніки МРС фази А статора. Зазначимо, що F_{Am} – це значення МРС на осі фази А статора при струмі i , що дорівнює максимальному.

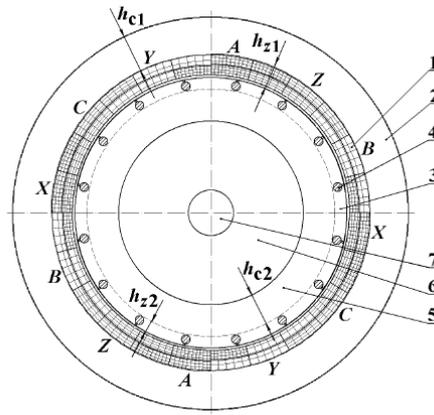


Рисунок 1.1. Поперечний розріз трифазного АТ з двома парами полюсів: 1 – зубцевий шар статора з розташованою в ньому двошаровою обмоткою; 2 – спинка статора; 3 – зубцевий шар ротора; 4 – стержні ротора; 5 – спинка ротора; 6 – маточина з немагнітного матеріалу; 7 – вал

Виконавши перетворення координат трифазного АД до осей d , q з дотриманням перелічених раніше принципів, отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = R_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}) \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}) \\ 0 = R_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - (\omega - \omega_1) (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}) \\ 0 = R_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} - (\omega - \omega_1) (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}) \\ J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = p_n (M_e - M_c) \\ M_e = p_n M_m (i_{1q} i_{2d} - i_{2q} i_{1d}), \end{array} \right. \quad (1.3)$$

де R_1 , L_1 – активний опір та індуктивність фази обмотки статора узагальненої машини; R_2 , L_2 – активний опір та індуктивність фази обмотки ротора узагальненої машини; M_m – взаємна індуктивність; ω_1 – частота обертання системи координат d , q ; ω – частота обертання ротора, ел. рад/с; J_Σ – сумарний момент інерції рухомих частин; M_e – електромагнітний момент; M_c – статичний момент.

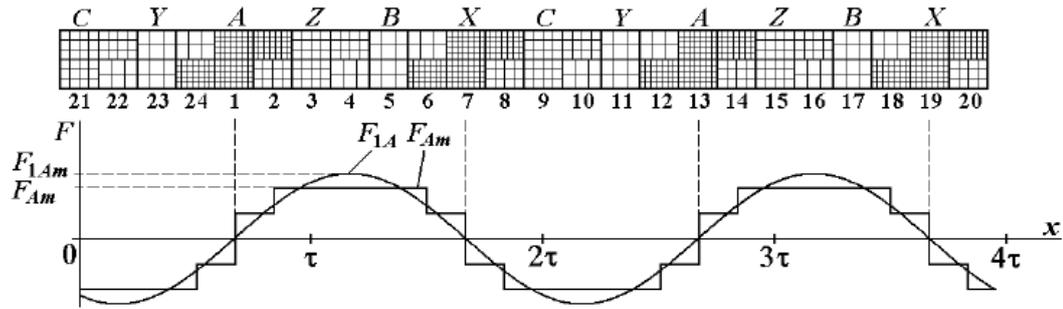


Рисунок 1.2. Діаграма розподілу МРС фази А статора вздовж повітряного зазору АД з двошаровою обмоткою та вкороченим кроком

В рівняннях системи (1.3) величини і параметри ротора приведені до статора, а в рівняннях руху та електромагнітного моменту використовуються електромагнітний, статичний, а також момент інерції реального АД.

Математичній моделі АД, записаній з позицій теорії узагальненої електричної машини (1.3), відповідає просторова модель в осях d , q , представлена на рис. 1.3.

На рис. 1.3 осі фаз обмотки статора трифазного АД позначені A_1 , B_1 , C_1 , а кут між віссю d узагальненої машини і віссю A_1 статора – α_1 .

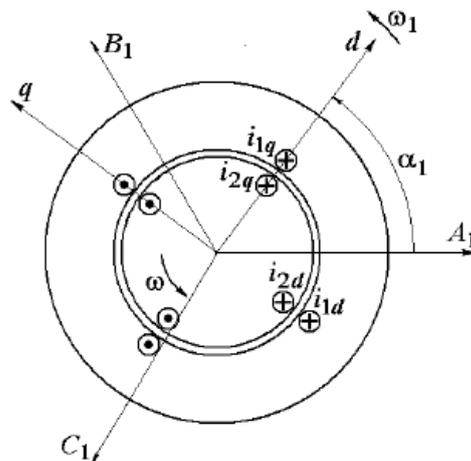


Рисунок 1.3. Просторова модель узагальненої електричної машини

Система рівнянь (1.3) не є новою і наводиться, наприклад, в [1, 2, 4, 5]. Однак матриці перетворення струмів і напруг у різних джерелах вибираються по-різному. При цьому не завжди зберігається величина магнітного потоку одного полюса, тому виникають відмінності у підходах до визначення параметрів узагальненої машини, що входять до системи рівнянь (1.3). На

підставі аналізу математичної моделі узагальненої електричної машини (1.3) отримано співвідношення між величинами та параметрами фаз обмоток статора та ротора узагальненої електричної машини та АД, які зведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 Співвідношення параметрів і величин обмоток узагальненої електричної машини та трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора

| Найменування параметрів і величин узагальненої електричної машини | Позначення | Співвідношення з параметрами трифазного АД з приведеною до статора обмоткою ротора |
|---|---|--|
| Параметри і величини обмотки статора | | |
| Величина вектора струму статора | I_1^0 | $I_1^0 = \frac{3}{2} I_1 \sqrt{2} = \frac{3}{2} I_{1m}$ |
| Величина вектора напруги статора | U_1^0 | $U_1^0 = U_1 \sqrt{2} = U_{1m}$ |
| Активний опір фази | $R_1 = R_{1d} = R_{1q}$ | $R_1 = \frac{2}{3} R_{1p}$ |
| Індуктивність фази від потоку розсіювання | $L_{1\sigma} = L_{1d\sigma} = L_{1q\sigma}$ | $L_{1\sigma} = \frac{2}{3} L_{1p\sigma}$ |
| Індуктивність фази | $L_1 = L_{1d} = L_{1q}$ | $L_1 = \frac{2}{3} L_{1p\sigma} + M_m$ |
| Параметри і величини обмотки ротора | | |
| Величина вектора струму ротора | I_1^0 | $I_2^0 = \frac{3}{2} I_2 \sqrt{2} = \frac{3}{2} I_{2m}$ |
| Активний опір фази | $R_2 = R_{2d} = R_{2q}$ | $R_2 = \frac{2}{3} R_{2p}$ |
| Індуктивність фази від потоку розсіювання | $L_{2\sigma} = L_{2d\sigma} = L_{2q\sigma}$ | $L_{2\sigma} = \frac{2}{3} L_{2p\sigma}$ |
| Індуктивність фази | $L_2 = L_{2d} = L_{2q}$ | $L_2 = \frac{2}{3} L_{2p\sigma} + M_m$ |

Зазначимо, що співвідношення, наведені в табл. 1.2, записані стосовно трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора. Параметри цього АД домовимося позначати індексом p , а величини узагальненої машини – індексом σ .

1.2 Співвідношення параметрів і величин обмоток узагальненої електричної машини та трифазного АД

З метою створення фізичної моделі гіпотетичної узагальненої електричної машини встановимо кількісні співвідношення між її конструктивними параметрами та параметрами АД зі зведеною до статора обмоткою ротора. При цьому вважаємо, що для узагальненої електричної машини враховуються всі введені раніше допущення, а також зберігаються наступні параметри та величини реальної машини:

- 1) магнітний потік, створюваний першою просторовою гармонікою магнітної індукції одного полюса;
- 2) активна довжина статора та ротора;
- 3) полюсний поділ.

Перехід від реального трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і числом пар полюсів p_n до узагальненої машини може бути здійснений за одним з двох варіантів, кожен з яких містить у собі два етапи.

Перший варіант передбачає виконання наступних етапів:

- 1) перехід від реального трифазного АД з короткозамкненим ротором і числом пар полюсів p_n до трифазного АД з короткозамкненим ротором і однією парою полюсів;
- 2) перехід від трифазного АД з короткозамкненим ротором і однією парою полюсів до узагальненої електричної машини.

В процесі перетворення за другим варіантом необхідно виконати наступні етапи:

- 1) перехід від реального трифазного АД з короткозамкненим ротором і числом пар полюсів p_n до трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора;
- 2) перехід від трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора до узагальненої електричної машини.

Розглянемо основні співвідношення між параметрами реального трифазного АД з числом пар полюсів p_n і трифазного АД з однією парою полюсів.

У реальному АД кутова частота напруги живлення ω_1 у p_n разів більша за геометричну частоту обертання магнітного поля ω_{1r} . В АД з однією парою полюсів кутова частота напруги живлення зберігається, а геометрична частота обертання магнітного поля ω_{1r} дорівнює кутовій частоті напруги живлення ω_1 , тобто збільшується в p_n разів. Оскільки геометрична частота обертання магнітного поля ω_{1r} АД з однією парою полюсів в p_n разів більша за геометричну частоту обертання реального двигуна, то і частота обертання ротора АД з однією парою полюсів буде в p_n разів більша за частоту обертання ротора w реальної машини. У зв'язку з цим електромагнітний момент АД з однією парою полюсів повинен бути в p_n разів менший за електромагнітний момент M_e реальної машини за умови збереження потужності. Полісний поділ τ зберігається, а число полюсів зменшується в p_n разів. Отже, діаметр АД з однією парою полюсів по середня лінія повітряного зазору D_{cp} зменшується в p_n разів. МРС всіх витків реальної обмотки ділиться на $2 p_n$ зазори, а у АД з однією парою полюсів – на 2. Звідси випливає, що МРС, яка припадає на один повітряний зазор реального АД, в p_n разів менша, ніж у АД з однією парою полюсів. Щоб магнітний потік одного полюса зберігся, необхідно магнітний опір повітряного зазору на одному полюсному діленні R_δ АД з однією парою полюсів збільшити в p_n разів. Тому повітряний зазор δ АД з однією парою полюсів має бути в p_n разів більшим за повітряний зазор реальної машини. При цьому амплітуда першої гармоніки магнітної індукції в повітряному зазорі $B_{\delta 1m}$ АД з однією парою полюсів має бути такою ж, як у реальної машини. Значення густин струму обмотки статора і ротора обох двигунів мають бути однаковими. Зберігаючи незмінними об'єми міді обмотки статора і алюмінію обмотки ротора, а також густини струму цих обмоток, отримаємо, що висоти зубцевих шарів статора h_{z1} і ротора h_{z2} зростають в p_n разів. При цьому незмінне значення магнітного потоку одного полюса можна забезпечити, зберігши висоти спинки статора h_{c1} і спинки ротора h_{c2} . Електричні втрати в обмотках статора і ротора обох двигунів мають бути рівні. Результати проведеного аналізу зведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 Співвідношення величин і конструктивних параметрів АД з числом пар полюсів p_{Π} і АД з однією парою полюсів

| Найменування параметру | Реальний АД з числом пар полюсів p_{Π} | АД з однією парою полюсів |
|--|--|---------------------------|
| Магнітний потівок одного полюса | Φ_1 | Φ_1 |
| Полюсний тиск | τ | τ |
| Активна довжина статора і ротора | l | l |
| Кутова частота живильної напруги | ω_1 | ω_1 |
| Геометрична частота обертання магнітного поля | ω_{1r} | $p_{\Pi}\omega_{1r}$ |
| Число пазів статора | Z_1 | Z_1/p_{Π} |
| Число витків фази обмотки | w_1 | w_1 |
| Шаг обмотки по пазам | y_1 | y_1 |
| Обмотковий коефіцієнт | $k_{об1}$ | $k_{об1}$ |
| Магніторушійна сила на один полюс | F_{1m} | $p_{\Pi}F_{1m}$ |
| Середня довжина витку обмотки статора | $l_{в1}$ | $l_{в1}$ |
| Висота зубцового шару статора | h_{z1} | $p_{\Pi}h_{z1}$ |
| Висота спинки статора | h_{c1} | h_{c1} |
| Площа міді обмотки статора | $S_{м1}$ | $p_{\Pi}S_{м1}$ |
| Об'єм міді обмотки статора | $V_{м1}$ | $V_{м1}$ |
| Густина струму в обмотці статора | j_1 | j_1 |
| Електричні втрати в обмотці статора | ΔP_{e1} | ΔP_{e1} |
| Діаметр машини по середній лінії повітряного зазору | $D_{ср}$ | Z_2/p_{Π} |
| Амплітуда першої гармоніки магнітної індукції в повітряному зазорі | $B_{\delta 1m}$ | $B_{\delta 1m}$ |
| Магнітний опір повітряного зазору | R_{δ} | $p_{\Pi}R_{\delta}$ |
| Повітряний зазор | δ | $p_{\Pi}\delta$ |
| Число пазів ротора | Z_2 | Z_2/p_{Π} |
| Площа алюмінія (площа стержнів) обмотки ротора | S_{a2} | $p_{\Pi}S_{a2}$ |
| Об'єм алюмінія обмотки ротора | V_{a2} | V_{a2} |
| Густина струму в обмотці ротора | j_2 | j_2 |
| Електричні втрати в обмотці ротора | ΔP_{e2} | ΔP_{e2} |
| Висота зубцового шару ротора | h_{z2} | $p_{\Pi}h_{z2}$ |
| Висота спинки ротора | h_{c2} | h_{c2} |
| Частота обертання, геом. рад/с | ω | $p_{\Pi}\omega$ |
| Потужність на валу | P_2 | P_2 |
| Електромагнітний момент | M_e | M_e / p_{Π} |

На рис. 1.4 показано поперечний розріз, а на рис. 1.5 – діаграму розподілу МРС фази A статора та основної гармоніки МРС фази A статора АД з однією

парою полюсів. Зазначимо, що співвідношення параметрів на рис. 1.1, 1.4 та рис. 1.2, 1.5 відповідає даним табл. 1.3.

Далі виконується етап переходу від трифазного АТ з однією парою полюсів до узагальненої електричної машини.

Зазначимо, що традиційним є перехід від реального трифазного АТ з короткозамкненим ротором та числом пар полюсів r_p до узагальненої машини, що виконується за другим варіантом.

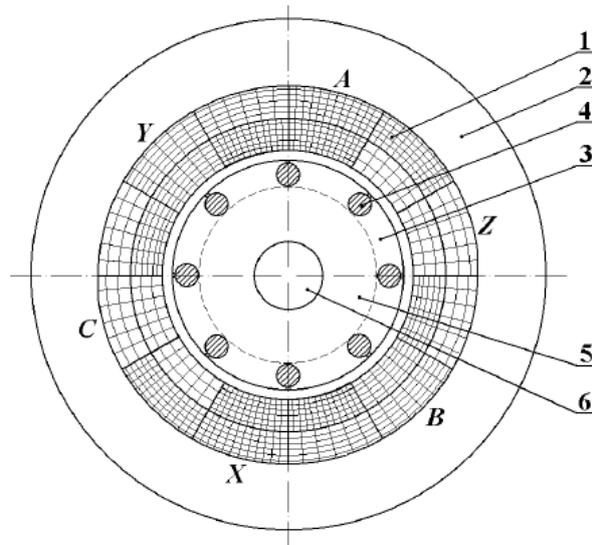


Рисунок 1.4. Поперечний розріз трифазного АТ з однією парою полюсів: 1 – зубцевий шар статора з розміщеною в ньому двошаровою обмоткою; 2 – спинка статора; 3 – зубцевий шар ротора; 4 – стержні ротора; 5 – спинка ротора; 6 – вал

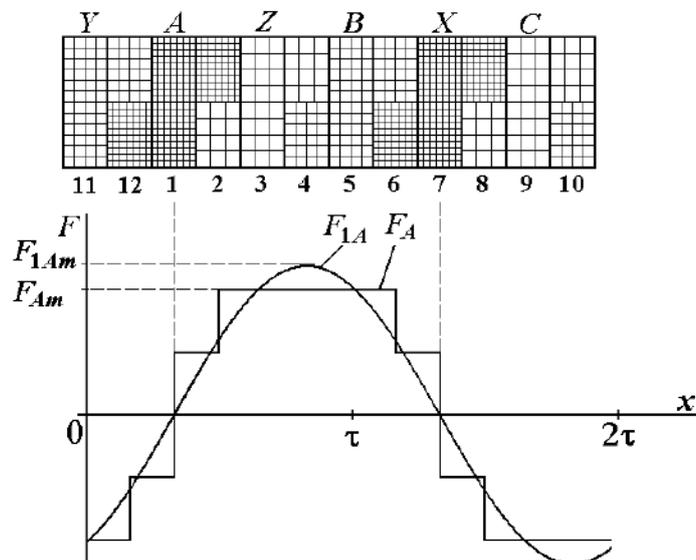


Рисунок 1.5. Діаграма розподілу МРС фази А статора вздовж повітряного зазору АД з однією парою полюсів

Одним з етапів цього переходу є приведення величин і параметрів короткозамкненого ротора до трифазної обмотки статора. Методики такого приведення викладено в [3, 6]. Таким чином, виконавши перший етап перетворення, отримуємо величини і параметри трифазного АД з числом пар полюсів p_n і приведеною до статора обмоткою ротора.

Розглянемо співвідношення між параметрами трифазного АД з числом пар полюсів p_n і приведеною до статора обмоткою ротора та узагальненою електричною машиною.

У трифазному АД з приведеною до статора обмоткою ротора кутова частота напруги живлення ω_1 у p_n разів більша за геометричну частоту обертання магнітного поля $\omega_{1\Gamma}$. В узагальненій машині кутова частота напруги живлення зберігається, а геометрична частота обертання магнітного поля $\omega_{1\Gamma}$ дорівнює кутовій частоті напруги живлення ω_1 , тобто збільшується в p_n разів. Оскільки геометрична частота обертання магнітного поля $\omega_{1\Gamma}$ узагальненої машини в p_n разів більша за геометричну частоту обертання реальної машини, то і частота обертання ротора узагальненої машини буде в p_n разів більша за частоту обертання ротора ω трифазного АД з приведеною до статора обмоткою ротора. У зв'язку з цим електромагнітний момент узагальненої машини має бути в p_n разів меншим за електромагнітний момент M_e трифазного АД з приведеною до статора обмоткою ротора за умови збереження потужності. Полюсний поділ τ зберігається, а число полюсів зменшується в p_n разів. Отже, діаметр узагальненої машини по середній лінії повітряного зазору D_{cp} зменшується в p_n разів. МРС всіх витків реальної обмотки ділиться на $2 p_n$ зазори, а в узагальненої машини – на 2. Звідси випливає, що МРС, яка припадає на один повітряний зазор трифазного АД з приведеною до статора обмоткою ротора, в p_n разів менша, ніж в узагальненої машини. Щоб магнітний потік одного полюса зберігся, необхідно магнітний

опір повітряного зазору на одному полюсному поділі R_δ узагальненої машини збільшити в p_n разів.

Таким чином, повітряний зазор δ узагальненої машини має бути в p_n разів більшим за повітряний зазор трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора. При цьому амплітуда першої гармоніки магнітної індукції в повітряному зазорі $B_{\delta 1m}$ узагальненої машини має бути такою ж, як у трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора.

Ефективні значення густин струму обмотки статора j_1 трифазного АД і узагальненої машини мають бути однаковими:

$$j_1 = \frac{j_m}{\sqrt{2}}; \quad j_1 = \sqrt{\frac{J_{1d}^2 + J_{1q}^2}{2}},$$

де j_m – амплітудне значення густини струму статора трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора; j_{1d}, j_{1q} – густини струму в поздовжній і поперечній фазах обмотки статора узагальненої машини.

Зберігаючи незмінними об'єми міді обмотки статора та алюмінію обмотки ротора, а також густини струму цих обмоток, отримаємо, що висоти зубцевих шарів статора h_{z1} і ротора h_{z2} зростають у p_n разів. При цьому незмінне значення магнітного потоку одного полюса можна забезпечити, зберігши висоти спинки статора h_{c1} і спинки ротора h_{c2} . Електричні втрати в обмотках статора та ротора цих машин мають бути рівними.

Співвідношення між величинами та конструктивними параметрами трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора та гіпотетичної узагальненої електричної машини, отримані в ході проведеного аналізу, зведені в табл. 1.4.

Поперечний розріз гіпотетичної узагальненої електричної машини показано на рис. 1.6.

Радіуси фаз обмотки статора узагальненої машини змінюються у відповідності з виразами:

$$r_{1d} = R_{1\sigma} + \frac{p_n h_{z1}}{\sqrt{2}} |\sin p_n x|; \quad r_{1q} = R_{1\sigma} + \frac{p_n h_{z1}}{\sqrt{2}} |\sin p_n x|,$$

де $R_{1в}$ – внутрішній радіус синусоїдної обмотки статора; $R_{1н}$ – зовнішній радіус синусоїдної обмотки статора; $p_n h_{z1}$ – висота синусоїдної обмотки статора.

Таблиця 1.4 Співвідношення величин і конструктивних параметрів АД зі зведеною до статора обмоткою ротора та узагальненої електричної машини

| Найменування параметра | АД с приведеною до статора обмоткою ротора | Узагальнена машина |
|--|--|---|
| Активна потужність, споживана статором | P_1 | P_1 |
| Ефективне число витків фази обмотки | w_3 | w_3 |
| Середня довжина витку обмотки статора | l_{B1} | l_{B1} |
| Магніторухійна сила на один полюс | F_{1m} | $p_{\pi} F_{1m}$ |
| Магнітний потік одного полюса | Φ_1 | Φ_1 |
| Полюсне ділення | τ | τ |
| Активна довжина статора і ротора | l | l |
| Кутова частота живильної напруги | ω_1 | ω_1 |
| Геометрична частота обертання магнітного поля | ω_{1r} | $p_{\pi} \omega_{1r}$ |
| Діаметр машини по середній лінії повітряного зазору | D_{cp} | D_{cp}/p_{π} |
| Магнітний опір повітряного зазору | R_{δ} | $p_{\pi} R_{\delta}$ |
| Повітряний зазор | δ | $p_{\pi} \delta$ |
| Амплітуда першої гармоніки магнітної індукції в повітряному зазорі | $B_{\delta 1m}$ | $B_{\delta 1m}$ |
| Електричні втрати в обмотці статора | ΔP_{e1} | ΔP_{e1} |
| Густина струму в обмотці статора (середньоквадратичне значення) | j_1 | j_1 |
| Площа поперечного перетину провідників обмотки статора | $S_{пр1}$ | $\frac{3}{2} \frac{k_{об1}}{k_{sin}} \cdot S_{sp1}$ |
| Діаметр провідника обмотки статора | $d_{пр1}$ | $\frac{3}{2} \frac{k_{об1}}{k_{sin}} \cdot d_{sp1}$ |
| Висота зубцового шару статора (висота синусоїдної обмотки статора) | h_{z1} | $p_{\pi} h_{z1}$ |
| Висота спинки статора | h_{c1} | h_{c1} |
| Електричні втрати в обмотці ротора | ΔP_{e2} | ΔP_{e2} |
| Густина струму в обмотці ротора (середньоквадратичне значення) | j_2 | j_2 |
| Площа поперечного перетину провідників обмотки ротора | $S_{пр2}$ | $\frac{3}{2} \frac{k_{об2}}{k_{sin}} \cdot S_{sp2}$ |
| Діаметр провідника обмотки ротора | $d_{пр2}$ | $\frac{3}{2} \frac{k_{об2}}{k_{sin}} \cdot d_{sp2}$ |
| Висота зубцового шару ротора (висота синусоїдної обмотки ротора) | h_{z2} | $p_{\pi} h_{z2}$ |
| Висота спинки ротора | h_{c2} | h_{c2} |
| Частота обертання, геом. рад/с | ω | $p_{\pi} \omega$ |
| Потужність на валу | P_2 | P_2 |
| Електромагнітний момент | M_e | M_e/p_{π} |

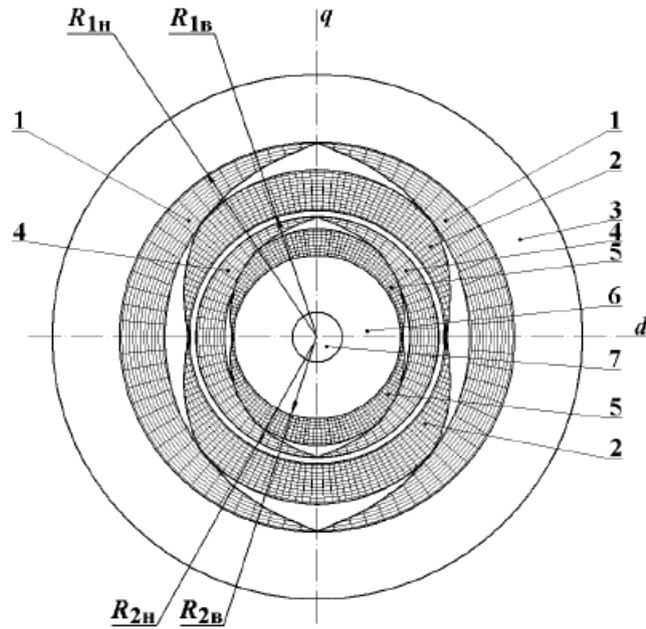


Рисунок 1.6. Поперечний розріз гіпотетичної узагальненої електричної машини: 1 – фаза d синусоїдної обмотки статора; 2 – фаза q синусоїдної обмотки статора; 3 – спинка статора; 4 – фаза d синусоїдної обмотки ротора; 5 – фаза q синусоїдної обмотки ротора; 6 – спинка ротора; 7 – вал

Діаграма зміни радіусів фаз синусоїдної обмотки статора узагальненої електричної машини вздовж повітряного зазору показана на рис. 1.7.

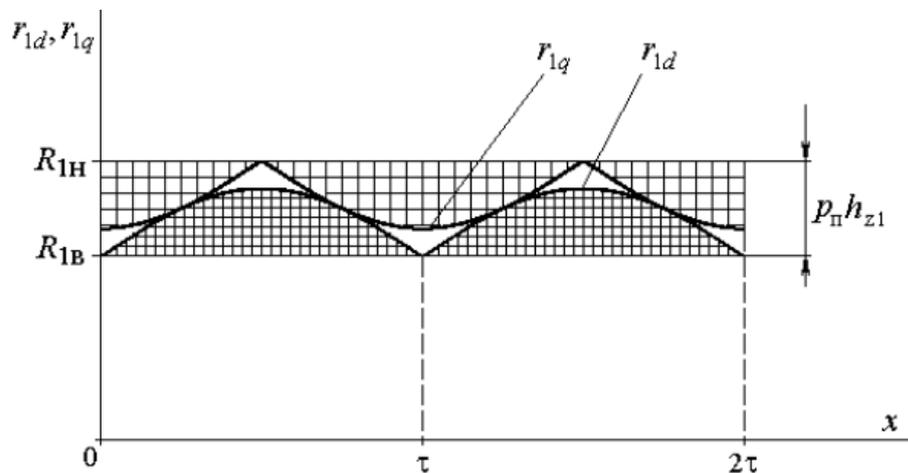


Рисунок 1.7. Діаграма зміни радіусів фаз обмотки статора узагальненої електричної машини вздовж повітряного зазору.

Аналогічні вирази та діаграми можуть бути отримані для радіусів фаз обмотки ротора узагальненої машини.

Порівняльний аналіз рис. 1.1, 1.2 та рис. 1.4, 1.5, а також даних табл. 1.3 показує, що в АД з однією парою полюсів порівняно з АД, що має число пар полюсів p_n , у p_n разів більшими є наступні конструктивні параметри та величини:

- 1) амплітуда МРС, що припадає на один полюс;
- 2) висота зубцевого шару статора та ротора;
- 3) площа обмоток статора та ротора;
- 4) повітряний зазор;
- 5) частота обертання.

Разом з тим, у p_n разів зменшуються:

- 1) число пазів статора та ротора;
- 2) діаметр машини по середній лінії повітряного зазору;
- 3) електромагнітний момент.

Порівняльний аналіз рис. 1.1 та рис. 1.6, а також даних табл. 1.4 показує, що в узагальненій машині порівняно з АД, що має число пар полюсів p_n , у p_n разів більшими є наступні конструктивні параметри та величини:

- 1) амплітуда МРС, що припадає на один полюс;
- 2) висота синусних обмоток статора та ротора;
- 3) повітряний зазор.

У p_n разів зменшуються:

- 1) діаметр машини по середній лінії повітряного зазору;
- 2) електромагнітний момент.

Таким чином, виконавши перетворення координат так, щоб зберегти незмінними результуючі МРС та ефективну кількість витків фаз обмоток, отримаємо математичну модель узагальненої електричної машини, що дозволяє зберегти фізику магнітних процесів реального двигуна. На основі проведеного аналізу отримано співвідношення основних величин та конструктивних параметрів узагальненої електричної машини та АД з приведеною до статора обмоткою ротора. Зазначені співвідношення

дозволяють створити інженерний образ гіпотетичної узагальненої електричної машини.

Висновки по першому розділу

1. За умови рівності результуючих магніторухійних сил проведено аналіз обмоткових даних реального трифазного АД та узагальненої машини. Встановлено, що в більшості випадків число витків фази діаметральної зосередженої обмотки менше, а число витків еквівалентної синусної обмотки більше числа витків фази обмотки реальної машини.

2. Пропонується виконувати перетворення координат за умови рівності ефективного числа витків фази обмотки узагальненої машини ефективному числу витків фази обмотки реальної машини та результуючих МРС, створюваних обмотками цих машин. Подібний підхід дозволяє зберегти величину магнітного потоку, що припадає на один полюс. Ця обставина в подальшому дозволить врахувати насичення магнітопроводу.

3. На підставі аналізу математичної моделі узагальненої електричної машини отримано співвідношення між величинами фазних струмів і напруг, а також активними опорами та індуктивностями обмоток фаз статора і ротора узагальненої електричної машини та трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора.

4. За умов рівності ефективного числа витків фаз обмоток і результуючих МРС встановлено кількісні співвідношення між конструктивними параметрами узагальненої електричної машини та параметрами трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора. Зазначені співвідношення дозволяють створити фізичну модель гіпотетичної узагальненої електричної машини.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА ВПЛИВУ МІЖВИТКОВОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

У цементному виробництві в якості елемента електропривода тарільчастих живильників сировинних млинів, клінкерних транспортерів, шламових насосів, печей випалювання використовуються високовольтні асинхронні двигуни як з фазним, так і з короткозамкненим ротором.

Причини виникнення несправностей асинхронних двигунів мають різну природу. Однією з найпоширеніших причин аварій у подібних виробництвах є робота двигуна в умовах високого забруднення. Крім того, аварії є результатом недосконалості технологічних процесів виробництва, недотримання умов експлуатації.

Згідно зі статистикою, капітальному ремонту піддається приблизно 20 % електродвигунів, в інших випадках несправності виникають на більш ранніх термінах експлуатації. У 70–80 % випадків виходу з ладу асинхронних двигунів причиною є пошкодження обмоток. У свою чергу, вихід з ладу обмоток у 93 % випадках обумовлений міжвитковим замиканням [3]. Дефекти, що виникають, стають причиною виникнення різного роду несиметрій в електричних і магнітних колах електродвигунів.

При цьому міжвиткові короткі замикання є одними з найбільш важко виявляємих пошкоджень. Найбільш ефективні методи (аналіз спектра модулів векторів Парка, аналіз магнітного потоку, вимірювання часткових розрядів, сигнатурний аналіз електричних сигналів електродвигуна та ін.) ґрунтуються на виявленні характерних частотних складових сигналу, що свідчать про наявність даного виду несправності. Однак на практиці джерелом таких частотних складових може бути невеликий дисбаланс напруги живлення, який неминучий під час експлуатації, або зміни у приводному механізмі [3]. Тому за даним критерієм досить важко розрізнити міжвиткове коротке замикання і, наприклад, несиметрію напруги живлення.

2.1 Системи диференціальних рівнянь для дослідження міжвиткових коротких замикань в одній із фаз ротора

Нижче представлено результати виводу системи диференціальних рівнянь для дослідження міжвиткових коротких замикань в одній із фаз ротора (в даному випадку у фазі A).

Система рівнянь, що описує електромагнітні процеси машини, побудована на базі класичного математичного опису асинхронного двигуна в трифазній природній системі координат [4]. Для досягнення сформульованої мети роботи отримано модифікацію математичної моделі, що враховує особливості досліджуваних режимів. В результаті, опис системи рівнянь забезпечує додаткову можливість врахування несиметрії обмоток, і, як відмінна властивість модифікації, отримана система має додаткове рівняння для короткозамкненого контуру обмотки фази A ротора та враховує частку короткозамкнених витків пошкодженої фази [1].

Модифікована система диференціальних рівнянь статора має вигляд

$$\begin{cases} u_A - i_A R_A - \frac{d\Psi_A}{dt} - u_B + i_B R_A + \frac{d\Psi_B}{dt} = 0, \\ u_B - i_B R_B - \frac{d\Psi_B}{dt} - u_C + i_C R_C + \frac{d\Psi_C}{dt} = 0, \\ i_A + i_B + i_C = 0. \end{cases}$$

Модифікована система рівнянь ротора запишеться у вигляді

$$\begin{cases} u_A - i_A R_A - \frac{d\Psi_A}{dt} - u_B + i_B R_A + \frac{d\Psi_B}{dt} = 0, \\ u_B - i_B R_B - \frac{d\Psi_B}{dt} - u_C + i_C R_C + \frac{d\Psi_C}{dt} = 0, \\ i_A + i_B + i_C = 0. \end{cases}$$

де $R_k = R_{avk}$ – активний опір короткозамкненого контуру. При цьому вирази потокозчеплень фаз статора та ротора мають вигляд:

$$\begin{aligned} \Psi_A = & (L_{1\sigma} + L_m)i_A - \frac{1}{2}L_m i_B - \frac{1}{2}L_m i_C + L_m v_o i_a \cos(\varphi + 0) + L_m v_k i_k \cos(\varphi + 0) + \\ & + L_m i_b \cos\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) + L_m i_c \cos\left(\varphi - \frac{3\pi}{2}\right), \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_B = & (L_{1\sigma} + L_m)i_B - \frac{1}{2}L_m i_A - \frac{1}{2}L_m i_C + L_m i_b \cos(\varphi + 0) + L_m L_m v_o i_a \cos\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) \\ & + L_m v_k i_k \cos\left(\varphi - \frac{3\pi}{2}\right) + L_m i_c \cos\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Psi_C = & (L_{1\sigma} + L_m)i_C - \frac{1}{2}L_m i_A - \frac{1}{2}L_m i_B + L_m i_c \cos(\varphi + 0) + L_m i_c \cos(\varphi + 0) + \\ & + L_m L_m v_o i_a \cos\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) + L_m v_k i_k \cos\left(\varphi - \frac{3\pi}{2}\right) + L_m i_b \cos\left(\varphi - \frac{3\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a = & (L_{2\sigma} + L_m)v_o^2 i_a + L_m v_o v_k i_k - \frac{1}{2}L_m v_o i_b - \frac{1}{2}L_m v_o i_c + L_m v_o i_A \cos(-\varphi + 0) + \\ & + L_m v_o i_B \cos\left(-\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) + L_m v_o i_C \cos\left(-\varphi - \frac{3\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \Psi_b = & (L_{2\sigma} + L_m)i_b - \frac{1}{2}L_m v_k i_k - \frac{1}{2}L_m v_o i_a - \frac{1}{2}L_m i_c + L_m v_o i_B \cos(-\varphi + 0) + \\ & + L_m v_o i_C \cos\left(-\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) + L_m v_o i_A \cos\left(-\varphi - \frac{3\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_c = & (L_{2\sigma} + L_m)i_c - \frac{1}{2}L_m v_k i_k - \frac{1}{2}L_m v_o i_a - \frac{1}{2}L_m i_b + L_m v_o i_B \cos(-\varphi + 0) + \\ & + L_m v_o i_A \cos\left(-\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) + L_m v_o i_B \cos\left(-\varphi - \frac{3\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (2.8)$$

де L_m – еквівалентна взаємна індуктивність; $L_{1\sigma}$ – індуктивність розсіювання обмотки статора; $L_{2\sigma}$ – індуктивність розсіювання обмотки ротора; i_A, i_B, i_C – струми статора у фазах A, B і C відповідно; i_a, i_b, i_c – струми ротора у фазах A, B і C відповідно; v_k – відношення кількості витків короткозамкнутого кон- туру до загальної кількості витків фази ротора; v_o – відношення кількості витків, що «вціліли», до загальної кількості витків фази ротора; φ – кут положення обмотки фази ротора і відповідної однойменної обмотки фази статора.

В результаті спільного розв'язання рівнянь (2.3)–(2.8) та (2.1), (2.2) отримано рівняння, на основі яких розраховуються величини струмів та електромагнітного моменту асинхронного двигуна при міжвитковому короткому замиканні. Підсумковий запис даних рівнянь має наступний вигляд.

Фаза *A* статора

$$\begin{aligned} & -\left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_A}{dt} + \left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_B}{dt} + L_m\left[-v_o\sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) - \sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right]\frac{di_a}{dt} + \\ & + L_m\left[\left(-v_k\sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)\right)\frac{di_k}{dt} + L_m\left(3\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right)\right)\right]\frac{di_b}{dt} + \\ & + L_m i_a \omega_r \left[v_o\sqrt{3}\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right) + \sqrt{3}\cos(\varphi)\right] + L_m i_k v_k \omega_r \left[\sqrt{3}\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right)\right] + L_m i_b \omega_r \left[3\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)\right] + \\ & + [U_A \sin(\omega t - \alpha_a) - U_B \sin(\omega t - \alpha_b)] - i_A R_A + i_B R_B = 0. \end{aligned}$$

Фаза *B* статора

$$\begin{aligned} & -2\left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_B}{dt} + \left(L_{1\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_A}{dt} + L_m\left[-v_o\sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) - \sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right]\frac{di_a}{dt} + \\ & + L_m\left[\left(-v_k\sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)\right)\frac{di_k}{dt} + L_m\left(3\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right)\right)\right]\frac{di_b}{dt} + \\ & + L_m i_a \omega_r \left[v_o\sqrt{3}\cos(\varphi - \pi) + \sqrt{3}\cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)\right] + L_m i_k v_k \omega_r \left[\sqrt{3}\cos(\varphi - \pi)\right] + L_m i_b \omega_r \left[3\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right] + \\ & + [U_B \sin(\omega t - \alpha_b) - U_C \sin(\omega t - \alpha_c)] - i_A R_C + i_B (R_B + R_C) = 0. \end{aligned}$$

Фаза *A* ротора

$$\begin{aligned} & -\left((L_{2\sigma} + L_m)v_o^2 + L_m v_o - \frac{1}{2}L_m\right)\frac{di_a}{dt} - \left(L_m v_o v_k + \frac{1}{2}L_m v_k\right)\frac{di_k}{dt} + \\ & + \left(L_{2\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_b}{dt} + L_m\left(v_o\sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{5\pi}{6}\right) + \sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right)\frac{di_A}{dt} + \\ & + L_m\left(v_o\sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)\right)\frac{di_B}{dt} + \\ & + L_m i_A \omega_r \left(v_o\sqrt{3}\cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) - \sqrt{3}\cos(\varphi)\right) + \\ & + L_m i_B \omega_r \left(-v_o\sqrt{3}\cos(\varphi) + \sqrt{3}\cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)\right) - i_a v_o R_a + i_{rb} R_b = 0. \end{aligned}$$

Фаза B ротора

$$\begin{aligned}
 & -2\left(L_{2\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_b}{dt} - \left(L_{2\sigma} + \frac{3}{2}L_m\right)\frac{di_a}{dt} + L_m(-3\cos(\varphi))\frac{di_B}{dt} + \\
 & + L_m\left(3\cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)\right)\frac{di_A}{dt} + L_m i_A \omega_r \left(3\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)\right) + \\
 & + L_m i_B \omega_r \left(3\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right) - i_a R_c - i_b (R_b + R_c) = 0.
 \end{aligned}$$

Короткозамкнений контур фази A ротора

$$\begin{aligned}
 & v_k^2 (L_{2\sigma} + L_m) \frac{di_k}{dt} + \left(L_m v_o v_k + \frac{1}{2} L_m v_k\right) \frac{di_a}{dt} + \\
 & + L_m v_k \sqrt{3} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) \frac{di_A}{dt} + L_m v_k \sqrt{3} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \frac{di_B}{dt} + \\
 & + L_m v_k i_A \omega_r \left(\sqrt{3} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right)\right) + L_m v_k i_B \omega_r \left(\sqrt{3} \cos(\varphi)\right) + i_k R_k = 0.
 \end{aligned}$$

Аналіз отриманих виразів дозволяє констатувати відмінні ознаки отриманої математичної моделі: в рівняннях є складові, що відображають вплив струму додаткового контуру, утвореного короткозамкненими витками, на струми фаз обмоток статора і ротора.

Електромагнітний момент асинхронної машини визначається як часткова похідна за геометричним кутом від загального запасу електромагнітної енергії машини. Електромагнітна енергія обмоток асинхронної машини визначається за співвідношенням:

$$W_E = \frac{1}{2} \cdot [\Psi_A \cdot i_A + \Psi_B \cdot i_B + \Psi_C \cdot i_C + \Psi_a \cdot i_a + \Psi_b \cdot i_b + \Psi_c \cdot i_c].$$

Звідси електромагнітний момент асинхронного двигуна

$$M = \frac{\partial W_E}{\partial \gamma} Z_p,$$

де Z_p – число пар полюсів двигуна.

Рівняння руху записується у вигляді

$$M - M_C = J \frac{d\omega_r}{dt},$$

де M_C – момент опору; J – сумарний момент інерції електропри- вода; ω_r – кутова частота обертання ротора.

2.2 Чисельне моделювання режиму міжвиткового короткого замикання в роторі

Об'єктом дослідження є високовольтний асинхронний електродвигун із фазним ротором типу АКЗ 13-62-8УХЛ4 потужністю 63 кВт із синхронною частотою обертання 750 об/хв. Електродвигуни даного типу використовуються в цементній промисловості як електропривод печей випалювання клінкеру.

В середовищі програмного пакета MatLab реалізовано моделювання режиму пуску двигуна за наявності міжвиткового короткого замикання в одній із фаз ротора [10]. В роботі даний режим характеризується залежностями струмів фаз обмоток статора та ротора, частоти обертання ротора від часу, механічною характеристикою асинхронного двигуна.

На рис. 2. 1, 2.2 наведено залежності струмів фаз статора та ротора від часу, на рис. 2.3 – залежність частоти обертання від часу, на рис. 2.4 – механічна характеристика машини для випадку 60 % витків фази в короткозамкнутому контурі фази A ротора ($v_k = 0,6$) при номінальному механічному навантаженні[11].

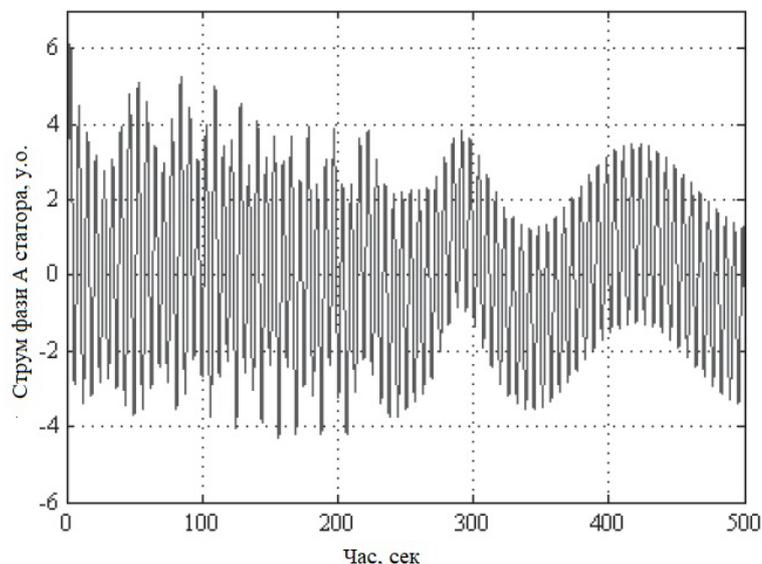


Рисунок 2.1 – Струм фази А статора при міжвитковому короткому замиканні в одній фазі ротора при $v_k = 0,6$

2.3 Аналіз результатів моделювання режиму міжвиткового короткого замикання

Як показує аналіз залежності частоти обертання ротора від часу (рис. 2.3), збільшення частоти обертання вала ротора в діапазоні від 0 до 0,5 синхронної відбувається за проміжок часу 280 електричних секунд. Слід зазначити, що для моделюемого режиму в наступний момент часу має місце різкий провал механічного моменту, зумовлений ефектом Гергеса, який виникає внаслідок несиметрії в ланцюзі ротора.

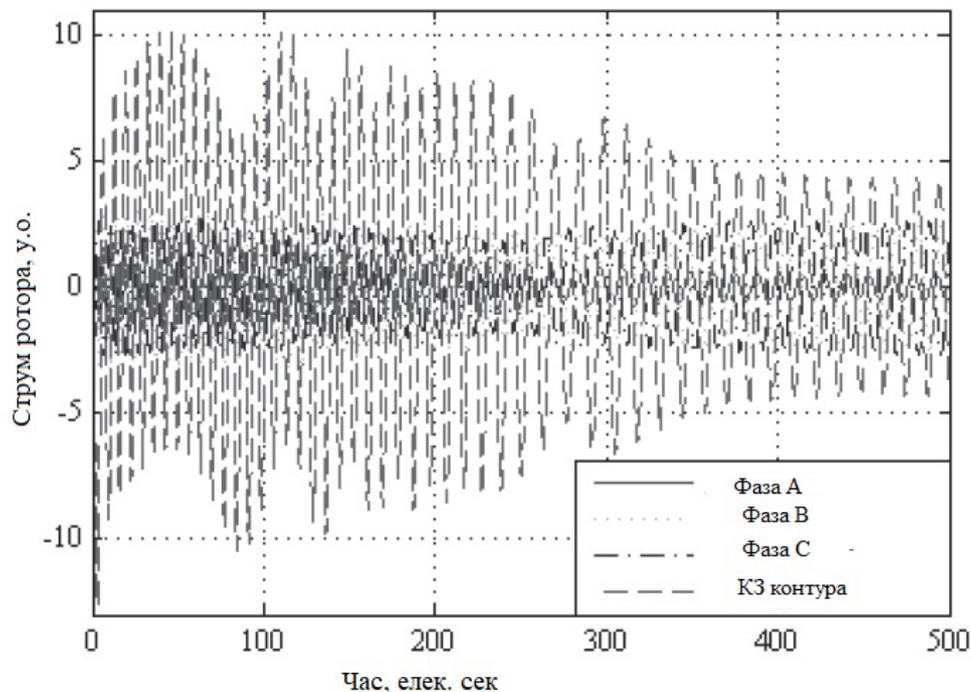


Рисунок 2.2 – Струми фаз ротора при міжвитковому короткому замиканні в одній фазі ротора при $v_k = 0,6$

Аналіз залежностей струмів фаз ротора у функції часу, наведених на рис. 2.2, у свою чергу, показує, що струм короткозамкненого контуру приблизно на порядок перевищує значення струмів в уцілілих частинах обмоток ротора. Це зумовлює перевищення струмів фаз ротора вище допустимих значень. Оскільки електричні втрати в обмотці пропорційні квадрату струму, то

значення потужності втрат у міді короткозамкненого контуру буде приблизно у 100 разів перевищувати номінальні розрахункові значення, що немину- че призведе до неприпустимого перегріву електричної машини та розвитку аварійної ситуації.

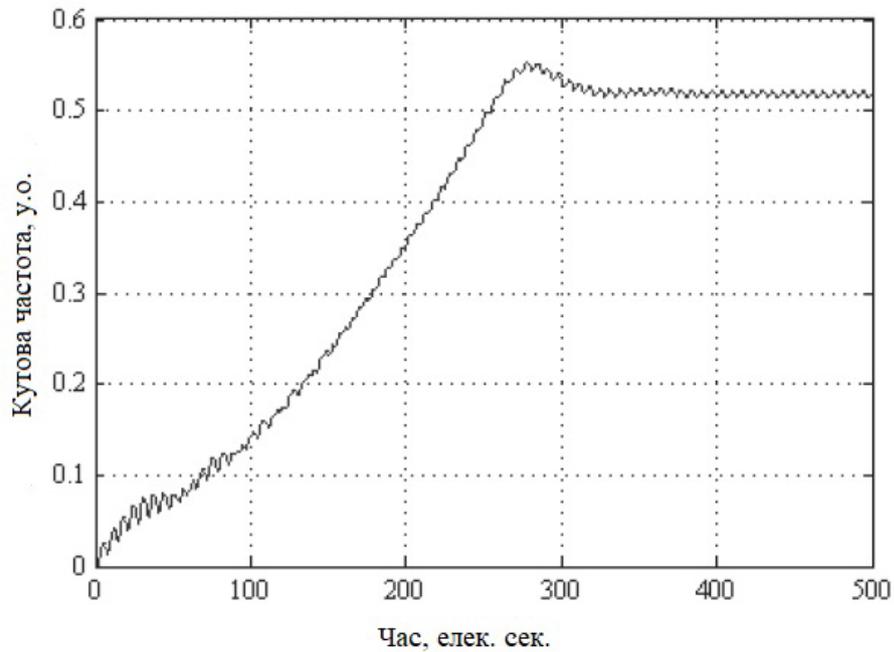


Рисунок 2.3 – Частота обертання ротора при міжвитковому короткому замиканні в одній фазі ротора при $v_k = 0,6$

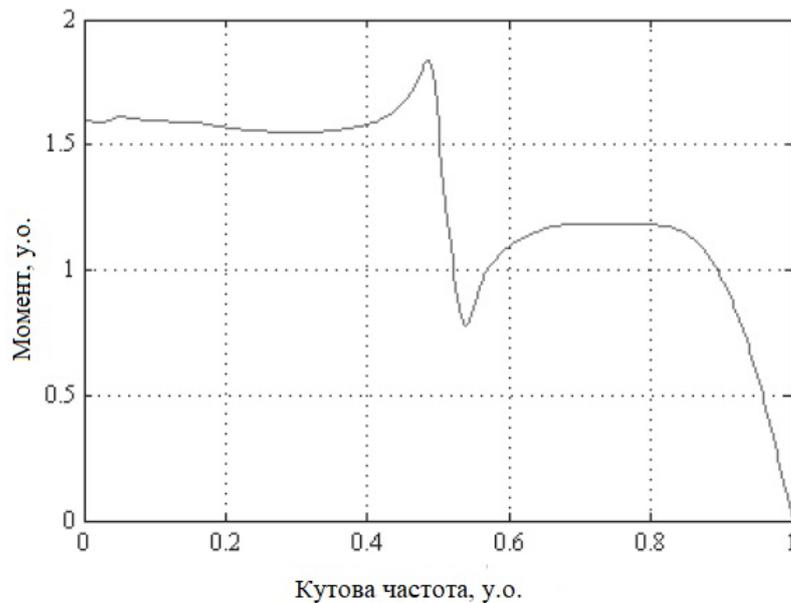


Рисунок 2.4 – Статична механічна характеристика двигуна за міжвиткового короткого замикання в одній фазі ротора з $v_k = 0,6$

Аналіз залежностей струмів фаз обмоток статора двигуна, показаних на рис. 2.1, дозволяє констатувати модулюючий ефект струму короткозамкненого контуру, представленого на рис. 2.2. Амплітуди струмів також мають підвищені значення у порівнянні з номінальною величиною, що є неприпустимим і свідчить про необхідність негайного відключення аварійного двигуна.

Дослідження показали, що вид характеристик, за якими робиться висновок про ступінь аварійності стану обмотки, зокрема амплітуди струмів фаз обмоток двигуна та величина провалу в механічній характеристиці, значною мірою залежить від значення параметра ν_k , який враховує відношення коротко- замкнених витків до загальної кількості витків фази обмотки.

З метою верифікації модифікації математичної моделі сформовано масив розрахункових даних високовольтних асинхронних двигунів типу АКЗ 13- 62- 8УХЛ4 в діапазоні потужностей 63...200 кВт[5].

Систематизація результатів розрахунку асинхронних двигунів у вказаному діапазоні потужності показує, що при частці короткозамкнених витків $\geq 0,6$ величина провалу моменту при частоті обертання близькій до 0,5 синхронної досягає величини, меншої за рівень номінального навантаження.

Двигун при цьому втрачає здатність здійснювати задані функції через те, що на даному відрізку часу момент навантаження виявляється більшим за електромагнітний момент асинхронного двигуна. Це перериває монотонність збільшення частоти обертання валу ротора, яка при вказаних обставинах є обмеженою величиною, близькою до половини синхронної частоти обертання.

Висновок по другому розділу

Для вирішення задачі оцінки впливу міжвиткового короткого замикання на значення струмів обмоток та електромагнітного моменту асинхронного двигуна розроблено модифікацію базової математичної моделі асинхронного двигуна.

Для асинхронних двигунів типу АКЗ 13-62-8УХЛ4 в діапазоні потужностей 63...200 кВт отримано масив розрахункових даних струмів фаз обмоток та електромагнітних моментів.

Отримано наступні основні результати для вказаного діапазону потужності асинхронних двигунів: – величина провалу механічного моменту двигуна при частоті обертання близькій до половини синхронної досягає значення, меншого за рівень номінального навантаження при частці короткозамкнених витків $\geq 0,6$; – супроводжуюче режим різке зростання струмів фаз неминуче призведе до неприпустимого перегріву електричної машини та розвитку аварійної ситуації.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

3.1 Аналіз дефектів обмоток статора

Типи дефектів обмотки статора. Розглянемо детальніше обмотку статора. Слід звернути увагу на два основні типи відмов обмотки статора: асиметрію обмотки статора, спричинену відмовою однієї з фаз, і коротке замикання кількох витків у фазній обмотці. І якщо в першому випадку машина продовжує працювати зі зменшеним крутним моментом, то коротке замикання призводить до виходу обмотки з ладу.

Асиметрія асинхронної машини або асиметрія напруг живлення виявляється через від'ємну послідовність струму статора. Поведінка машини не ідеальна, але у випадку невеликих асиметрій не слід вживати жодних суттєвих дій. Значна електрична асиметрія (наприклад, розімкнена фаза) викликає струми від'ємної послідовності, співмірні зі струмами додатньої послідовності. Таким чином, таку асиметрію легко виявити.

Коротке замикання виявити значно складніше. За наявності одного замикання двигун може продовжувати працювати. Однак нагрівання в замкненій області призведе до критичного руйнування ізоляції та поширення міжвиткових замикань по обмотці, що в підсумку може призвести до фазних замикань або замикання фази на землю. В останньому випадку замикання струму через заземлення може призвести до пошкодження сердечника та виходу двигуна з ладу [12,13].

Причини виникнення дефектів ізоляції. Дефекти в ізоляції, що призводять до замикання, можуть виникати як у пазовій області, так і в лобових частинах обмотки. Можна виділити наступні причини виникнення дефектів ізоляції в обмотці статора: термічне старіння, електричні перенапруги, механічні напруження, а також фактори навколишнього середовища [14].

Зважаючи на те, що проходження струму по обмотці пов'язане з її нагріванням, відбувається термічне старіння ізоляції. Як правило, при кожному перевищенні температури на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ термін служби ізоляції скорочується вдвічі через термічне старіння. В процесі термічного старіння ізоляція висихає, в ній з'являються мікротріщини, у зв'язку з чим вона стає більш вразливою до інших факторів впливу або напружень, які фактично викликають відмову.

На термін служби ізоляції впливають також електричні перенапруги. При виборі матеріалів і розробці конструкцій котушок для забезпечення достатнього розрахункового терміну служби необхідно враховувати певний взаємозв'язок між терміном служби ізоляції і напругою, прикладеною до ізоляційних матеріалів. До електричних факторів, які негативно впливають на ізоляцію, можна віднести стрибки струму, що виникають в обмотці при перехідних процесах і комутаційні перенапруги. Дані фактори призводять до додаткового нагрівання обмотки, ерозії і виникнення в ній небажаних хімічних реакцій, що призводить до деградації ізоляції.

В процесі функціонування машини і обертання ротора в двигуні виникають вібрації, які також можна розглядати як негативний фактор, що впливає на термін служби ізоляції. Сила, що діє на котушки через струм обмотки статора, пропорційна квадрату струму статора. Таким чином, дані зусилля найбільші в момент пуску машини, коли струм статора максимальний. Обмотка при цьому вібрує з частотою, що вдвічі перевищує частоту мережі, як в радіальному, так і в тангенціальному напрямках. Подібні вібрації можуть призвести до пошкодження ізоляції котушки і провідників обмотки.

Нарешті, важливим фактором, що впливає на термін служби ізоляції, є фактори зовнішнього середовища. Слід вживати заходів для обмеження/мінімізації впливу вологи, хімічних речовин і сторонніх частинок на обмотку статора. Також проблемою є утворення конденсату на обмотці статора, що може в результаті призвести до замикання обмотки. Це явище

можна запобігти, висушивши обмотку за допомогою обігрівачів приміщення або струменевого нагріву.

Типи замикань обмотки статора. Для того щоб чіткіше зрозуміти, які замикання можуть виникнути в обмотці статора асинхронного двигуна, розглянемо системи ізоляції, що застосовуються в сучасних асинхронних машинах. Схема ізоляції асинхронного двигуна з обмоткою, складеною з жорстких секцій, представлена на рис. 3.1.

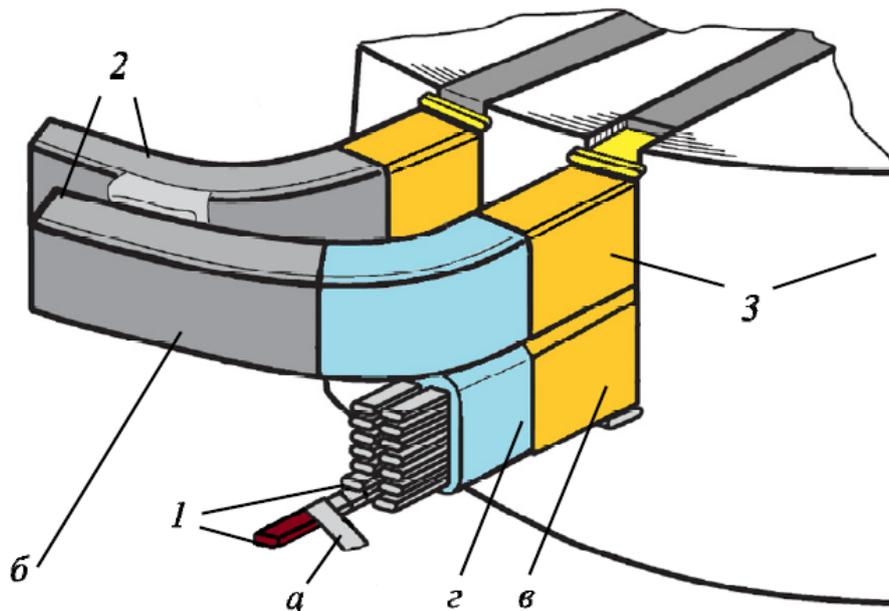


Рис. 1. Структура ізоляції обмотки статора асинхронних двигунів і типи можливих замикань

Ізоляція витків обмотки (позначено як «а» на рис. 3.1), як правило, являє собою плівку з поліетилентерефталату (ПЕТ або лавсану) та склотканини. Фазна ізоляція («б» на рис. 3.1) у сучасних двигунах – це зазвичай композитний матеріал з лавсану і склотканини або слюдяного паперу (частинки слюди на плівці або підкладці з ПЕТ і склотканини).

Пазова ізоляція («в» на рис. 3.1) призначена для відділення мідних провідників від заземленого сердечника статора. На кінці фази обмотки пазова ізоляція піддається впливу повного значення фазної напруги відносно землі. Майже у всіх сучасних статорах двигунів використовують стрічки зі слюдяного паперу, скріплені епоксидною смолою, як ізоляцію даного типу. Ці

матеріали майже завжди комбінуються з вакуумним просоченням обмотки двигуна лаком або компаундом. Поверх пазової ізоляції розміщується напівпровідниковий шар (лак або стрічка). Таке покриття запобігає частковому розряду, ймовірному в будь-якому повітряному зазорі, який неминуче з'явиться між поверхнею ізоляції заземлення та бічною стороною паза в статорі. Як правило, цей шар являє собою стрічку з вуглецевим наповненням. Більшість виробників двигунів використовують це покриття в двигунах з номінальною напругою 6 кВ і вище.

На ділянці 10–15 см від виходу з паза розміщується ще один шар лаку або стрічки («г» на рис. 1). Мета цієї ізоляції полягає в тому, щоб лінеаризувати електричну напругу вздовж поверхні котушки, в кінці провідного покриття паза, щоб знизити ризик часткових розрядів. В даний час це покриття зазвичай являє собою стрічку, що містить порошок карбїду кремнію. Цей тип ізоляції найчастіше використовується в двигунах з перетворювальною потужністю 6 кВ і вище [15].

Виходячи з рис. 3.1, можна зробити висновок, що при експлуатації двигуна може виникнути 3 види замикань обмотки статора:

- міжвиткове (позиція 1 на рис. 3.1),
- міжфазне (позиція 2 на рис. 3.1),
- на корпус (позиція 3 на рис. 3.1).

Найбільш імовірним при цьому є саме міжвиткове замикання. Згідно зі статистикою, на такі замикання припадає близько 93 % відмов обмоток статора [1]. При його виникненні внаслідок збільшення сили струму порушується температурний режим у замкнених витках, що призводить до прискорення термічного старіння ізоляції, збільшення числа часткових розрядів, що в свою чергу призводить до появи нових дефектів ізоляції і в кінцевому підсумку може спричинити вихід з ладу корпусної або міжфазної ізоляції та відповідне замикання. Тому вкрай важливо вчасно відстежувати дефекти, що з'являються в ізоляції.

Для запобігання виникненню коротких замикань необхідне проведення діагностики стану ізоляції в процесі функціонування машини. Існує чотири основних методи контролю ізоляції [16]:

- 1) випробування на перенапругу;
- 2) неруйнівний тест часткових розрядів;
- 3) тест реакції на високочастотний сигнал;
- 4) моніторинг еквівалентних значень параметрів ізоляції.

Розглянемо докладніше кожен із вищевказаних методів діагностики.

3.2 Основні методи контролю ізоляції

3.2.1 Випробування на перенапруги.

Найбільш простим видом діагностики обмотки статора є випробування на перенапругу. При випробуванні на перенапругу до обмотки статора прикладаються імпульси напруги з коротким часом наростання і відносно високою амплітудою. Таким чином забезпечується навантаження на ізоляцію, аналогічне тому, яке виникає при стрибках перенапруг під час експлуатації. Проходження випробування гарантує, що двигун здатний витримувати імпульси нижче відповідного рівня напруги і з більшим часом наростання [17]. Дана діагностика може проводитися як функціонально, так і тестово. Розглянемо тестовий варіант.

Установка для випробування на перенапругу двигуна, виведеного з роботи, представлена на рис. 3.2. Принцип полягає в наступному: конденсатор C заряджається до певного значення напруги U_m , а потім за допомогою вимикача S замикається на обмотку асинхронного двигуна АД і швидко розряджається, тим самим подаючи на обмотку статора імпульс з малим часом наростання.

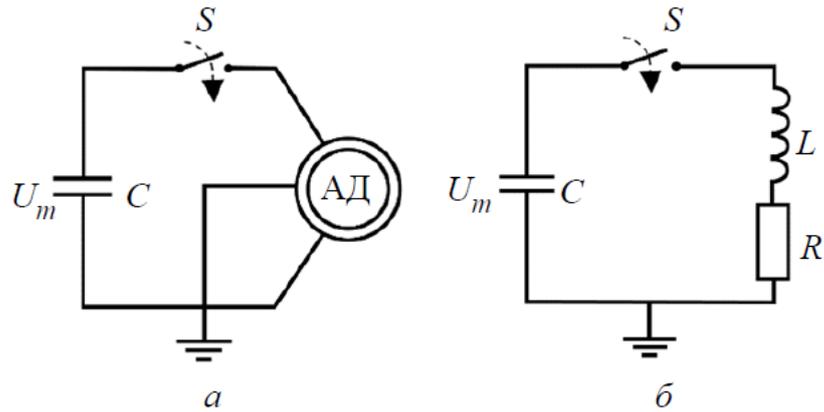


Рис. 2. Випробування на перенапругу: *а* – схема випробувань; *б* – еквівалентна схема заміщення

Еквівалентна схема заміщення даної системи являє собою коливальний RLC - контур. У випадку, якщо станеться пробій фрагменту обмотки, параметри контуру зміняться, і це позначиться на частоті.

Оскільки випробувальна напруга значно вища за номінальну, вона дозволяє виявити несправності обмотки, які не можуть бути виявлені під час нормальної експлуатації. Максимальна допустима випробувальна напруга може бути визначена, виходячи з номінальної напруги машини $U_{\text{ном}}$, за формулою

$$U_{\text{max}} = 1000B + 2U_{\text{ном}}$$

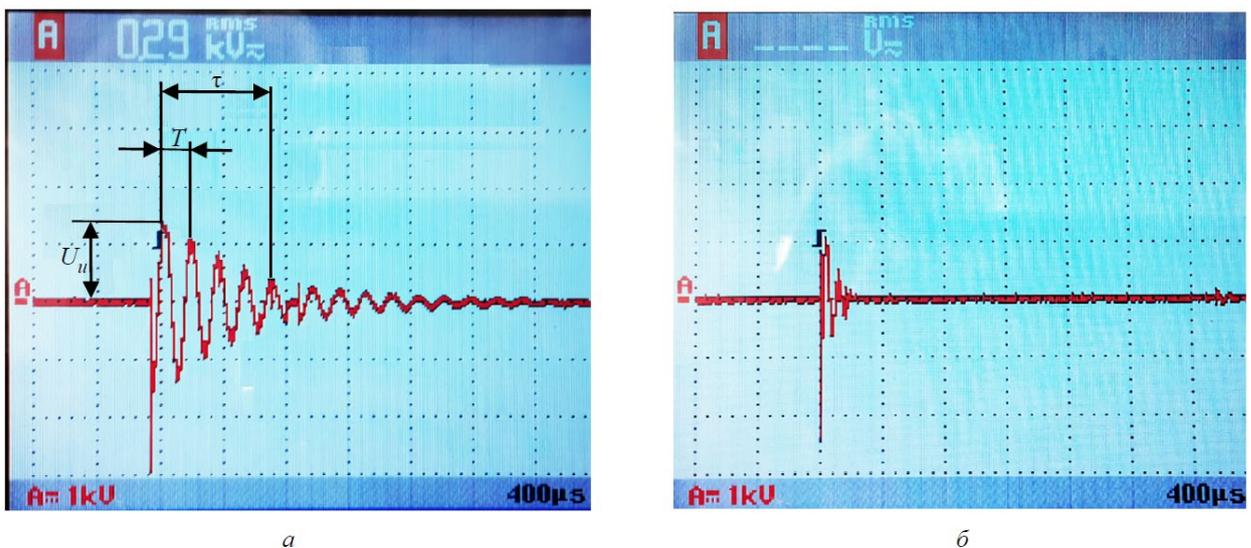


Рис. 3.3. Випробування обмотки статора на перенапругу: *а* – справна міжвиткова ізоляція; *б* – пробій міжвиткової ізоляції

На рис. 3.3 наведено осцилограми, отримані в результаті випробувань на перенапругу обмоток зі справною та з дефектною міжвитковою ізоляцією, де U_i – амплітуда імпульсу напруги; T – період коливань перехідного процесу; τ – час згасання перехідного процесу. З осцилограм видно, що за наявності дефектів період коливань і час згасання перехідного процесу, який виникає при подачі імпульсу напруги на обмотку, зменшуються.

Випробування на перенапругу можна реалізувати і в процесі експлуатації машини. Схема, яка дозволяє реалізувати даний тип випробувань обмотки, представлена на рис. 3.4.

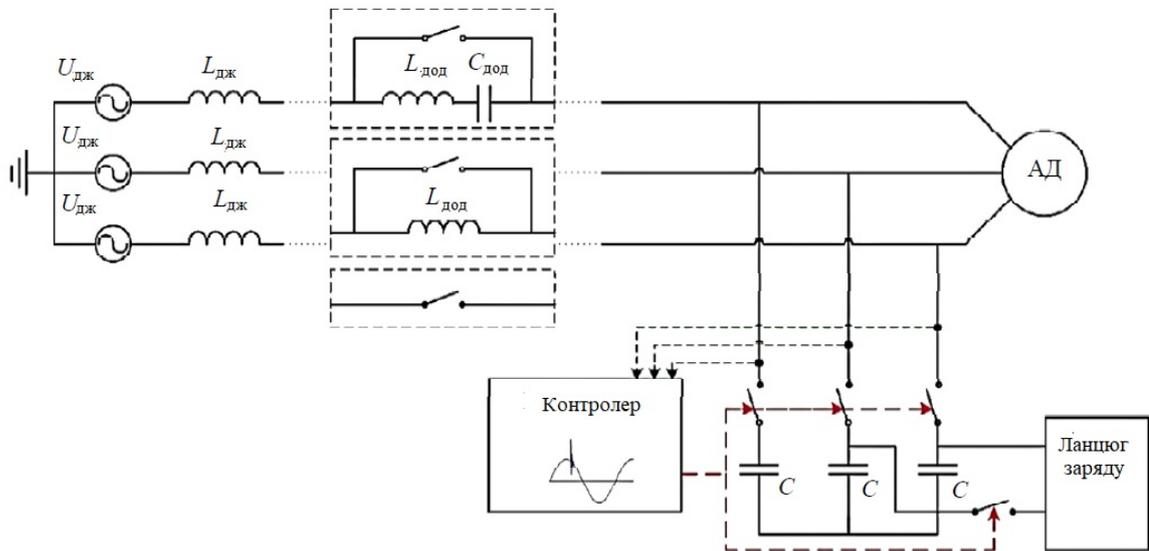


Рисунок 3.4. Схема для функціональної діагностики двигуна методом випробування на перенапругу

До обмотки статора, яка живиться від джерела напруги $U_{дж}$, через перемикачі підключаються три конденсатори C , з'єднані в зірку. До конденсаторів підключено ланцюг заряду та вимірювальне обладнання. У момент проведення діагностики перемикачі між фазами двигуна та конденсаторами замикаються і імпульс подається на обмотку статора.

Слід зазначити, що окрім обмотки статора існує ще один можливий шлях для проходження імпульсу – через індуктивність джерела $L_{дж}$. Причому, як правило, індуктивний опір джерела значно менший, ніж в обмотки статора. Таким чином, більша частина імпульсу піде в джерело, що знижує точність

діагностики. Для виходу з цієї ситуації має сенс вводити в ланцюг фаз джерела додатковий реактивний опір $L_{\text{доп}}$ і $C_{\text{доп}}$. Для того, щоб введений опір не впливав на функціонування двигуна, ємності та індуктивності необхідно зробити відключаємими. Підбирати вмикаємі ємність та індуктивність слід таким чином, щоб частота імпульсу перенапруги була вище на 2 порядки або більше, ніж робоча частота двигуна [18].

Незважаючи на очевидні переваги даного тесту – відносну простоту реалізації та універсальність, цей тест має один великий недолік – він відноситься до руйнівних. При проведенні діагностики наноситься шкода ізоляції обмотки статора, що призводить до прискорення її старіння [18].

3.2.2 Діагностика часткових розрядів.

Часткові розряди – це електричні розряди малої потужності, які виникають в ізоляції обмотки статора і можуть вважатися як причиною старіння ізоляції, так і індикатором, оскільки зі старінням ізоляції посилюється активність часткових розрядів. Причини виникнення часткових розрядів можна розділити на дві категорії: експлуатаційні та дефекти при виготовленні [19].

Недостатнє просочення обмотки – це дефект, допущений при виготовленні, який може призвести до часткових розрядів. Якщо не виконано якісне просочення, в процесі експлуатації елементи ізоляційної системи деформуватимуться під впливом вібрації. Внаслідок цього в ізоляції виникатимуть повітряні проміжки, і таким чином підвищиться ймовірність виникнення часткових розрядів. Важливим фактором для боротьби з цим небажаним явищем є додаткова ізоляція лобових частин обмотки за допомогою стрічки або фарби, що містить карбід кремнію. У разі неякісного покриття лобових частин ймовірність розрядів зростає.

До категорії експлуатаційних причин можна віднести термічне старіння обмотки. При тривалій експлуатації при температурі, що перевищує 120 °С, епоксидний зв'язуючий матеріал перестає зв'язувати шари ізолюючої стрічки, що призводить до виникнення повітряних проміжків, в яких можуть індукуватися часткові розряди. Інший експлуатаційний фактор, що сприяє

появі часткових розрядів, – поява на поверхні ізоляції провідних ділянок, по яких можуть протікати незначні струми. Ці провідні доріжки можуть складатися з пилу і вологи або мастила, що потрапляє з підшипникового вузла.

Окремо серед експлуатаційних факторів, що впливають на активність часткових розрядів, стоїть застосування в приводах широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). При замиканні-розмиканні ключів у ШІМ-перетворювачі виникають імпульси перенапруги через відмінність хвильових опорів живильних кабелів та обмотки статора. Ці імпульси підвищують ймовірність виникнення часткових розрядів. Крім того, з огляду на високу частоту подачі імпульсів виникають ємнісні струми, які протікають між витками і також негативно впливають на ізоляцію.

Як вже було зазначено, часткові розряди не тільки є небажаним явищем в обмотці статора, але й можуть слугувати індикатором її стану. Однак при вичленуванні інформації про обмотку з часткових розрядів існує ряд проблем:

- відокремлення корисного сигналу від численних шумів, зумовлених ШІМ;
- отримання сигналу напруги основної частоти для вимірювального пристрою для синхронізації з сигналом часткових розрядів.

Розглянемо рішення даних проблем на прикладі двигуна з потужністю 12.5 МВт і номінальною напругою 3 кВ. Спрощена схема вимірювання часткових розрядів представлена на рис. 3.5. Вимірювання часткових розрядів здійснюється за допомогою датчика часткових розрядів (ДЧР) ємністю 80 пФ. Узгодження вимірювальної апаратури з напругою, що виробляється ШІМ-джерелом, забезпечується за допомогою дільника напруги (ДН), реалізованого за допомогою двох конденсаторів. Для первинного вирішення задачі придушення перешкод використовується фільтр верхніх частот, що реалізується за допомогою вже згаданого датчика спільно з резистором, що має опір 50 Ом. Таким чином реалізується фільтр верхніх частот з частотою зрізу

$$f_{зр} = \frac{1}{2\pi C_{дам} R} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-12} \cdot 50} \approx 40 \text{ МГц.}$$

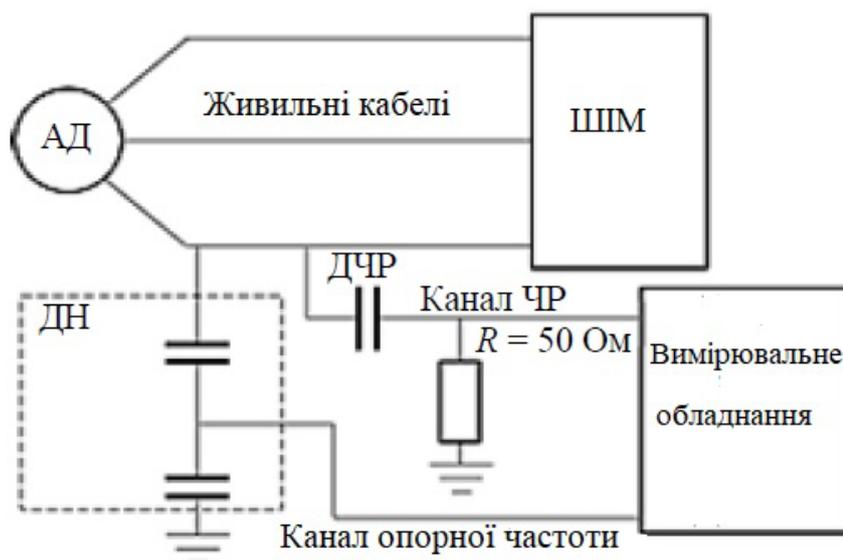


Рисунок 3.5. Схема установки для вимірювання часткових розрядів

Цей фільтр дозволяє відсіювати значну частину небажаних шумів. У комплексі з ним можна аналізувати форму імпульсів імовірних часткових розрядів на основі отриманих раніше емпіричних даних для відсіювання помилкових сигналів. Сигнал напруги основної частоти забезпечується за допомогою ємнісного дільника напруги.

Діагностика часткових розрядів дозволяє досить точно відстежити ступінь старіння ізоляції та не потребує великих вкладень. Проте, при діагностиці подібним методом можна зіткнутися з труднощами при виділенні корисного сигналу з перешкод, зумовлених ШІМ.

3.2.3 Моніторинг еквівалентних значень параметрів ізоляції.

Ще одним способом моніторингу стану ізоляції є розрахунок еквівалентних значень параметрів ізоляції (ємність, опір, коефіцієнт розсіювання) [20]. Існують дві варіації такого методу діагностики – тестова та функціональна.

Тестова діагностика передбачає виведення машини з експлуатації для проведення випробувань ізоляції. У цьому випадку еквівалентні параметри ізоляції визначаються на основі еквівалентної схеми заміщення (рис. 3.6). Дана схема включає в себе активні та ємнісні опори для міжфазної ($R_{ф-ф}$ та $C_{ф-ф}$) та

корпусної ($R_{\phi-3}$ та $C_{\phi-3}$) ізоляції. Якщо припустити, що в процесі експлуатації діелектричні властивості ізоляції фаз змінюються однаково, то відповідно до вищевказаної схеми еквівалентні значення ємності $C_{екв}$, опору $R_{екв}$, а також значення коефіцієнта розсіювання DF для двигуна, що живиться напругою з частотою f , можна визначити через дійсні ємності та опори за наступними формулами:

$$C_{екв} = 2C_{\phi-\phi} + C_{\phi-3};$$

$$R_{екв} = \frac{R_{\phi-3}R_{\phi-\phi}}{2R_{\phi-3} + R_{\phi-\phi}};$$

$$DF = \frac{2R_{\phi-3} + R_{\phi-\phi}}{2\pi f 2R_{\phi-3}R_{\phi-\phi}(2C_{\phi-\phi} + C_{\phi-3})}.$$

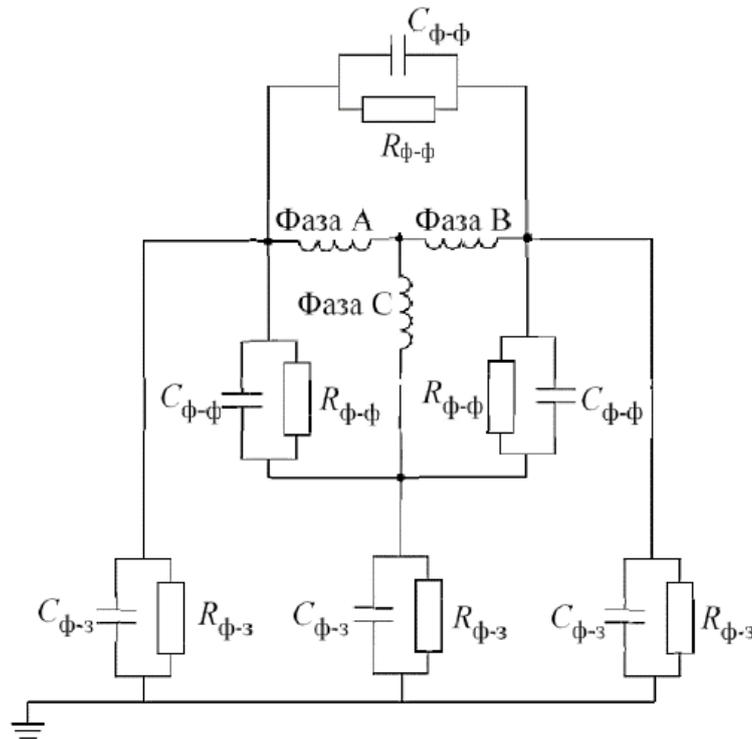


Рисунок 3.6. Схема для тестової діагностики двигуна методом розрахунку еквівалентних параметрів ізоляції

Функціональний варіант діагностики передбачає визначення параметрів ізоляції в процесі експлуатації машини на основі струму витoku фаз $I_{ф. вит}$ ($I_{а вит}$, $I_{б вит}$, $I_{с вит}$) та напруги між фазою та землею $U_{\phi-3}$ ($U_{а-3}$, $U_{б-3}$, $U_{с-3}$).

Слід зазначити, що значення параметрів опору ізоляції при функціональній діагностиці, як правило, відрізняються від параметрів, виміряних на тій же машині під час тестової діагностики. Така розбіжність може бути пояснена

тим, що розподіл напруги в обмотці в процесі експлуатації відрізняється від розподілу при випробуваннях машини, виведеної з експлуатації.

Цей момент потрібно мати на увазі при інтерпретації отриманих результатів. Даний метод дозволяє з високою точністю відстежувати стан ізоляції. Його недолік полягає в необхідності великої кількості допоміжного вимірювального обладнання (синхронний підсилювач для виведення сигналу, високочутливий трансформатор струму) [21].

3.2.4 Діагностика стану ізоляції за відповіддю на високочастотний сигнал.

Як вже було відзначено, при старінні ізоляції змінюються діелектричні властивості її матеріалу. Як наслідок, при цьому змінюються паразитні ємності, що виникають між витками обмотки, секціями обмотки, між фазами, а також між обмоткою і сталлю статора. Це зумовлено тим, що ізоляція фактично виступає в ролі діелектрика між обкладками конденсатора в даних ємностях.

Виходячи з представленого аналізу, можна зробити висновок, що міжвиткові, міжсекційні ємності, а також ємності між обмоткою і осердям статора знаходяться в залежності від стану відповідної ізоляції. Таким чином, значення даних ємностей можна використовувати в якості параметра діагностики стану ізоляції.

Метод діагностики ізоляції на основі аналізу реакції обмотки на високочастотний сигнал заключається в наступному. Для генерування високочастотного сигналу, який подається на обмотку, використовується ШІМ-інвертор. При цьому досліджується перехідний процес струму, що протікає через обмотку[22].

Першопричина виникнення перехідного процесу в обмотці статора при перемиканні інвертора полягає в тому, що індуктивний опір машини значно перевищує індуктивний опір живильного кабелю. Таким чином, в теорії імпульс напруги повністю відбивається (коефіцієнт відбиття близький до одиниці). Відбитий імпульс напруги призводить до перехідної перенапруги

коливального характеру із згасаючою амплітудою. Пікове значення перенапруги може в 2 або навіть в 4 рази (для швидко наступних імпульсів напруги) перевищувати напругу ланки постійного струму, а частота коливань знаходиться в діапазоні від десятків кілогерц до десятків мегагерц.

Зміни в системі ізоляції машини призводять до змін характерних для машини при високих частотах коливань. Запропонований метод діагностики стану оцінює коливання струму, що слугують реакцією на перемикання напруги, для того щоб виявити зміни в поведінці машини при високих частотах. Аналіз коливань струму є кращим, оскільки датчики струму вже є в сучасних приводах для управління машиною. Для реалізації цього методу на обмотку статора подається високочастотний сигнал напруги і за допомогою датчиків струму знімається відповідний сигнал – струмова реакція. З отриманого сигналу віднімається усталена складова, після чого отримується перехідний процес струму в чистому вигляді, який і піддається аналізу. Приклад перехідного процесу струму, отриманого від асинхронного двигуна потужністю 1.5 МВт, представлений на рис. 3.7, а.

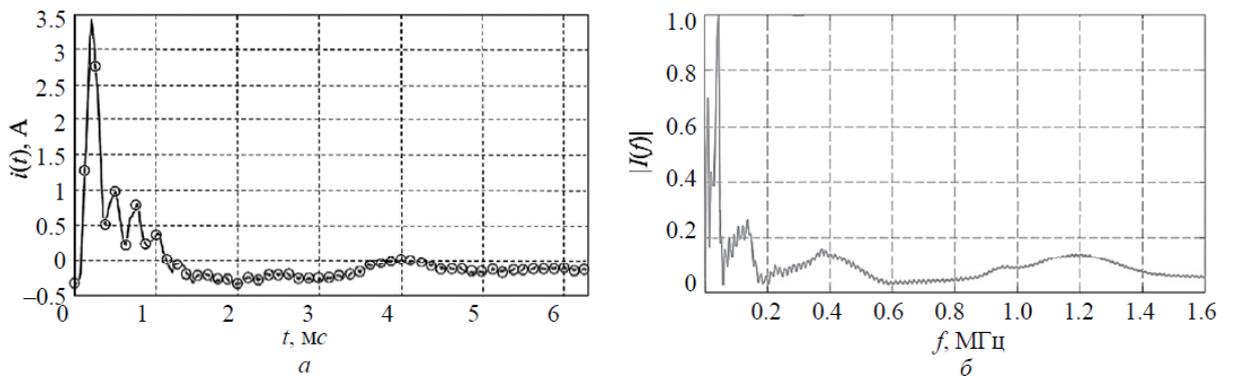


Рисунок 3.7. Перехідний процес струму при подачі високочастотного сигналу на обмотку статора: а – у часовій області; б – у частотній області

Далі коливання струму при перехідному процесі аналізуються в частотній області. Отриманий сигнал з часової області переводиться у частотну за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Досліджуване часове вікно вибрано таким чином, щоб воно починалося в момент дійсного перемикання ключів до моменту згасання коливань. Так, наприклад, для показаного на рис. 3.7, а

сигналу тривалість вибраного вікна становить 6.4 мс. Використовувана частота дискретизації 40 млн точок на секунду. Таким чином, кількість дискретних значень становить 256 шт. Результируючий амплітудний спектр після перетворення Фур'є, отнормований за максимальним значенням, зображений на рис. 3.7, б.

Амплітудний спектр, отриманий на початку експлуатації машини, вважається еталонним і використовується для порівняння зі спектрами сигналів, отриманих на більш пізніх етапах експлуатації. Показником зносу ізоляції вважатиметься відхилення спектра від цього еталону.

Висновки по третьому розділу

На основі аналізу представлених методик діагностики обмотки статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором можна зробити висновок, що найбільш перспективним є метод аналізу струмової реакції обмотки статора на вплив напруги високої частоти. Безсумнівною перевагою цього методу є простота та відсутність необхідності в додатковому вимірювальному обладнанні.

ВИСНОВКИ

1. За умови рівності результуючих магніторушійних сил проведено аналіз обмоткових даних реального трифазного АД та узагальненої машини. Встановлено, що в більшості випадків число витків фази діаметральної зосередженої обмотки менше, а число витків еквівалентної синусної обмотки більше числа витків фази обмотки реальної машини.

2. Пропонується виконувати перетворення координат за умови рівності ефективного числа витків фази обмотки узагальненої машини ефективному числу витків фази обмотки реальної машини та результуючих МРС, створюваних обмотками цих машин. Подібний підхід дозволяє зберегти величину магнітного потоку, що припадає на один полюс. Ця обставина в подальшому дозволить врахувати насичення магнітопроводу.

3. На підставі аналізу математичної моделі узагальненої електричної машини отримано співвідношення між величинами фазних струмів і напруг, а також активними опорами та індуктивностями обмоток фаз статора і ротора узагальненої електричної машини та трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора.

4. За умов рівності ефективного числа витків фаз обмоток і результуючих МРС встановлено кількісні співвідношення між конструктивними параметрами узагальненої електричної машини та параметрами трифазного АД зі зведеною до статора обмоткою ротора. Зазначені співвідношення дозволяють створити фізичну модель гіпотетичної узагальненої електричної машини.

5. Для вирішення задачі оцінки впливу міжвиткового короткого замикання на значення струмів обмоток та електромагнітного моменту асинхронного двигуна розроблено модифікацію базової математичної моделі асинхронного двигуна.

6. На основі аналізу представлених методик діагностики обмотки статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором можна зробити висновок, що найбільш перспективним є метод аналізу струмової реакції обмотки

статора на вплив напруги високої частоти. Безсумнівною перевагою цього методу є простота та відсутність необхідності в додатковому вимірному обладнанні. Однак цей метод не позбавлений недоліків. Зокрема, індикатор стану ізоляції, що використовується в цьому методі, не несе фізичного сенсу і показує лише відхилення від норми. Так, при збільшенні та зменшенні паразитних ємностей в обмотці теоретично може бути отримане одне і те ж значення діагностичного параметра.

7. Слід відмітити, що аналіз перехідних процесів – це дуже перспективний метод оцінки стану ізоляції, однак потрібно ввести діагностичний параметр, який буде однозначно визначати зміну ємності i , як наслідок, зміну стану ізоляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Качура О.В., Количев С.В., С'янов О.М., Зальоткін В.В. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ДВИГУНА В РЕАЛЬНИХ КООРДИНАТНИХ ВІСЯХ // Збірник наукових праць ДДТУ № 2(47) 2025 С.107-116
2. Уайт Д., Вудсон Г. Електромеханічні перетворювачі енергії. //repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/9d7b2aa2-a1ce-4565-a45d-f791ef53b84d/content
3. АНАЛІЗ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЇХ РЕЖИМІВ РОБОТИ /Токареєв О. В., Борягин Д. О., Шеремет О. І// НАУЧНИЙ ВЕСТНИК ДГМА. № 1 (25Е), 2018 с 39-44.
4. Купін А. І., Кузнєцов Д. І. К 92 Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. – Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2016. – 200 с. ISBN 978-617-7250-64-6
- 5.Закладний, О. О. Визначення аварійних режимів електродвигунів засобами сучасних систем діагностування їх стану / О. О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2022. – № 1. – С. 96-104..
6. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.
7. ДСТУ ISO 2365-94 Машини електричні асинхронні потужністю до 400 кВт.Двигуни
8. Метод оценки технического состояния машин: патент Украины № 13540 // А. А. Стеценко [и др.]. 2004. Бюл. № 7.
9. Вовк О.Ю. Метод періодичного діагностування асинхронних двигунів/О.Ю. Вовк, Л.М. Безменнікова, С.О. Квітка // Праці ТДАТУ. – 2010. – № 10, Т4. – с. 39-46.

10. Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Mathcad / Е.М. Немцев // Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: Електротехніка і енергетика. Всеукраїнський науковий збірник №1(19) – 2(20)'2018, Покровськ: ДВНЗ ДонНТУ, с. 75 – 81.

11. О. В. Губаревич, С. О. Гулак, А. П. Поляков ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ГОДОГРАФА ВЕКТОРА ПАРКА/ Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 3

12. Ferreira F., Baoming G., de Almeida A. Reliability and operation of high-efficiency induction motors // IEEE Trans. on Industry Appl. 2016. Vol. 52, no. 6. P. 4623–4633. doi: 10.1109/TIA.2016.2600677.

13. Advances in diagnostic techniques for induction machines / A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G. A. Capolino // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55. P. 4109–4126. doi: 10.1109/TIE.2008.2007527.

14. Siddique A., Yadava G. S., Singh B. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors // IEEE Trans. on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, no. 1. P. 106–114. doi: 10.1109/TEC.2004.837304.

15. Stone G. C., Culbert I. M., Lloyd B. A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conf. Record. Charleston, SC, 2007. P. 187–192. doi: 10.1109/CITCON.2007.358997.

16. Babel A. S., Strangas E. G. Condition-based monitoring and prognostic health management of electric machine stator winding insulation // Intern. Conf. on Electrical Machines, ICEM. Berlin, Germany IEEE, 2014. P. 1855–1861. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960436.

17. Experimental evaluation of using the surge PD test as a predictive maintenance tool for monitoring turn insulation quality in random wound AC motor stator windings / J. Yang, T. Kang, B. Kim, S. B. Lee, Y. Yoon,

18. A new concept for online surge testing for the detection of winding insulation deterioration in low-voltage induction machines // IEEE Transactions on Industry Appl., Vol. 47, no. 5, 2011. P. 2051–2058. doi: 10.1109/TIA.2011.2161972.

19. Stone G. C., Sedding H. G., Chan C. Experience with on-line partial discharge measurement in high voltage inverter fed motors // 2016 Petroleum and Chemical Industry Technical Conf. (PCIC), 2016, Philadelphia, USA. P. 1–7. doi: 10.1109/PCICON.2016.7589241.

20. Lee S. B., Yang J., Younsi K., Bharadwaj R. An online groundwall and phase to phase insulation quality assessment technique for AC machine stator windings / S. Grubic, J. Restrepo, J. Aller M, B. Lu, T. G. Habetler // Fourtieth IAS Ann. Meeting. Conf. Record of the 2005 Industry Appl. Conf. IEEE, 2005. P. 10–19. doi: 10.1109/IAS.2005.1518285. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1658323> (дата обращения 20.04.2023).

21. Online capacitance and dissipation factor monitoring of AC motor stator insulation / K. Younsi, P. Neti, M. Shah, J. Y. Zhou, J. Krahn, K. Weeber, D. Whitefield // IEEE Intern. Power Modulator and High Voltage Conf. Atlanta, USA, 2010. P. 530–533. doi: 10.1109/IPMHVC.2010.5958411.

22. Nussbaumer P., Vogelsberger M. A., Wolbank T. M. Induction machine insulation health state monitoring based on online switching transient exploitation // IEEE Trans. Ind. Electr. 2015. Vol. 62, no. 3. P. 1835–1845. doi: 10.1109/TIE.2014.2361114.