

УДК 621.316.9

М.Р. Гайко¹, студент
В.І. Курганська¹, студент¹Кафедра Автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАХИСТ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В РОБОЧИХ РЕЖИМАХ

Анотація. У статті приведено огляд та аналіз роботи асинхронних електродвигунів в різних робочих режимах та зроблено оцінку можливості їх захисту при порушеннях та змінах значень робочих параметрів. Розвиваються методи діагностики стану асинхронних двигунів, що базуються на контролі споживаного струму з подальшим виконанням спектрального аналізу отриманого сигналу. Це дозволяє з високим ступенем достовірності визначати стан різних елементів двигуна шляхом вимірювання слабкої модуляції споживаного електродвигуном струму.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, аварійні режими, захист.

Вступ. Конструктивні параметри асинхронних електродвигунів є практично постійними в процесі використання, а саме:

- струм холостого ходу, залежить від повітряного зазору;
- втрати холостого ходу, які пов'язані з якістю листової сталі і збіркою пакетів;
- опір обмоток статора, який залежить від якості намотки: натяг проводу, коливання його діаметра та ін.;
- опір обмоток ротору, який залежить від якості заливки.

У більшості випадків конструкції АД далекі від дотримання принципу ідентичності параметрів однотипних машин і основне джерело відмов – обмотки статора [1].

Мета та завдання. Аналіз роботи асинхронного двигуна в робочих режимах. Дослідження способу захисту електродвигуна від струмових перевантажень

Матеріали і результати досліджень. Відповідно до ІЕС 60034-1 двигуни з напругою до 1000 В і потужністю до 315 кВт витримують півтораразове перевантаження струмом протягом 2 хвилин. Для контролю температури АД використовуються датчики температурного захисту обмоток. Двигуни, що мають сервіс – фактор 1,15 можуть тривало працювати при відхиленні напруги $\pm 10\%$ і номінального навантаження. Перевищення температури обмоток може бути більше граничного значення на 10°C . Максимальна температура навколишнього повітря не повинна перевищувати 40°C .

Контрольованими параметрами можуть бути струм двигуна, температура обмоток, момент на валу, струм витoku, напруга та ін. Для нестаціонарних теплових режимів, необхідно враховувати температуру в найбільш нагрітій точці обмотки двигуна.

Аналіз статистичних даних свідчить, що основні аномальні режими (перевантаження, зниження напруги, обрив фазного проводу) супроводжуються підвищенням струму електродвигуна, який викликає додаткове нагрівання його обмоток і при використанні температурного захисту необхідно враховувати, що його передаточна характеристика не в повній мірі відповідає перевантажувальній характеристиці електродвигуна.

Вимірювання температури обмоток проводять наступними трьома методами:

- методом опору;
- методом закладених термоперетворювачів;
- методом термометра.

Як правило, для вимірювання температури ізолюваних обмоток машин застосовується метод опору. Для машин змінного струму потужністю більше 500 кВт вимірювання температури обмоток виконується методом закладених термоперетворювачів, а при потужності до 200 кВт вимірювання температури проводиться методом опору безпосередньо після швидкої зупинки машини або накладенням струму на робочий струм.

Датчики вбудовуються в лобові частини обмоток статора зі сторони протилежної вентилятору зовнішнього обдування по одному в кожен фазу, з'єднуються послідовно.

Така система забезпечує захист двигуна як в режимах з повільним нагріванням (перевантаження, робота на двох фазах), так і в режимах зі швидким нагріванням (заклинювання ротора, вихід з ладу підшипників та ін.). Відповідно вимогам ІЕС 60034-11 температура спрацювання захисту повинна відповідати значенням, наведеним в табл. 1. Опір одного позистора $30 \div 140$ Ом при 25°C , опір ланцюга з трьох позисторів складає 250 ± 160 Ом.

Таблиця 1 – Температура спрацювання захисту

Клас нагрівостійкості ізоляції двигуна	Позначення типу позистора	Гранична температура спрацювання
В	СТ14А-2-130	130°C
Е	СТ14А-2-145	145°C
Н	СТ14А-2-160	160°

Виконуючий пристрій температурного захисту повинен відключати силовий ланцюг двигуна при досягненні опору ланцюга термодатчиків $210 - 450$ Ом.

З точки зору температурних впливів на ізоляцію розрізняють поняття «теплостійкість» і «нагрівостійкість».

Теплостійкість визначає здатність електроізоляційного матеріалу зберігати свої властивості на певному рівні при відносно короткочасному перегріві.

Нагрівостійкість визначає здатність матеріалу без істотного погіршення характеристик витримати вплив гранично допустимої для даного типу ізоляції температури протягом періоду часу, що відповідає терміну служби електродвигуна.

Як видно, з практичної точки зору, нагрівостійкість є більш важливою характеристикою ізоляції і вона закладена в основу класифікації ізоляційних матеріалів.

Розвиваються методи діагностики стану асинхронних двигунів, ґрунтовані на контролі споживаючого струму з послідовним виконанням спектрального аналізу отриманого сигналу. Це дозволяє з високим рівнем достовірності визначати стан різних елементів двигуна шляхом вимірювання слабкої модуляції споживаючого електродвигуном струму. Наявність в спектрі струму двигуна характерних частот певної величини свідчить про наявність пошкоджень електричної а/або механічної частини електродвигуна. Серйозність пошкоджень визначається порівнянням значень сигналу на характерній частоті пошкодження зі значенням сигналу на частоті живильної мережі [3].

Загальним недоліком методу спектрального аналізу струму статора і спектрального аналізу модулів векторів Парка струму і напруги є необхідність урахування впливу на електричні параметри електродвигуна параметрів живильної мережі, характер навантаження, вплив зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів у приводі. При використанні регульованого електропривода на основі силових напівпровідникових перетворювачів в спектрах струму з'являються частоти, обумовлені комутацією вентилів, які також необхідно враховувати.

При повторному короткочасному режимі S4 двигунів загальнопромислового призначення відбувається послідовність ідентичних циклів роботи із впливом пускових процесів, кожен із яких включає час пуску Δt_0 , час роботи при постійному навантаженні Δt_p , за час якого двигун не нагрівається вище допустимої температури Θ_{max} , і час стоянки Δt_R , за час якого двигун не охолоджується до температури навколишнього середовища.

Допустиме число пусків Z двигуна на годину, який має динамічний момент інерції ротора J_M , кг·м², і працює в режимі S4 із статичним навантаженням на валу, визначуваною потужністю P_2 , кВт, і динамічним навантаженням, що визначається динамічним моментом інерції електродвигуна J_{EXT} , кг·м², орієнтовно можна визначити по формулах:

$$Z = Z_0 \cdot \frac{K_M \cdot K_p}{F_j}, \quad (1)$$

$$K_M = 1 - \frac{m_{cm.cp}}{m_{d.cp}}, \quad (2)$$

$$K_p = 1 - \left(\frac{P_2}{P_{2H}} \right) \cdot \frac{(1 - K_0) \cdot \frac{PB}{100}}{(1 - K_0) \cdot \frac{PB}{100} + \left(1 - \frac{PB}{100} \right) \cdot \beta_0}, \quad (3)$$

$$F_j = \frac{J_M + J_{EXT}}{J_M}, \quad (4)$$

$$m_{d.cp} = \frac{m_n + 2 \cdot m_k + 2 \cdot m_M + 1}{6}, \quad (5)$$

де Z_0 – допустиме число пусків на годину двигуна без статичного і динамічного навантаженням на валу;

$m_{ст.ср}$ – відносне значення статичного середнього моменту за час розгону двигуна;

$m_{д.ср}$ – відносне значення середнього за час розгону моменту обертання двигуна.

При зміні окремих періодів повторно-короткочасного режиму відбувається струмове перевантаження електродвигуна і його температура може перевищувати допустиме значення Θ_{max} . Значення Z_0 для двигунів серії АІІ і 5А наведені в табл. 2..

Таблиця 2 – Значення кількості пусків для деяких типів електродвигунів

Тип двигуна	Z_0 пусків за годину			
	2р = 2	2р = 4	2р = 6	2р = 8
5А80МА	3900	8700	18000	20000
5А112МВ	1600	3700	7000	8000
АМРМ132S	—	2900	3500	5800
5А160S	780	2000	2500	3400
АІР180М	600	1200	1400	2000

Продовження табл. 2.

Тип двигуна	Z_0 пусків за годину			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
5A200M	400	1000	1100	1400
5A225M	300	700	800	1200
5AM250S	200	320	440	700
5AM280S	130	220	260	360

Періодичні режими роботи електродвигунів характеризуються типами від S1 до S8. Тривалість одного циклу рівна 10 хв, коефіцієнт циклічної тривалості включення рівний одному із наступних значень: (15, 25, 40, 60)%. Максимально допустиме навантаження всередині одного циклу обмежують з урахуванням його впливу на всі частини машини, наприклад на ізоляційну систему, у відповідності з дією експоненційного закона змінення відносно очікуваного термічного терміну служби.

Аперіодичне змінне навантаження при змінних частотах обертання, включаючи перевантаження вище номінальних значень, характеризує типовий режим S9. В режимі S10 електродвигун може працювати необмежений період часу з дискретними постійними навантаженнями і частотами обертання, включаючи час перевантаження і час холостого ходу [1].

Максимальне навантаження P_{max} в усіх режимах S2 – S10 не повинне перевищувати P_{S1} навантаження типового режиму S1, $P_{max} \leq 1,15 P_{S1}$. Для типових режимів S9, рис. 1 і S10, рис. 2 за номінальну вихідну потужності приймається базове навантаження, що відповідає типовому режиму S1.

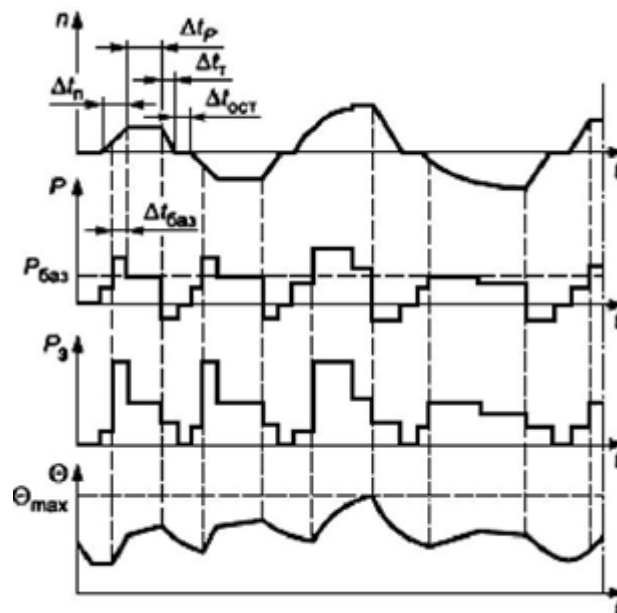


Рисунок 1 – Часові діаграми зміни параметрів режиму S9

На рис. 1 наведені позначення: P – навантаження; P_{δ} – базове навантаження; P_{δ} – електричні втрати; θ – температура; θ_{max} – максимальна досягнута температура; t – час: Δt_p – час роботи з постійним навантаженням, Δt_n – час розгону; Δt_m – час електричного гальмування; $\Delta t_{ост}$ – час зупинки; Δt_{δ} – час роботи з базовим навантаженням, n – частота обертання.

У типовому режимі S10, що складається з обмеженого числа дискретних навантажень та, якщо можливо, частот обертання, кожна комбінація навантаження/частоти обертання зберігається достатній час для того, щоб машина досягла встановленого теплового стану, рис. 2. Мінімальне навантаження протягом робочого циклу може мати і нульове значення (холостий хід, знеструмлений стан).

Режим S10 оцінюється значеннями величин $P/\Delta t$ і T_{CC} . Навантаження P враховується в частках базового навантаження і Δt її тривалість у частках тривалості повного циклу навантаження. Відносна величина очікуваного термічного терміну служби (T_{CC}) ізоляційної системи визначається з урахуванням номінальної потужності та допустимої межі перевищення температури, що відповідають тривалому типовому режиму S1.

Дискретні навантаження є, як правило, еквівалентним навантаженням, інтегрованим за певний період часу. Немає необхідності, щоб кожен цикл навантаження точно повторював попередній, проте кожне навантаження всередині циклу повинно підтримуватися достатній час для досягнення встановленого теплового стану, і кожен навантажувальний цикл повинен інтегровано представляти ту ж імовірність відносного очікуваного термічного терміну служби ізоляції електродвигуна T_{CC} .

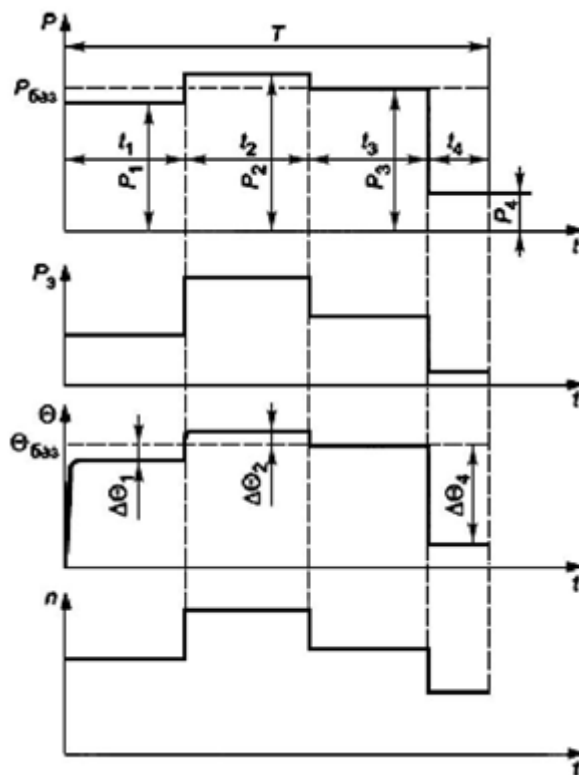


Рисунок 2 – Часові діаграми зміни параметрів режиму S10

На рис. 2 наведені позначення: P – навантаження; $P_{баз}$ – базове навантаження відповідно до типового режиму S1; $P_{1,2,i}$ – постійна частина навантаження всередині одного циклу навантаження; $P_э$ – електричні втрати; θ – температура; $\theta_{баз}$ – температура при базовому навантаженні $P_{баз}$; t – час; $t_{1,2,3,4}$ – час роботи з постійним навантаженням усередині циклу навантаження; T – час одного циклу навантаження; $\Delta\theta_{1,2,i}$ – різниця між перевищенням температури обмоток при кожному з навантажень всередині одного циклу і перевищенням температури при базовому навантаженні в режимі S1; n – частота обертання.

Однак цикл може містити навантаження, які відрізняються від номінальних, що відповідають типовому режиму S1. В залежності від значення та тривалості різних навантажень у межах одного циклу відносний очікуваний термічний термін служби машини, що визначається термічним старінням ізоляційної системи, може бути розрахований за рівнянням:

$$\frac{1}{T_{CC}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i 2^{\Delta \Theta_i / k}, \quad (6)$$

де T_{CC} - очікуваний відносний термічний термін служби у разі роботи з номінальною (базовою) потужністю в типовому режимі;

n – число дискретних значень навантаження;

Δt_i – тривалість окремих постійних навантажень усередині робочого циклу, віднесена до тривалості всього робочого циклу;

$\Delta \Theta_i$ – різниця між перевищенням температури обмотки при кожному з різних навантажень всередині одного циклу і перевищенням температури при базовому навантаженні в режимі;

k – коефіцієнт збільшення перевищення температури, що веде до скорочення термічного терміну служби ізоляційної системи на 50%.

Очікуваний відносний термін T_{CC} може розглядатися тільки як відносна величина. Вона може бути використана для наближеної оцінки дійсної зміни очікуваного термічного терміну служби ізоляції машини в порівнянні з типовим режимом S1 при роботі з номінальною потужністю.

Для АД, що ремонтуються, проблема довговічності пов'язана зі старінням матеріалів і зношуванням механічних вузлів, швидко збільшуються витрати на ремонт і збитки від простоїв. З іншого боку, відносна величина амортизаційних відрахувань зменшується зі збільшенням терміну служби. Таким чином, виникає поняття оптимальної довговічності, яка визначається мінімумом питомих, наприклад, річних витрат споживача.

Якщо загальні витрати споживача становлять

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad (7)$$

де $C_1 = A$, A – вартість електродвигуна;

C_2 – поточні експлуатаційні витрати, пропорційні часу роботи та враховують витрати електроенергії, витрати на обслуговування, планову профілактику та ін, тобто $C_2 = B \cdot t$;

C_3 - витрати на ремонт та збитки від простоїв, які залежать від загальної кількості відмов n за час t , $C_3 = D^n$.

Щоб визначити оптимальний час довговічності T_{onm} роботи електродвигуна аналітично, можна замінити початкову ділянку кривої нормального розподілу степеневу функцією, тоді $C = A + Bt + D^n$.

Питомі витрати

$$\frac{C}{t} = \frac{A}{t} + B + Dt^{n-1}, \quad (8)$$

будуть мінімальними при

$$t = T_{onm} = \sqrt{\frac{A}{(n-1)D}}, \quad (9)$$

З рівняння видно, що час довговічності T_{onm} зростає зі збільшенням вартості машини і з підвищенням її надійності.

Запропоновано спосіб захисту електродвигуна від струмових перевантажень, який включає в себе вимірювання струмів електродвигуна, визначення значень їх квадратів, формування часового ряду часткових сум квадратів струмів, видалення останнього значення цього часового ряду при надходженні чергового значення квадрата струму електродвигуна, зміщення на крок вперед складових всіх елементів часового ряду, встановлення на перше місце ряду нового вимірюваного значення квадрата струму та підсумовування його до складових інших елементів часового ряду, формування сигналу на відключення електродвигуна від мережі при перевищенні заданого рівня сум квадратів струму в будь-якому елементі ряду. Крім того формують першу ланку з інформаційних точок часового ряду з часом усереднення кратним часу дискретизації датчиків струмів фаз електродвигуна, а кожен наступну ланку формують з інформаційних точок з часом усереднення кратним часу усереднення інформаційних точок першої ланки, також продовжують формувати часовий ряд на період з моменту формування сигналу на відключення електродвигуна до моменту обнуління всіх складових елементів часового ряду, або протягом 3÷4 постійних часу нагрівання електродвигуна після його фактичного відключення від мережі живлення [2].

Вимірюються еквівалентні струми з часом усереднення від Δt до $n \cdot \Delta t$, де Δt – крок дискретизації контрольованого часового інтервалу;

n – кількість кроків;

$n \cdot \Delta t = (3 \div 4) T_n$; T_n – постійна теплова часу нагріву електродвигуна.

Довжину часового ряду вибирають рівною значенню 3..4 постійних теплових часу нагрівання електродвигуна. Щоб скоротити кількість елементів n , часовий ряд формують з ланок з наростаючою кратністю часу усереднення інформаційних точок $n_1 < n_2 < n_n$. Наприклад, першу ланку формують з інформаційних точок тривалістю в секунди, а другу - хвилини. Таким чином, кількість елементів часового ряду із двох ланок скорочується приблизно в 50...60 разів.

Гранично допустиме значення сум квадратів струмів n -ного елемента пам'яті часового ряду становить

$$\sum_{1}^n \frac{I_{екв}^2}{n} = I_{ном}^2 \left(\frac{K}{n \Delta t} + 1 \right), \quad (10)$$

де n – порядковий номер комірки пам'яті часового ряду;

$I_{ном}$ – номінальний струм електродвигуна;

K – постійна величина;

Δt – період дискретизації.

Далі порівнюють значення часткових сум квадратів струму в елементах часового ряду з їх гранично допустимими значеннями. При виході за допустимі межі хоча б в

одному з елементів часового ряду значень часткових сум квадратів струму формується сигнал на відключення електродвигуна від мережі [2].

Висновки. Запропоновано спосіб захисту електродвигуна від струмових перевантажень, що включає в себе вимірювання струмів, формування часового ряду частинних сум квадратів струмів та автоматичне відключення при перевищенні заданого рівня. Для оптимізації довговічності важливо враховувати експлуатаційні витрати та підвищення надійності, включаючи оптимізацію формування часового ряду.

Список використаної літератури

1. Спосіб захисту електродвигуна : пат. 42964 Україна : МПК H02H 7/08. № u 2009 02348 ; заявл. 16.03.2009 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14.
2. Спосіб захисту електродвигуна від струмових перевантажень : пат. 101074 Україна : МПК H02H 7/08. № u 2015 01981 ; заявл. 05.03.15; опубл. 25.08.2015, Бюл. №16.

Науковий керівник: ст. викл. Дубовик В.Г.

UDC 621.316.9

M.R. Haiko¹, student,
V.I. Kurganska¹, student

¹Department of Automation of electrical and mechatronic complexes
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

PROTECTION OF INDUCTION MOTORS IN OPERATING MODES

Abstract. *The article reviews and analyzes the operation of asynchronous electric motors in various operating modes and evaluates the possibility of their protection in the event of violations and changes in the values of operating parameters. Methods of diagnosing the state of asynchronous motors are being developed, based on the control of the consumed current followed by the spectral analysis of the received signal. This makes it possible to determine with a high degree of reliability the condition of various engine elements by measuring the weak modulation of the current consumed by the electric motor.*

Keywords: *asynchronous electric motor, emergency modes, protection.*

References

1. The method of protecting the electric motor: pat. 42964 Ukraine: IPC H02H 7/08. No. u 2009 02348; statement 16.03.2009; published 27.07.2009, Bull. No. 14.
2. The method of protecting the electric motor from current overloads: pat. 101074 Ukraine: IPC H02H 7/08. No. u 2015 01981; statement 05.03.15; published 25.08.2015, Bul. No. 16.

Academic supervisor: senior lecturer Volodymyr Dubovik