

УДК 621.355:786

Олександр Єнікєєв¹, д-р техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>

Юрій Куп^{2,3}, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>

Андрій Ткаченко^{1*}, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0005-0752-0900>

Леонід Щербак³, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-1536-4806>

¹Європейський університет, бульв. Академіка Вернадського, 16-в, м. Київ, 03115, Україна;

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна;

³Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: tkachenko.aat@gmail.com

ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ОБРИВІВ В СТАТОРНИХ ОБМОТКАХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Анотація. Розглянуто особливості технічної експлуатації асинхронних двигунів вантажопідйомних машин та типові пошкодження обмоток статора. Встановлено, що одним із перспективних шляхів вирішення завдань захисту двигунів є використання комп'ютерних систем моніторингу. Алгоритмічне та прикладне програмне забезпечення цих систем включає операції вимірювань та контролю струмів статорних обмоток. Запропоновано метод моніторингу та діагностування асинхронних трифазних двигунів за кутами зсуву фаз лінійних струмів. Розроблено методику розрахунку режимів роботи асинхронних двигунів при обриві однієї з паралельних гілок фазної обмотки статора. На підставі отриманих рівнянь за допомогою методу графів складено схему комп'ютерного моделювання у програмному середовищі MatLab із розширенням Simulink для розрахунку симетричних та несиметричних режимів роботи асинхронного двигуна з урахуванням розподілу струмів у паралельних гілках фазних обмоток. Результати теоретичних досліджень підтверджено експериментально. Наведено графіки залежностей величин сталих температур лобових частин статорних обмоток від величин фазних струмів. Показано, що струмове перевантаження працюючої гілки пошкодженої фазної обмотки може мати місце навіть при номінальному лінійному струмі. Водночас в працюючій паралельній гілці фазної обмотки з обривом має місце суттєве теплове перевантаження, яке призводить до швидкої деградації ізоляційних матеріалів обмотки та розвинення несправності до більш серйозної. Характерною особливістю режиму роботи асинхронного двигуна при обриві паралельної гілки фазної обмотки статора є те, що при зниженому навантаженні двигун може тривалий час працювати без перегріву. Показано, що в якості діагностичного показника доцільно використовувати характер асиметрії лінійних струмів за фазою.

Ключові слова: моніторинг, діагностичні ознаки, комп'ютерна система, математичне моделювання, обрив гілки, програмне середовище MatLab із розширенням Simulink, комп'ютерне моделювання.

1. Вступ

Одними з найбільш поширених електричних машин є асинхронні двигуни (АД) [1, 2]. За даними статистики ЄС про виробництво промислових товарів, з приблизно 10 млн багатофазних двигунів змінного струму (за винятком тягових) потужністю 0,75–375 кВт домінують трифазні АД, що становить близько 85 % частки ринку [3]. Споживання ними електричної енергії на промислових підприємствах становить до 70 % від загального [4]. АД є достатньо надійними машинами, при забезпеченні номінальних режимів роботи термін їх експлуатації складає 20–40 тис. годин [5]. Однак, як показують дослідження [6], АД нерідко експлуатуються у достатньо важких умовах та за незадовільного технічного обслуговування. Як наслідок цього суттєво зростає вірогідність пошкоджень, що є причиною значних збитків.

Найбільш поширеними причинами виходу з ладу АД є несправності обмоток статора: обриви та міжвиткові замикання [7]. Своєчасне їх виявлення дає змогу не допустити більш серйозних пошкоджень [8], отже зменшити час відновлення, скоротити витрати на обслуговування та втрати від позапланових простоїв, а також покращити ефективність роботи електродвигунів та виробничих механізмів [9]. Одним із найбільш перспективних шляхів вирішення цих завдань є використання комп'ютерних систем моніторингу [10, 11], алгоритмічне та прикладне програмне забезпечення яких включає також операції опрацювання даних вимірювань та контролю роботи двигунів [12]. Це, у свою чергу, потребує створення сучасних систем моніторингу стану АД із діагностуванням аварійних режимів роботи [13]. Одним із найбільш розповсюджених способів виявлення пошкоджень електродвигунів є контроль величин струмів обмоток статора [14–15].

Метою статті є розроблення методології досліджень режимів роботи АД за умов наявності обривів у статорних обмотках та визначення діагностичних ознак, що можуть бути використані в комп'ютерних системах моніторингу та діагностування поточного стану АД в робочих умовах.

2. Методи та матеріали

2.1 Особливості роботи швидкісних асинхронних двигунів

АД у складі вантажопідйомних машин працюють в режимі з достатньо високою періодичністю вмикання, за умов складних діаграм навантажень, затяжними пусками тощо [16]. Тривалість робочого циклу АД та величини навантаження на механізми підйому неможливо визначити заздалегідь [17], що ускладнює облік усіх можливих режимів роботи при виборі двигуна за потужністю, а ефективний захист від теплових навантажень здійснюється не завжди. В результаті величина температури обмоток АД нерідко перевищує максимально припустиму величину, що призводить до передчасного виходу з ладу ізоляційних матеріалів [18–19].

Крім того, під час експлуатації вантажопідйомних машин можливий режим роботи із загальмованим ротором внаслідок спроби підйому примерзлого або заклиненого вантажу, відмови електричного обладнання керування гальмівного механізму тощо [20]. Робота АД в таких режимах супроводжується суттєвим струмовим перевантаженням, що викликає швидке зростання температури обмоток та нерівномірне теплове розширення конструкційних елементів машин. Це може викликати вихід з ладу обмотки навіть при температурах, менших за максимально припустиму.

Подібні наслідки викликає неповнофазний режим роботи АД. Причинами його виникнення можуть бути: поганий контакт на одній фазі магнітного пускача або рубильника; обрив в одній фазі двигуна або дроту струмопроводу; поганий контакт у вивідній коробці силового тощо. Як наслідок цього мають місце значні струмові перевантаження, перегрів і вихід з ладу АД.

Таким чином, на підставі аналізу особливостей роботи АД вантажопідйомних машин впливає, що вони працюють у достатньо важких умовах. Для покращення надійності роботи двигуна, зменшення кількості пошкоджень та попередження поломок доцільно використати системи захисту, які здатні запобігти виникненню пошкоджень та унеможливити їхній розвиток. Дослідження умов виникнення аварійних режимів роботи АД дасть змогу розробити рекомендації щодо вибору типу та налаштувань засобів захисту.

2.2 Системи захисту та аварійні режими роботи

ДСТУ EN 60204-32:2018 передбачено, що усі двигуни, потужність яких перевищує 0,5 кВт, повинні бути захищені від перегрівання шляхом [21]:

1. Захисту від перевантаження за допомогою пристроїв, що виявляють співвідношення часу і величини струму (P_t) у колі і подають сигнал на відмикання або включення сигналізації у випадках, коли раптове вимкнення АД неприпустиме, наприклад у приводах підйому вантажу.
2. Використання пристроїв для безпосереднього вимірювання температури обмоток двигуна.
3. Захисту від обмежень трифазних струмів, при чому кількість поточних пристроїв обмеження може бути зменшена від 3 до 2.

Вказані засоби захисту не захищають АД від усіх можливих аномальних режимів [22]. Зокрема, у двигунах вантажопідйомних машин широко застосовуються схеми з паралельним з'єднанням гілок статорних обмоток. Наприклад, обмотка статора двошвидкісного АД може передбачати перемикання зі схеми «трикутник» у «подвійну зірку», при цьому «подвійна зірка» відповідає вищій швидкості та має дві паралельні гілки у кожній фазній обмотці статора.

Відомо, що обрив паралельної гілки фазної обмотки статора призводить до менш помітного зниження перевантажувальної здатності та пускового моменту електродвигуна. В якості прикладу на рис. 1 наведено електромеханічні характеристики $M(\omega)$ пошкодженої фази статора АД типу АО2-61 при обриві однієї з двох паралельних гілок (тут ω – кутова частота обертання ротора електродвигуна; M_n , ω_n – номінальні величини моменту та частоти обертання відповідно).

На підставі аналізу графіка рис. 1 впливає: обрив однієї з двох паралельних гілок фазної обмотки статора двигуна АО2-61 призводить до зниження пускового моменту на 30 %, а максимального – на 31 % [23]. Втім, при номінальному навантаженні АД не зупиняється та може піти в хід. Також відомо, що відсутність симетрії лінійних струмів за наявності цього аномального режиму роботи АД має складний характер. Таким чином, доцільно виконати більш ретельні дослідження режиму роботи двигуна за наявності такої несправності.

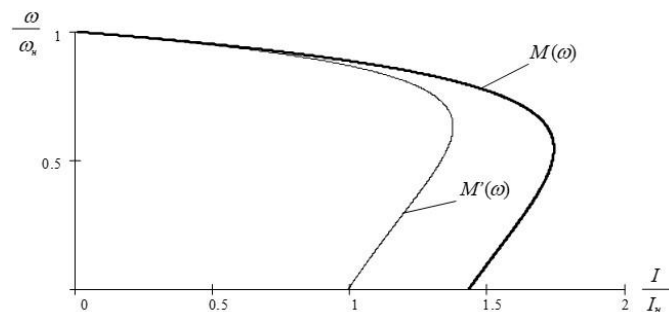


Рисунок 1. Механічні характеристики двигуна АО2-61: номінальна – $M(\omega)$, та при обриві однієї з двох паралельних гілок фазної обмотки статора – $M'(\omega)$

2.3. Методика математичного моделювання асинхронних двигунів при обривах в паралельних гілках фазних обмоток статора

В процесі дослідження особливостей режимів роботи АД обмотки статора авторами розглянуто її модель у вигляді паралельного з'єднання додаткових елементів, як це показано на рис. 2, а. За такого подання зручно імітувати обриви обмоток статора використовуючи паралельні гілки, короткозамкнені витки тощо. Дослідження проводились за умови, що обрив має місце тільки в одній обмотці з n паралельних гілок статора. Сигнальний граф математичної моделі для досліджень режимів роботи АД зображено на рис. 2, б.

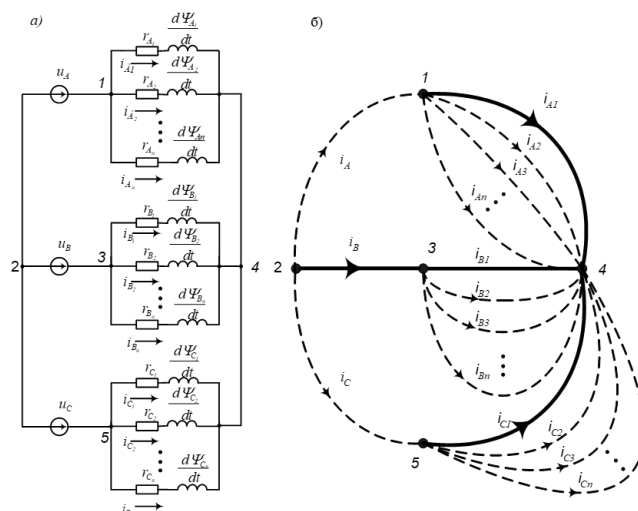


Рисунок 2. Схема обмоток статора АД для складання математичної моделі

З аналізу рис. 2 зроблено висновок, що схема підключення обмоток статора має чотири гілки дерева і $(3n-1)$ гілок зв'язку. Усього схема має $(3n+3)$ гілок та невідомих струмів. Для розрахунку невідомих необхідно скласти $(3n+3)$ незалежних рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа. Для випадку із двома паралельними гілками в кожній обмотці статора маємо таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} i_A + i_B + i_C &= 0; \\ i_{A1} + i_{A2} + i_{A3} + \dots + i_{An} &= i_A; \\ i_{B1} + i_{B2} + i_{B3} + \dots + i_{Bn} &= i_B; \\ i_{C1} + i_{C2} + i_{C3} + \dots + i_{Cn} &= i_C. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В рівняннях (1) і далі, з метою спрощення запису формул, часовий аргумент t при струмах, напругах та потокозчепленнях не вказано. Для побудови повної системи рівнянь, що описують роботу АД, система (1) доповнена такими рівняннями. Для контурів, що включають гілки дерева і одну з гілок зв'язку, складено рівняння за другим законом Кірхгофа

$$r_{A1}i_{A1} + \frac{d\Psi_{A1}}{dt} - r_{B1}i_{B1} - \frac{d\Psi_{B1}}{dt} = u_A - u_B \quad (2)$$

та $(n-1)$ рівнянь для контурів зі струмами $(i_{A1}, i_{A2}), (i_{A1}, i_{A3}) \dots (i_{A1}, i_{An})$:

$$\left. \begin{aligned} r_{A1}i_{A1} + \frac{d\Psi_{A1}}{dt} - r_{A2}i_{A2} - \frac{d\Psi_{A2}}{dt} &= 0; \\ r_{A2}i_{A2} + \frac{d\Psi_{A2}}{dt} - r_{A3}i_{A3} - \frac{d\Psi_{A3}}{dt} &= 0; \\ &\dots \\ r_{An-1}i_{An-1} + \frac{d\Psi_{An-1}}{dt} - r_{An}i_{An} - \frac{d\Psi_{An}}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Подібно до (3) для контурів зі струмами $(i_{B1}, i_{B2}), (i_{B1}, i_{B3}) \dots (i_{B1}, i_{Bn})$ складено по $(n-1)$ рівнянь

$$\left. \begin{aligned} r_{B1}i_{B1} + \frac{d\Psi_{B1}}{dt} - r_{B2}i_{B2} - \frac{d\Psi_{B2}}{dt} &= 0; \\ r_{B2}i_{B2} + \frac{d\Psi_{B2}}{dt} - r_{B3}i_{B3} - \frac{d\Psi_{B3}}{dt} &= 0; \\ &\dots \\ r_{Bn-1}i_{Bn-1} + \frac{d\Psi_{Bn-1}}{dt} - r_{Bn}i_{Bn} - \frac{d\Psi_{Bn}}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Наступне рівняння отримано для контуру зі струмами i_B, i_{B1}, i_{C1}, i_C ,

$$r_{B1}i_{B1} + \frac{d\Psi_{B1}}{dt} - r_{C1}i_{C1} - \frac{d\Psi_{C1}}{dt} = u_B - u_C. \quad (5)$$

Завершують повну систему рівнянь для статорних обмоток $(n-1)$ виразів для контурів зі струмами $(i_{C1}, i_{C2}), (i_{C1}, i_{C3}) \dots (i_{C1}, i_{Cn})$, яка за структурою подібна до рівнянь (3) та (4)

$$\left. \begin{aligned} r_{C1}i_{C1} + \frac{d\Psi_{C1}}{dt} - r_{C2}i_{C2} - \frac{d\Psi_{C2}}{dt} &= 0; \\ r_{C2}i_{C2} + \frac{d\Psi_{C2}}{dt} - r_{C3}i_{C3} - \frac{d\Psi_{C3}}{dt} &= 0; \\ &\dots \\ r_{Cn-1}i_{Cn-1} + \frac{d\Psi_{Cn-1}}{dt} - r_{Cn}i_{Cn} - \frac{d\Psi_{Cn}}{dt} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де u_A, u_B, u_C – фазні напруги; $r_{A1}, r_{A2}, r_{B1}, r_{B2}, r_{C1}, r_{C2}$ – активні опори паралельних гілок статора; $\Psi_{A1}, \Psi_{A2}, \Psi_{B1}, \Psi_{B2}, \Psi_{C1}, \Psi_{C2}$ – потокозчеплення гілок обмоток статора; $i_{A1}, i_{A2}, i_{B1}, i_{B2}, i_{C1}, i_{C2}$ – струми паралельних гілок фазних обмоток статора.

В результаті отримано систему рівнянь (1–6) для статора, яка включає $4+l+(n-l)+(n-l)+l+(n-l) = 3+3n$ рівнянь для $3+3n$ невідомих струмів (три фазних струму i_A, i_B, i_C та $3n$ струмів паралельних гілок). При складанні рівнянь зроблено наступні припущення: витіснення струму, насичення і втрати в магнітопроводі відсутні; комплексні опори обмоток не мають ємнісних складових; джерело живлення є ідеальним.

Система рівнянь для ротора складається з трьох рівнянь з трьома невідомими фазними струмами ротора i_A, i_B, i_C

$$\left. \begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0; \\ r_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} - r_b i_b - \frac{d\psi_b}{dt} &= 0; \\ r_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} - r_c i_c - \frac{d\psi_c}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Рівняння (1–7) становлять систему рівнянь, достатню для розрахунку струмів статора та ротора АД. Потокозчеплення кожної з обмоток, що входять у систему рівнянь (2–7), визначаються як підсумок власного потокозчеплення обмотки j ($i_j L_j$) та потокозчеплень інших обмоток $\sum_{k=1}^n i_k M_{jk}, k \neq j$. В якості прикладу нижче наведено рівняння для потокозчеплення першої паралельної гілки обмотки фази А статора

$$\begin{aligned} \psi_{A1} &= i_{A1} L_{A1} + i_{A2} M_{A1A2} + i_{A3} M_{A1A3} + \dots + i_{An} M_{A1An} + i_{B1} M_{A1B1} + i_{B2} M_{A1B2} + \\ &+ i_{B3} M_{A1B3} + \dots + i_{Bn} M_{A1Bn} + i_{C1} M_{A1C1} + i_{C2} M_{A1C2} + i_{C3} M_{A1C3} + \dots + i_{Cn} M_{A1Cn} + \\ &+ i_a M_{A1a} + i_b M_{A1b} + i_c M_{A1c}; \\ \psi_{A2} &= i_{A1} M_{A2A1} + i_{A2} L_{A2} + i_{A3} M_{A2A3} + \dots + i_{An} M_{A2An} + i_{B1} M_{A2B1} + i_{B2} M_{A2B2} + \\ &+ i_{B3} M_{A2B3} + \dots + i_{Bn} M_{A2Bn} + i_{C1} M_{A2C1} + i_{C2} M_{A2C2} + i_{C3} M_{A2C3} + \dots + i_{Cn} M_{A2Cn} + \\ &+ i_a M_{A2a} + i_b M_{A2b} + i_c M_{A2c}; \\ &\vdots \\ \psi_{An} &= i_{A1} M_{AnA1} + i_{A2} M_{AnA2} + i_{A3} M_{AnA3} + \dots + i_{An} L_{An} + i_{B1} M_{AnB1} + i_{B2} M_{AnB2} + \\ &+ i_{B3} M_{AnB3} + \dots + i_{Bn} M_{AnBn} + i_{C1} M_{AnC1} + i_{C2} M_{AnC2} + i_{C3} M_{AnC3} + \dots + i_{Cn} M_{AnCn} + \\ &+ i_a M_{Ana} + i_b M_{Anb} + i_c M_{Anc}. \end{aligned} \quad (8)$$

Разом отримано n виразів для n потокозчеплень паралельних гілок фази А. Аналогічно вищевикладеному складається по n рівнянь для потокозчеплень паралельних гілок фазних обмоток В і С і три рівняння для потокозчеплень фазних обмоток ротора – всього $(3n+3)$ рівнянь для $(3n+3)$ рівнянь потокозчеплень ($\psi_{A1}, \psi_{A2}, \psi_{A3}, \dots, \psi_{An}, \psi_{B1}, \psi_{B2}, \psi_{B3}, \dots, \psi_{Bn}, \psi_{C1}, \psi_{C2}, \psi_{C3}, \dots, \psi_{Cn}$).

Рівняння динаміки АД можна отримати, виходячи з виразів (10–12):

$$W_\phi = \frac{1}{2} (\sum_{k=1}^n \psi_{Ak} i_{Ak} + \sum_{k=1}^n \psi_{Bk} i_{Bk} + \sum_{k=1}^n \psi_{Ck} i_{Ck}); \quad (9)$$

$$M = Z_p \frac{\partial W_\phi}{\partial \phi}; \quad (10)$$

$$M - M_C = \frac{J}{Z_p} \frac{d\omega}{dt}, \quad (11)$$

де Z_p – число пар полюсів; W_ϕ – електромагнітна енергія; ϕ, ω – кут обертання ротора та кутова частота відповідно; J – зведений до валу двигуна момент інерції механічної частини приводу; M, M_C – електромагнітний момент та статичний момент опору на валу АД.

Рівняння (1–7) та (11) становлять математичну модель АД у трифазних неперетворених координатах, котру доповнено рівняннями зв'язку потокозчеплень (8). Розглянута математична модель дає змогу виконувати аналіз як симетричних, так і несиметричних режимів роботи АД з урахуванням розподілу струмів у паралельних гілках фазних обмоток. Наприклад, для досліджень режимів роботи

АД за наявності обриву однієї або декількох паралельних гілок статора обмотки достатньо прийняти активний опір відповідної гілки рівним нескінченності.

Відповідно до рівнянь математичної моделі (1–7) та (11) у середовищі MatLab Simulink реалізовано структурну програму аналізу режимів роботи АД при обриві однієї з двох паралельних гілок обмотки статора (рис. 3).

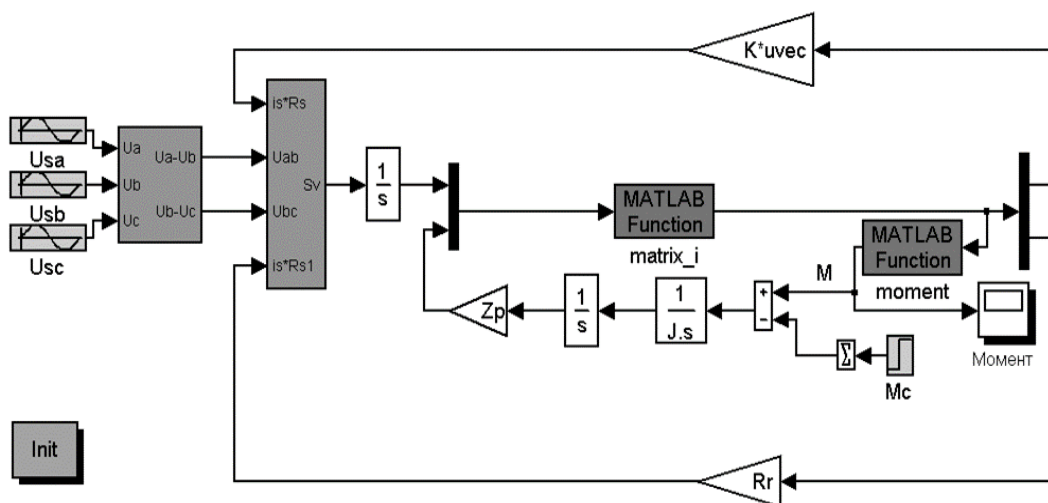


Рисунок 3. Структурна програма моделювання режимів роботи АД при обриві паралельної гілки статора обмотки в середовищі MatLab Simulink

Як приклад на рис. 4 наведено результати моделювання АД при обриві паралельної гілки обмотки статора – фазні струми статора $I_{\phi}(t)$ та електромагнітний момент $M(t)$ при пуску на холостому ході АД при обриві паралельної гілки.

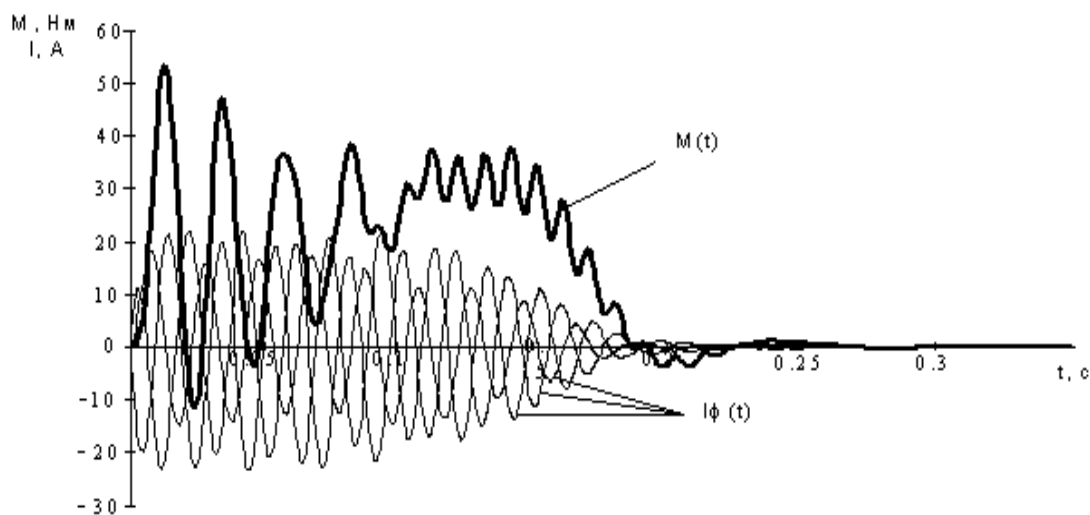


Рисунок. 4. Графічне представлення результатів моделювання фазних струмів статора та електромагнітного моменту двигуна АО2-61 ($2p = 6$) при пуску

3. Результати моделювання та експериментальних досліджень

В табл. 1 представлені дані моделювання для двигуна АО2-61 при обриві першої з двох паралельних гілок статорної обмотки фази С.

Таблиця 1. Розрахункові значення струмів у фазах та паралельних гілках двигуна АО2-61 при обриві однієї з двох паралельних гілок обмотки фази

M/M_n	$I_A/I_{ном}$	$I_{A1}/2I_{ном}$	$I_{A2}/2I_{ном}$	$I_B/I_{ном}$	$I_{B1}/2I_{ном}$	$I_{B2}/2I_{ном}$	$I_C/I_{ном}$	$I_{C1}/2I_{ном}$	$I_{C2}/2I_{ном}$
0,00	0,26	0,35	0,20	0,26	0,33	0,22	0,17	0,00	0,34
0,1	0,28	0,37	0,21	0,28	0,34	0,23	0,18	0,00	0,36
0,2	0,33	0,42	0,24	0,32	0,39	0,26	0,21	0,00	0,42
0,3	0,39	0,50	0,29	0,38	0,47	0,31	0,25	0,00	0,50
0,4	0,47	0,61	0,37	0,46	0,56	0,37	0,30	0,00	0,61
0,5	0,57	0,72	0,44	0,55	0,67	0,45	0,37	0,00	0,73
0,6	0,68	0,85	0,53	0,66	0,79	0,53	0,44	0,00	0,88
0,7	0,80	1,00	0,64	0,78	0,94	0,64	0,52	0,00	1,04
0,8	0,95	1,17	0,79	0,92	1,09	0,76	0,62	0,00	1,24
0,9	1,14	1,38	0,96	1,11	1,29	0,93	0,76	0,00	1,51

З метою встановлення невизначеності розрахунків проведено дослід на АД АО2-61 (схема підключення забезпечує $2p = 6$) при обриві однієї з двох паралельних гілок обмотки фази статора. У табл. 2 наведено дослідні дані.

Таблиця 2. Дослідні значення струмів у фазах та паралельних гілках двигуна АО2-61 при обриві однієї з двох паралельних гілок обмотки фази

M/M_n	$I_A/I_{ном}$	$I_{A1}/2I_{ном}$	$I_{A2}/2I_{ном}$	$I_B/I_{ном}$	$I_{B1}/2I_{ном}$	$I_{B2}/2I_{ном}$	$I_C/I_{ном}$	$I_{C1}/2I_{ном}$	$I_{C2}/2I_{ном}$
0,5	0,58	0,75	0,4	0,57	0,7	0,43	0,39	0,00	0,78
0,7	0,84	1,1	0,6	0,8	1,03	0,67	0,57	0,00	1,14
0,8	0,97	1,18	0,8	0,95	1,2	0,78	0,63	0,00	1,26

На рис. 5 показано залежності величин фазних струмів АД від ковзання: $I(s)$ – фазних струмів справного двигуна, $I_A(s)$ – струму фази А з обривом, $I_B(s)$, $I_C(s)$ – струмів фаз В і С без обривів.

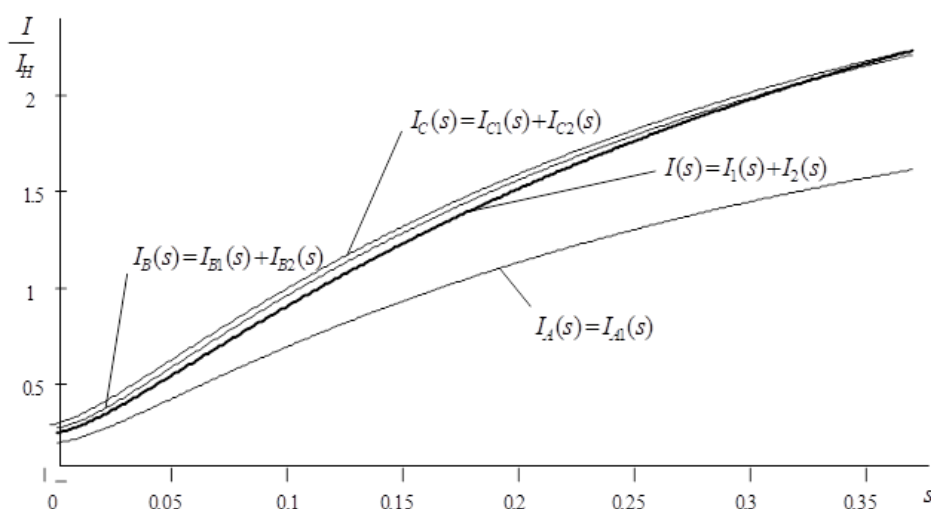


Рисунок 5. Графіки залежностей струмів фаз двигуна АО2-61 ($2p = 6$) від ковзання $I(s)$ – справного двигуна; $I_A(s)$, $I_B(s)$, $I_C(s)$ – струмів фаз А (з обривом), В, С відповідно

З аналізу рис. 5 можна зробити висновок, що обрив паралельної гілки фазної обмотки призводить до збільшення струмів фаз без несправності на (10–15) % відносно струмів непошкодженого двигуна. У пошкодженій фазі струм дещо менший. Однак слід зазначити, що у пошкодженій фазі працює тільки одна паралельна гілка, отже в ній також можливе струмове перевантаження, що викликає швидке розвинення несправності до повного виходу з ладу обмотки в результаті обриву, міжфазного замикання або замикання на корпус. Таким чином, передбачені ДСТУ методи захисту АД можуть бути неефективними для виявлення його несправності.

Для дослідження теплового стану електродвигунів виконано моделювання із використанням еквівалентних теплових схем заміщення. На рис. 6 показано графіки залежності сталих температур лобових частин паралельних гілок обмоток статора при різних величинах навантаження на валу.

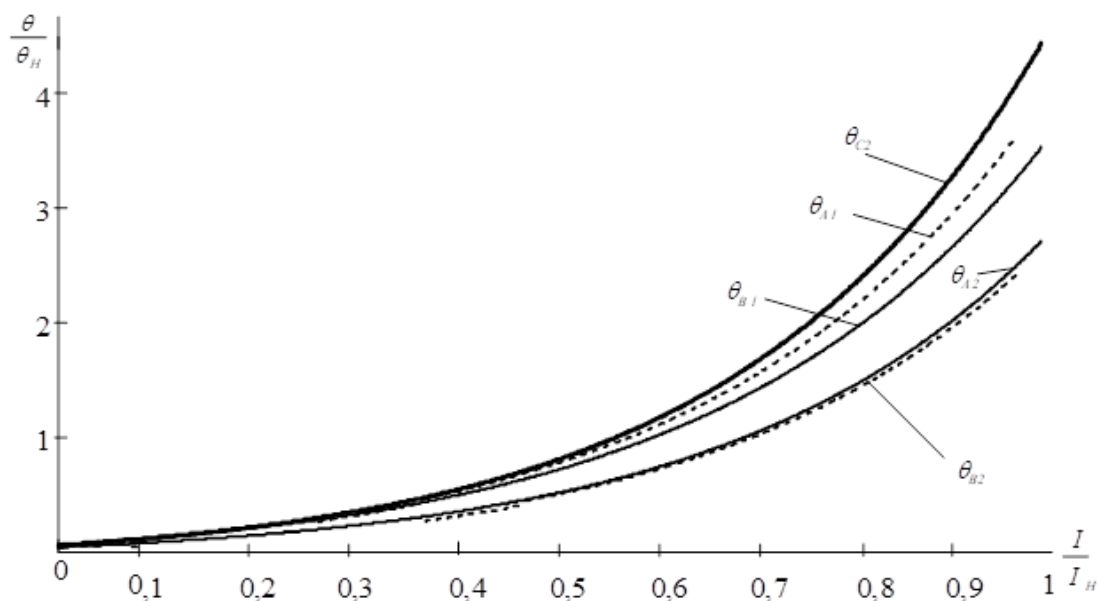


Рисунок 6. Графіки сталої температури лобових частин обмоток двигуна АО2-61 ($2p = 6$), при обриві першої паралельної гілки фази А статора

З аналізу рис. 6 випливає, що обрив паралельної гілки призводить до значного перегріву окремих паралельних гілок статора обмотки. Так, при номінальному моменті опору на валу двигуна температура паралельної гілки пошкодженої фази перевищує номінальну в $\sim 4,4$ рази. Однак при навантаженні 64 % номінальної температури обмоток не перевищують максимально допустимої і двигун може працювати тривалий час.

Аналіз розподілу температур в сталому режимі роботи АД також проводився шляхом експериментальних досліджень. З цією метою в лобові частини обмоток статора було розміщено термопари. Оскільки дослідження температурного поля за несправностей обмотки статора пов'язано з ризиком виходу АД з ладу, оцінку перегрівів у всьому діапазоні навантажень отримати неможливо. У табл. 3 наведено дослідні та розрахункові перевищення температур лобових частин обмоток у встановленому режимі при зниженому навантаженні.

Таблиця 3. Відносні температури лобових частин паралельних гілок фазних обмоток статора після завершення теплових перехідних процесів

M/M_H	θ_{A2}/θ_H	θ_{B1}/θ_H	θ_{B2}/θ_H	θ_{C1}/θ_H	θ_{C2}/θ_H
Розрахунок					
0,51	0,28	0,18	0,27	0,18	0,24
0,64	1,072	0,66	1,02	0,68	0,93
0,7	1,23	0,76	1,16	0,78	1,06
Дослід					
0,51	0,30	0,15	0,25	0,17	0,20
0,64	1,00	0,59	0,97	0,63	0,86
0,70	1,25	0,73	1,18	0,73	1,01

У табл. 4 подано величини відносних моментів опору на валу двигуна та відповідні їм різниці фаз лінійних струмів (ΔI) при обриві однієї з двох паралельних гілок обмотки фази статора.

Таблиця 4. Різниця фаз лінійних струмів при зміні статичного навантаження на валу двигуна

№ з/п	M/M_H	$\Delta\psi_{AB}$	$\Delta\psi_{BC}$	$\Delta\psi_{CA}$
1	0	109,4	111,9	136,7
2	0,5	111,7	112,1	137,3
3	0,66	109,3	110,8	138,2
4	0,85	110,7	111,5	137,8
5	0,87	110,9	110,8	138,3

4. Обговорення

В результаті аналізу розподілу струмів (табл. 1) при обриві паралельної гілки в обмотці статора встановлено, що має місце асиметрія за величиною як лінійних струмів, так і струмів в паралельних гілках. Зокрема, при навантаженні більше $0,7M_H$ у гілках фазних обмоток мають місце струмові перевантаження, хоча лінійні струми не перевищують номінальних величин.

Результати розрахунку теплового стану двигуна (табл. 3) дають змогу встановити, що при обриві однієї з двох паралельних гілок фазної обмотки статора найбільш нагрітою є лобова частина гілки пошкодженої фази. Наприклад, момент опору $0,7M_H$ має місце теплове перевантаження $1,25\theta_H$. Перевищення температурами номінальних значень має місце і в паралельних гілках інших фаз. Так, при тому ж навантаженні температури других паралельних гілок справних фаз В та С склали $1,18\theta_H$ і $1,01\theta_H$ відповідно. Однак момент опору $0,64M_H$ температури всіх паралельних гілок близькі до номінальних і двигун може працювати тривалий час.

Величини різниці фаз $\Delta\psi$ між лінійними струмами (табл. 4) свідчать, що виникнення несправності викликає також фазну несиметрію лінійних струмів. При цьому характер несиметрії лінійних струмів зберігається із зміною навантаження. Так із зростанням моменту опору від 0 до M_H максимальна зміна кута зсуву фаз між лінійними струмами становить $1,2^\circ$, а максимальне відхилення від нормального кута зсуву фаз 120° становить 17° . Сучасні методи детермінованої та статистичної фазометрії [24, 25] дають змогу вимірювати фазові зсуви сигналів в околі частоти мережевої напруги з похибкою порядку $0,05^\circ$ – $0,1^\circ$, що цілком достатньо для практичного застосування в системах моніторингу робочого стану АД в процесі їх роботи. Таким чином, фазовий зсув лінійних струмів обмоток статора АД є надійною діагностичною ознакою для виявлення обривів обмоток статора.

5. Висновки

В роботі запропоновано математичну модель роботи асинхронного двигуна у вигляді системи рівнянь, достатніх для розрахунку струмів його статора та ротора. На основі розробленої моделі запропоновано методику математичного моделювання асинхронних двигунів при обривах в паралельних гілках фазних обмоток статора.

В результаті проведеного в середовищі MatLab Simulink моделювання встановлено, що обрив паралельної гілки обмотки статора АД супроводжується складним характером несиметрії струмів за величиною та фазою. В цьому випадку можливий режим роботи АД, в якому лінійні струми не перевищують номінальної величини, а в працюючій гілці пошкодженої фазної обмотки статора має місце струмове перевантаження. Таким чином, незважаючи на те, що ДСТУ встановлює жорсткі вимоги до систем захисту двигунів, існуючі засоби захисту можуть бути неефективними стосовно виявлення подібних режимів роботи, що підтверджує необхідність розроблення нових програмних та апаратних засобів захисту і моніторингу роботи АД.

Показано, що виявлення аномального режиму роботи доцільно виконувати шляхом контролю різниці фаз лінійних струмів. Цей діагностичний показник є зручним для використання, оскільки величина несиметрії за фазою є суттєвою у порівнянні із нормальним режимом роботи. Крім того, кут зсуву фаз між струмами фазних обмоток статора АД малочутливий до зміни навантаження електродвигуна, що дає змогу виявляти несправності в широкому діапазоні змін моменту опору на валу двигуна. На цій основі зроблено висновок про можливість використання фазового зсуву лінійних

струмів обмоток статора АД як надійної діагностичної ознаки для виявлення обривів в обмотках і перспективність використання фазового методу в системах моніторингу стану працюючих АД.

Посилання

1. Mamchur D. An analysis on induction motor reliability and lifetime estimation methods. *Przegląd elektrotechniczny*. 2020. Vol. 1. Iss. 12. P. 220—223. <https://doi.org/10.15199/48.2020.12.47>
2. Garcia M., Panagiotou P. A., Antonino-Daviu J. A., Gyftakis K. N. Efficiency Assessment of Induction Motors Operating Under Different Faulty Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66. Iss. 10. P. 8072—8081. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2885719>
3. Payán M. B., Fernandez J. M. R., Ortega J. M. M., Santos J. M. R. Techno-economic optimal power rating of induction motor. *Applied Energy*. 2019. Vol. 240. P. 1031—1048. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.016>
4. de Almeida A. T., Fong J., Falkner H., Bertoldi P. Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 1275—1286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112>
5. Laughton M. A., Say M. G. *Electrical Engineers Reference Book*. Elsevier, 2016. 992 p.
6. Яковлев А.І. Резерви зниження величини збитків при виході з ладу електрообладнання на технологічних агрегатах. *Економіка. Фінанси. Право*. 2016. № 9. С. 4—9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecfipr_2016_9_3 (дата звернення: 18.06.2024).
7. Singh A., Grant B. A review of induction motor fault modeling. *Electric Power Systems Research*. 2016. Vol. 133. P. 191—197. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.017>
8. Husari F., Seshadrinath J., Early Stator Fault Detection and Condition Identification in Induction Motor Using Novel Deep Network. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 3. Iss. 5. P. 809—818. <https://doi.org/10.1109/TAI.2021.3135799>
9. Garcia-Calva T., Morinigo-Sotelo D., Fernandez-Cavero V., Romero-Troncoso R. Early Detection of Faults in Induction Motors—A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 21. <https://doi.org/10.3390/en15217855>
10. de Jesús Rangel-Magdaleno J. Induction Machines Fault Detection: An Overview. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2021. Vol. 24. Iss. 7. P. 63—71. <https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9549228>
11. Ugwiri M. A., Carratù M., Pietrosanto A., Paciello V., Lay-Ekuakille A. Vibrations Measurement and Current Signatures for Fault Detection in Asynchronous Motor. *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (2020, May 25—28, Dubrovnik, Croatia). P. 1—6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC43012.2020.9128433>
12. Yenikieiev O., Zakharenkov D., Gasanov M., Yevsyukova F., Naboka O., Ruzmetov A. Improving the Productivity of Information Technology for Processing Indirect Measurement Data. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE)*. 2022. Vol. 534. P. 80—94. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15944-2_8
13. Марченко Н.Б., Щербак Т.Л. Багаторівневі системи моніторингу стану та діагностики складних технічних об'єктів. *Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць*. Київ: ПІМЕ НАН України, 2019. Вип. 87. С. 77—84. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3612248>
14. Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. 106908. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106908>
15. Bakhri S., Ertugrul N. A Negative Sequence Current Phasor Compensation Technique for the Accurate Detection of Stator Shorted Turn Faults in Induction Motors. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 9. 3100. <https://doi.org/10.3390/en15093100>
16. Molnár D., Blatnický M., Dižo J. Design of the Power of an Electric Lifting Motor for a Single Girder Bridge Crane with a 500 Kg Load Capacity. *Transport Technic and Technology*. 2021. Vol. 17. Iss. 2. P. 23—29. <https://doi.org/10.2478/ttt-2021-0010>
17. Bobojanov M.K., Rismukhamedov D.A., Tuychiev F.N., Shamsutdinov Kh.F. Development of new pole-changing winding for lifting and transport mechanisms. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 365. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336504024>
18. Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A. A comparison of informative value of motor current and power spectra for the tasks of induction motor diagnostics. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014* (2014, September 21—24). P. 540—545. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980549>
19. Sumislawska M., Gyftakis K. N., Kavanagh D. F., McCulloch M. D., Burnham K. J., Howey D. A. The Impact of Thermal Degradation on Properties of Electrical Machine Winding Insulation Material. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. Iss. 4. P. 2951—2960. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2544745>
20. Haniszewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19. Iss. 1. P. 75—86. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17310>
21. ДСТУ EN 60204-32:2018 Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 32. Вимоги до вантажопідіймальних машин (EN 60204-32:2008, IDT; IEC 60204-32:2008, IDT).

22. Стадній О.Ю., Васюра А.С., Дорощенко Г.Д. Аварійні ситуації в роботі асинхронних двигунів, заходи та засоби їх запобігання. *Опτικο-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2019. Вип. 37(1). С. 109—115. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-37-1-109-115>
23. Федоров М.М., Ткаченко А.А. Режимы работы асинхронных двигунів при неисправностях в обмотка статора. *Вибухозахищене електрообладнання*. Збірник праць. УкрНДІВЕ, 2006. С. 320—324.
24. Babak V.P., Babak S.V., Eremenko V.S., Kuts Y.V., Myslovych M.V., Scherbak L.M., Zaporozhets A. Models and Measures in Measurements and Monitoring. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer International Publishing, 2021. Vol. 360. P. 227—266. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
25. Zhong M., Kuts Y., Kochan O., Lysenko Iu., Levchenko O., Vlach-Vyhrynovska H. Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing. *Measurement Science Review*. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 32—43. <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004>

References

1. Mamchur, D. (2020). An analysis on induction motor reliability and lifetime estimation methods. *Przegląd elektrotechniczny*, 1(12), 220—223. <https://doi.org/10.15199/48.2020.12.47>
2. Garcia, M., Panagiotou, P. A., Antonino-Daviu, J. A., & Gyftakis, K. N. (2019). Efficiency Assessment of Induction Motors Operating Under Different Faulty Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(10), 8072—8081. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2885719>
3. Payán, M. B., Fernandez, J. M. R., Ortega, J. M. M., & Santos, J. M. R. (2019). Techno-economic optimal power rating of induction motors, *Applied Energy*, 240, 1031—1048. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.016>
4. de Almeida, A. T., Fong, J., Falkner, H., & Bertoldi, P. (2017). Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1275—1286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112>
5. Laughton, M. A., & Say, M. G. (2016). *Electrical Engineers Reference Book* (992 p.). Elsevier.
6. Yakovlev, A.I. (2016). Reserves for losses decrease in case of technological units' electrical equipment failure. *Economics. Finances. Law*, 9, 4—9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecfipr_2016_9_3 (Last accessed: 18.06.2024) [in Ukrainian].
7. Singh, A., & Grant, B. (2016). A review of induction motor fault modeling. *Electric Power Systems Research*, 133, 191—197. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.017>
8. Husari, F., & Seshadrinath, J. (2021). Early Stator Fault Detection and Condition Identification in Induction Motor Using Novel Deep Network. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 3(5), 809—818. <https://doi.org/10.1109/TAI.2021.3135799>
9. Garcia-Calva, T., Morinigo-Sotelo, D., Fernandez-Cavero, V., & Romero-Troncoso, R. (2022). Early Detection of Faults in Induction Motors—A Review. *Energies*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/en15217855>
10. de Jesús Rangel-Magdaleno, J. (2021). Induction Machines Fault Detection: An Overview. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24(7), 63—71. <https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9549228>
11. Ugwiri, M. A., Carratù, M., Pietrosanto, A., Paciello, V., & Lay-Ekuakille, A. (2020, May 25—28). Vibrations Measurement and Current Signatures for Fault Detection in Asynchronous Motor. *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1—6). Dubrovnik, Croatia. <https://doi.org/10.1109/I2MTC43012.2020.9128433>
12. Yenikieiev, O., Zakharenkov, D., Gasanov, M., Yevsyukova, F., Naboka, O., & Ruzmetov, A. (2022). Improving the Productivity of Information Technology for Processing Indirect Measurement Data. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE)*, 534 (pp. 80—94). https://doi.org/10.1007/978-3-031-15944-2_8
13. Marchenko, N.B., & Shcherbak, T.L. (2019). Multi-level systems for condition monitoring and diagnostics of complex technical objects. *Modeling and Information Technologies: coll. of science works*. Kyiv: G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine, 87, 77—84 [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3612248>
14. Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 106908. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106908>
15. Bakhri, S., & Ertugrul, N. (2022). A Negative Sequence Current Phasor Compensation Technique for the Accurate Detection of Stator Shorted Turn Faults in Induction Motors. *Energies*, 15(9), 3100. <https://doi.org/10.3390/en15093100>
16. Molnár, D., Blatnický, M., & Dižo, J. (2021). Design of the Power of an Electric Lifting Motor for a Single Girder Bridge Crane with a 500 Kg Load Capacity. *Transport Technic and Technology*, 17(2), 23—29. <https://doi.org/10.2478/ttt-2021-0010>
17. Bobojanov, M.K., Rismukhamedov, D.A., Tuychiev, F.N., & Shamsutdinov, Kh. F. (2023). Development of new pole-changing winding for lifting and transport mechanisms. *E3S Web of Conferences*, 365. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336504024>

18. Zagirnyak, M., Mamchur, D., & Kalinov, A. (2014, September 21–24). A comparison of informative value of motor current and power spectra for the tasks of induction motor diagnostics. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014* (pp. 540–545).
19. Sumislawska, M., Gyftakis, K. N., Kavanagh, D. F., McCulloch, M. D., Burnham, K. J., & Howey, D. A. (2016). The Impact of Thermal Degradation on Properties of Electrical Machine Winding Insulation Material. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 2951–2960. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2544745>
20. Haniszewski, T. (2017). Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. *Journal of Vibroengineering*, 19(1), 75–86. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17310>
21. DSTU EN 60204-32:2018 Machine safety. Electrical equipment of machines. Part 32. Requirements for lifting machines (EN 60204-32:2008, IDT; IEC 60204-32:2008, IDT).
22. Stadniy, O.Yu., Vasyura, A.S., & Doroshchenkov, G.D. (2019). Emergency situations in the operation of asynchronous motors, measures and means of their prevention, *Optoelectronic information-power technologies*, 37(1), 109–115 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-37-1-109-115>
23. Fedorov, M.M., & Tkachenko, A.A. (2006). Operation modes of induction motors with faults in the stator winding. - *Explosion-proof electrical equipment*. Collection of works (pp. 320–324). UkrNDIVE.
24. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Y.V., Myslovych, M.V., Scherbak, L.M., & Zaporozhets, A. (2021). Models and Measures in Measurements and Monitoring. *Studies in Systems, Decision and Control*, 360 (p. 227–266). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
25. Zhong, M., Kuts, Y., Kochan, O., Lysenko, Iu., Levchenko, O., & Vlach-Vyhrynovska, H. (2022). Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing. *Measurement Science Review*, 22(1), 32–43. <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004>

PHASE METHOD OF DETECTING BREAKS IN STATOR WINDINGS OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Olexander Yenikieiev¹, Dr. Sci. (Engin.), <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>

Yurii Kuts^{2,3}, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>

Andrii Tkachenko^{1*}, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0009-0005-0752-0900>

Leonid Sherbak³, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1536-4806>

¹European University, 16-b, Academician Vernadsky Blv., Kyiv, 03115, Ukraine;

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteyskyi Prosp., Kyiv, 03056, Ukraine;

³General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: tkachenko.aat@gmail.com

Abstract. *The paper considers the specific features of the technical operation of asynchronous motors in hoisting machines and typical damages to stator windings. It is established that one promising approach to motor protection is the use of computer monitoring systems. These systems' algorithmic and application software includes measuring and controlling stator winding currents. A method for calculating the operating modes of asynchronous motors with a break in one of the parallel branches of the stator phase winding is developed. Based on the derived equations, a computer simulation scheme was compiled using the graph method in the MatLab software environment with the Simulink extension to calculate the symmetric and asymmetric operating modes of an asynchronous motor, considering the current distribution in the parallel branches of the phase windings, and the results of theoretical studies are experimentally confirmed. As a result, graphs are provided to show the relationship between the steady-state temperatures of the stator windings' frontal sections and the values of the phase currents. It is shown that current overload of the operating branch of the damaged phase winding can occur even at the nominal linear current. At the same time, in the operating parallel branch of the phase winding with a break, there is a significant thermal overload, which leads to rapid degradation of the winding insulation materials and the development of a malfunction to a more serious one. A characteristic feature of the operating mode of an asynchronous motor with a break in the parallel branch of the stator phase winding is that at a reduced load, the motor can operate for an extended period without overheating. It is demonstrated that the nature of the asymmetry of linear currents by phase can be used as a diagnostic indicator.*

Keywords: asynchronous motor, lifting machine, stator winding, break of parallel branch, protection, current overload, diagnostics.

Надійшла до редколегії: 03.06.2024