



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 163792

(13) U

(51) МПК

H02H 7/08 (2006.01)

H02H 7/085 (2006.01)

G01R 31/08 (2020.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2026 01318	(72) Винахідник(и): Кривоносов Валерій Єгорович (UA), Антипов Євген Олексійович (UA), Кривоносов Валерій Валерієвич (UA), Прокопенко Сергій Олександрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 10.03.2026	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 30.07.2026	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 29.07.2026, Бюл.№ 30	(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041 (UA)
	(74) Представник: Пшенична Тетяна Володимирівна

(54) СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ВИТКОВОГО ЗАМИКАННЯ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРОДВИГУНА, ПРАЦЮЮЧОГО В УМОВАХ ВИПАДКОВИХ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ ТА НАВАНТАЖЕНЬ НА ВАЛУ**(57) Реферат:**

Спосіб виявлення виткового замикання в обмотках електродвигуна, працюючого в умовах випадкових змін параметрів мережі живлення та навантажень на валу, включає вимірювання лінійних напруг і фазних струмів, вимірювання частоти мережі, обертів електродвигуна, активної складової опору обмотки статора, проведення дослідів холостого ходу і короткого замикання, за отриманими результатами визначення величин елементів схеми заміщення справного електродвигуна, за результатами вимірювань лінійних напруг, частоти мережі та обертів електродвигуна коригують величини елементів схеми заміщення. Додатково визначають ділянки стаціонарності для трифазної системи живлення за умов:

$M(I_a)=\text{const}, M(I_b)=\text{const}, M(I_c)=\text{const}, M(U_a)=\text{const},$
 $(U_b)=\text{const}, M(U_c)=\text{const}, M(f)=\text{const}, M(n)=\text{const}, (1)$

де $M(I_a), M(I_b), M(I_c)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень фазних струмів електродвигуна на ділянки стаціонарності,

$M(U_a), (U_b), M(U_c)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень фазних напруг, мережі живлення

$M(f)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень значень частоти мережі живлення на ділянки стаціонарності,

$M(n)$ - математичне сподівання вимірюваних обертів вала електродвигуна,

розраховують величини модулів комплексних значень фазних струмів на визначених ділянках стаціонарності за виразом:

$$|I_{\text{rec } a}| = \frac{|M(U_{\text{meas } a})|}{|Z_{\text{rec}}|}, |I_{\text{rec } b}| = \frac{|M(U_{\text{meas } b})|}{|Z_{\text{rec}}|}, |I_{\text{rec } c}| = \frac{|M(U_{\text{meas } c})|}{|Z_{\text{rec}}|}, (2)$$

$|Z_{\text{rec}}|$ - модуль комплексного опору фазної обмотки, який розраховують за виразом:

UA 163792 U

$$Z_{\text{rec}} = (r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (3)$$

r_1, x_1 - активний та індуктивний опори розсіювання статорної обмотки електродвигуна;

r_2', x_2' - приведені до статорної обмотки активний та індуктивний опори розсіювання роторної обмотки електродвигуна;

r_μ, x_μ - активний та індуктивний опори намагнічуючого контуру електродвигуна,

s - ковзання, яке на ділянці стаціонарності розраховують виразом:

$$s = \frac{60 \cdot M(f) \cdot \frac{1}{2p} - M(n)}{60 \cdot M(f)}, \quad (4)$$

де - $2p$ -кількість пар полюсів електродвигуна.

Порівнюють розрахункові модулі комплексних значень фазних струмів математичними сподіваннями вимірюваних діючих значень фазних струмів ділянки стаціонарності, а за їх різницею визначають початковий момент появи виткового замикання в обмотці статора електродвигуна.

Корисна модель належить до електротехніки, а саме до систем захисту електродвигунів, що працюють з напругою до 1000 В на змінному струмі в умовах випадкових змінюваної несиметрії, відхилень напруги живлення, частоти та навантаження на валу електродвигуна. Корисна модель призначена для виявлення виткових замикань у статорних обмотках асинхронного електродвигуна під час роботи.

Понад 80 % загальної кількості електрообладнання електроприводів електротехнічних комплексів промислових та агропромислових підприємств складають асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором (О.В. Токарев Д.О. Борягін, О.Т. Шеремет Аналіз причин пошкодження асинхронних двигунів. Науковий вісник ДДМА № 1 (25Е), 2018. С. 39-49). Умови їх роботи пов'язані з неякісною напругою мережі живлення, підвищеною запиленістю, вологістю та кислотністю навколишнього середовища, технологічними та випадковими струмовими перевантаженнями, що є наслідком зниження властивостей ізоляції та непередбачених аварійних ситуацій (Bento F., Adouni A., Muxiri A. C., Fonseca D. S., Marques Cardoso A. J. On the risk of failure to prevent induction motors permanent damage, due to the short available time-to-diagnosis of inter-turn short-circuit faults. IET Electrical Power Applications. 2021. Vol. 15. No. 1. pp. 51-62. URL: <https://doi.org/10.1049/elp2.12008>). Щорічно до 80 % аварійного виходу АД з ладу припадає на пошкодження ізоляції, зокрема корпусної - до 20-25 %, та міжвиткової, на частку якої припадає до 80 %. Своєчасне виявлення критичного стану і прогнозування розвитку аварійної ситуації ізоляції обмоток АД є головним напрямком підвищення економічної ефективності електротехнічних комплексів.

Відомий "Спосіб захисту асинхронного електродвигуна від виткових замикань" патент UA № 105420 H02H 7/08, G01R 31/00, G01R 31/06, опублікований 12.05.2014, Промислова власність, бюлетень № 9. За яким одночасно вимірюють амплітуди першої гармоніки струму і амплітуди резонансних гармонік. Як тільки виміряні величини відрізняються від заданих значень, формується сигнал на відключення електродвигуна від мережі. Виявлення виткового замикання в даному способі здійснюється за рахунок появи нелінійного елемента (перехідного опору в точці замикання). Як відомо ("Оцінка впливу несиметрії напруги системи живлення на режими роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором". Суворов І.Ф., Дейс Д.А., Романова В.В., Хромов С.В. Сучасні технології. Системний аналіз. Моделювання № 3 (51), 2016. С 222-227) відхилення та провали напруг мережі живлення призводять до відхилень амплітуд першої та вищих гармонійних складових струмів, тому контролювання амплітуди складових струмів без урахування відхилень напруги мережі живлення не дозволяє виявляти початковий момент виткового замикання. Наявність несинусоїдальної напруги мережі живлення викликає появу вищих гармонійних складових у фазних струмах АД, що викликає посилення або ослаблення вищих гармонійних складових у струмах, викликаних витковим замиканням. Зміна гармонійного складу струмів за рахунок ослаблення з'єднання струмоведучих частин електричного кола, перехідного опору контактів пускача або болтових струмоведучих з'єднань, також призводить до появи вищих гармонійних складових у фазних струмах АД, що може бути ідентифіковано як виткове замикання та призвести до помилкового відключення електродвигуна від мережі. Зміна навантаження електродвигуна, зумовлена вимогами технологічного процесу, також змінює рівні амплітуд гармонійних складових струмів. Несиметрія живлячих напруг призводить до різних значень рівнів гармонійних складових фазних струмів АД. З опису способу не видно, з якого мінімального або максимального значення амплітуди гармонійної складової слід робити висновок про виткове замикання в обмотці статора АД. Для коректного виявлення виткового замикання в даному способі необхідно знизити чутливість пристрою, що реалізує відомий спосіб, за рахунок розширення зони довірчого інтервалу контрольованих значень амплітуд гармонійних складових. Таким чином, даний спосіб не дозволяє однозначно виявити початковий момент появи виткового замикання в статорних обмотках АД, що отримує живлення від мережі зі змінними показниками якості електроенергії.

Відомий спосіб реалізований у "Пристрої контролю та захисту електродвигуна від неповнофазних режимів і виткових замикань" А. с. SU 1584028, H02H 7/00, H02H 7/08, опублікований 07.08.1990 р., бюлетень № 29. У якому вимірюють лінійні напруги мережі живлення і фазні струми АД, визначають величини коефіцієнтів несиметрії напруги та струму, а також вимірюють температуру статора двигуна. За максимальним значенням коефіцієнта несиметрії напруги судять про неповнофазні режими мережі живлення, а за максимальним значенням коефіцієнта несиметрії струму судять про обрив кола струму. За різницею значень величин коефіцієнтів несиметрії струму та напруги і за підвищеною температурою обмотки статора АД судять про виткове замикання.

Недоліком даного способу є низька чутливість - це обумовлено неможливістю встановити однозначну залежність між коефіцієнтами несиметрії напруги і фазних струмів АД. Коефіцієнт

несиметрії напруги не змінює свого значення при чергуванні однакових за величиною відхилень напруги в фазах, а значення коефіцієнта несиметрії струмів можуть приймати будь-які значення, оскільки величини фазних струмів залежать від того, в якій обмотці статора відбулося виткове замикання та від рівня напруги в цій фазі. Неоднозначне визначення величини

коефіцієнта несиметрії фазних струмів за однієї і тієї ж величини коефіцієнта несиметрії напруги не дозволяє виявити виткове замикання в обмотці статора на ранній стадії.

У даному способі неможливо виявити роботу електродвигуна при провалах напруги мережі живлення. Тривала робота АД в умовах провалу напруги призведе до теплового перевантаження АД, а використання критерію "максимального значення" величин коефіцієнтів

несиметрії напруги та струмів як фактора неповнофазного режиму мережі живлення або струмових ланцюгів призводить до помилкового виявлення виткового замикання та до несанкціонованого відключення електродвигуна від мережі.

Найбільш близьким є спосіб діагностики початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна, описаний у патенті № 124403, Україна, С2, МПК (2021.01); заявл. а201912168 від 02.12.2019; опубл. 08.09.2021, бюлетень № 36, у якому проводять вимір лінійних напруг і фазних струмів, вимірюють частоту мережі, частоту обертання електродвигуна, активну складову опору обмотки статора, проводять досліді холостого ходу і короткого замикання, за отриманими результатами визначають величини елементів схеми заміщення справного електродвигуна, за результатами вимірювань лінійних напруг, частоти мережі і частоти обертання електродвигуна коригують величини елементів схеми заміщення та розраховують величини фазних струмів, порівнюють отримані значення з виміряними величинами фазних струмів, а за їх різницею визначають початковий момент появи виткового замикання в обмотці статора електродвигуна.

Недоліком даного способу є зниження достовірності при випадкових змінах несиметрії та відхилень напруги мережі живлення разом зі змінною навантаженням на валу електродвигуна - це обумовлено тим, що при зміні рівня напруги мережі живлення як в одній, так і у двох та трьох фазах, фазні струми змінюються немиттєво через інерційність ротора електродвигуна. Крім того, зміна навантаження, обумовлена технологічним процесом, є наслідком перехідного процесу до встановлення сталих значень струмів, напруг та частоти мережі живлення. В відомому способі виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання здійснюється за миттєвими показниками напруг, фазних струмів, частоти та обертів електродвигуна. На ділянках перехідних процесів напруги мережі живлення, фазних струмів, частоти та обертів вала електродвигуна виникає помилка виявлення початкового моменту виткового замикання у статорній обмотці електродвигуна, що знижує достовірність відомого способу. Збільшення меж, у яких проводять порівняння величин вимірянних і розрахункових значень фазних струмів, призводить до зниження чутливості.

В основу корисної моделі поставлена задача розробити спосіб виявлення виткового замикання в обмотках електродвигуна, працюючого в умовах випадкових змін параметрів мережі живлення та навантаження на валу, у якому введення нових операцій дозволить підвищити достовірність виявлення початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна, що працюють в умовах наявності перехідних динамічно змінюваних відхилень, несиметрії і частоти напруги мережі живлення та навантаження на валу електродвигуна, тим самим забезпечивши достовірність своєчасного виявлення початку виникнення виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна.

Поставлена задача вирішується у способі виявлення виткового замикання в обмотках електродвигуна, працюючого в умовах випадкових змін параметрів мережі живлення та навантаження на валу, який включає вимірювання лінійних напруг і фазних струмів, вимірювання частоти мережі, обертів електродвигуна, активної складової опору обмотки статора, проведення дослідів холостого ходу і короткого замикання, за отриманими результатами визначення величин елементів схеми заміщення справного електродвигуна, за результатами вимірювань лінійних напруг, частоти мережі та обертів електродвигуна коригують величини елементів схеми заміщення, згідно з корисною моделлю, додатково визначають ділянки стаціонарності для трифазної системи живлення за умов:

$$M(I_a) = \text{const}, M(I_b) = \text{const}, M(I_c) = \text{const}, M(U_a) = \text{const}, \\ (U_b) = \text{const}, M(U_c) = \text{const}, M(f) = \text{const}, M(n) = \text{const}, (1)$$

де $M(I_a)$, $M(I_b)$, $M(I_c)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень фазних струмів електродвигуна на ділянки стаціонарності,

$M(U_a)$, (U_b) , $M(U_c)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень фазних напруг, мережі живлення

$M(f)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень частоти мережі живлення на ділянці стаціонарності,

$M(n)$ - математичне сподівання вимірюваних обертів вала електродвигуна, розраховують величини модулів комплексних значень фазних струмів на визначених ділянках стаціонарності за виразом:

$$|I_{rec\ a}| = \frac{|M(U_{meas\ a})|}{|Z_{rec}|}, |I_{rec\ b}| = \frac{|M(U_{meas\ b})|}{|Z_{rec}|}, |I_{rec\ c}| = \frac{|M(U_{meas\ c})|}{|Z_{rec}|}, \quad (2)$$

$|Z_{rec}|$ - модуль комплексного опору фазної обмотки, який розраховують по виразу:

$$Z_{rec} = (r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (3)$$

r_1, x_1 - активний та індуктивний опори розсіювання статорної обмотки електродвигуна;

r_2', x_2' - приведені до статорної обмотки активний та індуктивний опори розсіювання роторної обмотки електродвигуна;

r_μ, x_μ - активний та індуктивний опори намагнічуючого контуру електродвигуна,

s - ковзання, яке на ділянці стаціонарності розраховують виразом:

$$s = \frac{60 \cdot M(f) \cdot \frac{1}{2p} - M(n)}{60 \cdot M(f)}, \quad (4)$$

де $2P$ - кількість пар полюсів електродвигуна, порівнюють розрахункові модулі комплексних значень фазних струмів з математичними сподіваннями вимірюваних діючих значень фазних струмів ділянки стаціонарності, а за їх різницею визначають початковий момент появи виткового замикання в обмотці статора електродвигуна.

На Фіг. 1 представлено фотографію експериментально отриманої осцилограми добового графіку (з 17 по 24 години) зміни фазних напруг мережі живлення електродвигуна,

На Фіг. 2 представлено фотографію експериментально отриманої осцилограми добового графіку (з 17 по 24 години) зміни фазних струмів електродвигуна,

На Фуг. 3 представлено фотографію експериментально отриманої осцилограми добового графіку (з 17 по 24 години) зміни частоти мережі живлення та коефіцієнта несиметрії напруги мережі

На Фіг. 4 наведено однолінійну електричну схему випробувального стенда з електродвигуном, у якому в обмотці фази А виконані відгалуження витків $\Delta W_1=8\%$, $\Delta W_2=14\%$, $\Delta W_3=27\%$, позначено: PM1 - дослідний зразок приладу, що аналізує показники якості електричної енергії, збирає, та передає в ПО вищого рівня дані вимірювань фазних напруг, струмів, обчислень та виявлених подій (далі аналізатор якості електроенергії).

QF1 - ввідний автоматичний вимикач.

ЛАТР1-ЛАТР3 - автотрансформатори для зміни фазних напруг в межах від $0,6U_n$ до $1,4U_n$.

QF2 - автоматичний вимикач живлення аналізатора якості електроенергії.

PS1 - джерело (перетворювач) живлення 220VAC/24VDC, що використовується для живлення аналізатора якості електричної енергії та допоміжних ланцюгів управління стенда.

QF3 - автоматичний вимикач живлення ланцюгів навантаження.

QF4 - автоматичний вимикач підключення випрямляча напруги по схемі "подвійної зірки Ларіонова".

QF5 - автоматичний вимикач підключення трифазної батареї конденсаторів (компенсація реактивної потужності/фільтрація).

R1, R2, R3, R4, R5, R6 - статичні опори, що формують дільник напруги для вимірювання фазних напруг досліджуваної трифазної системи.

C1, C2, C3 - конденсатори, призначені для фільтрації вимірюваних миттєвих значень напруги досліджуваної трифазної системи.

VS1, VS2, VS3, VS4, VS5, VS6 - силові тиристори, що формують 2 моста випрямляча напруги за схемою "подвійної зірки Ларіонова".

R7 - змінний опір (реостат), що використовується як навантаження випрямляча напруги за схемою "подвійної зірки Ларіонова".

R11, R15, R19, R23, C4, C5, C6, C7 - статичні опори та конденсатори RC-фільтрів в ланцюгах вимірювання фазних струмів досліджуваного навантаження

R9, R10, R13, R14, R17, R18, R21, R22 - статичні опори, що формують дільник напруги для вимірювання фазних струмів досліджуваної трифазного навантаження.

5 R8, R12, R16, R20 - статичні опори - шунти, для вимірювання фазних струмів досліджуваної трифазного навантаження.

TA1, TA2, TA3, TA4 - трансформатори струму, для вимірювання струмів досліджуваного навантаження в фазі A, B, C та N, відповідно.

10 C8, C9, C10 - конденсатори, що формують трифазну батарею для компенсації реактивної потужності/фільтрації.

M, G - трифазний асинхронний двигун та, з'єднаний з ним, однофазний генератор, що використовуються як досліджуване навантаження.

R24 - змінний опір (реостат), що використовується як навантаження однофазного генератора.

15 На Фіг. 5 представлено фотографію графіка зміни фазного струму фази A для замкнутих витків на ділянках стаціонарності при фазних відхиленнях напруги.

Експериментально отриманої осцилограми, Фіг. 1, Фіг. 2, та Фіг. 3, зміни рівнем напруг мережі живлення частоти та фазних струмів демонструють, що сталі режими в енергосистемі є ідеалізованими з великими припущеннями, так як параметри мережі живлення та 20 електродвигуна динамічно змінюються в часі. За таких умов, застосування способу, виявлення виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна за миттєвими значеннями функціональних параметрів мережі живлення та електродвигуна, може привести до недостовірних дій системи захисту та вимкнення електродвигуна не правомірним, а зниження чутливості, при детермінових змінах фазних струмів, робить цей спосіб непридатним до 25 використання. Таким чином підвищення достовірності виявлення виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна можливо лише при виявленні ділянок стаціонарності та застосування статистичних показників (математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення), як функціональних параметрів електродвигуна, так і показників мережі живлення. Спосіб здійснюється таким чином.

30 1. На непрацюючому АД вимірюють активний опір п статорних обмоток електродвигуна, наприклад, за допомогою міліомметра МИКО-9А, що дозволяє проводити вимірювання активного опору в індуктивних і без індуктивних ланцюгах в діапазоні 10 мкОм ÷ 300 Ом.

Проводячи досліди холостого ходу та короткого замикання, визначають параметри схеми заміщення.

35 Використовуючи дані дослідів короткого замикання, розраховують повний опір електродвигуна:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}, (3)$$

де U_k - напруга короткого замикання, I_k - струм в досліді короткого замикання. Визначається активний опір електродвигуна як;

40
$$r_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2}, (4)$$

де P_k - активна потужність електродвигуна в досліді короткого замикання.

Індуктивний опір електродвигуна:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}, (5)$$

Приведений опір ротора електродвигуна:

45
$$r_2' = r_k - r_1, (6)$$

За даними випробування холостого ходу визначають повний опір електродвигуна:

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x}, (7)$$

де U_x - напруга холостого ходу, I_x - струм в досліді холостого ходу.

Активний опір електродвигуна:

50
$$r_x = \frac{P_x}{3 \cdot I_x^2}, (8)$$

де P_x - потужність в досліді холостого ходу.

Індуктивний опір електродвигуна:

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - r_x^2}, (9)$$

Активний опір намагнічує контуру:

$$r_{\mu,} = r_x - r_1, (10)$$

Індуктивний опір обмотки статора: $x_1 = 0.48 \cdot X_k$.

Індуктивний опір ротора, приведений до статора: $x_2' = X_k - x_1$.

5 Індуктивний опір намагнічувального контуру; $x_{\mu,} = X_k - x_1$.

2. Визначають ділянки стаціонарності зміни струму, напруги та частоти, на відповідних ділянках часу за виразами:

$$M(I_a) = \text{const}, M(I_b) = \text{const}, M(I_c) = \text{const}, M(U_a) = \text{const}, \\ (U_b) = \text{const}, M(U_c) = \text{const}, M(f) = \text{const}, M(n) = \text{const}. (1)$$

10 де $M(I_a)$, $M(I_b)$, $M(I_c)$ - математичне сподівання вимірюваних фазних струмів ділянки стаціонарності,

$M(U_a)$, (U_b) , $M(U_c)$ - математичне сподівання вимірюваних фазних напруг,

$M(f)$ - математичне сподівання вимірюваних значень частоти мережі живлення ділянки стаціонарності,

15 $M(n)$ - математичне сподівання вимірюваних обертів вала електродвигуна ділянки стаціонарності.

Математичне сподівання для аналогової функції при перетворенні у дискретні цифрові значення, на прикладі фазного струму, знайдемо за виразом:

$$M(I) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |I_i|$$

20 де N-кількість значень вибірки генеральної сукупності випадкових величин. Ураховуємо що кожний вимірюваний параметр має випадкову дисперсію з усіх незміщених і спроможних оцінок, то кількість значень n - кількість числа вибірки, згідно з розподілом випадкової величини Ст'юдента приймаємо n - 30.

25 При безперервному контролю випадкових функціональних величин параметрів мережі живлення та електродвигуна, для визначення ділянки стаціонарності, покроково виключаємо перше вимірюване значення та додаємо наступне вимірюване значення.

Розраховуємо математичне сподівання контрольованих параметрів мережі живлення та електродвигуна.

30 При виконанні умов (1) визначаємо ділянку стаціонарності, на якій проводимо виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання в статорній обмотки електродвигуна.

3. У робочому режимі вимірюють математичне сподівання частоти мережі - $M(f)$, та, $M(n)$ обороти вала електродвигуна, наприклад, тахометром ДО-03-02 - оптичним тахометром з цифровим виходом. Визначають величину ковзання s за виразом:

$$S = \frac{60 \cdot M(f) \cdot \frac{1}{2p} - M(n)}{60 \cdot M(f)}, (4)$$

35 де - 2P - кількість пар полюсів електродвигуна,

За отриманого значення ковзання корегують параметри схеми заміщення для ділянки стаціонарності.

4. Розраховуємо величини модулів фазних струмів за діючими значеннями на визначених ділянках стаціонарності за виразом:

$$40 \quad |I_{\text{rec } a}| = \frac{|M(U_{\text{meas } a})|}{|Z_{\text{rec}}|}, |I_{\text{rec } b}| = \frac{|M(U_{\text{meas } b})|}{|Z_{\text{rec}}|}, |I_{\text{rec } c}| = \frac{|M(U_{\text{meas } c})|}{|Z_{\text{rec}}|},$$

5. Порівнюють розрахункові значення модулів фазних струмів з значенням математичного сподівання вимірюваних діючих значень величинами фазних струмів.

Виконання рівностей:

$$|I_{\text{rec } a}| = M(I_a) \pm \delta; |I_{\text{rec } b}| = M(I_b) \pm \delta; |I_{\text{rec } c}| = M(I_c) \pm \delta,$$

45 для вимірюваних і розрахункових значень фазних струмів, у межах визначеної похибки - δ , є критерієм нормальної роботи електродвигуна. Похибки - δ , є середньоквадратичне відхилення випадкової функції.

Виконання нерівностей:

$$|I_{\text{rec } a}| \neq M(I_a) \pm \delta; |I_{\text{rec } b}| \neq M(I_b) \pm \delta; |I_{\text{rec } c}| \neq M(I_c) \pm \delta,$$

50 є критерієм виявлення початкового моменту виткового замикання.

Приклад виконання апробації способу.

Дослідження проведені на стенді (фіг. 3) для асинхронного електродвигуна типу 4A80A2УЗ: потужність 1,5 кВт, напруга 380 В, номінальний струм 3,31 А, коефіцієнт потужності 0,85, ККД 0,81, номінальне ковзання 0,04, а також параметри схеми заміщення, визначені на підставі даних вимірювань активного опору обмотки статора АД, дослідів холостого ходу і короткого

замикання: $r_1 = 4,1 \text{ Ом}$, $x_1 = 4,3 \text{ Ом}$, $r_2' = 3,67 \text{ Ом}$, $x_2' = 4,52$, $r_0 = 4,11 \text{ Ом}$, $x_0 = 123,15 \text{ Ом}$.

На працюючому електродвигуні при навантаженні 83 % визначили математичне сподівання $M(n) = 1486,4 \text{ об/хвилину}$.

Для осцилограм, фіг. 1 та фіг. 2, та фіг. 3, ділянки, наприклад від 2 часу вимірювання до 22 часу, з дискретизацією 1 хвилина знаходять математичні сподівання. Дані розрахунків

Таблиця

Дані розрахунків математичних сподівань параметрів мережі живлення та електродвигуна.

Ділянка Час, хвилини	1 20.00-20.15	2 20.15-20.30	3 20.30-20.45	4 20.45-21.00	5 21.00-21.15	6 21.30-21.45	7 21.45-22.00
$M(U_a), \text{В}$	236,35	233,9	232,1	232,1	231,1	231,1	231,1
$M(U_b), \text{В}$	236,45	234,2	232,4	232,4	232,4	232,4	232,4
$M(U_c), \text{В}$	236,8	234,9	232,9	231,9	231,0	231,9	231,0
$M(I_a), \text{А}$	249,0	250,2	2502,4	253,8	240,0	240,1	249,1
$M(I_b), \text{А}$	250,5	250,9	253,5	257,1	250,5	250,5	250,5
$M(I_c), \text{А}$	250,4	250,5	254,4	254,5	246,3	254,4	254,4
$M(f), \text{Гц}$	49,91	49,93	49,92	49,94	49,89	49,96	49,95

На ділянках 5-7 математичні сподівання напруг та фазних струмів електродвигуна є незмінними, ці ділянки є ділянками стаціонарності. Розраховуємо ковзання:

$$S = \frac{60 \cdot M(f) \cdot \frac{1}{2p} - M(n)}{60 \cdot M(f)} = \frac{60 \cdot 49,96 \cdot \frac{1}{2} - 1486,4}{60 \cdot 49,96} = 0,0083$$

Корегують параметри схеми заміщення електродвигуна та визначають розрахункові фазні струми.

На фіг. 4, показані результати дослідження зміни фазного струму фази А для замкнутих витків на ділянках стаціонарності при фазних відхиленнях напруги.

Розроблений спосіб виявлення виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна, що працює при нестационарних режимах напруги та навантаження, у якому безперервно здійснюється моніторинг рівнів напруг, фазних струмів, частоти мережі та частоти обертання електродвигуна, визначаються ділянки стаціонарності зміни фазних струмів, напруг і частоти мережі живлення, у яких своєчасно виявляється виткове замикання в статорних обмотках електродвигуна, є запорукою запобігання аварійним ситуаціям в електротехнічному комплексі.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб виявлення виткового замикання в обмотках електродвигуна, працюючого в умовах випадкових змін параметрів мережі живлення та навантажень на валу, який включає вимірювання лінійних напруг і фазних струмів, вимірювання частоти мережі, обертів електродвигуна, активної складової опору обмотки статора, проведення дослідів холостого ходу і короткого замикання, за отриманими результатами визначення величин елементів схеми заміщення справного електродвигуна, за результатами вимірювань лінійних напруг, частоти мережі та обертів електродвигуна коригують величини елементів схеми заміщення, який **відрізняється** тим, що додатково визначають ділянки стаціонарності для трифазної системи живлення за умов:

$M(I_a) = \text{const}$, $M(I_b) = \text{const}$, $M(I_c) = \text{const}$, $M(U_a) = \text{const}$,
 $(U_b) = \text{const}$, $M(U_c) = \text{const}$, $M(f) = \text{const}$, $M(n) = \text{const}$, (1)

де $M(I_a)$, $M(I_b)$, $M(I_c)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень фазних струмів електродвигуна на ділянки стаціонарності,

$M(U_a)$, (U_b) , $M(U_c)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень фазних напруг, мережі живлення,

$M(f)$ - математичне сподівання вимірюваних діючих значень частоти мережі живлення на ділянці стаціонарності,

$M(n)$ - математичне сподівання вимірюваних обертів вала електродвигуна,

розраховують величини модулів комплексних значень фазних струмів на визначених ділянках стаціонарності за виразом:

$$|I_{rec\ a}| = \frac{|M(U_{meas\ a})|}{|Z_{rec}|}, |I_{rec\ b}| = \frac{|M(U_{meas\ b})|}{|Z_{rec}|}, |I_{rec\ c}| = \frac{|M(U_{meas\ c})|}{|Z_{rec}|}, \quad (2)$$

$|Z_{rec}|$ - модуль комплексного опору фазної обмотки, який розраховують за виразом:

$$Z_{rec} = (r_1 + jx_1) + \left(\frac{r_2}{s} + jx_2 \right) \cdot (r_\mu + jx_\mu), \quad (3)$$

r_1, x_1 - активний та індуктивний опори розсіювання статорної обмотки електродвигуна;

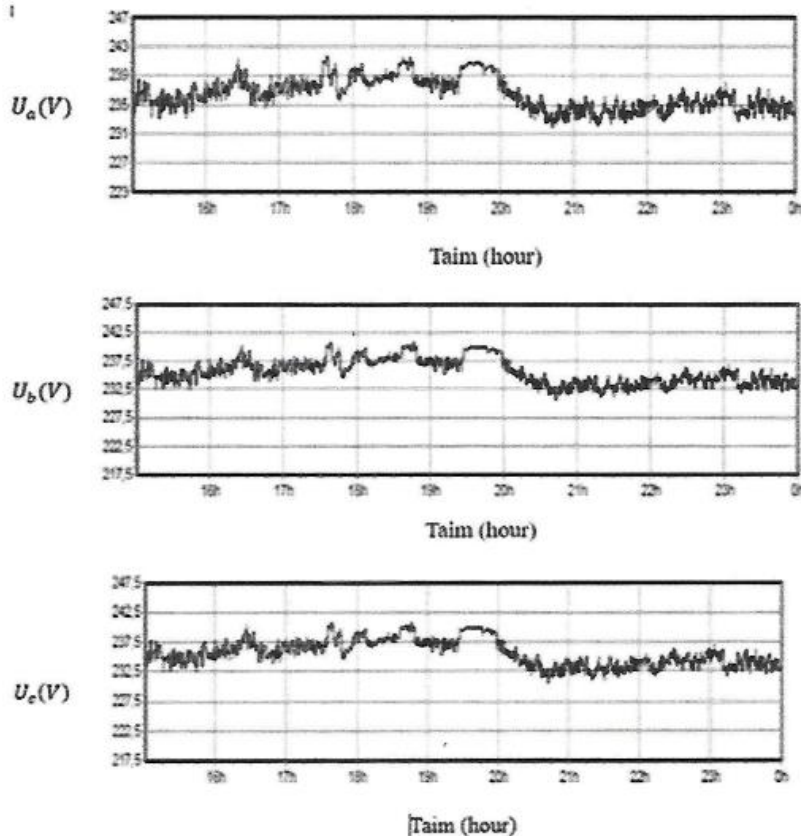
10 r_2', x_2' - приведені до статорної обмотки активний та індуктивний опори розсіювання роторної обмотки електродвигуна;

r_μ, x_μ - активний та індуктивний опори намагнічуючого контуру електродвигуна,

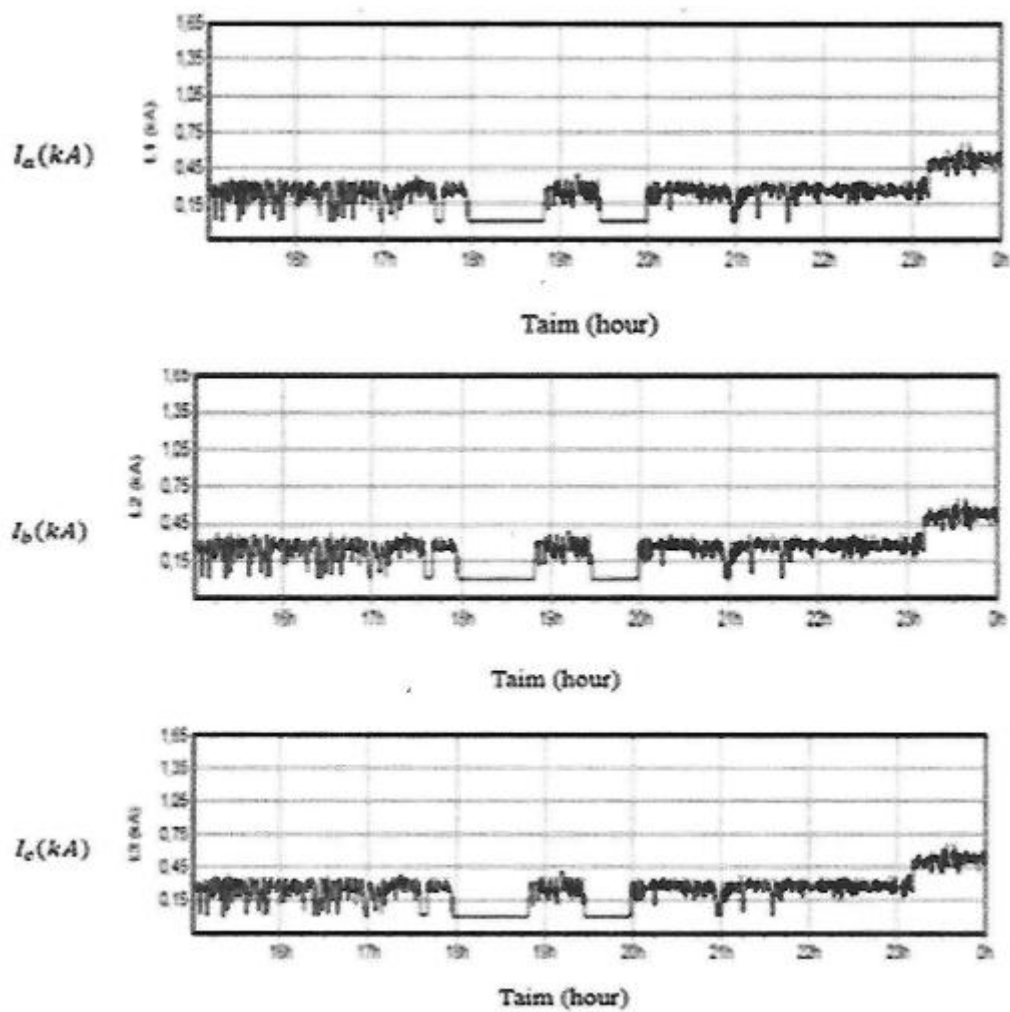
s - ковзання, яке на ділянці стаціонарності розраховують виразом:

$$s = \frac{60 \cdot M(f) \cdot \frac{1}{2p} - M(n)}{60 \cdot M(f)}, \quad (4)$$

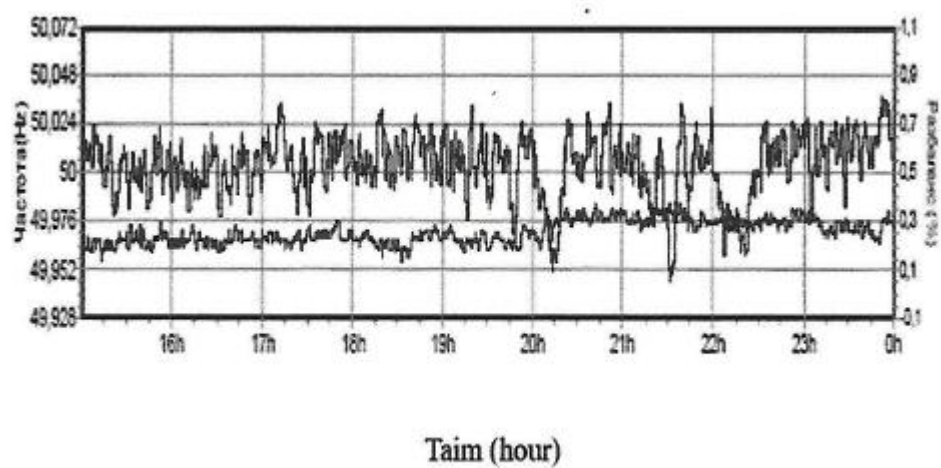
15 де $2P$ - кількість пар полюсів електродвигуна, порівнюють розрахункові модулі комплексних значень фазних струмів математичними сподіваннями вимірюваних діючих значень фазних струмів ділянки стаціонарності, а за їх різницею визначають початковий момент появи виткового замикання в обмотці статора електродвигуна.



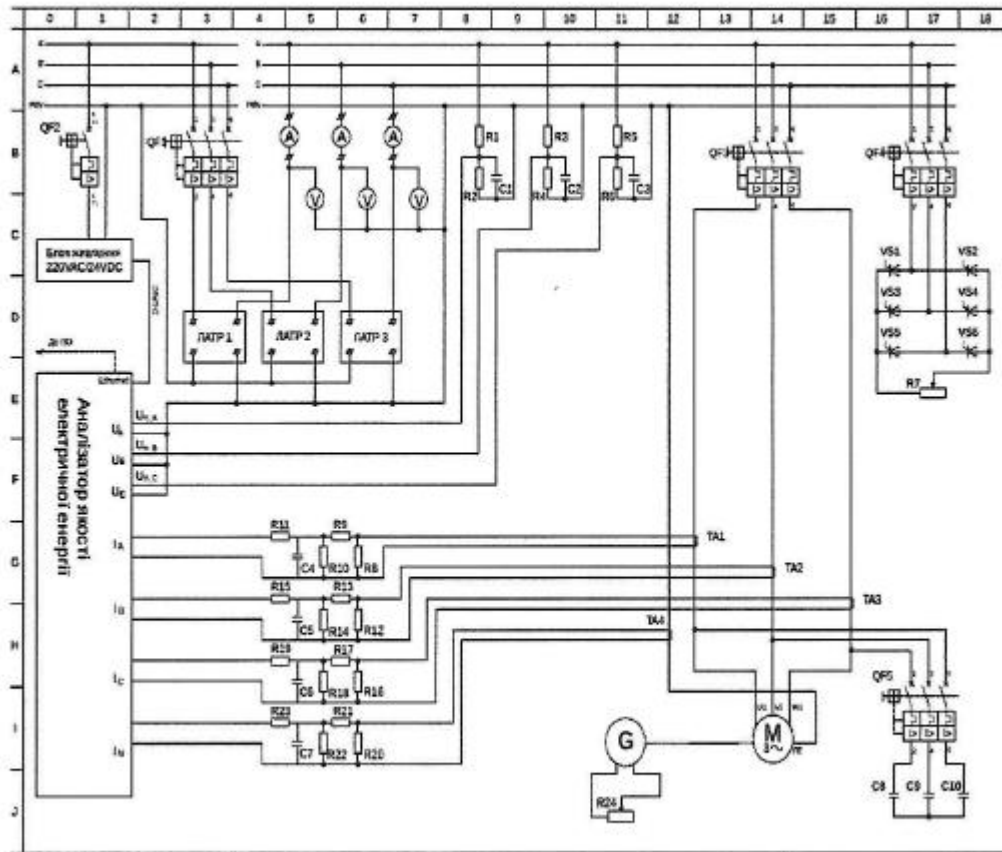
Фиг. 1



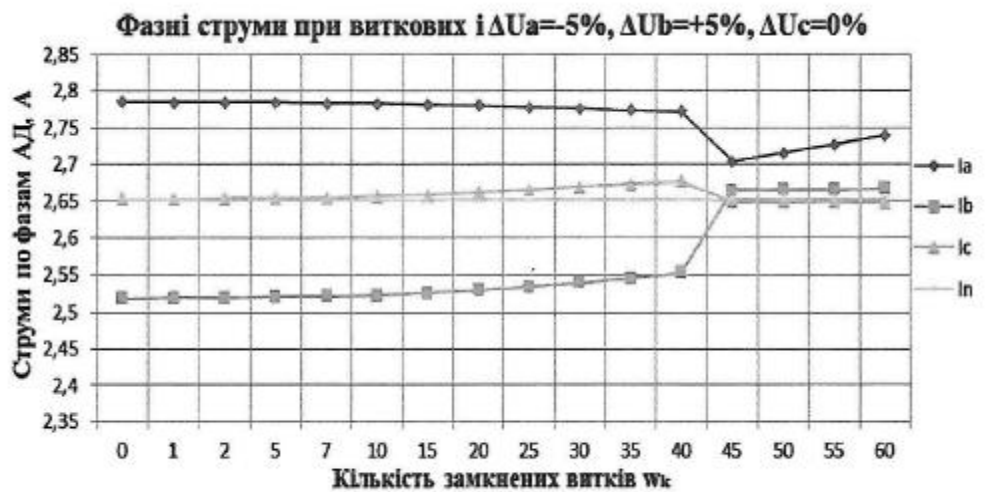
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5