

**ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ
ВИТКОВОГО ЗАМИКАННЯ СТАТОРНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНА
ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ ЖИВЛЕННЯ**

Прокопенко С.О.	аспірант, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ;
Кривоносов В.Є.	д-р техн. наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8219-021X , e-mail: kryvonosov@nubip.edu.ua ;
Кривоносов В.В.	аспірант, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7083-7881 , e-mail: krivonosov.val05@gmail.com ;
Савенко О.С.	канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8108-2575 , e-mail: savenko_o_s@pstu.edu

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення достовірності виявлення міжвиткових коротких замикань у статорних обмотках асинхронних двигунів (АД) за умов динамічно змінних та несиметричних напруг живлення. Проаналізовано сучасні методи функціональної діагностики, включно з аналітичними підходами, методами обробки сигналів, машинного навчання та системами на основі симетричних компонент. Показано, що більшість існуючих рішень недостатньо враховують вплив коливань показників якості електроенергії та змін навантаження на валу АД, що знижує точність раннього виявлення виткових замикань. Запропоновано перспективний напрям удосконалення функціонального методу діагностування шляхом комплексного використання миттєвих значень фазних струмів і напруг, параметрів схеми заміщення та статистичної обробки даних. Наведено програму експериментальних досліджень впливу динамічних змін параметрів мережі та режимів роботи електродвигуна на інформативні ознаки дефекту. Отримані результати створюють підґрунтя для підвищення чутливості та надійності систем ранньої діагностики асинхронних двигунів за умов несиметрії напруг живлення.

Ключові слова: виткове замикання, функціональна діагностика, діагностичні критерії, статистичний аналіз, параметри схеми заміщення електродвигуна.

Постановка проблеми

Асинхронні електродвигуни (АД) є основою сучасного електроприводу електротехнічних комплексів; їхня частка становить близько 80% усього електрообладнання підприємства. Раптове, несанкціоноване відключення електродвигуна від мережі живлення призводить до зупинки технологічного обладнання, пошкодження машин, сировини та до значних економічних втрат.

За даними статистики, понад 60% випадків виходу з ладу АД пов'язані з пошкодженням ізоляції обмотки статора. Основною причиною є передчасне динамічне та термічне старіння ізоляції, що призводить до пошкодження провідникової та пазової частин обмотки.

Унаслідок зниження діелектричних властивостей ізоляції виникають пошкодження у статорних обмотках АД – виткові та міжфазні замикання, які з часом переростають у коротке замикання.

Міжвиткові замикання викликають появу несиметрії фазних струмів; контроль коефіцієнтів несиметрії струмів і напруги дає змогу виявити початок розвитку виткового замикання [1, 2].

Замикання в обмотках статора АД є аварійними та призводять до раптового відключення двигуна від мережі живлення існуючими засобами релейного

захисту, наприклад, струмовим відсіченням чи тепловим захистом.

На тлі динамічних змін показників якості електроенергії існуючі методи функціонального діагностування виткових замикань мають обмежену достовірність і чутливість.

Аварійний вихід АД з ладу під час експлуатації призводить до небезпечних ситуацій та матеріальних збитків, зокрема через зупинку технологічного процесу або судна у відкритому морі, а також через подальший ремонт двигуна.

Тому розроблення нових методів контролю технічного стану електродвигуна і режимів його роботи є актуальним завданням сьогодення. Вирішення цього питання дасть змогу знизити збитки від негативних наслідків аварійного виходу з ладу АД шляхом своєчасного виявлення дефектів на ранній стадії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Пошкодження статорної обмотки за характером несправностей розподіляються так: міжвиткові замикання – 85% (із них 95% виникають у лобовій частині обмотки), пробої міжфазної ізоляції – 11%, пробої ізоляції на корпус – 4%. Коли замиканню піддається понад 40% витків у пазу обмотки статора, виникає несиметрія струмів, яку можуть виявити більшість

пристроїв захисту від несиметричних режимів, що призводить до відключення такого АД від мережі. Замикання 2-15% витків не спричиняють істотних перекосів струмів між фазами і двигун продовжує працювати в штатному режимі.

Небезпека полягає в тому, що в місці замикання утворюються короткозамкнені витки, у яких індукється струм, що спричиняє додаткове нагрівання сусідніх непошкоджених витків. За тривалого теплового впливу ізоляція справних витків починає прискорено старіти, що з часом призводить до серйозних аварій – міжфазного замикання або замикання на корпус.

Так, у роботі [3] показано, що за міжвиткового замикання до 15% витків у пазу перехід до міжфазного замикання або замикання на корпус відбувається через 3-6 місяців, а якщо провідники замикаються через дугу, то час скорочується до кількох секунд. Для АД, які мають міжвиткові замикання 30-50 % витків у пазу, аварійний режим настає через 200-300 годин експлуатації.

Виявлення міжвиткових коротких замикань у працюючих АД в режимі онлайн залишається важливим напрямом наукових досліджень.

Методології діагностики несправностей можна розділити на три основні класифікації:

- Методи, засновані на аналітичних підходах. Наприклад, у роботі [4] автори пропонують інтегровану структуру для діагностики та прогнозування стану електричних машин на основі моделі, що описує рівні серйозності несправностей. Запропоновано універсальний метод, який використовує кілька індикаторів несправностей для діагностики та фільтр частинок для прогнозування міжвиткових замикань у статорних обмотках електричних машин. У статті відсутні дослідження, що враховують динамічні зміни параметрів мережі живлення.

- Методи на основі обробки сигналів і машинного навчання. У роботі [5] авторами представлено систему онлайн-обробки сигналів та машинного навчання (ML), розроблену для ранньої діагностики міжвиткових замикань статора (SITF) у трифазних асинхронних двигунах із короткозамкненим ротором. Система зосереджується на оцінюванні швидкості двигуна та використовує лише значення струмів статора.

У статті запропоновано застосування вибраних гармонік разом із моделями машинного навчання для оцінки індикатора ступеня несправності, який розроблено на основі фізичних закономірностей процесу відмови двигуна.

Водночас неврахування змін напруги мережі живлення може призвести до некоректного виявлення несправностей.

У роботі [6] описано детальну аналітичну модель, яка включає точне моделювання індуктивності з урахуванням гармонік пазів ротора (RSH) як для справних, так і для двигунів із міжвитковими замиканнями (SIT). Запропонована модель розроблена аналітично, покроково, з урахуванням особливостей RSH.

Представлено детальний, але спрощений аналіз, що враховує як гармоніки магніторушійної сили, так і гармоніки потоку в повітряному зорі.

На наступному етапі моделювання запропоновано асиметричну модель, яка описує замикання SIT в одній із фаз асинхронного двигуна. У моделі також враховано вплив насичення. Запропоновану модель перевірено шляхом порівняння результатів моделювання в перехідному, сталому та частотному режимах з експериментальними даними. Порівняння показало високий ступінь кореляції з результатами, отриманими на реальному двигуні. Внесок цієї роботи обґрунтовано порівнянням запропонованої моделі з існуючими. Крім того, у статті доведено, що частотна сигнатура, пов'язана з RSH, присутня в лінійному струмі й може бути використана для ідентифікації замикань SIT.

У роботі [7] авторами представлено спрощену та практичну методологію виявлення міжвиткових коротких замикань в асинхронних двигунах із короткозамкненим ротором за різних умов механічного навантаження. Для цього використано одновимірну згорткову нейронну мережу (1D-CNN), розширену залишковими блоками та навчену на диференційованих сигналах струму статора, отриманих у різних режимах навантаження. Однак у статті не розглянуто вплив показників якості електроенергії на достовірність виявлення дефектів.

- Методи обробки сигналів. Так, у роботі [8] автори пропонують виявлення та діагностику електричних несправностей у статорній обмотці трифазних асинхронних двигунів за допомогою аналізу магнітного потоку та вібраційних сигналів. Встановлено зв'язок між основними електричними несправностями (міжвитковими короткими замиканнями та незбалансованою напругою живлення) і сигналами магнітного потоку та вібрації, що дозволяє визначити характерні частоти цих дефектів. Однак у статті не розглянуто вплив динамічних змін напруги та навантаження.

У роботах [9, 10] автори дослідили частотні складові фазних струмів як можливість виявлення виткових замикань. У струмах виявлено наявність другої гармонійної складової, що є ознакою зниження виткової ізоляції.

- Діагностичні системи на основі даних. Так, у роботах [11-16] авторами розглянуто використання систем штучного інтелекту та нейронних мереж інтерпретованого глибокого навчання. Такі системи використовують бази даних, отримані за допомогою відомих методів контролю як функціональних параметрів, так і різних датчиків.

Аналіз літературних джерел свідчить, що виявлення виткових замикань у статорних обмотках електродвигуна є надзвичайно важливим саме під час роботи двигуна.

У роботі [17] авторами розглянуто метод виявлення міжвиткових коротких замикань у статорних обмотках машин на основі спектрального аналізу струму статора як справних, так і пошкоджених двигунів.

У роботі [18] проаналізовано перехідні процеси пускових струмів, які відображають асиметрію, спричинену початковим коротким замиканням, і містять інформативні ознаки несправності. Використання дисперсійного аналізу дозволяє контролювати розвиток короткого замикання.

У роботі [19] представлено метод ідентифікації міжвиткових коротких замикань в асинхронних двигунах під час зміни струму навантаження. Метод ґрунтується на гібридному аналітичному підході, що поєднує генетичний алгоритм та імітацію відпалу. Його суть полягає у визначенні опорних матриць та обчисленні відстані між значеннями опорної та тестової матриць.

У роботі [20] представлено онлайн-метод діагностики міжвиткових замикань статора трифазних асинхронних двигунів на основі концепції симетричних компонент. Струм зворотної послідовності забезпечує ефективний і швидкий спосіб моніторингу для виявлення коротких замикань у статорі.

Зміна співвідношення струмів зворотної та прямої послідовностей використовується як основний індикатор несправності, що подається на вхід нейронної мережі. Вихідні дані нейронної мережі прямого поширення із зворотним зв'язком дають змогу класифікувати рівень короткого замикання статорної обмотки.

У наведених роботах не доведено застосування комплексного підходу до визначення виткових замикань із урахуванням динамічних змін несиметрії напруги живлення та навантаження на валу АД.

Таким чином, раннє виявлення міжвиткових коротких замикань має фундаментальне значення для запобігання подальшому пошкодженню електродвигуна. Стаціонарний аналіз у ряді випадків є недостатньо адекватним, зокрема для ненавантажених машин, механізмів із коливальним моментом або за наявності флуктуацій напруги та частоти в мережі живлення.

Мета статті

Аналіз існуючих методів виявлення виткового замикання у обмотках статора АД методами функціональної діагностики. Розробка напрямку та програми дослідження впливу динамічних змін показників якості електроенергії та навантаження на валу АД для своєчасного контролю стану АД та мережі живлення.

Матеріали та методи

Для проведення досліджень використано асинхронний двигун, що входить до складу лабораторної установки. Експерименти виконано із застосуванням електричного методу дослідження та статистичного аналізу отриманої бази даних.

Виклад основного матеріалу

Технічна діагностика – це інструмент забезпечення безвідмовної роботи технічних об'єктів.

Діагностика являє собою процес оцінювання фактичного стану об'єкта, за результатами якого приймається рішення щодо його подальшої експлуатації або проведення ремонту.

Процес оцінювання технічного стану електричних машин у промисловості, на транспорті чи в інших галузях передбачає виявлення та ідентифікацію небажаних робочих станів.

Сукупність робочих станів – це послідовність цілеспрямованих дій, що виконуються машиною протягом певного інтервалу часу.

Діагностична система повинна забезпечувати виявлення та ідентифікацію виникнення несправностей у режимі реального часу або на ранніх етапах їх розвитку.

Застосування контролю параметрів мережі живлення, фазних струмів АД та частоти обертання ротора розглянуто в роботах [21].

Для виявлення початкового моменту появи виткових замикань у статорних обмотках АД важливим є встановлення критеріальних залежностей між вимірюваними миттєвими та розрахунковими величинами параметрів напруги живлення й фазних струмів двигуна.

У цьому випадку доцільно використовувати теорію множин випадкових подій і елементи булевої алгебри.

Розглядаються такі множини значень:

– множина вимірюваних векторів робочих фазних струмів:

$$\underline{I}_a \in \{\underline{I}_a\}, \underline{I}_b \in \{\underline{I}_b\}, \underline{I}_c \in \{\underline{I}_c\}; \quad (1)$$

– множина вимірюваних векторів фазних (лінійних) напруг:

$$\underline{U}_a \in \{\underline{U}_a\}, \underline{U}_b \in \{\underline{U}_b\}, \underline{U}_c \in \{\underline{U}_c\}; \quad (2)$$

– множина частоти мережі:

$$f_{п.с.} \in \{f_{п.с.}\}; \quad (3)$$

– множина значень швидкості обертання ротора АД:

$$n_{рот} \in \{n_{рот}\}; \quad (4)$$

– множина значень коефіцієнта, що визначає зміну числа витків в пазу статора обмотки при виткових замиканнях:

$$k_{\Delta w} \in \{k_{\Delta w}\}. \quad (5)$$

Критеріальні залежності визначені для режиму миттєвих значень, умовами якого є:

$$f_{п.с.} = \text{const}; \underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c = \text{const}; n_{рот} = \text{const}.$$

Критерієм нормальної роботи АД є функції:

$$a) F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c,$$

при $\underline{U}_a \neq 0, \underline{U}_b \neq 0, \underline{U}_c \neq 0$ відповідають справжньому значенню – логічна «1»;

$$b) F(\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}) = \{1, 1, 1\} =$$

$$= \{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\} / \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\} / \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\},$$

при $\{I_a \cap I_{ap}\}, \{I_b \cap I_{bp}\}, \{I_c \cap I_{cp}\}_a$ відповідають справжньому значенню – логічна «1»,

де I_{ap}, I_{bp}, I_{cp} – розрахункові значення векторів фазних струмів АД.

$$I_{ap}, I_{bp}, I_{cp} = \Phi(\{U_a, U_b, U_c\}, n_{pom}, f_{II.C.}, \{Z_{wi}\}), \quad (6)$$

Z_{wi} – повний комплексний опір схеми заміщення АД в i -й фазі.

Критерієм неповнофазного режиму напруги мережі живлення є функція:

$$F(U_a, U_b, U_c) = \{0, 0, 0\} = \{U_a / U_b\} \vee \{U_a / U_c\}. \quad (7)$$

Критерієм «обриву, недовмикання однієї з фаз струмових ланцюгів, пошкодження кабельної лінії та ін.» є виконання умови:

$$F_1\{F(U_a, U_b, U_c), F(I_a, I_b, I_c)\} = (U_a / U_b / U_c) / (\{I_a / I_b\} \vee \{I_a / I_c\}), \quad (8)$$

де $F(U_a, U_b, U_c) = \{1, 1, 1\} = U_a / U_b / U_c$ – функція відповідає наявності ненульових значень фазної напруги;

$F(I_a, I_b, I_c) = \{0, 0, 0\} = \{I_a / I_b\} \vee \{I_a / I_c\}$ – функція відповідає відсутності струму в одній із фаз,

а $I_a \neq 0, I_b \neq 0, I_c \neq 0$ відповідають справжньому значенню – логічна «1».

Критерії виявлення початкового моменту міжвиткового замикання в статорній обмотці АД:

$$a) F(U_a, U_b, U_c) = \{1, 1, 1\} = U_a / U_b / U_c,$$

$$b) F(\{I_a \setminus I_{ap}\}, \{I_b \setminus I_{bp}\}, \{I_c \setminus I_{cp}\}) = \{0, 0, 0\} = \{I_a \setminus I_{ap}\} \setminus \{I_b \setminus I_{bp}\} \setminus \{I_c \setminus I_{cp}\}$$

при $\{I_a \cap I_{ap}\}, \{I_b \cap I_{bp}\}, \{I_c \cap I_{cp}\}_a$ відповідають справжньому значенню – логічна «1».

Критеріальні залежності дозволили розробити програмне забезпечення для роботи мікроконтролера пристрою [22], що реалізує спосіб діагностики та захисту АД від неповнофазних режимів та виткових замикань.

Достовірність розробленого методу виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання при використанні миттєвих значень (векторів) при виконанні умов:

$$1. \frac{dU_a}{dt} \neq \frac{dU_b}{dt} \neq \frac{dU_c}{dt} \neq 0; \quad \frac{dI_a}{dt} \neq \frac{dI_b}{dt} \neq \frac{dI_c}{dt} \neq 0; \quad \frac{d\omega_r}{dt} \neq 0, \text{ де } \omega_r - \text{швидкість ротора АД.}$$

Не є коректним та потребує збір бази даних значень струмів, напруг, швидкості та використання статистичної обробки.

2. Оскільки загальний опір асинхронного двигуна є основною складовою при визначенні розрахункового струму кожної фази, відповідно до Т-подібної схеми заміщення (рис. 1, а), комплексний опір фази АД з одношаровою обмоткою, намотаною одним провідником, визначається за виразом:

$$Z_{wi} = (1 - k_z)^2 \cdot$$

$$\cdot \left[\left(\frac{r_1}{1 - k_z} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \cdot \left(\frac{r_\mu}{(1 - k_z)^2} + jx_\mu \right)}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + j(1 - k_z)^2 x_\mu)} \right] \quad (9)$$

де Z_{wi} – повний комплексний опір АД в i -й фазі;

$k_z = \frac{k_{\Delta w}}{q_1}$ – коефіцієнт відношення замкнутих витків у пазу до загальної кількості витків в обмотці;

q_1 – кількість пазів фазової обмотки;

r_1, x_1 – активний та індуктивний опір розсіювання статорної обмотки;

r'_2, x'_2 – приведені до статорної обмотки активний та індуктивний опір розсіювання роторної обмотки;

s – ковзання АД;

r_μ, x_μ – активний та індуктивний опір намагнічуючого контуру.

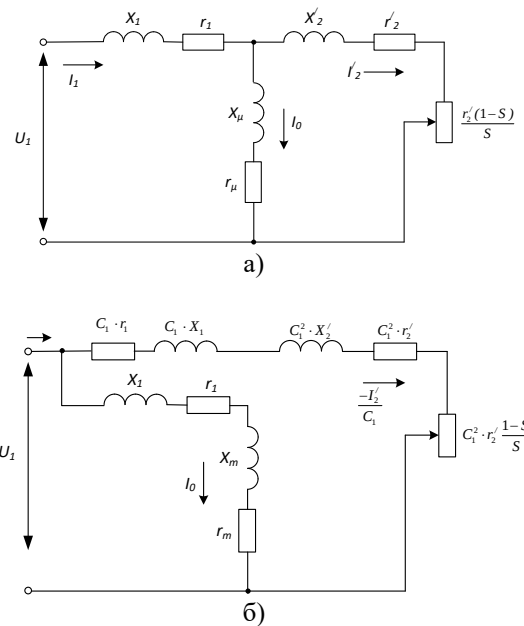


Рис. 1 – Схеми заміщення АД:
а) Т-подібна схема, б) Г-подібна

Комплексний опір кожної фази АД з одно- та двошаровими обмотками, з паралельними провідниками визначаємо виразом

$$Z_{mi} = \left(\frac{r_1}{1 + \frac{k_z}{(m_1 - n)}} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (10)$$

де m_1 – число паралельних провідників у котушці обмотки статора; n – число замкнених паралельних провідників.

При умові $\frac{ds}{dt} \neq const$ та $\frac{df}{dt} \neq const$, де f –

частота мережі, Гц, також потребує використання статистичних методів обробки бази даних.

Програма дослідження впливу динамічних змін функціональних параметрів мережі живлення та АД передбачає:

1. Визначення параметри схеми заміщення АД;
2. Виконання відгалуження у статорній обмотки АД (3 гілки) фаз А та визначення параметрів відгалужень (Δr_1 , Δx_1 , ΔW_1 – кількість витків)
3. Дослідження функціональної залежності $I_a, I_b, I_c - f(U_a - \Delta U_b = U_c = U_n \text{ при } \Delta W_1 - var$
4. Дослідження функціональної залежності

$$\frac{du_a}{dt} \neq \frac{du_b}{dt} \neq \frac{du_c}{dt} \neq 0 \quad ; \quad \frac{di_a}{dt} \neq \frac{di_b}{dt} \neq \frac{di_c}{dt} \neq 0;$$

при $\Delta W_1 - var$

а) при нетермінових змінах параметрів

б) при випадкових змінах

5. Визначення межі достовірності розрахункових та вимірюваних струмів при $S - var$.

Для отримання баз даних змінних параметрів мережі живлення та фазних струмів АД розроблено електричну схему стенду автономної мережі потужністю 3 кВт (рис. 2).

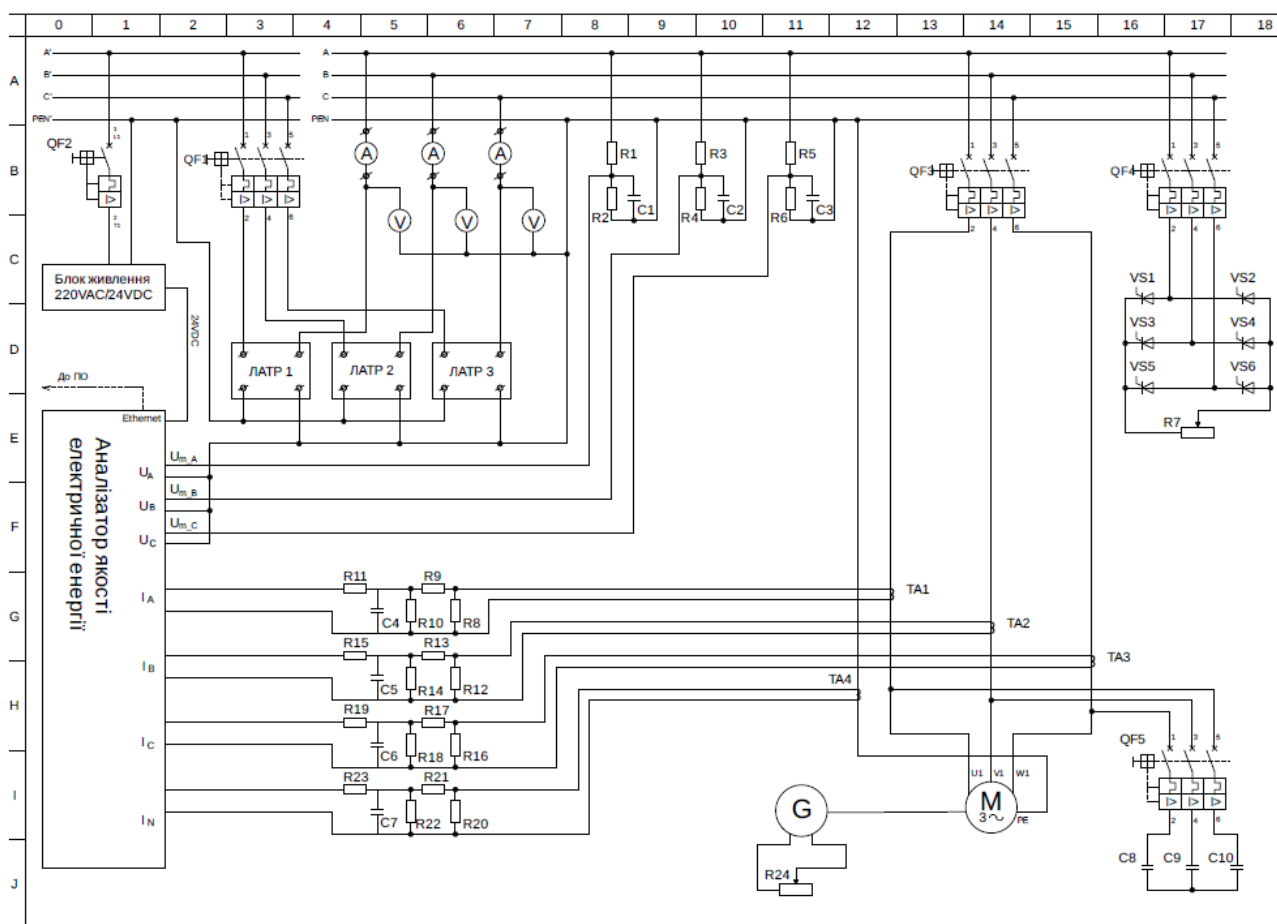


Рис. 2 – Електрична схема стенду автономної мережі

На рис. 2 позначено: РМ1 – Дослідний зразок приладу, що аналізує показники якості електричної енергії, збирає та передає в ПЗ вищого рівня дані миттєвих вимірювань фазних напруг, струмів, обчислень та виявлених подій (далі аналізатор якості електроенергії).

QF1 – Ввідний автоматичний вимикач.

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 стенду

QF3 – Автоматичний вимикач живлення ланцюгів навантаження.

QF4 – Автоматичний вимикач підключення випрямляча напруги за схемою «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 – Силкові тиристори, що формують 2 мости випрямлювача напруги за схемою «подвійної зірки Ларіонова».

R7 – Змінний опір (реостат) що використовується в якості навантаження випрямлювача 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.

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 А, В, С та N відповідно

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 в якості досліджуваного навантаження.

R24 – Змінний опір (реостат) що використовується в якості навантаження однофазного генератора.

Висновки

Підвищення достовірності виявлення початкового моменту виникнення виткових замикань у статорних обмотках асинхронного двигуна за умов динамічно змінних параметрів мережі живлення та навантаження на валу потребує виконання таких дій:

1. Збір та постійне оновлення бази даних про стан мережі живлення й зміни фазних струмів асинхронного двигуна.

2. Застосування статистичного аналізу для обробки та інтерпретації отриманих даних.

3. Використання результатів обробки для визначення критеріальних параметрів виявлення початкового моменту виникнення виткових замикань як за детермінованих, так і за випадкових змін параметрів мережі живлення та функціональних характеристик асинхронного двигуна.

Перелік використаних джерел

- [1] Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий: авт. свид. 1584028 СССР: SU 1584028. № 4389543/24-07; заявл. 09.03.88; опубл. 07.08.90. Бюл. № 29. 10 с.
- [2] Спосіб діагностики початкового моменту

виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна: пат. 124403 Україна: МПК G01R 31/00, H02H 7/09, H02H 7/08, H02H 1/00. № а201912168; заявл. 23.12.19; опубл. 08.09.21, Бюл. № 36. 7 с.

- [3] Jameson N. J., Azarian M. H., Pecht M. Improved electromagnetic coil insulation health monitoring using equivalent circuit model analysis. *International journal of electrical power & energy systems*. 2020. Vol. 119. Article 105829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105829>.
- [4] Model-based diagnosis and RUL estimation of induction machines under interturn fault / V. Nguyen et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53, iss. 3. Pp. 2690-2701. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2669195>.
- [5] Babu A. K., Seshadrinath J. Interacting multiple model framework for incipient diagnosis of interturn faults in induction motors. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 5. Pp. 5120-5129. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAI.2024.3405468>.
- [6] Ray S., Day D. Development of a comprehensive analytical model of an induction motor under conditions of stator interturn faults taking into account rotor slot harmonics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70, iss. 2. Pp. 2037-2047. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3165294>.
- [7] Early detection of inter-turn short circuits in induction motors using the derivative of stator current and a lightweight 1D-ResNet / C. J. Morales-Perez et al. *Computation*. 2025. Vol. 13(6). Article 140. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation13060140>.
- [8] Lamim Filho P. C. M., Pederiva R., Brito J. N. Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014. Vol. 42, iss. 1-2. Pp. 377-387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.08.033>.
- [9] Short-term fault feature extraction based on adaline for PMSM inter-turn short circuit diagnosis using residual insulation monitoring / D. Wei et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70. Pp. 3103-3114. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3167164>.
- [10] Online detection of induction motor's stator winding short-circuit faults / Eftekhari M., Moallem M., Sadri S., Hsieh M.-F. *IEEE Systems Journal*. 2014. Vol. 8, iss. 4. Pp. 1272-1282. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2288172>.
- [11] Ayas S., Ayas M. S. A novel bearing fault diagnosis method using deep residual learning network. *Multi-media Tools and Applications*. 2022. Vol. 81, iss. 2. Pp. 22407-22423. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11617-1>.
- [12] Convolutional neural network based inter-turn fault diagnosis in LSPMSMs / L. S. Maraaba et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 81960-81970. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991137>.

- [13] Abid F. B., Sallem M., Brem A. Robust interpretable deep learning for intelligent fault diagnosis of induction motors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 69, iss. 6. Pp. 3506-3515. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2932162>.
- [14] Husari F., Seshadrinath J. Early stator fault detection and condition identification in induction motor using novel deep network. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 3, iss. 5. Pp. 809-818. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAI.2021.3135799>.
- [15] Fang Y., Wang M., Wei L. Deep transfer learning in inter-turn short circuit fault diagnosis of PMSM. *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Takamatsu, Japan, 8-11 August 2021. Pp. 489-494. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA52036.2021.9512785>.
- [16] Oner M. U., Sahin I., Keysan O. Neural networks detect inter-turn short circuit faults using inverter switching statistics for a closed-loop controlled motor drive. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023. Vol. 38, iss. 4. Pp. 2387-2395. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3274052>.
- [17] Joksimovic G. M., Penman J. The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000. Vol. 47, iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.873216>.
- [18] Transient envelope current analysis for inter-turn short-circuit detection in induction motor stator / Zaparoli I. O., Baccarini L. M. R., Lamim Filho P. C. M., Batista F. B. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 42. Article 97. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-2188-7>.
- [19] Identification of inter-turn short-circuits in induction motor stator winding using simulated annealing / M. Tomczyk et al. *Energies*. 2022. Vol. 15(1). Article 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010117>.
- [20] Induction motor stator interturn short circuit fault detection in accordance with line current sequence components using artificial neural network / Rajamany G., Srinivasan S., Rajamany K., Natarajan R. K. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019. Vol. 2019. Article 4825787. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4825787>.
- [21] Кривоносов В., Василенко С., Бухлал Н. Розробка програмного забезпечення виявлення виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна і умовах несиметрії напруг. *Наука та виробництво*. 2020. № 23. С. 130-140. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020240697>.
- [22] Комп'ютерна програма «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна»: опубл. 27.02.20.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL METHOD FOR DIAGNOSING THE TURN-TO-TURN SHORT CIRCUIT OF THE STATOR WINDINGS OF AN ELECTRIC MOTOR IN THE EVENT OF SUPPLY VOLTAGE ASYMMETRY

Prokopenko S.O.	postgraduate student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv;
Kryvonosov V.E.	D.Sc. (Engineering), professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8219-021X , e-mail: kryvonosov@nubip.edu.ua ;
Kryvonosov V.V.	postgraduate student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7083-7881 , e-mail: krivonosov.val05@gmail.com ;
Savenko O.S.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi State Technical University», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8108-2575 , e-mail: savenko_o_s@pstu.edu

The article addresses the urgent problem of improving the reliability of early detection of inter-turn short circuits in the stator windings of induction motors (IM) operating under dynamically changing and asymmetrical supply-voltage conditions. As induction motors constitute the majority of industrial electric drives, faults related to insulation degradation pose significant risks of unexpected shutdowns, equipment damage, and costly downtime. Statistical data indicate that more than 60% of IM failures are associated with insulation defects, with inter-turn short circuits being the most frequent and dangerous type due to their rapid development into phase-to-phase or ground faults. A comprehensive analysis of recent research highlights several groups of diagnostic methods: analytical modeling approaches, signal-processing techniques, machine-learning-based systems, and diagnostic methods rooted in symmetrical component analysis. Although each class of methods offers valuable diagnostic insights, most studies do not sufficiently account for dynamic variations in power-quality parameters – such as voltage unbalance, frequency fluctuations, and load changes – which

significantly influence the accuracy of fault detection. In particular, the inability of conventional functional diagnostics to maintain high sensitivity under non-stationary operating conditions limits their practical applicability for early fault identification. The article proposes a promising direction for developing a functional diagnostic method based on the combined use of instantaneous values of phase currents and voltages, estimated parameters of the motor equivalent circuit, and statistical processing of large datasets obtained under real operating conditions. A detailed research program is presented, including the determination of equivalent-circuit parameters, modeling changes in the number of winding turns, and studying functional dependencies between voltage asymmetry, load dynamics, and variations in diagnostic indicators. An experimental setup for generating and analyzing variable network conditions is described. The results demonstrate that integrating statistical analysis with functional diagnostic criteria significantly enhances the robustness of inter-turn short-circuit detection in the presence of voltage asymmetry and dynamic disturbances. The proposed approach provides a foundation for creating more sensitive and reliable online monitoring systems, ensuring timely fault identification and improving the operational safety and longevity of induction motors.

Keywords: turn-to-turn short circuit, functional diagnostics, diagnostic criteria, statistical analysis, equivalent circuit parameters of the electric motor.

References

- [1] I.V. Zhezhelenko, V.E. Kryvonosov, and B.F. Rybalko, "Ustroistvo dlia kontroliia y zashchyti elektrodvyhatelia ot nepolnofaznykh rezhymov y vytkovykh zamikanyii" ["Device for monitoring and protecting an electric motor from uneven phase conditions and turn-to-turn short circuits"], USSR Author's Certificate Appl. 1584028, Aug. 07, 1990. (Rus.)
- [2] V.E. Kryvonosov, O.H. Grib, S.V. Vasylenko, and V.V. Kryvonosov, "Sposib diahnostryky pochatkovoho momentu vytkovoho zamykannia v statornykh obmotkakh elektrodvyhuna" ["Method for diagnosing the initial moment of turn-locking in the stator windings of an electric motor"], UA Patent 124403, Sept. 08, 2021. (Ukr.)
- [3] N.J. Jameson, M.H. Azarian, and M. Pecht, "Improved electromagnetic coil insulation health monitoring using equivalent circuit model analysis," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 119, article 105829, 2020. doi: **10.1016/j.ijepes.2020.105829**.
- [4] V. Nguyen, J. Seshadrinath, D. Wang, S. Nadarajan, and V. Vaiyapuri, "Model-based diagnosis and RUL estimation of induction machines under interturn fault," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, iss. 3, pp. 2690-2701, 2017. doi: **10.1109/TIA.2017.2669195**.
- [5] A.K. Babu, and J. Seshadrinath, "Interacting multiple model framework for incipient diagnosis of interturn faults in induction motors," *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 5, pp. 5120-5129, 2024. doi: **10.1109/TAI.2024.3405468**.
- [6] S. Ray, and D. Day, "Development of a comprehensive analytical model of an induction motor under conditions of stator interturn faults taking into account rotor slot harmonics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, iss. 2, pp. 2037-2047, 2023. doi: **10.1109/TIE.2022.3165294**.
- [7] C.J. Morales-Perez, D. Camarena-Martinez, J.P. Amezcuita-Sanchez, J.J. Rangel-Magdaleno, E.E. Sánchez Ramírez, and M. Valtierra-Rodríguez, "Early detection of inter-turn short circuits in induction motors using the derivative of stator current and a lightweight 1D-ResNet," *Computation*, vol. 13(6), article 140, 2025. doi: **10.3390/computation13060140**.
- [8] P.C.M. Lamim Filho, R. Pederiva, and J.N. Brito, "Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 42, iss. 1-2, pp. 377-387, 2014. doi: **10.1016/j.ymssp.2013.08.033**.
- [9] D. Wei, K. Liu, W. Hu, X. Peng, Y. Chen, and R. Ding, "Short-term fault feature extraction based on adaline for PMSM inter-turn short circuit diagnosis using residual insulation monitoring," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, pp. 3103-3114, 2023. doi: **10.1109/TIE.2022.3167164**.
- [10] M. Eftekhari, M. Moallem, S. Sadri, M.-F. Hsieh, "Online detection of induction motor's stator winding short-circuit faults," *IEEE Systems Journal*, vol. 8, iss. 4, pp. 1272-1282, 2014. doi: **10.1109/JSYST.2013.2288172**.
- [11] S. Ayas, and M.S. Ayas, "A novel bearing fault diagnosis method using deep residual learning network," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, iss. 2, pp. 22407-22423, 2022. doi: **10.1007/s11042-021-11617-1**.
- [12] L.S. Maraaba, A.S. Milhem, I.A. Nemer, H. Al-Duwaish, and M.A. Abido, "Convolutional neural network based inter-turn fault diagnosis in LSPMSMs," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 81960-81970, 2020. doi: **10.1109/ACCESS.2020.2991137**.
- [13] F.B. Abid, M. Sallem, and A. Brem, "Robust interpretable deep learning for intelligent fault diagnosis of induction motors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, iss. 6, pp. 3506-3515, 2019. doi: **10.1109/TIM.2019.2932162**.
- [14] F. Husari, and J. Seshadrinath, "Early stator fault detection and condition identification in induction motor using novel deep network," *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 3, iss. 5, pp. 809-818, 2022. doi: **10.1109/TAI.2021.3135799**.
- [15] Y. Fang, M. Wang, and L. Wei, "Deep transfer learning in inter-turn short circuit fault diagnosis of PMSM," in *Proceedings of the 2021 IEEE*

International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, Aug. 8-11, 2021, pp. 489-494. doi: **10.1109/ICMA52036.2021.9512785**.

- [16] M.U. Oner, I. Sahin, and O. Keysan, "Neural networks detect inter-turn short circuit faults using inverter switching statistics for a closed-loop controlled motor drive," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, iss. 4, pp. 2387-2395, 2023. doi: **10.1109/TEC.2023.3274052**.
- [17] G.M. Joksimovic, and J. Penman, "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, iss. 5, 2000. doi: **10.1109/41.873216**.
- [18] I.O. Zapparoli, L.M.R. Baccarini, P.C.M. Lamim Filho, and F.B. Batista, Transient envelope current analysis for inter-turn short-circuit detection in induction motor stator, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, article 97, 2020. doi: **10.1007/s40430-020-2188-7**.
- [19] M. Tomczyk, R. Mielnik, A. Plichta, I. Goldasz, and M. Sułowicz, "Identification of inter-turn short-circuits in induction motor stator winding using simulated annealing," *Energies*, vol. 15(1), article 17, 2022. doi: **10.3390/en15010117**.
- [20] G. Rajamany, S. Srinivasan, K. Rajamany, and R.K. Natarajan, "Induction motor stator interturn short circuit fault detection in accordance with line current sequence components using artificial neural network," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2019, article 4825787, 2019. doi: **10.1155/2019/4825787**.
- [21] V.E. Krivonosov, V.V. Vasilenko, and N.A. Bouhlal, "Rozrobka prohramnoho zabezpechennia vyivlennia vytkovoho zamykannia v statornykh obmotkakh elektrodvyhuna i umovakh nesymetrii napruh" ["Development of software for detecting an inter-turn fault in the stator windings of an electric motor under conditions of voltage asymmetry"], *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, № 23, pp. 130-140, 2020. doi: **10.31498/2522-9990232020240697**.
- [22] V.E. Kryvonosov, O.H. Hryb, I.T. Karpaliuk, V.V. Kryvonosov, A.O. Boriakin, and S.V. Vasylenko, "Prystii diahnostyky nepovnofaznykh rezhymiv merezhi, strumovykh lantsiuhiv, pochatkovoho momentu vytkovoho zamykannia v statornykh obmotkakh i zakhystu elektrodvyhuna" ["Device for diagnosing incomplete phase modes of the network, current circuits, the initial moment of turn-on short circuit in stator windings and electric motor protection"]. 2020.

Стаття надійшла 12.08.2025

Стаття прийнята 30.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Перспективи розвитку функціонального методу діагностування виткового замикання статорних обмоток електродвигуна при несиметрії напруг живлення / Прокопенко С. О., Кривonosов В. С., Кривonosов В. В., Савенко О. С. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 141-149. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344830>.