

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

УДК 621.359.4

Ніколайчук Вадим Володимирович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних
двигунів відносно корпусу в системах заземлення TN**
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Ніколайчук В.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов М.Я.

(прізвище, ім'я, по батькові)

**д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології**

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Ніколайчук В.В Діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів відносно корпусу в системах заземлення TN. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Надійна робота асинхронних двигунів є критично важливою для функціонування промислових підприємств. Пошкодження ізоляції статорних обмоток, особливо пробій на корпус, становить серйозну загрозу безперебійної роботи та може призвести до значних економічних втрат, пов'язаних з простоем обладнання та необхідністю капітального ремонту. Кваліфікаційна робота показала роль діагностики та шляхи підвищення терміну служби та надійності виробів, що має велике народногосподарське значення.

Ключові слова: асинхронні двигуни, ізоляції статорних обмоток, діагностика, моніторинг.

ABSTRACT

Nikolaychuk V.V. Diagnosis of stator winding insulation faults relative to the frame in TN grounding systems of asynchronous motors. Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

Reliable operation of asynchronous motors is crucial for the functioning of industrial enterprises. Damage to the insulation of stator windings, especially short circuits to the frame, poses a serious threat to uninterrupted operation and can lead to significant economic losses associated with equipment downtime and the need for major repairs. The qualification work demonstrated the role of diagnostics and ways to increase the service life and reliability of products, which is of great national economic importance.

Keywords: asynchronous motors, stator winding insulation, diagnostics, monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 НАДІЙНІСТЬ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	6
1.1 Закономірності старіння ізоляції, основні поняття та визначення	6
1.2 Старіння ізоляції під впливом температури	7
1.3 Старіння ізоляції під дією електричного поля	9
1.4 Старіння ізоляції під дією механічних навантажень	10
1.5 Старіння ізоляції під дією вологи та хімічно активних речовин	13
Висновки по розділу 1	14
РОЗДІЛ 2 СУЧАСНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.	15
2.1 Тенденції розвитку діагностики міжвиткової ізоляції статора асинхронних двигунів.	17
2.2 Сучасні підходи до діагностики міжвиткової ізоляції статора асинхронних двигунів	18
Висновки по розділу 2	28
РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА КАБЕЛЮ ЖИВЛЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛОКАЛЬНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.	29
Висновки по розділу 3	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

Надійна робота асинхронних двигунів є критично важливою для безперебійного функціонування численних промислових процесів. Серед різноманітних факторів, що впливають на їхню ефективність та довговічність, значне місце займає стан ізоляції статорних обмоток. Пошкодження ізоляції обмоток відносно корпусу може призвести до витoku струму, перегріву, короткого замикання і, зрештою, до повного виходу двигуна з ладу.

Отже, своєчасне та точне діагностування таких пошкоджень є необхідним для запобігання аварійним ситуаціям, мінімізації простоїв обладнання та забезпечення безпечної експлуатації. Ця робота присвячена огляду існуючих методів діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів відносно корпусу, аналізу їхніх переваг та недоліків, а також перспектив розвитку нових технологій в цій галузі.

Метою роботи є дослідження методів ефективного діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів відносно корпусу.

Оцінюється ефективність кожного методу у виявленні різних типів пошкоджень ізоляції, враховуючи фактори, що впливають на точність діагностики, зокрема, температура, вологість та ступінь забруднення обмоток.

Діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів відносно корпусу є надзвичайно **актуальною** проблемою сучасної електротехніки. Асинхронні двигуни широко використовуються в різних галузях промисловості, від насосів і вентиляторів до конвеєрів і верстатів. Їх надійна та ефективна робота є критично важливою для безперервного виробничого процесу.

Предметом дослідження є процес діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів відносно корпусу. Даний аспект має ключове значення для забезпечення надійної та тривалої експлуатації електричних машин, оскільки пошкодження ізоляції є однією з основних причин їх виходу з ладу.

Об'єктом даного дослідження є процес діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів відносно корпусу.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Ніколайчук В.В.

ПРОПОРЦІЇ УКЛАДАННЯ ЛИСТІВ МАГНІТОПРОВОДУ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ – 2025» ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ 30 жовтня 2025 року м. Житомир.

2. Кадошніков Я. В, Ніколайчук В.В.

ТЕХНОЛОГІЯ АКТИВНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ - СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2.

3. Ніколайчук В.В., Савченко Л. Г.

СТРАТЕГІЇ ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕСПРАВНОСТЕЙ (FDI) В ЕНЕРГЕТИЦІ «Біоенергетичні системи» ІХ Міжнародна науково-практична конференція, Житомир, Україна, 19-20. 11. 2025

РОЗДІЛ 1

НАДІЙНІСТЬ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

1.1 Закономірності старіння ізоляції, основні поняття та визначення

Надійність електричної машини значною мірою визначається надійністю обмоток, яка, в свою чергу, залежить від стану ізоляції.

Ізоляція працює в складних, часто дуже несприятливих умовах. В процесі експлуатації електричних машин, а також під час їх зберігання та транспортування, вони піддаються різноманітним зовнішнім впливам, що з часом призводять до прогресуючого погіршення її властивостей.

Основною характеристикою ізоляції є її електрична міцність. Однак, ця найважливіша властивість ізоляція може зберегти в процесі експлуатації лише за наявності багатьох інших якостей, зниження рівня яких призводить до зменшення електричної міцності.[1]

Ізоляція повинна зберігати високу теплопровідність, інакше неминуче виникнення підвищених місцевих нагрівів, що супроводжуються прискоренням її руйнування.

Ізоляція повинна мати достатню механічну міцність та еластичність, які б виключали можливість утворення залишкової деформації, тріщин, розшарування під дією механічних зусиль.

Ізоляція повинна зберігати стабільний хімічний склад, оскільки його зміна призводить до зниження її електричної міцності.

Ізоляція повинна мати стійку структуру, тому що лише однорідна і монолітна структура може володіти всіма перерахованими вище властивостями.

Залежно від конкретних умов роботи до ізоляції можуть пред'являтися й різні інші вимоги, наприклад, такі як хімічна стійкість, морозостійкість, тропікостійкість та ін.

Необоротні зміни структури і хімічного складу ізоляції, що відбуваються під впливом зазначених вище факторів в сукупності, називаються її старінням.

Процес погіршення властивостей ізоляції в результаті старіння називається зношуванням.

Таким чином, термін «старіння» відноситься до матеріалу, а термін «зношування» – до ізоляційної конструкції.

В окремих випадках зношування може й не бути наслідком старіння, крім того, можливі пошкодження ізоляції, не пов'язані зі зношуванням: продавлювання, прорізання її гострими кромками металевих деталей, утворення тріщин внаслідок значних напружень при згинанні тощо. Такі місцеві дефекти часто розвиваються порівняно швидко і призводять до пробою ізоляції задовго до суттєвого погіршення її властивостей в усьому об'ємі внаслідок електричного або термоокислювального руйнування.

Якщо швидкість старіння ізоляції визначається в основному експлуатаційними умовами та властивостями застосовуваних матеріалів, то на утворення місцевих дефектів значний вплив має також рівень технології та загальної культури виробництва, умови зберігання електричних машин, їх транспортування та монтажу.

1.2 Старіння ізоляції під впливом температури

Серед різних факторів, що визначають термін служби ізоляції електричних машин, одним з основних є старіння ізоляції під дією температури. Це явище найкраще піддається кількісному обліку, а тому порівняно детально досліджене. З точки зору температурних впливів на ізоляцію розрізняють поняття «теплостійкість» і «нагрівостійкість».

Теплостійкістю називають здатність електроізоляційного матеріалу зберігати свої властивості на певному рівні при відносно короткочасному перегріві. Матеріал не повинен при цьому руйнуватися, змінювати свої хімічні властивості, не повинно виникати пластичних деформацій, витікання або руйнування.[2]

Нагрівостійкість характеризує здатність матеріалу без суттєвого погіршення характеристик витримувати вплив гранично допустимої для даного типу ізоляції температури протягом періоду часу, що відповідає терміну служби машини, і при обумовлених величинах інших експлуатаційних впливів.

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

Оскільки нагрівостійкість визначається швидкістю старіння ізоляції в умовах підвищених температур, особливого значення набувають методи розрахунку швидкості старіння і на цій основі – терміну служби ізоляції.

Перші роботи в цьому напрямку мали, головним чином, дослідний характер і відносились до ізоляції класу А. В результаті було сформульовано правило «восьми градусів» (правило Монтзінгера). Відповідно до цього правила, підвищення температури на кожні 8°C понад гранично допустиму скорочує термін служби ізоляції вдвічі.

$$T = T_0 \cdot 2^{\frac{-v}{\Delta v}} = T_0 \cdot e^{-0,0866v}$$

де v – температура нагрівання ізоляції, °C; T – термін служби ізоляції за цієї температури (в роках); T_0 – термін служби ізоляції за так званих «нульових» умов (при $v = 105^\circ\text{C}$ становить $6,225 \cdot 10^4$ років); $\Delta v = 8^\circ\text{C}$ – перевищення температури над допустимою, при якій термін служби ізоляції скорочується вдвічі.

П р и м і т к а. Встановлено, що величина $\Delta v = 8^\circ\text{C}$ відповідає лише класу А – для інших класів ізоляції вона підвищується до $(10\div 12)^\circ\text{C}$, а саме: чим вищий клас нагрівостійкості, тим повільніше відбувається її старіння при відповідній гранично допустимій температурі.

Рівняння для будь-якого класу нагрівостійкості ізоляції може бути представлене в логарифмічній формі:

$$\ln T = \ln T_0 - k \cdot v,$$

де $k = \ln 2 / \Delta v$. З рівняння видно, що логарифм терміну служби ізоляції лінійно залежить від температури.

Незважаючи на емпіричний характер рівняння (4), воно знаходить відоме практичне застосування та дозволяє виконувати орієнтовні розрахунки в тих випадках, коли вони стосуються порівняно невеликих відрізків часу та невеликих діапазонів зміни температури.

1.3 Старіння ізоляції під дією електричного поля

В процесі експлуатації ізоляція електричних машин тривалий час перебуває під робочою напругою, а крім того, періодично зазнає впливу підвищених напруг: під час профілактичних випробувань і різних хвильових явищ.

Дані експлуатації та експериментів показують, що помітний вплив електричного поля на термін служби ізоляції починає виявлятися в машинах з номінальною напругою ≥ 6 кВ.

Електричне старіння відбувається досить повільно в новій і доброякісній ізоляції, достатньо щільній і монолітній. Воно поступово прискорюється в міру розвитку загального руйнування, спричиненого різними причинами (тепловими, механічними, електричними та ін.), що супроводжується розшаруванням і розпушенням ізоляції, утворенням в ній пор, пустот (повітряних або газових прошарків), тріщини. Різні мікродфекти є в тій чи іншій мірі і в новій ізоляції, але в міру її старіння їх кількість і розміри суттєво збільшуються.

З появою таких неоднорідностей в ізоляції розвиваються іонізаційні процеси, що супроводжуються прогресуючим її руйнуванням. Іони, які розганяються в електричному полі, бомбардують поверхню ізоляційних прошарків. У порожнинах ізоляції, особливо при перенапругах, виникають часткові розряди, що руйнують окремі шари ізоляції за рахунок теплового ефекту та механічного розщеплення. Крім того, розряди супроводжуються хімічними реакціями з утворенням озону, взаємодія якого з азотом повітря та

парами води призводить до утворення азотної кислоти, яка руйнівню діє на ізоляцію.[3]

Часткові розряди іноді призводять до так званих незавершених пробоїв, коли пробивається лише частина шарів. З плином часу розряди стають частішими, а напруга їх виникнення – меншою. Цей процес завершується повним пробоем.

Окрім розрядів у товщині ізоляції, за певних умов виникають також поверхневі розряди, які супроводжуються руйнуванням зовнішніх шарів ізоляції. Якщо не вжити заходів проти коронування, то ізоляція може вийти з ладу протягом кількох місяців.

Вплив електричного поля на термін служби ізоляції досліджено ще недостатньо. Для оцінки цього впливу іноді використовують залежність виду

$$\lg T = \lg A_E - m \cdot \lg E \rightarrow T = A_E \cdot E^{-m}$$

де A_E та m – сталі, що залежать від властивостей ізоляційного матеріалу.

П р и м і т к а. Ці характеристики називаються «кривими життя» ізоляції і виражають залежність часу T до пробою зразка від величини прикладеної напруги E .

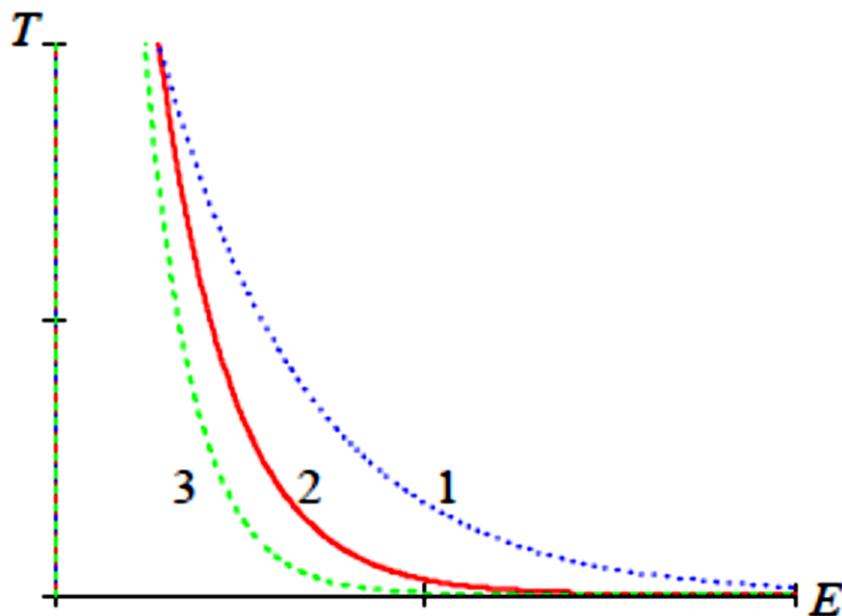


Рис.1 Характеристики «криві життя»

Геометричний зміст характеристик зрозумілий з рис. 1. Старіння ізоляції виражається у зміщенні «кривої життя» паралельно її початковому стану (характеристика – 1) ліворуч. Таке зміщення також відображає вплив зміни якості сировини або технології виготовлення ізоляції.

1.4 Старіння ізоляції під дією механічних навантажень

Одним з найважливіших факторів зносу та старіння ізоляції є механічні та термомеханічні навантаження.

До перших належать статичний тиск на ізоляцію, згинальні та скручувальні зусилля, удари та вібрація.

Термомеханічними називають навантаження, що виникають в результаті періодичних нагрівань та охолоджень обмотки.

Джерела механічних впливів: електродинамічні сили, невірноваженість обертових частин, відцентрові зусилля, поштовхи та удари, що передаються з боку приводів або механізмів.

У більшості випадків перелічені зусилля мають циклічний, знакозмінний характер, причому найбільш типовою є вібрація з частотою 100 Гц. Періодично, при перехідних процесах (пуск, реверс, коротке замикання і т.п.) амплітуди вібрацій збільшуються в десятки разів внаслідок збільшення струму в обмотках і квадратичної залежності електродинамічних зусиль від струму. Особливо помітні зусилля можуть виникати в обмотках великих машин – турбо- та гідрогенераторів.

Механічні характеристики ізоляції залежать від температури. Зі збільшенням нагрівання межа міцності ізоляції швидко знижується, причому одночасно ізоляція стає більш еластичною. Наприклад, межа міцності мікалентної компаундованої ізоляції при розтягуванні становить 3340 Н/см² при 20°С і лише 344 Н/см² при 100°С. Значення ці можуть коливатися дуже суттєво в залежності від особливостей технології, величини напруцювання та ін.

Сучасні сорти ізоляції мають значну стійкість до статичних навантажень. Однак досвід показує, що навіть за порівняно невеликих деформацій

відбувається суттєве зниження пробивної напруги, яке відбувається приблизно за лінійним законом. Для кожної температури існує певна межа деформації, після якої зняття навантаження не призводить до відновлення початкових діелектричних властивостей. Це свідчить про те, що значні деформації супроводжуються появою незворотних структурних змін у вигляді тріщин, розривів, розшарування тощо, а також перерозподілом зв'язуючого.

Хоча в середньому статичні навантаження ізоляційних матеріалів в електричних машинах зазвичай невеликі, в окремих точках можуть мати місце значні концентрації механічних напружень, що відображаються на швидкості старіння ізоляції.[4]

Більш суттєвий вплив на процес руйнування ізоляції електричних машин мають циклічні знакозмінні навантаження, що виникають під дією вібрацій різного походження. У нормальному режимі роботи вібрація зазвичай незначна за амплітудою, але число циклів за час служби машини може досягати порядку 10^{10} .

При цьому нова ізоляція, міцна та еластична, мало піддається вібраційному старінню, особливо при підвищених температурах, коли просочувальний компаунд має високу пластичність. Зі старінням ізоляції її руйнування під дією вібрації швидко прогресує. Цьому сприяє поступове послаблення кріплення обмотки як у пазах, так і в лобових частинах.

Відтворення в лабораторних умовах вібраційного старіння ізоляції пов'язане зі значними витратами часу та технічними труднощами. Тому такі випробування дозволяють дати лише непряму оцінку цього явища, зокрема:

- вібрація є чинником, що діє повільно, її наслідки виявляються лише через значну кількість циклів;

- в ізоляції, підданій штучному старінню, під впливом вібрації спостерігаються дефекти, близькі за своїм характером до змін в ізоляції зі значним напруцюванням;

- вібраційне старіння викликає найбільш різке погіршення стану ізоляції в місцях виходу стрижнів або катушок з пазів, передбачається, що структурні

зміни, цілком аналогічні спостережуваним після прискорених випробувань, мають місце при перехідних процесах, коли амплітуди вібрацій досягають значних величин;

– дія вібрації на виспні обмотки виражається в поступовому руйнуванні просочувального лаку, в результаті чого порушується цементация обмотки і окремі провідники набувають певної свободи переміщення. Це призводить до руйнування міжвиткової ізоляції в точках дотику провідників.

З досвіду випливає, що вібрація скорочує термін служби ізоляції в декілька разів.

Старіння ізоляції низьковольтних машин, що працюють при помірних температурах обмоток, взагалі не може бути пояснено за допомогою теплових або електричних явищ. В цьому випадку найбільш вірогідними причинами, що викликають поступове руйнування ізоляції, є механічні навантаження та хімічний вплив навколишнього середовища.

Певну роль в процесах руйнування ізоляції відіграють термомеханічні явища, пов'язані з різницею коефіцієнтів теплового розширення ізоляції та провідників. Це призводить до утворення тріщин, розбухання ізоляції, розшарування її та взаємного зміщення окремих шарів.

1.5 Старіння ізоляції під дією вологи та хімічно активних речовин

Важливим фактором старіння ізоляції є вплив хімічно активних середовищ і вологи. Волога проникає в ізоляцію головним чином у ті періоди, коли остання перебуває в неробочому стані. Особливо інтенсивно процес відбувається при охолодженні ізоляції після її роботи, оскільки в цей період тиск в її порах і капілярах дещо нижчий за атмосферний. Під дією вологи відбувається гідролітичне руйнування ізоляційних матеріалів, що полягає в руйнуванні полімерних ланцюгів. Періодичне проникнення вологи та видалення її збільшує пористість ізоляції. Ці процеси розвиваються паралельно з іншими явищами старіння ізоляції та взаємно стимулюють один одного.

Дуже шкідливу дію на ізоляцію чинять хімічно активні речовини: луги, кислоти та їх ангідриди, що знаходяться в навколишньому середовищі. Ізоляцію руйнують також масла і пари розчинників. Пил, що міститься в навколишньому повітрі, чинить на ізоляцію абразивну дію.[5]

Сукупний вплив на термін служби ізоляції температури, вологості та агресивних середовищ можна оцінити за наступним рівнянням:

$$T = A \cdot e^{-B/\theta} \cdot C^{-m} \cdot \eta^{-n}$$

де C – концентрація агресивного агента; η – відносна вологість.

Таким чином, процеси старіння ізоляції підтримують і активізують один одного. Руйнування ізоляції відбувається поступово, а початок йому дається процесом теплового старіння.

Висновки по першому розділу.

Проаналізувавши основні фактори, що впливають на стан ізоляції асинхронних двигунів, можна стверджувати, що виникнення несправностей є результатом комплексної дії електричних, термічних, механічних та хімічних чинників. До електричних причин належать перенапруги, як комутаційні, так і атмосферні, що призводять до пробоя ізоляції. Термічні навантаження, викликані перевантаженнями двигуна, недостатнім охолодженням або високою температурою навколишнього середовища, призводять до деградації ізоляційних матеріалів та зниження їхніх діелектричних властивостей. Механічні причини, такі як вібрації, механічні пошкодження під час монтажу або експлуатації, сприяють утворенню тріщин та відшарувань ізоляції. Хімічний вплив вологи, масел, пилу та агресивних середовищ також негативно впливає на стан ізоляції, прискорюючи процес її руйнування.

Таким чином, забезпечення надійної та безперебійної роботи асинхронних двигунів вимагає комплексного підходу, що включає правильний вибір двигуна, його коректний монтаж та експлуатацію, своєчасне технічне обслуговування та моніторинг стану ізоляції.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.

2.1 Тенденції розвитку діагностики міжвиткової ізоляції статора асинхронних двигунів.

Міжвиткове замикання обмотки статора є однією з найпоширеніших несправностей асинхронних двигунів, що призводить до значних фінансових втрат через пошкодження обладнання та простої виробництва. Тому, своєчасне та точне діагностування цієї несправності є критично важливим для забезпечення надійної та безперебійної роботи промислових установок. Сучасні методи діагностування пропонують широкий спектр можливостей, від простих вимірювань до складних аналізів сигналу.

Традиційні методи, такі як вимірювання опору ізоляції та перевірка коефіцієнта абсорбції, хоча й корисні, мають обмежену чутливість до міжвиткових замикань на початкових стадіях розвитку. Більш ефективними є методи, що базуються на аналізі спектру струму статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA). MCSA дозволяє виявляти специфічні гармоніки в спектрі струму, які вказують на наявність дефектів ізоляції. Удосконалені алгоритми, такі як метод Парка та перетворення Вігнера-Вілля, підвищують чутливість MCSA до незначних змін у струмі статора.

Окрім того, все більшого поширення набувають методи, що базуються на аналізі напруги зворотної послідовності (Negative Sequence Voltage Analysis, NSVA). Міжвиткове замикання призводить до асиметрії напруги та струмів, що відображається на величині напруги зворотної послідовності. Аналіз цієї напруги дозволяє ідентифікувати та оцінити ступінь пошкодження ізоляції.

У майбутньому, очікується подальший розвиток методів діагностування, що базуються на штучному інтелекті та машинному навчанні. Застосування цих технологій дозволить автоматизувати процес діагностування, підвищити його точність та передбачати розвиток несправностей на ранніх стадіях, тим самим

мінімізуючи потенційні збитки. Впровадження сучасних методів діагностування міжвиткової ізоляції є ключовим фактором забезпечення надійної та ефективної роботи асинхронних двигунів в умовах сучасного виробництва.

2.2 Сучасні підходи до діагностики міжвиткової ізоляції статора асинхронних двигунів

2.2.1 Діагностика несправностей трифазного синхронного двигуна з електричним збудженням за допомогою адаптивного порогового алгоритму

Діагностика несправностей трифазних синхронних двигунів з електричним збудженням є критично важливою для забезпечення надійної та безперебійної роботи промислових установок. Традиційні методи, засновані на аналізі параметрів струму та напруги, часто виявляються недостатньо ефективними для виявлення ранніх стадій дефектів. У цьому контексті, застосування адаптивного порогового алгоритму представляє собою перспективний підхід до підвищення точності та оперативності діагностики.

Адаптивний пороговий алгоритм, на відміну від фіксованих порогів, динамічно змінює свої граничні значення, враховуючи поточний робочий режим двигуна та його специфічні характеристики. Це дозволяє мінімізувати кількість хибних спрацювань та покращити чутливість до незначних змін, які можуть сигналізувати про виникнення несправності. Алгоритм використовує інформацію про струм статора, струм збудження та напругу живлення для формування діагностичних ознак, які порівнюються з адаптивними порогоми.

Перевагою використання адаптивних порогів є їх здатність компенсувати вплив змін навантаження, температури та інших факторів, що можуть спотворювати діагностичні сигнали. Це особливо важливо для синхронних двигунів, робота яких характеризується змінними навантаженнями та складними режимами.

Таким чином, застосування адаптивного порогового алгоритму у системі діагностики трифазного синхронного двигуна з електричним збудженням дозволяє значно підвищити надійність та ефективність виявлення

несправностей, що, в свою чергу, сприяє зменшенню простоїв обладнання та запобіганню аварійним ситуаціям. Подальші дослідження у цьому напрямку мають бути спрямовані на оптимізацію алгоритму та розширення переліку діагностованих дефектів.

2.2.2 Діагностика та класифікація пошкоджень ізоляції обмотки статора трифазного асинхронного двигуна за допомогою вейвлету та MNN

Зростаюча індустріалізація потребує методів діагностики початкових несправностей в асинхронних двигунах на початковій стадії, щоб уникнути простою виробництва. У зв'язку з цим виявлення несправностей у трифазному асинхронному двигуні на ранній стадії є життєво важливим компонентом у переробних галузях промисловості. Неврівноваженість напруги живлення, знижена напруга та раптові зміни навантаження є іншими неминучими проблемами, які можуть викликати струмові сигнатури, подібні до пошкоджень ізоляції обмотки статора. У цій статті запропоновано надійний метод виявлення, класифікації різних пошкоджень ізоляції обмотки статора та визначення ступеня тяжкості міжвиткових замикань статора, коли асинхронний двигун працює в різних умовах експлуатації. У представленій роботі ознаки збурень витягуються з трифазних залишків, отриманих за допомогою вейвлет-мультироздільної здатності. Реалізовано три модульні нейронні мережі, одна з яких використовується для класифікації різних збурень, таких як однофазний режим, незбалансованість напруги живлення, знижена напруга, міжвиткові замикання статора, раптова зміна навантаження та фазні несправності, друга – для класифікації фазних пошкоджень обмотки статора, а третя – для ідентифікації пошкодженої фази та ступеня тяжкості міжвиткових замикань статора. Результати моделювання та експериментальні дані демонструють достовірність запропонованого методу та покращення точності класифікації порівняно з традиційним методом.

2.2.3 Діагностика несправностей двигуна за допомогою алгоритму негативного відбору

Діагностика несправностей двигуна є критично важливим завданням для забезпечення його надійної та ефективної роботи. З розвитком технологій, все більше уваги приділяється використанню інтелектуальних систем для автоматизації цього процесу. Одним з перспективних підходів є застосування алгоритму негативного відбору.

Алгоритм негативного відбору, натхненний імунною системою людини, передбачає створення моделі нормального стану двигуна. Ця модель будується шляхом навчання на даних, що представляють роботу двигуна в справному стані. Будь-яке відхилення від цієї моделі, виявлене при моніторингу поточних даних, розглядається як потенційна несправність.

Перевагою цього підходу є його здатність виявляти не тільки відомі, але й непередбачувані поломки. Оскільки алгоритм не потребує знання конкретних ознак несправностей, він може бути використаний для діагностики широкого спектру проблем, включаючи ті, що раніше не зустрічалися.

Однак, ефективність алгоритму негативного відбору залежить від якості даних, що використовуються для навчання. Важливо мати репрезентативний набір даних, що охоплює всі можливі режими роботи двигуна в справному стані. Крім того, необхідна точна настройка параметрів алгоритму для мінімізації кількості хибних спрацювань.

В цілому, використання алгоритму негативного відбору представляє собою багатообіцяючий напрямок у діагностиці несправностей двигуна. Подальші дослідження та розробки в цій області можуть значно підвищити надійність та безпеку експлуатації двигунів різного типу.

2.2.4 Діагностика початкових пошкоджень статора асинхронного двигуна за допомогою вейвлет-аналізу.

Діагностика стану трифазних асинхронних двигунів (АД) відіграє важливу роль у забезпеченні їх надійної роботи та запобіганні непередбачуваним відмовам. Аналіз струмових сигнатур двигуна (АСДД) є добре відомим методом діагностики початкових пошкоджень статора. Традиційний АСДД базується на аналізі частотного спектру, отриманого за допомогою перетворення Фур'є. Однак, для адекватної діагностики необхідний аналіз у часовій та частотній областях.

Представлена робота пропонує алгоритм на основі вейвлет-аналізу для виявлення початкових пошкоджень статора та ідентифікації пошкодженої фази в трифазних АД. Для моделювання міжвиткових замикань використано параметричну модель 3-сильного АД з розподіленими параметрами. Параметри моделі розраховані на основі експериментів, проведених на реальному 3-сильному АД. Валідація моделі виконана шляхом порівняння частотної характеристики змодельованого двигуна з частотною характеристикою, виміряною на практичній машині.

Запропонований алгоритм використовує адаптивну логіку на основі порогових значень для виявлення міжвиткових замикань та ідентифікації пошкодженої фази. Алгоритм валідовано на даних, отриманих від спеціально розробленого 3-сильного АД. Результати експериментів та моделювання показують, що запропонований алгоритм ефективно виявляє міжвиткові замикання та ідентифікує пошкоджену фазу навіть за наявності незбалансованої напруги живлення. Таким чином, вейвлет-аналіз представляє собою перспективний інструмент для надійної та точної діагностики початкових пошкоджень статора АД.

2.2.5 Виявлення та діагностика несправностей на основі вейвлетів за допомогою онлайн-MCSA несправностей обмотки статора, спричинених порушенням ізоляції в промисловій асинхронній машині

У цій статті представлено новий ефективний підхід до виявлення та діагностики несправностей (FDD) для онлайн-моніторингу стану (CM)

несправностей обмотки статора, спричинених пошкодженням ізоляції в промислових асинхронних машинах. Методи FDD широко класифікуються на три категорії: підходи на основі вилучення сигнатур, моделей та знань. Останні досягнення в обчислювальній продуктивності та сенсорних технологіях дозволяють використовувати передові системи для досягнення цієї мети. Передова система діагностики з використанням комп'ютерної підтримки використовує розпізнавання образів, яке в основному складається з вилучення ознак, вибору ознак та класифікації ознак відповідно. Впровадження вейвлетів у процес вилучення ознак на основі сигнатур разом із класифікацією ознак за допомогою підходу на основі знань використовується для надійної автоматичної ідентифікації несправностей обмотки статора. На основі математичного моделювання міжвиткового замикання обмотки статора розроблено модель Simulink для перевірки математично отриманих результатів, і показано, що результати добре узгоджуються з експериментальними даними.

2.2.6 Нейронечіткий класифікатор для ідентифікації міжвиткових несправностей обмотки статора промислової машини

Міжвиткові замикання в обмотці статора промислової машини є однією з найбільш поширених причин її виходу з ладу. Раннє виявлення цих несправностей критично важливе для забезпечення безперебійної роботи обладнання та уникнення значних економічних втрат. Традиційні методи діагностики часто вимагають демонтажу машини та проведення трудомістких вимірювань. В останні роки все більшої популярності набувають інтелектуальні системи моніторингу, які використовують дані, отримані безпосередньо під час роботи обладнання.

У цій роботі пропонується підхід до ідентифікації міжвиткових несправностей, що базується на використанні нейронечіткого класифікатора. Цей тип класифікатора поєднує в собі переваги нейронних мереж (здатність до навчання на даних та розпізнавання складних закономірностей) та нечіткої логіки (здатність до обробки нечіткої та невизначеної інформації). Це дозволяє

ефективно класифікувати стан обмотки статора, використовуючи інформацію про струми та напруги, виміряні в процесі роботи машини.

Представлений нейронечіткий класифікатор складається з декількох шарів, кожен з яких виконує певні функції: фазифікація вхідних даних, застосування нечітких правил, агрегування результатів та дефазифікація. Навчання класифікатора відбувається на основі даних, зібраних з машин, що працюють у різних режимах та з різним ступенем ушкодження обмотки статора.

Результати моделювання та експериментальних досліджень демонструють високу ефективність запропонованого нейронечіткого класифікатора у виявленні міжвиткових несправностей на ранніх стадіях. Це дозволяє своєчасно виявити проблему, вжити необхідні заходи для запобігання подальшому пошкодженню обладнання та забезпечити його надійну та безперебійну роботу. Таким чином, використання нейронечіткого класифікатора є перспективним підходом до моніторингу та діагностики промислових машин.

2.2.7 Гібридна модельно-орієнтована система діагностики нечіткої логіки для несправностей статора трифазних асинхронних двигунів з кліткорізом

Діагностика несправностей асинхронних двигунів з кліткорізом є критично важливою для забезпечення їх надійної та ефективної роботи, особливо в промислових застосуваннях. Традиційні методи часто стикаються з проблемами обробки нечіткої та неповної інформації, характерної для реальних умов експлуатації. Тому, розробка гібридної модельно-орієнтованої системи діагностики, що поєднує потужність математичного моделювання та гнучкість нечіткої логіки, представляє значний інтерес.

Представлена концепція системи базується на інтеграції моделі асинхронного двигуна, яка описує його динамічну поведінку в нормальному та несправному станах, з системою нечіткої логіки. Математична модель генерує очікувані значення параметрів, таких як струм статора та напруга. Ці значення, разом з фактичними вимірюваннями, використовуються як вхідні дані для

системи нечіткої логіки. Нечітка логіка, в свою чергу, дозволяє враховувати невизначеності та похибки вимірювань, а також екстрагувати діагностичну інформацію на основі експертних знань.

Переваги такої гібридної системи полягають у її здатності ефективно обробляти нечіткі дані, враховувати складні взаємозв'язки між параметрами двигуна та забезпечувати більш точну діагностику несправностей статора, таких як міжвиткове замикання. Використання моделі двигуна дозволяє виявляти відхилення від нормальної поведінки, а нечітка логіка допомагає класифікувати ці відхилення на основі чітких правил, що відображають знання експертів. Такий підхід сприяє підвищенню надійності та безпеки експлуатації асинхронних двигунів, а також зниженню витрат на обслуговування та ремонт.

2.2.8 Автоматичний моніторинг стану промислових машин з використанням перетворювача Холла на основі FSA

Надійний та швидкий моніторинг стану промислової машини в режимі реального часу є потребою вкрай важливою при вирішенні критичних неконтрольованих несправностей машин, таких як пошкодження ізоляції обмотки статора, що є більш помітним під час роботи в складних умовах. Раннє виявлення несправностей обмотки статора, особливо несправностей типу "виток-виток", що виникають переважно як коротке замикання між обмотками однієї фази через пошкодження ізоляції, може запобігти поширенню несправності та захистити обмотку від подальших пошкоджень ізоляції. У цій статті представлено аналіз усталеного та перехідного режимів трифазного асинхронного двигуна за допомогою аналізатора сигнатур несправностей на основі перетворювача Холла за різних умов несправності. Було реалізовано числову модель з несправностями обмотки статора, враховуючи дві основні несправності, такі як несправність типу "виток-виток статора" (STTF) та несправність фази статора (SPhN), з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). МСЕ отримує симетричні складові струму двигуна за різних умов несправності за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Крутний

момент машини також був змодельований та порівняний у справному та несправному стані. Чисельна модель методом скінченних елементів (МСЕ) змогла ідентифікувати справну та несправну асинхронну машину з точністю 95% за допомогою аналізу скінченних елементів (МСЕ), і це було перевірено за допомогою результатів експериментальної установки за тих самих робочих умов.

2.2.9 Аналіз пошкоджень багаторівневої обмотки статора на ізоляційному матеріалі промислового асинхронного двигуна

Дослідження багаторівневого пошкодження обмотки статора на ізоляційному матеріалі промислового асинхронного двигуна на початковій стадії може досягти значної економії енергії, мінімізувати витрати на обслуговування та збільшити термін служби. Раннє виявлення має головну перевагу в запобіганні виходу з ладу двигуна, який поступово призводить до катастрофічного або повного зупинення. У цій статті багаторівневе пошкодження обмотки статора промислового асинхронного двигуна в числовій моделі було розроблено та реалізовано за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Оскільки багаторівневе пошкодження обмотки статора становить значну часову та частотну області, сигнатура двигуна аналізується за допомогою методу на основі час-частоти з використанням вейвлетів. Раннє виявлення багаторівневих пошкоджень обмотки статора використовує сигнатури з експериментальної установки як справних, так і несправних двигунів шляхом поєднання як модульних, так і віртуальних приладів. Результати МСЕ потім були перевірені в тих самих робочих умовах з використанням експериментальної установки. Було помічено, що результати, отримані за допомогою МСЕ, добре узгоджуються з експериментальною установкою. Зміна частотної складової в частотній характеристиці датчика для умов несправності на різних рівнях серйозності свідчить про наявність кількох частотних діапазонів. Коли двигун перебував під впливом 50% короткого замикання статора, спостерігалася аналогічна смуга частот між 700-800 Гц. Як результат, запропоноване дослідження було точним з коефіцієнтом кореляції 0,96.

2.2.10 Ефективна нейромережева модель для виявлення несправностей у промислових машинах у режимі реального часу

Асинхронні машини мають значний попит у промисловості, оскільки вони використовуються для великомасштабного виробництва і, отже, вразливі як до електричних, так і до механічних несправностей. Автоматизований безперервний моніторинг стану промислових машин для виявлення цих несправностей став однією з ключових областей досліджень протягом останнього десятиліття. Серед різних несправностей раннє виявлення пошкодження ізоляції в обмотці статора має значний попит, оскільки воно часто трапляється і становить 37% від загальної кількості відмов машин. Крім того, ця несправність, якщо її виявити на початковій стадії, може переважно зменшити час простою машини та витрати на обслуговування. У запропонованій роботі дані сигналу струму статора в часовій області з експериментальної установки як справних, так і несправних асинхронних машин використовуються для навчання моделей штучних нейронних мереж з метою визначення стану машини. Щоб скоротити час, необхідний для навчання нейронної мережі, ознаки витягуються з необроблених даних сигналу струму, а потім передаються до класифікаторів. Кількісно визначено різні характеристики продуктивності одинадцяти моделей нейронних мереж, такі як кількість ознак, кількість епох запуску, час навчання, функції активації, швидкість навчання, функція втрат моделі та точність щодо кожної моделі. Лише кілька нейронних мереж змогли класифікувати справні та несправні асинхронні машини з ефективністю 94,73% при узагальненні нейромережевої моделі з використанням необроблених даних, тоді як зі статистичними даними ефективність становила 98,43%.

2.2.11 Експериментальний підхід до виявлення та кількісної оцінки короткого замикання на обмотках асинхронної машини з подвійним живленням (DFIM)

Асинхронна машина з подвійним живленням (DFIM) відіграє важливу роль у сучасних енергетичних системах, зокрема, у вітрогенераторах. Її надійна

робота є критичною, а пошкодження, такі як короткі замикання на обмотках, можуть призвести до значних збоїв. Тому розробка ефективних методів діагностики таких пошкоджень є актуальним завданням.

Експериментальний підхід до виявлення та кількісної оцінки короткого замикання на обмотках DFIM передбачає комплексне дослідження зміни електричних параметрів машини за різних режимів роботи. Він ґрунтується на аналізі струмів статора та ротора, напруг, а також розрахунку гармонічного складу сигналів. Зокрема, наявність короткого замикання проявляється у збільшенні амплітуди певних гармонік, зміні фазових співвідношень та асиметрії струмів.

Для кількісної оцінки ступеня пошкодження застосовуються методи математичного моделювання та порівняння експериментальних даних з результатами моделювання. Це дозволяє визначити кількість витків, залучених у коротке замикання, та оцінити вплив пошкодження на характеристики DFIM. Важливим аспектом є використання сучасних датчиків та вимірювального обладнання для забезпечення високої точності та чутливості експерименту.

Отже, експериментальний підхід, з використанням ретельного вимірювання електричних величин та їхнього аналізу, є ефективним інструментом для виявлення та кількісної оцінки коротких замикань на обмотках DFIM, що сприяє підвищенню надійності та ефективності роботи даного типу електричних машин.

2.2.12 Виявлення міжвиткового короткого замикання на статорі асинхронної машини з подвійним живленням за допомогою периметрального аналізу

Міжвиткові короткі замикання (МКЗ) в обмотках статора асинхронних машин з подвійним живленням (АМПЖ) є серйозною проблемою, що може призвести до значних збитків, зупинки технологічного процесу та навіть аварійних ситуацій. Ефективне виявлення таких пошкоджень є критично

важливим для забезпечення надійної та безпечної роботи електроприводу. Одним з перспективних методів діагностики МКЗ є периметральний аналіз.

Периметральний аналіз базується на моніторингу та аналізі розподілу магнітного поля навколо статора. Наявність МКЗ призводить до асиметрії магнітного поля, що проявляється у зміні амплітуди та фази напруженості магнітного поля, вимірюваної вздовж периметру статора. Дані зміни можуть бути зафіксовані за допомогою спеціальних датчиків магнітного поля, розташованих навколо статора, та оброблені за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Перевагою периметрального аналізу є неінвазивність методу, оскільки датчики встановлюються зовні машини, що дозволяє проводити діагностику без розбирання обладнання. Крім того, метод має високу чутливість до невеликих МКЗ, що дає можливість виявляти пошкодження на ранніх стадіях розвитку.

Впровадження системи діагностики МКЗ на основі периметрального аналізу дозволяє значно підвищити надійність та безпеку експлуатації АМПЖ, зменшити ризик аварійних ситуацій та знизити витрати на ремонт та простій обладнання. Подальші дослідження в даній області повинні бути спрямовані на оптимізацію конфігурації датчиків, розробку ефективних алгоритмів обробки даних та створення автоматизованих систем діагностики, що дозволять оперативно виявляти та локалізувати МКЗ в обмотках статора АМПЖ.

2.2.13 Виявлення міжвиткового короткого замикання в асинхронній машині за допомогою спостерігача ковзного режиму високого порядку: моделювання та експериментальна перевірка

Забезпечення надійності та безперебійної роботи асинхронних машин є критично важливим для багатьох промислових застосувань. Одним з найбільш поширених типів пошкоджень в таких машинах є міжвиткове коротке замикання (МВКЗ) обмотки статора, яке може призвести до серйозних наслідків, включаючи зниження ефективності, перегрів, і зрештою, вихід машини з ладу.

Традиційні методи виявлення МВКЗ, засновані на аналізі спектру струму, часто вимагають складної обробки сигналу та чутливі до шумів. Тому, розробка більш ефективних та надійних методів діагностики є актуальною науково-технічною задачею.

У цій роботі представлено підхід до виявлення МВКЗ в асинхронній машині на основі застосування спостерігача ковзного режиму високого порядку (СКРВП). СКРВП забезпечує робастну оцінку станів машини та дозволяє виявляти навіть незначні зміни в її динаміці, що викликані МВКЗ. Моделювання в програмному середовищі підтверджує чутливість розробленого спостерігача до виникнення МВКЗ.

Експериментальна перевірка, проведена на реальній асинхронній машині, підтверджує ефективність запропонованого підходу. Результати показують, що СКРВП здатний швидко та надійно виявляти МВКЗ на ранніх стадіях розвитку, що дозволяє своєчасно вжити заходів для запобігання більш серйозним пошкодженням.

Висновки цієї роботи демонструють перспективність використання СКРВП для діагностики МВКЗ в асинхронних машинах, пропонуючи ефективний та надійний інструмент для підвищення надійності та безпеки промислових електроприводів.

Висновки по другому розділу

Розділ присвячений сучасним методам діагностування міжвиткової ізоляції обмотки статора асинхронних двигунів, підкреслює критичну важливість своєчасного виявлення пошкоджень для забезпечення надійної та ефективної роботи обладнання. Аналіз розглянутих методів дозволяє зробити висновок про відсутність універсального рішення, що однаково ефективно виявляє міжвиткові замикання на різних стадіях розвитку та в різних умовах експлуатації.

Більшість сучасних методів базуються на аналізі сигналів струму, напруги, вібрації та магнітного поля. Вони вимагають застосування складного математичного апарату та розвиненого програмного забезпечення для обробки даних та виявлення характерних ознак міжвиткових замикань. Важливою

тенденцією є інтеграція цих методів у системи онлайн-моніторингу стану двигунів, що дозволяє здійснювати безперервний контроль та оперативно реагувати на виявлені дефекти.

Перспективним напрямком досліджень є розробка комбінованих методів, що поєднують переваги декількох різних підходів для підвищення точності та надійності діагностики. Необхідною умовою успішного впровадження сучасних методів є наявність кваліфікованого персоналу, здатного інтерпретувати результати діагностики та приймати обґрунтовані рішення щодо подальшої експлуатації обладнання. Зрештою, ефективне діагностування міжвиткової ізоляції є запорукою зменшення витрат на ремонт та простій обладнання, а також підвищення безпеки виробництва.

РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА КАБЕЛЮ ЖИВЛЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛОКАЛЬНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.

У сучасних економічних реаліях, коли питання енергоефективності набувають дедалі більшої ваги, перед підприємствами постає нагальна потреба в оптимізації споживання електроенергії. Одним з ключових аспектів цієї оптимізації є зниження споживання реактивної потужності в електричних мережах. Надмірна генерація реактивної потужності призводить до збільшення втрат в лініях електропередачі, зниження коефіцієнта потужності та, як наслідок, до підвищення витрат на електроенергію.

Водночас, забезпечення надійного пуску асинхронних двигунів (АД) залишається критично важливим для безперебійного функціонування багатьох виробничих процесів. Ненадійний пуск АД може призвести до збоїв в роботі обладнання, пошкодження двигуна та, у підсумку, до фінансових втрат. Контроль величини опору ізоляції АД є важливим фактором забезпечення його надійного пуску, оскільки дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційні проблеми, пов'язані з погіршенням ізоляції обмоток.

Порушення технологічного циклу є суттєвим чинником, який впливає на собівартість виробленої продукції та на економічні показники будь-якого підприємства. Більше 70% навантаження в металургії, гірничодобувній, газодобувній та інших галузях припадає на асинхронні двигуни, із яких 30 – 40% працюють із тривалими або короткочасними технологічними паузами або у режимі гарячого резерву. Електродвигуни, що експлуатуються в таких режимах, стикаються із підвищеною вологістю, запиленістю та іншими чинниками агресивного середовища, що впливають на їхню надійність та тривалість служби.

Надійність пуску асинхронного двигуна (АД) є визначальним фактором його ефективної роботи та довговічності. Серед численних чинників, що

впливають на цей процес, першочергове значення має справність ізоляції обмоток статора. [18]. Справна ізоляція гарантує необхідний рівень електричної міцності, запобігаючи пробою обмоток під час пускових перенапруг, які значно перевищують номінальну напругу. Пробій ізоляції не лише виводить двигун з ладу, але й створює потенційну загрозу для безпеки обладнання та персоналу. Пуск АД, коли величина опору ізоляції статорних обмоток нижче 0,5 МОм, заборонено. У більшості випадків (50 – 90%) відмови АД пов'язані з пошкодженням ізоляції обмоток.

Асинхронні двигуни (АД) є найбільш поширеним типом електричних машин, широко використовуваних в промисловості. Разом з тим, вони є значними споживачами реактивної електричної енергії, що негативно впливає на коефіцієнт потужності енергосистеми та призводить до збільшення втрат в мережах електропостачання.[5] Тому, питання компенсації реактивної потужності, що споживається АД, є важливим завданням енергозбереження.

Серед існуючих методів компенсації, локальна компенсація реактивної потужності, шляхом розміщення батарей конденсаторів (БК) безпосередньо в точках підключення АД, є найбільш ефективним. Цей підхід дозволяє значно зменшити потік реактивної потужності по мережі від підстанції до двигуна, знижуючи навантаження на трансформатори та кабельні лінії.

Актуальна задача – зниження собівартості продукції, що випускається підприємством, що забезпечує компенсація реактивної потужності, а в період технологічної паузи використовувати потужність, накопичену в БК для контролю зміни величини опору ізоляції.

Згідно з правилами ПУЕ [18], при відключенні БК від мережі вони замикаються на розрядні опори або лампи розжарювання. Такі перемикання дозволяють перетворити накопичену в БК електричну енергію в теплову.

Схема підключення БК до обмоток статора АД наведена на рис. 1, схема заміщення після зупинки АД – на рис.3. 2.

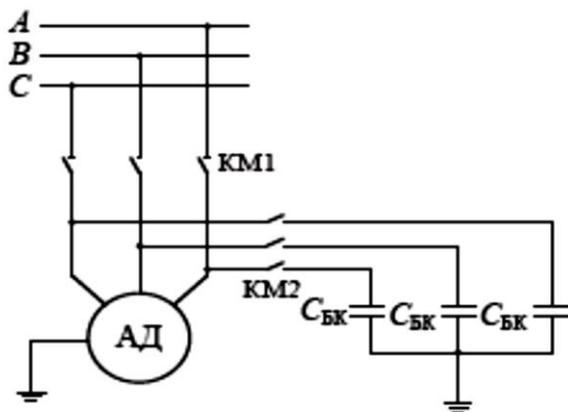


Рис. 3. 1. Схема підключення батареї конденсаторів: $C_{БК}$ – ємність батареї конденсаторів із залишковою напругою після її відключення від мережі

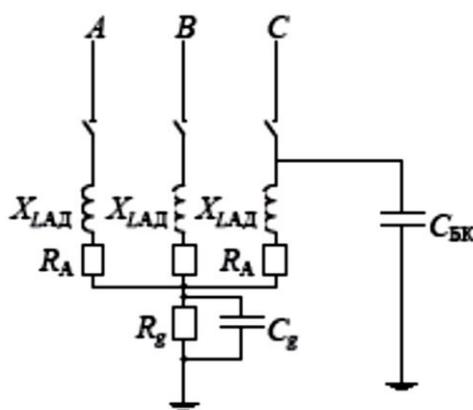


Рис. 3.2. Схема заміщення після зупинки асинхронного двигуна:
 X_{LAD}, R_{AD} – індуктивний та активний опори обмотки статора асинхронного двигуна; R_g, C_g – активна та ємнісна складові опору ізоляції

Для розрахунку, приймаючи опір діелектрика активним і не враховуючи активний опір обмотки статора АД, схему заміщення показано на рис. 3.

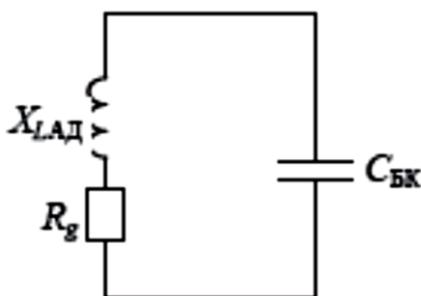


Рис. 3.3. Схема заміщення

Напруга яка залишилася на конденсаторі $U_{\text{БК}}$ викликає в колі струм і БК починає розряджатися. Рівняння, представлено на рис.3.3, має вигляд

$$E = IR_g + U_{\text{БК}}, \quad (1)$$

де $E = -L_{\text{АД}} \frac{dI}{dt}$; $L_{\text{АД}}$ – індуктивність обмотки; $U_{\text{БК}} = -\frac{1}{C_{\text{БК}}} \int I dt$.

Після підстановки

$$L_{\text{АД}} \frac{dI}{dt} - IR_g - \frac{1}{C_{\text{БК}}} = 0 \quad (2)$$

Похідна представляється диференціальним рівнянням другого порядку.

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_g}{L_{\text{АД}}} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{L_{\text{АД}} C_{\text{АД}}} = 0 \quad (3)$$

Рішення якого є

$$i = \frac{U}{2L\gamma} e^{P_1 t} + \frac{U}{2L\gamma} e^{P_2 t} \quad (4)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt{\left(\frac{R_{\text{АД}}}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}}; \quad P_{1,2} = -\frac{R_{\text{АД}}}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_{\text{АД}}}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}}.$$

Перехідний процес в колі залежить від параметрів R_g , $C_{\text{БК}}$, $L_{\text{АД}}$. При співвідношенні $\frac{1}{C_{\text{АД}} L_{\text{АД}}} < \left(\frac{R_{\text{АД}}}{2L_{\text{АД}}}\right)^2$ перехідний процес у колі має аперіодичний характер.

Зміна напруги $U_{\text{БК}}$ залежить від величини R_g – активного опору діелектрика. Результати математичного моделювання розряду БК показано на рис.3.4. Моделювання процесу мають параметри: двигуни серії 4А;

короткозамкнений ротор Ф112М4У3 потужністю $P = 4,5$ кВт і напругою 380 В; $\cos\alpha \approx 0,85$; число обертів 1480 об/хв.

Моделювання дозволили розробити спосіб контролю ізоляції АТ та кабелю живлення [19].

При робочому режимі БК підключена паралельно до обмоток статора АД, проходить компенсація реактивної потужності. Вимірюється швидкість зміни напруги на БК. За зміною значень швидкості напруги визначають міжфазне, коротке замикання в мережі, неповнофазні режими роботи АД, з подальшою відключенням двигуна від мережі.

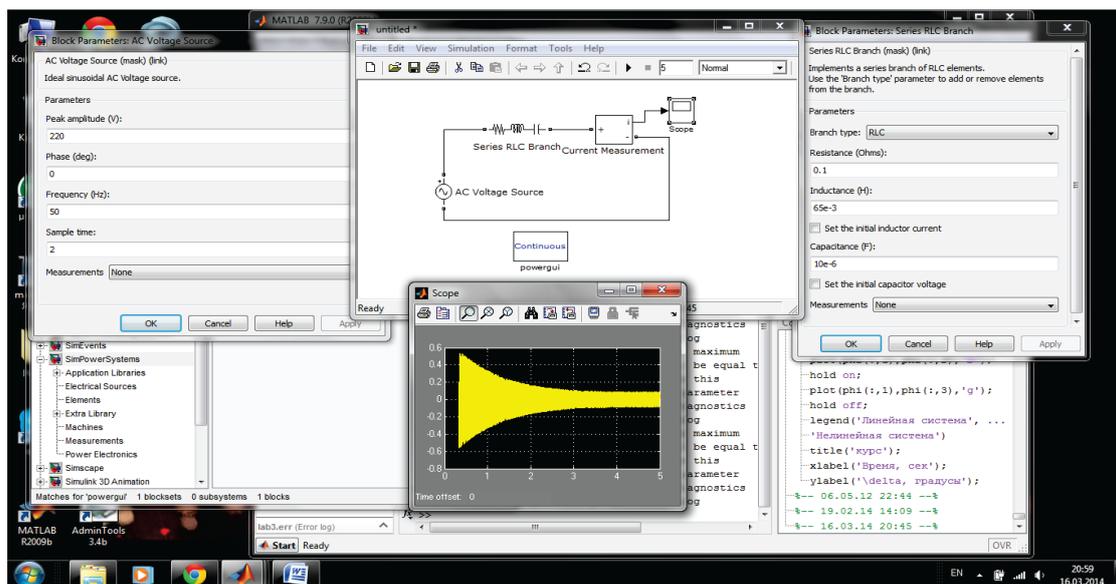


Рис.3. 4. Результат моделювання аперіодичного процесу

Якщо відключенні АД і БК від живильної мережі напруга $U_{БК}$ на одному з конденсаторів $C_{БК}$ залишається $U_{БК} = U_{\phi}$ або $\frac{1}{3}U_{\phi}$. Конденсатор замикається на опір ізоляції і опір обмотки статора.

У роботі АД процеси старіння ізоляції обмоток АД і кабелю протікають значно швидше, ніж у конденсатора, опір ізоляції руйнується. Якщо опори ізоляції обмоток АД і кабелю стануть меншими за величину 0,5 МОм, буде виконуватися нерівність

$$Z_{gAD} \ll Z_{gBK}.$$

Спад напруги на конденсаторі буде у 50 і більше разів інтенсивнішою, ніж при значенні нової ізоляції.

Якщо $\frac{1}{C_{AD}L_{AD}} < \left(\frac{R_{AD}}{2L_{AD}}\right)^2$ корені виразу будуть комплексними, коефіцієнт

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{C_{BK}L_{AD}} - \left(\frac{R_{AD}}{2L}\right)^2}.$$

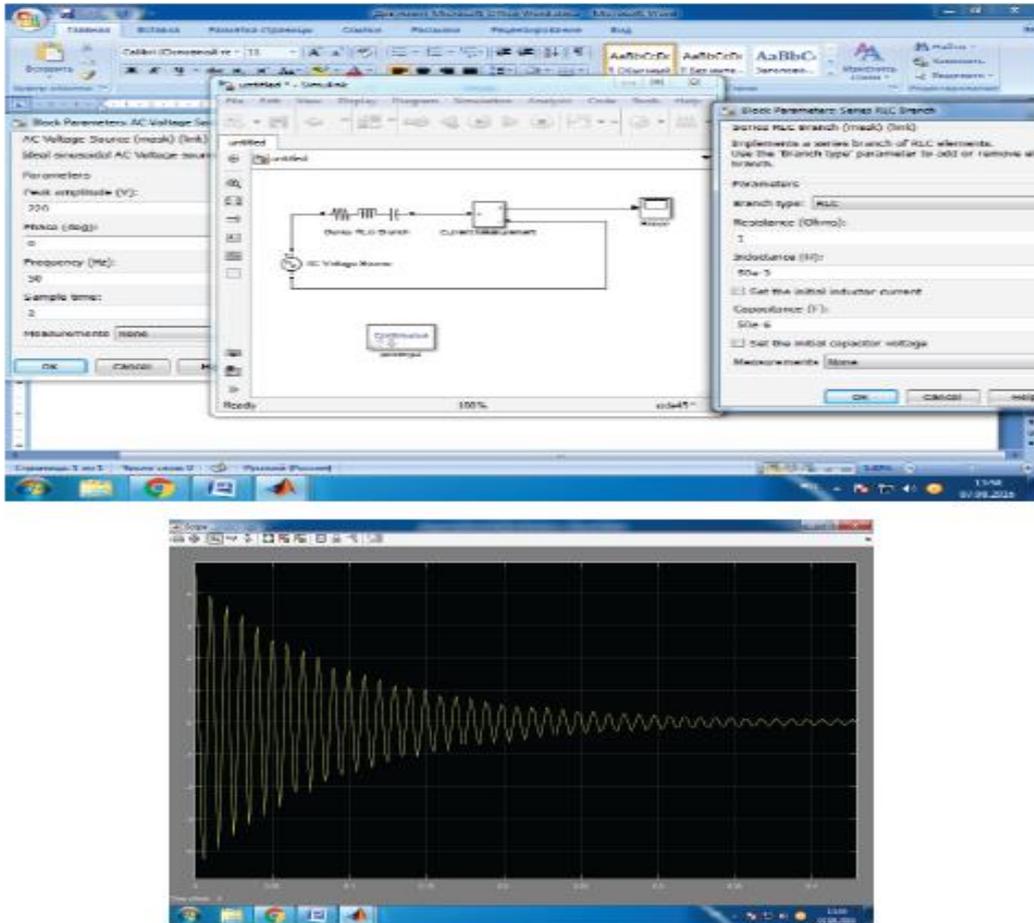


Рис. 3.5. Моделювання періодичного процесу

Перехідний процес буде періодичним. Розряду конденсатора показано на рис.3.5. Розглядання перехідних процесів дозволило розробити структуру пристрою захисту АД та алгоритм його роботи [19].

Блок-схема пристрою контролю та захисту АД і кабелю живлення представлена на рис. 3.6.

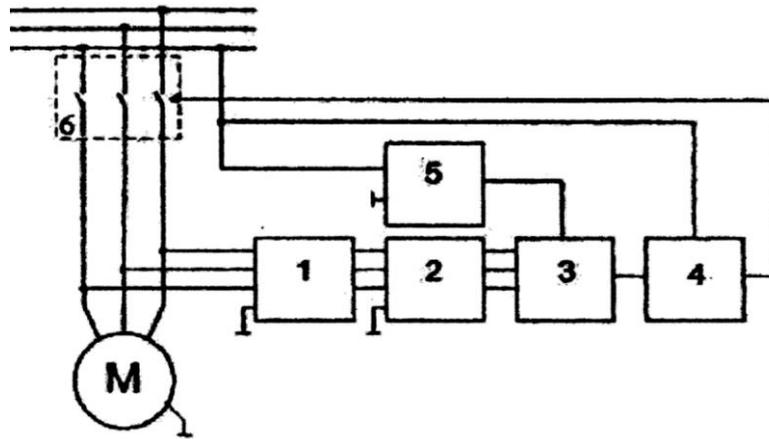


Рис. 3.6. Блок-схема пристрою захисту асинхронного двигуна та живильного кабелю

Блок-схема пристрою на рис. 3.6. складається з блоку конденсаторів 1, блоку високоомних дільників 2, мікропроцесорного блоку 3, комутаційного блоку 4, блоку живлення 5 та пускача 6.

Як що відключенні електродвигуна від живильної мережі на кожному з конденсаторів зберігається залишкова напруга. За фактом зникнення змінної складової та появи постійної складової на конденсаторах (блоку 1) програмний блок 3 робить висновок про технологічну паузу. При відключенні електродвигуна від мережі пускачем напруги заряду конденсатора блоку 1 будуть повторювати величину, форму та фазовий кут миттєвих значень напруги кожної фази живильної мережі. Через високоомні резистори блоку 2 відбувається розряд конденсаторів і тим самим формується сигнал для мікроконтролера мікропроцесорного блоку.[19]

Програмне забезпечення мікроконтролера вибирає максимальне миттєве значення напруги, що надходить з блоку 2, обчислює похідну зміни напруги в часі на максимально зарядженому конденсаторі, тобто швидкість розряду конденсатора на свій високоомний дільник. За величиною швидкості зміни напруги визначається опір ізоляції обмотки електродвигуна, а також кабелю, що живить електродвигун. Це можливо, оскільки під час технологічної паузи еквівалентний опір ізоляції двигуна плюс опір ізоляції кабелю включені паралельно до блоку 2 високоомних дільників.

При справному стані ізоляції обмоток та кабелю живлення їх опір прямує до нескінченності, а розряд конденсатора зумовлений струмом розряду, величина якого визначена значенням опорів високоомного дільника.

При дефекті опір прямує до нуля, струм розряду конденсатора – до нескінченності, швидкість падіння напруги швидка. Перехідний процес розряду конденсатора переходить з аперіодичного в періодичний, такий перехід є моментом граничної величини опору ізоляції.

Запропонований пристрій здійснює контроль стану ізоляції двигуна.

Висновки по третьому розділу.

Компенсація реактивної потужності за допомогою батареї конденсаторів є загальноприйнятою практикою в електричних мережах з метою підвищення ефективності використання електроенергії. Однак, енергія, накопичена в цих конденсаторах, може мати й інше, менш очевидне застосування – забезпечення безперервного моніторингу стану ізоляції обмоток асинхронних двигунів та кабельних ліній живлення без потреби в додаткових джерелах живлення.

Суть полягає в використанні залишкової напруги на конденсаторах після відключення системи для живлення низьковольтних діагностичних ланцюгів. Ці ланцюги, інтегровані в систему моніторингу, можуть вимірювати такі параметри, як опір ізоляції або струм витoku, що є ключовими показниками стану ізоляційного покриття.

Перевагами такого підходу є економічна ефективність, оскільки не потрібне окреме джерело живлення для діагностики, а також підвищення надійності роботи обладнання завдяки своєчасному виявленню погіршення стану ізоляції. Це дозволяє оперативно проводити технічне обслуговування, запобігаючи аварійним зупинкам та пов'язаним з ними фінансовим втратам.

Таким чином, використання енергії, накопиченої в батареях конденсаторів компенсації реактивної потужності, для безперервного моніторингу стану ізоляції є перспективним напрямком, що дозволяє підвищити надійність та ефективність експлуатації електрообладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Стаття, присвячена діагностуванню пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів відносно корпусу в системах заземлення TN, висвітлює критично важливу проблему для забезпечення надійної та безпечної роботи електрообладнання. Проведений аналіз існуючих методів діагностування, зокрема, використання вимірювання опору ізоляції, струмів витоку та методів на основі аналізу спектру струму, дозволяє зробити певні висновки щодо їхньої ефективності та доцільності застосування в різних умовах експлуатації.

Найважливішим висновком є необхідність комплексної діагностики, яка базується на поєднанні декількох методів. Використання лише одного методу може призвести до хибних висновків, оскільки чутливість кожного методу різна до різних типів пошкоджень ізоляції. Наприклад, вимірювання опору ізоляції може бути недостатньо чутливим до мікротріщин або часткових пошкоджень, які проявляються при підвищених напругах та частотах.

Крім того, стаття підкреслює важливість врахування специфіки систем заземлення TN при виборі методів діагностування. Особливості заземлення, зокрема, використання заземленої нейтралі, впливають на характер протікання струмів витоку та на чутливість діагностичних приладів. Впровадження ефективної системи моніторингу стану ізоляції дозволить своєчасно виявляти та усувати пошкодження, запобігаючи аварійним зупинкам, забезпечуючи безперервність виробничого процесу та мінімізуючи ризики ураження електричним струмом.

Отже, для ефективного діагностування пошкоджень ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів в системах заземлення TN необхідний інтегрований підхід, що враховує специфіку системи заземлення та використовує комбінацію сучасних діагностичних методів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.
2. О. П. Чорний, Ю. В. Зачепа, В. К. Титюк, О. А. Чорна Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. – Кременчук: ЧП Щербатих А. В., 2019. – 122 с
3. В. О. ЗУБЕНКО. Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення. Вісник ХНТУ № 2(93), Ч. 1, 2025
4. О.В. ГУБАРЕВИЧ. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів/ Державний університет інфраструктури та технологій 2024 р
5. Діагностика несправностей трифазного синхронного двигуна з електричним збудженням за допомогою адаптивного порогового алгоритму. [https://www.semanticscholar.org/paper/Fault-diagnosis-of-three-phase electrically-excited-Sridhar-Devi/ea4cb6475e2d7384611bf59541dbaf31ba413128](https://www.semanticscholar.org/paper/Fault-diagnosis-of-three-phase-electrically-excited-Sridhar-Devi/ea4cb6475e2d7384611bf59541dbaf31ba413128)
6. Діагностика та класифікація пошкоджень ізоляції обмотки статора трифазного асинхронного двигуна за допомогою вейвлету та MNN. <https://www.semanticscholar.org/paper/Diagnosis-and-classification-of-stator-winding-on-a-Devi-Sarma/3f479b4239780d85ce47b60cce2b70f5766f927e>
7. Діагностика несправностей двигуна за допомогою алгоритму негативного відбору. [https://www.semanticscholar.org/paper/Motor-fault-diagnosis-using-negative-selection-Gao Wang/616865a66616e1b3fe399883c1bbf11b499fa710](https://www.semanticscholar.org/paper/Motor-fault-diagnosis-using-negative-selection-Gao-Wang/616865a66616e1b3fe399883c1bbf11b499fa710)
8. Діагностика початкових пошкоджень статора асинхронного двигуна за допомогою вейвлет-аналізу. <https://www.semanticscholar.org/paper/Detection-of-stator-incipient-faults-and-of-faulty-Devi-Sarma/e49f7bd8aa1dcf51a1de051cb022b3cf9b41b4d9>
9. Виявлення та діагностика несправностей на основі вейвлетів за допомогою онлайн-MCSA несправностей обмотки статора, спричинених порушенням ізоляції в промисловій асинхронній машині.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Wavelet-Based-Fault-Detection-and-Diagnosis-Using-Verma-Radhika/8f3c962b1e0824baa55e14da2d39e6e59b289fcd>

10. Нейронечіткий класифікатор для ідентифікації міжвиткових несправностей обмотки статора промислової машини.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Neuro-fuzzy-Classifier-for-Identification-of-Stator-Verma-Jain/0bb45e5303e535e5a7d72e47e21970430474d206>

11. Гібридна модельна-орієнтована система діагностики нечіткої логіки для несправностей статора трифазних асинхронних двигунів з кліткорізом.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Hybrid-Model-Based-Fuzzy-Logic-Diagnostic-System-in-Aswad-Jassim/25d281d36e667fe0ac218f18a905eb1e5dc8a7e9>

12. Автоматичний моніторинг стану промислових машин з використанням перетворювача Холла на основі FSA.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Automatic-Condition-Monitoring-of-Industrial-Using-Verma-Akkulu/b8605ec2e25c821e66b4377030069c4609813de3>

13. Аналіз пошкоджень багаторівневої обмотки статора на ізоляційному матеріалі промислового асинхронного двигуна.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Multi-Level-Stator-Winding-Failure-Analysis-on-the-Verma-Radhika/f072e8351ae995f01bf943d87b857de6c614c00c>

14. Ефективна нейромережева модель для виявлення несправностей у промислових машинах у режимі реального часу.

<https://www.semanticscholar.org/paper/An-efficient-neural-network-model-for-real-time-in-Verma-Nagpal/ef2747f7a85897c5c9d707e4a4957e574898aa17>

15. Експериментальний підхід до виявлення та кількісної оцінки короткого замикання на обмотках асинхронної машини з подвійним живленням (DFIM).

<https://www.semanticscholar.org/paper/An-Experimental-Approach-for-Detection-and-of-on-a-Bilal-H%C3%A9raud/b9a89aa0c1abec85f6bbd1c0030100c5bd1219a3>

16. Виявлення міжвиткового короткого замикання на статорі асинхронної машини з подвійним живленням за допомогою периметрального аналізу.

<https://www.semanticscholar.org/paper/An-Experimental-Approach-for-Detection-and-of-on-a-Bilal-H%C3%A9raud/b9a89aa0c1abec85f6bbd1c0030100c5bd1219a3>

17. Виявлення міжвиткового короткого замикання в асинхронній машині за допомогою спостерігача ковзного режиму високого порядку: моделювання та експериментальна перевірка. <https://www.semanticscholar.org/paper/Detecting-Inter-Turn-Short-Circuit-Fault-in-Machine-Guezmil-Berriri/88accd0cdad73e6725de03ca867bb9479673f706>

18. Норми випробування електрообладнання - Норми випробувань генераторів і синхронних компенсаторів під час ремонту обмоток. https://forca.com.ua/knigi/pravila/normi-viprobuvannya-elektroobladnannya_32.html

19. Діагностика стану ізоляції асинхронного двигуна та живильного кабелю в умовах локальної компенсації Приазовський державний технічний університет (Маріуполь, Україна) Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 60, No 6 (2017), pp. 536–543