УДК 621.313.333.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.9

В. О. ЗУБЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної
та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічного університет
ORCID: 0000-0002-8401-755X

Р. В. ТЕЛЮТА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4923-1227

СИСТЕМА ЗАХИСТУ ТА МОНІТОРИНГУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФУНКЦІЄЮ АВАРІЙНОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ

У статті розглянуто питання підвищення надійності, енергоефективності та ресурсоощадності роботи трифазних асинхронних електродвигунів шляхом розробки та впровадження інтегрованої системи захисту і моніторингу з функцією аварійного відключення. Актуальність теми зумовлена високим рівнем відмов електродвигунів у промисловому секторі, особливо в умовах агропромислового комплексу, де щорічно виходить з ладу до 25 % парку електроприводів, здебільшого при неповному навантаженні (40–60 % від номінального).

Запропоновано концепцію побудови автоматизованої системи, яка базується на безперервному контролі ключових експлуатаційних параметрів: фазних струмів, температури обмоток статора та частоти обертання ротора. Система не лише фіксує критичні відхилення в роботі двигуна, але й здатна ініціювати аварійне відключення та передати інформацію до SCADA-системи вищого рівня керування. У центрі діагностичної моделі – два інформативні показники: коефіцієнт втрат активної енергії (kпе), який відображає енерговитрати двигуна в умовах відхилення від номінального режиму, та коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції (kвр), що враховує теплове старіння ізоляційної системи.

У ході дослідження проведено моделювання різних режимів навантаження та впливу температури навколишнього середовища на ресурс ізоляції електродвигуна типу 4А100S2У3. Показано, що підвищення температури з 20 °С до 40 °С при незмінному навантаженні спричиняє зростання коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції з 0,19 до 0,7. Це вказує на суттєве прискорення процесів теплового старіння і підтверджує важливість термоконтролю в умовах експлуатації.

Результати дослідження демонструють доцільність впровадження системи моніторингу, яка дозволяє у реальному часі оцінювати технічний стан електродвигуна, прогнозувати залишковий ресурс ізоляції та своєчасно приймати рішення щодо обслуговування чи зупинки приводу. Запропонований підхід сприяє зменшенню аварійності, підвищенню енергоефективності виробничих процесів і забезпеченню сталого функціонування електроприводних систем.

Ключові слова: *асинхронний електродвигун, моніторинг, захист, ізоляція, коефіцієнт витрати ресурсу, коефіцієнт втрат активної енергії, теплове старіння, ресурсоенергозбереження, SCADA, аварійне відключення.*

V. O. ZUBENKO
PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Hydraulic Engineering Construction, Water and Electrical Engineering
Kherson State Agrarian and Economic University
ORCID: 0000-0002-8401-755X

R. V. TELIUTA
PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrical Systems
and Energy Management
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-4923-1227

PROTECTION AND MONITORING SYSTEM FOR AN INDUCTION MOTOR WITH EMERGENCY SHUTDOWN FUNCTION

The article addresses the issues of improving the reliability, energy efficiency, and resource conservation in the operation of three-phase squirrel-cage induction motors through the development and implementation of an integrated protection and monitoring system with an emergency shutdown function. The relevance of the topic is driven by the high failure rate of electric motors in the industrial sector, particularly in the agro-industrial complex, where up to 25 % of the motor fleet fails annually, mostly under partial load conditions (40–60 % of nominal).

A concept for the design of an automated system is proposed, based on continuous monitoring of key operational parameters: phase currents, stator winding temperature, and rotor speed. The system not only detects critical deviations in motor operation but can also initiate emergency shutdown and transmit data to a higher-level SCADA control system. At the core of the diagnostic model are two informative indicators: the active power loss coefficient (kne), which reflects energy consumption under non-nominal operating conditions, and the insulation resource consumption coefficient (kвр), which accounts for thermal aging of the motor's insulation system.

The study involved modeling different load profiles and analyzing the influence of ambient temperature on the insulation resource of an induction motor type 4A100S2U3. It was shown that increasing the ambient temperature from 20 °C to 40 °C, while maintaining the same load, leads to an increase in the insulation resource consumption coefficient from 0.19 to 0.7. This indicates a significant acceleration of thermal aging processes and highlights the importance of temperature monitoring during operation.

The results confirm the feasibility of implementing a monitoring system that enables real-time assessment of the motor's technical condition, prediction of the remaining insulation life, and timely decision-making regarding maintenance or shutdown. The proposed approach helps reduce failure rates, improve energy efficiency in industrial processes, and ensure the sustainable operation of electric drive systems.

Key words: *induction motor, monitoring, protection, insulation, insulation resource consumption coefficient, active power loss coefficient, thermal aging, resource and energy efficiency, SCADA, emergency shutdown.*

Постановка проблеми

Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором є одним з найпоширеніших типів електричних двигунів, який застосовується в різних виробничих галузях для приводу різноманітних механізмів та устаткування. Однією з основних проблем, які існують на потокових технологічних лініях агропромислового комплексу, є відмова 20–25 % наявного парку асинхронних електродвигунів щороку, при тому, що завантаження електродвигунів в нормальних режимах роботи становить лише 40–60 % їх потужності. Це має негативні наслідки, такі як незаплановані витрати на зупинку технологічних ліній, ремонт асинхронних електродвигунів і додаткові втрати електроенергії.

Серед основних завдань енергетичної стратегії України при вступі в ЄС є забезпечення сталого розвитку енергетики та зменшення негативного впливу на довкілля шляхом зменшення споживання енергії та підвищення ефективності використання ресурсів.

Асинхронні електродвигуни (АСД) займають провідне місце серед електромеханічних пристроїв у промисловості завдяки своїй надійності, простоті конструкції та широкому діапазону застосування. Однак у процесі експлуатації вони піддаються впливу ряду негативних факторів, таких як перевантаження, перегрів, порушення фазності, зниження напруги та інші нештатні режими, які можуть призвести до передчасного зносу або повної відмови двигуна.

Традиційні методи захисту двигунів, зокрема струмові реле чи теплові захисти, не завжди забезпечують своєчасне реагування на динамічні зміни робочих параметрів. Крім того, відсутність централізованого моніторингу ускладнює контроль за станом двигуна в режимі реального часу, що суттєво знижує ефективність експлуатації електрообладнання.

В умовах розвитку автоматизованих систем управління та цифрових технологій виникає потреба у створенні комплексної системи захисту та моніторингу АСД, яка б не лише забезпечувала оперативний контроль струмів, температури та частоти обертання, а й мала можливість автоматичного аварійного відключення двигуна при виявленні критичних параметрів, із подальшою передачею даних до SCADA-системи підприємства.

Таким чином, актуальним є питання розробки інтегрованої системи захисту та моніторингу асинхронного двигуна, здатної підвищити надійність та безпеку експлуатації електроприводних установок в умовах промислового середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження та публікації, щодо зменшення втрат в ізоляції асинхронного двигуна, зосереджені на застосуванні нових матеріалів для ізоляції, розробці методів діагностики та прогнозування стану ізоляції, та оптимізації процесу виробництва. Так серед українських дослідників проблемою покращення якості ізоляції асинхронних двигунів займались Серебрякова О. С, Чернишова В. О., Автаєва М. О., роботи яких стосувались вивченню методів неруйнівного контролю технічного стану ізоляції за електричними явищами. В роботах

Губаревич О. В., Голубєвої С. М. [3], запропоновано проводити класифікацію дефектів ізоляції з урахуванням їх походження. Серед закордонних досліджень можна виділити [4], роботи яких присвячені розробці ізоляційних матеріалів на основі епоксидних смол та наночастинок оксиду кремнію, використання яких дозволяє знизити втрати в ізоляції та збільшити надійність асинхронних двигунів. В роботі [5], досліджувалась можливість використання газового фазування для поліпшення якості ізоляції, що дозволить знизити втрати в ізоляції та забезпечити більшу надійність асинхронних двигунів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка та обґрунтування структури й принципів функціонування інтегрованої системи захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення, яка забезпечує своєчасне виявлення нештатних режимів роботи за основними експлуатаційними параметрами (струм, температура, частота обертання) та передбачає можливість автоматичної зупинки двигуна з передачею інформації до системи верхнього рівня (SCADA).

Викладення основного матеріалу дослідження

Підвищення ефективності та ресурсоенергозбереження асинхронних електродвигунів може бути досягнуте шляхом впровадження сучасних систем моніторингу і захисту, які дозволяють забезпечити оптимальні умови експлуатації обладнання. Одним із ключових напрямів є контроль технічного стану двигунів у режимі реального часу, що дає змогу своєчасно реагувати на відхилення основних параметрів та запобігати розвитку аварійних ситуацій.

До заходів, що сприяють ефективній роботі електродвигунів, належать:

- використання енергоефективних моделей двигунів високих класів (наприклад, IE3 або IE4), які мають знижені втрати;
- оптимізація робочих режимів шляхом автоматичного регулювання навантаження, швидкості обертання та режимів пуску/зупинки відповідно до змін у технологічному процесі;
- регулярне технічне обслуговування, а також систематичний контроль температурного режиму, струмів споживання і частоти обертання ротора.

Важливим фактором експлуатаційної надійності асинхронних двигунів є стан їх ізоляції, зокрема ізоляції обмоток. Пошкодження ізоляції не лише скорочує термін служби обладнання, але й значно підвищує витрати енергії через неконтрольовані втрати струму. Відсутність об’єктивного моніторингу цього параметра часто призводить до раптових відмов електродвигунів без видимих попереджувальних ознак.

Впровадження автоматизованої системи захисту та моніторингу з функцією аварійного відключення дозволяє виявляти критичні стани на ранніх етапах, знижуючи імовірність аварій та незапланованих простоїв. Така система забезпечує комплексний контроль параметрів двигуна, що дає змогу не лише підвищити енергоефективність виробництва, але й продовжити термін служби електрообладнання.

На основі проведених досліджень встановлено два ключові показники, що дозволяють оцінити режими роботи асинхронного електродвигуна з погляду ресурсо- та енергозбереження. Перший – коефіцієнт втрат активної енергії ($к_{пе}$) – відображає рівень енергетичних втрат у процесі експлуатації. Другий – коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції ($к_{вр}$) – характеризує інтенсивність старіння ізоляційного матеріалу обмоток двигуна.

Функціональну структуру системи діагностування асинхронного електродвигуна з урахуванням критеріїв ресурсоенергозбереження подано на рис. 1.

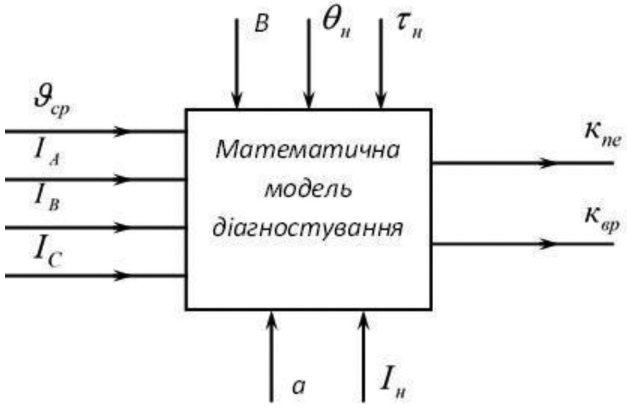

Рис. 1. Функціональна структура системи моніторингу параметрів асинхронного електродвигуна на основі математичної моделі діагностування

На схемі зображено функціональну взаємодію вхідних та вихідних параметрів системи моніторингу, що реалізується на основі математичної моделі діагностування асинхронного електродвигуна.

До вхідних величин належать:

I_A, I_B, I_C – фазні струми двигуна, А;

B – параметр, який характеризує клас ізоляції, *K*;

$\theta_н$ – номінальна абсолютна температура ізоляції, *K*;

$\tau_н$ – номінальне перевищення температури ізоляції, °С;

$\vartheta_{ср}$ – температура навколишнього середовища, °С;

a – коефіцієнт втрат асинхронного електродвигуна (відношення втрат у сталі до втрат у міді при номінальному режимі роботи);

$I_н$ – номінальне значення сили електричного струму, А.

На виході моделі формуються діагностичні коефіцієнти:

Kпе – коефіцієнт втрат активної енергії;

Kвр – коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції.

Ці показники дозволяють оцінити поточний стан двигуна, виявити ознаки перевантаження, перегріву чи інших відхилень, а також використовуються для прийняття рішень у системі захисту або вищого рівня керування (наприклад, SCADA).

Коефіцієнт втрат активної енергії являє собою відношення втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні до номінальних, тобто чим менше втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні, тим менше коефіцієнт втрат активної енергії

Коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції являє собою відношення швидкості зношення ізоляції в заданому режимі робот до номінального значення швидкості зношення ізоляції.

Дослідимо більш детально коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції. Під час експлуатації електродвигуни, і їх ізоляційна система, піддаються різним впливам, які можна розділити на два основні класи: режимні і кліматичні впливи.

Режимні впливи – це впливи, пов’язані з режимом роботи електродвигуна і способом його використання (завантаження, частота пуску і зупинки, переривчаста робота, несиметричність напруги і т.д.), що можуть спричинити перевантаження обмоток і перегрів, та призвести до пошкодження ізоляцію, і навіть до її втрати.

Кліматичні впливи – впливи, пов’язані з умовами середовища, в якому електродвигун працює (вологість, пил і забруднення, температура, інтенсивність опадів, агресивні хімічні речовини або інші атмосферні фактори), що мають негативний вплив на ізоляцію електродвигуна, та можуть призвести до утворення ізоляційних пробоїв і збільшення ризику короткого замикання.

Серед різних факторів, що визначають термін служби ізоляції електричних машин, одним з основних є теплове старіння. При аналізі експлуатаційних режимів особливого значення набувають методи розрахунку швидкості теплового старіння електричної ізоляції й визначення строку її служби.

У якості об’єкта дослідження було обрано асинхронний електродвигун типу 4А100S2У3. Для оцінки теплового зношення ізоляції протягом однієї години роботи в умовах квазісталого режиму було використано заданий графік навантаження. Температура навколишнього середовища при цьому приймалася сталою й дорівнювала 30 °С.

З метою дослідження впливу послідовності зміни навантаження у часі було змодельовано кілька варіантів його перестановки. Це дозволило порівняти результати теплового зношення ізоляції при однакових навантаженнях, але різному порядку їх прикладання. Окремо розглянуто варіант, у якому реальний графік навантаження був замінений на еквівалентне середньоквадратичне значення.

У результаті моделювання отримано залежності коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції від коефіцієнта завантаження електродвигуна та температури навколишнього середовища. Аналіз цих залежностей показав, що за наявності інформації про навантаження та температуру можна створити ефективну систему діагностування теплового стану двигуна. Така система дозволяє своєчасно оцінювати ступінь зношення ізоляції й запобігати аварійним відмовам обладнання.

Для забезпечення надійної та безпечної експлуатації асинхронних двигунів (АСД) у промислових умовах було розроблено систему контролю, яка дозволяє здійснювати моніторинг критичних параметрів двигуна в реальному часі та реалізовувати захист із можливістю аварійного відключення.

Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення складається з таких основних функціональних блоків: блоку вимірювання струмів споживання; блоку вимірювання частоти обертання ротора з використанням тахогенератора для обчислення ковзання; блоку індикації стану двигуна, що сигналізує про режими «норма», «перегрів» та «перевантаження»; системи аварійного відключення, яка автоматично або за командою вищого рівня вимикає двигун у разі виявлення критичних параметрів; а також блоку передачі інформації до SCADA-системи для віддаленого моніторингу та аналізу роботи обладнання.

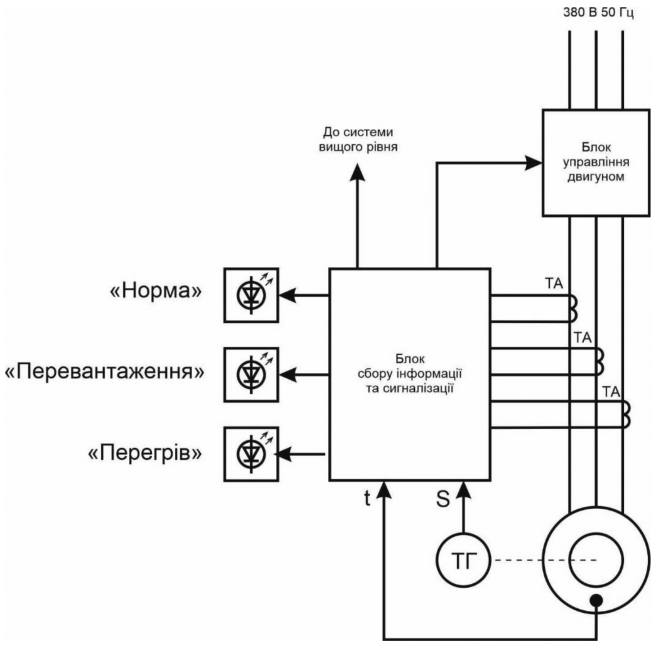

Рис. 2. Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення

Системою здійснюється контроль таких параметрів двигуна:

- Струми споживання (по фазах);
- Температура статора;
- Частота обертання.

У блоці вимірювання струмів споживання реалізується безперервний контроль електричних навантажень, які споживає асинхронний двигун у кожній з фаз. Для цього застосовуються трансформатори струму (ТА), що забезпечують ізольовану подачу сигналів на вхід контролера. Дані обробляються за допомогою аналого-цифрового перетворювача, після чого здійснюється аналіз на предмет виявлення відхилень від нормативних режимів, таких як перевантаження, міжфазна нерівномірність чи обрив фази. Окрім цього, за допомогою сигналів від ТА визначається частота мережі живлення, що є основою для розрахунку синхронної частоти двигуна. Це, у свою чергу, є ключовим етапом у визначенні ковзання, що характеризує ефективність роботи електропривода.

У блоці контролю температури статора встановлений термодатчик (термоопір або терморезистор), який інтегрується безпосередньо в обмотки статора двигуна. Цей датчик забезпечує постійний моніторинг температури обмоток, що дозволяє оперативно реагувати на перегрів і уникати пошкоджень ізоляції або міжвиткових замикань. У випадку перевищення допустимих температурних значень система автоматично формує аварійний сигнал типу «перегрів», що може призвести до блокування живлення двигуна для запобігання подальшому нагріванню і виходу з ладу.

У блоці вимірювання частоти обертання ротора використовується тахогенератор або цифровий енкодер, що встановлюється на валу двигуна. Завдяки цим пристроям фіксується реальна частота обертання ротора. Порівнюючи ці дані з частотою живлення мережі, система розраховує значення ковзання (S) – відносного відставання ротора від синхронного обертання. Це дозволяє оцінити ступінь навантаження на валу двигуна та ідентифікувати критичні ситуації, такі як пробуксовка ротора, перевантаження або заклинювання механізмів, що можуть призвести до серйозних пошкоджень електропривода.

У блоці індикації стану двигуна передбачено відображення поточного режиму роботи за допомогою світлових індикаторів, які встановлюються на панелі оператора або щиті керування. Зокрема, індикатор «Норма» сигналізує про справну та безпечну роботу двигуна, «Перегрів» – про критичне підвищення температури статора, а «Перевантаження» – про надмірне споживання струму. Така індикація дозволяє оперативно оцінити ситуацію навіть без доступу до SCADA або цифрових інтерфейсів.

У системі аварійного відключення реалізовано механізм автоматичного знеструмлення двигуна у разі виявлення критичних відхилень параметрів, що можуть призвести до аварійної ситуації або виходу з ладу електрообладнання. Управляючий сигнал генерується контролером і подається на виконавчий елемент – контактор, реле або силовий блок, який миттєво відключає живлення двигуна. Цей процес може бути ініційований як локально (автоматично), так і дистанційно – з вищого рівня керування (наприклад, із SCADA-системи або системи диспетчерського контролю).

У блоці передачі даних на SCADA-систему реалізовано функцію централізованого моніторингу та аналізу зібраної інформації. Усі параметри – значення струмів, температура, частота обертання, сигнали тривоги та

аварій – передаються цифровим каналом зв'язку до диспетчерської служби або серверного центру підприємства. Це дозволяє забезпечити глибоку аналітику, формування трендів, звітність, а також реалізувати віддалене керування та прийняття рішень щодо подальшої експлуатації обладнання.

Запровадження такої багатофункціональної системи захисту та моніторингу дозволяє підвищити рівень безпеки електроприводів, знизити ризики аварій, продовжити ресурс асинхронних двигунів, а також забезпечити ефективне технічне обслуговування на основі об'єктивних даних у реальному часі. Це особливо актуально для об'єктів із безперервними технологічними процесами, де зупинка обладнання може призвести до значних економічних втрат.

Висновки

У результаті дослідження запропоновано підхід до діагностування стану асинхронного електродвигуна з урахуванням ресурсо- та енергозберігаючих критеріїв. Встановлено, що швидкість теплового старіння ізоляції експоненційно залежить від температури та визначається такими параметрами, як коефіцієнт втрат активної енергії, коефіцієнт завантаження та температура навколишнього середовища. Для двигуна типу 4А100S2У3 підвищення температури з 20 °С до 40 °С призводить до зростання коефіцієнта витрат ресурсу ізоляції з 0,19 до 0,7. Результати підтверджують ефективність розробленої системи моніторингу, яка дозволяє оцінювати залишковий ресурс ізоляції в режимі реального часу та підвищує надійність і енергоефективність електроприводів.

Список використаної літератури

1. Телюта Р. В. Принципи побудови моделі дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні / Р. В. Телюта, С. П. Плешков // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.-2017. Вип. 30. С. 188–196. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2017_30_28

2, Худий Є. Г. Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин /Є. Г. Худий, І. І. Пельтек// Сб. научн. трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. № 28. Вестник НТУ «ХПИ», 2010. С. 549–550. ISSN 2079-8024.

3. Губаревич О. В., Голубєва С. М. Систематизація дефектів і вибір методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів: Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг», 10 жовтня 2019 р. / відп. за вип. М. А. Зенкін. – Київ: КНУТД, 2019. – 176 с. С. 65–67.

4. K. I. Kutsyy, O. V. Klymchuk, V. S. Kravchenko, and V. V. Ponomarenko, «Development of insulation materials based on epoxy resins and silicon dioxide nanoparticles for induction motors,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 4, pp. 4076-4082, July-Aug. 2021.

5. A. J. Akhtar, H. Borsi, A. Cavallini, R. Hackam, and D. Mazzetti, "Gas insulated motor design: A review", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 28, no. 1, pp. 1-12, Feb. 2021.

References

1. Teliuta, R. V., & Pleshkov, S. P. (2017). *Principles of constructing a model for studying active power losses in an induction motor*. Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University: Engineering in Agricultural Production, Sectoral Mechanical Engineering, Automation, (30), 188–196. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2017_30_28

2. Khudyy YE. H. Pel′tek I. I. (2010), "Modern methods of diagnostics of the state of insulation of electric machines", Sb. nauchn. trudov "Vestnyk NTU "KHPY": Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriya i praktyka, Vestnyk NTU "KHPY", Vol. 28, pp. 549–550. ISSN 2079-8024.

3. Hubarevych O. V. and Holubyeva S. M. (2019), "Systematization of defects and choice of methods of diagnostics of the technical state of insulation of induction motors". Tezy dopovidey III Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi "Mekhatronni systemy: innovatsiyi ta inzhynirynh" [Abstracts of the III International Scientific-Practical Conference "Mechatronic Systems: Innovations and Engineering"], Kyyiv : KNUTD, October 10, 2019, pp. 65–67.

4. K. I. Kutsyy, O. V. Klymchuk, V. S. Kravchenko, and V. V. Ponomarenko (2021), "Development of insulation materials based on epoxy resins and silicon dioxide nanoparticles for induction motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 4, pp. 4076–4082, July-Aug. 2021.

5. A. J. Akhtar, H. Borsi, A. Cavallini, R. Hackam, and D. Mazzetti (2021), "Gas insulated motor design: A review", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 28, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2021.