

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

КРИВОНОСОВ Валерій Єгорович

УДК 621. 313.333.2

**РОЗВИТОК ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ,
КОНТРОЛЮ ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ХАРКІВ - 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Приазовському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Маріуполь.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор Піротті Євген Леонідович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Гриб Олег Герасимович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем;

доктор технічних наук, професор Назаренко Ігор Петрович, Таврійський державний агротехнологічний університет, професор кафедри електроенергетики та автоматизації, декан енергетичного факультету;

доктор технічних наук, доцент Ягуп Катерина Валеріївна, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, доцент кафедри електричного транспорту.

Захист відбудеться «__» _____ 2019 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.01 у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий «__» _____ 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Д. Черенков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Електротехнічні комплекси (ЕТК) практично завжди мають досить різноманітний склад електрообладнання (ЕО). Робота такого обладнання пов'язана з електричними режимами, які мають суттєвий вплив на строки нормальної його експлуатації. Основним чинником, що впливає на стан ЕО є його навантаження, яке далеко не завжди відповідає номінальній потужності. Крім того, напруга трифазної мережі, яка повинна мати відповідну якість, часто має суттєві спотворення, пов'язані зі змінною асиметрією і відхиленнями, що обумовлені змішаним підключенням однофазних і трифазних споживачів. Також багато виробничих технологічних процесів відбувається в умовах, несприятливих для ЕО, що працює в умовах впливів руйнівних факторів навколишнього середовища, до яких можна віднести пил, вологість і присутність агресивних газів в технологічних приміщеннях. Вплив навколишнього середовища на ЕО викликає необхідність контролю та прогнозування його стану та захист від подібних явищ.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених дослідженню впливу теплових перевантажень на термін служби ізоляції ЕТК, зокрема, при поганих показниках якості електроенергії та підвищеній температурі навколишнього повітря, практично відсутня інформація про їх спільний вплив, такий як запилення, зволоження та інше, на зниження терміну служби ізоляції ЕО ЕТК. У місці запилення відбувається локальний перегрів ізоляції ЕО, що призводить до її прискореного старіння і, відповідно, різкого зниження терміну служби. Наявність провідного пилу на поверхні ізоляції, яка має мікротріщини, розшарування та інші дефекти, спричиняє виникнення струмопровідних містків, що прискорює процеси старіння та практично виводить обладнання з ладу.

Для зниження собівартості продукції, що випускається, керівництво підприємства змушене знижувати обсяги ремонтно-профілактичних робіт та переходити від традиційного обслуговування обладнання за графіком планово-попереджувального ремонту (ППР) до ремонту за фактом виявлення дефекту або причин його виникнення. У зв'язку з вищеописаним виникає завдання своєчасного виявлення і розпізнавання дефектів в ЕО ЕТК і прогнозування часу протікання аварійного процесу для проведення своєчасних профілактичних робіт.

Проведений нами і підтверджений колегами в Україні і за кордоном аналіз виникнення аварійних ситуацій і причин виходу ЕО ЕТК з ладу, дозволяє розділити їх на:

– внутрішні пошкодження, які викликані поломкою блоків ЕО ЕТК через механічну зношеність елементів і вузлів, зниженням діелектричної міцності ізоляції, несвоєчасним проведенням технічного обслуговування, помилками експлуатаційного персоналу і т.д.;

– зовнішні пошкодження у вигляді аварій і збоїв в системі електропостачання – це відмова комутаційної апаратури, зниження рівня ізоляції струмоведучих кабельних ліній, ослаблення контактних з'єднань,

неповнофазний режим мережі живлення, несанкціоновані відключення живлення, низька якість електроенергії та інше, що призводять до додаткових теплових втрат в елементах електропостачання та ЕО ЕТК;

– пошкодження, що виникають всередині ЕО ЕТК через відхилення якості електричної енергії в системі електропостачання від значень, нормованих по ГОСТ 13109-97, несанкціоновані відключення напруги живлення, виникнення випадкових провалів напруги, що призводять до розвитку внутрішніх аварійних ситуацій і поломки ЕО ЕТК.

Відсутність комплексного підходу до вивчення впливів якості електричної енергії сумісно з навколишнім середовищем як єдиного цілого, є однією з причин виникнення непрогнозованих відхилень в нормальній роботі обладнання, що спричиняє брак продукції, а в медичній галузі – отримання недостовірних даних про стан обстежуваного пацієнта, а значить – до невірної діагнозу і вибору неадекватної тактики лікування. Тому розвиток та підвищення ефективності систем діагностики, контролю та захисту ЕТК під час експлуатації являє собою актуальну науково-практичну проблему.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Біомедична інженерія» Приазовського державного технічного університету у рамках науково-дослідних робіт «Моніторинг режимів електричних мереж, від яких живляться перевантажувальні машини другого перевантажувального району та вугільного перевантажувального комплексу», (№ держреєстрації 0116U007129); «Підвищення ефективності та якості електропостачання промислових підприємств» (№ держреєстрації 0113U007316); «Оптимізація режимів та удосконалення управління системами електропостачання підприємств» (№ держреєстрації 011U004890); «Підвищення надійності функціонування електропостачання з урахуванням якості електроенергії» (№ держреєстрації 0115U004928). У вказаних роботах здобувач приймав участь як виконавець.

Метою роботи є розвиток та підвищення ефективності функціонування систем діагностики, контролю та захисту ЕО ЕТК з одночасним підвищенням достовірності отриманих результатів шляхом розроблення методів, моделей, принципів та критеріїв і багаторівневої системи контролю та управління електротехнічними комплексами. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати та оцінити існуючі методи і засоби діагностики, контролю та захисту технічного стану ЕО ЕТК;
- розробити метод виявлення початкового моменту послаблення болтового з'єднання при різних струмах навантаження;
- розробити математичні моделі оцінювання стану ізоляції елементів ЕТК та її теплового старіння при спотвореннях якості електричної енергії;
- розробити математичну модель оцінювання стану ізоляції ЕТК та мережі живлення в умовах локальної компенсації реактивної потужності;
- розробити метод ймовірнісного прогнозування виникнення і розвитку аварійних ситуацій при ослабленні болтових з'єднань;

- розробити метод діагностики локальних перегрівів ізоляції, які викликані пиловим покриттям різної провідності і струмовим навантаженням;
- розробити метод діагностування типових перенавантажень і температурного захисту асинхронних двигунів при провалах напруги і локальному перегріві ізоляції;
- визначити довірчі інтервали розрахункових температур болтового з'єднання і стану ізоляції ЕК;
- розробити структурну схему багаторівневої системи контролю та управління електротехнічними комплексами;
- запропонувати узагальнений критерій оцінки стану ізоляції ЕК і системи.

Об'єкт дослідження – електричні та теплові процеси в ЕО ЕТК при впливі агресивних факторів навколишнього середовища та низької якості електричної енергії.

Предмет дослідження – електричні та енергетичні параметри ЕО ЕТК при низькій якості електричної енергії та несприятливих впливах навколишнього середовища.

Методи дослідження. В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорії електричних кіл, теорії загальної теплотехніки, теорії ймовірності та математичної статистики, теорії диференціального та інтегрального числення та теорії системного аналізу. Надійність розробки забезпечена коректним використанням методів дослідження, підтверджена експериментальними дослідженнями та промисловим впровадженням.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- Вперше розроблено метод прогнозування виникнення і розвитку аварійної ситуації у болтовому з'єднанні струмопровідних частин електрообладнання електротехнічних комплексів.
- Вперше запропоновано інформаційний критерій для оцінювання стану мережі живлення електрообладнання електротехнічних комплексів, в якості якого використаний градієнт напруги на клеммах конденсаторів блоку компенсації реактивної потужності, що виникає при розряді накопиченої в них енергії і дозволяє своєчасно запобігати вихід з ладу електрообладнання.
- Вперше запропоновано метод температурного захисту електрообладнання електротехнічних комплексів і визначення товщини шару пилу на поверхні ізоляції кабелів живлення і фільтрів цього обладнання, який ґрунтується на різниці показань температурних давачів, встановлених на фільтрах і кабелях.
- Вперше запропоновано метод контролю за станом ізоляції і захисту електрообладнання електротехнічних комплексів, в якому здійснюється виявлення дефектів та зволоження ізоляції в періоди технологічних пауз по швидкісній зміні її поверхневої провідності.
- Отримав подальший розвиток метод моніторингу напруги, струмів навантаження і стану мережі живлення струмоведучих з'єднань, який

відрізняється від існуючих послідовним підключенням до мережі живлення твердотільних реле з паралельно підключеною батареєю конденсаторів, що дозволяє формувати часову затримку падіння напруги.

- Отримав подальший розвиток метод діагностування стану болтових струмоведучих з'єднань електрообладнання, який відрізняється від існуючих тим, що визначає початковий момент ослаблення за зміною температури навколишнього середовища.
- Удосконалено модель динаміки старіння ізоляції кабелів мережі живлення електрообладнання, яка відрізняється від існуючих тим, що встановлює зв'язок між відхиленнями коефіцієнта несиметрії напруг і лінійною напругою.

Практична значимість отриманих результатів, для електроенергетичної галузі полягає у наступному:

- Розроблені методики застосування швидкісних характеристик зміни параметрів ізоляції для виявлення її дефектів, таких як природне старіння, зволоження і покриття провідним і непровідним пилом, що оптимізує періоди проведення технологічних пауз і планово-попереджувальних ремонтів.
- Визначено діапазон значень критерію оцінки стану болтового з'єднання, який характеризує зміни постійної нагрівання більше 10% - як працездатний його стан, а зміни нижче 10% – як початок виникнення моменту ослаблення болтового з'єднання. Це дозволяє за швидкісною характеристикою зміни постійної нагріву прогнозувати час розвитку аварійного режиму.
 - Розроблено багаторівневу діагностичну систему контролю та управління електрообладнанням електротехнічних комплексів, яка встановила взаємозв'язок між блоками всередині системи, рівнями захистів «ЕО + живлення мережі», їх черговості, функціями і параметрами діагностування, а управління рівнями захистів забезпечило безаварійну роботу обладнання та високу якість роботи.
 - Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державне підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 993915,04 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 280450,85 грн./рік; «Тернопільській медичний центр ТОВ «Мевіз». У навчальному процесі Приазовського державного технічного університету теоретичні дослідження знайшли застосування, пов'язане з вивченням теоретичних питань неруйнуючих засобів та методів діагностики електрообладнання.

Особистий внесок здобувача.

Усі положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист дисертаційної роботи, одержані здобувачем самостійно.

[1, 22, 24, 27] – розроблена математична модель нагріву електродвигуна в умовах живлення несиметричними напругами, встановлено взаємозв'язок коефіцієнтів несиметрії та відхилення напруги мережі живлення; [2] -

розроблена методика оцінки теплових характеристик нагріву електродвигунів; [4] - розроблені математичні моделі, отримані та проаналізовані графіки навантаження різних типів електрообладнання з одночасним контролем показників якості мережі живлення та показників навколишнього середовища; [10, 14] - теоретично обґрунтований вплив провалу напруги на пошкодження блоків електротехнічних комплексів; [11] - розроблений алгоритм виявлення падіння напруги за швидкісними характеристиками першої складової фронту напруги; [12] - розроблена математична модель та метод контролю якості ізоляції обмоток електродвигунів та кабелю живлення, запропоноване та теоретично обґрунтоване використання швидкісних характеристик зміни напруги на клеммах батарей конденсаторів; [13, 19] - розроблено алгоритм підвищення безпеки компонентів діагностичних систем; [20] - обґрунтовано вибір класу вимірювальної техніки на розмір довірчих інтервалів; [6, 26, 33, 35, 36] – визначені нерівності діагностування початкового моменту ослаблення струмоведучих болтових з'єднань та алгоритми виявлення дефекту; [28, 29] – запропоновані методи ідентифікації електричних параметрів в експертних системах для діагностування електродвигунів; [41, 42, 44] - розроблені алгоритми контролю стану ізоляції, режимів мережі живлення та захисту електрообладнання; [30, 31] - розроблено математичну модель та блок-схему виявлення виткового замикання та захисту електродвигуна в умовах несиметричної напруги живлення; [32] - розроблено метод, у якому використано локальну компенсацію реактивної потужності та вперше запропоновано використання швидкісної зміни напруги на клеммах конденсаторів; [34] - розроблено метод та блок-схему пристрою діагностування дефектів ізоляції електродвигуна; [38] - розроблена схема та алгоритм роботи пристрою діагностики та захисту електродвигуна; [8] - запропонована математична модель діагностики причин температурного перевантаження ізоляції струмами та шаром пилю на її поверхні, розроблено метод захисту електродвигуна, в якому використано показники двох температурних давачів; [37] - розроблена методика визначення товщину шару пила за температурними показниками з урахуванням коефіцієнта теплопровідності та побудовані відповідні залежності; [23] - розроблена та теоретично обґрунтована система нерівностей, в якій враховуються динамічні зміни температурних показників навколишнього середовища і струмові навантаження; [40] - розроблені блок-схема пристрою і програмний алгоритм, в якому здійснена діагностика цілісності струмових ланцюгів та визначено початковий момент ослаблення болтового струмоведучого з'єднання; [9] - розроблено метод прогнозування виникнення та розвитку аварійної ситуації у болтовому з'єднанні струмопровідних частин ЕО ЕТК, в якому використано швидкісну характеристику зміни постійної нагріву болтового з'єднання; [39] - розроблені алгоритм і блок-схема пристроїв діагностики ЕО; [17, 30] - розроблено концепцію побудови багаторівневої системи діагностики і захисту ЕО та критерії вибору її складових елементів; [15, 16] - проведено дослідження ризиків, викликаних негативним впливом на експлуатаційну надійність електрообладнання; [41] - розроблені схема та алгоритм роботи пристрою

діагностики та захисту ЕО на прикладі рентгенівського комп'ютерного томографу.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи представлялися, доповідалися автором і обговорювалися на Міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: 7 Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту» – Транселектро, 2014 (Одеса-Дніпропетровськ, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (Київ, 2016); VI Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» - ВКДТС, 2017 (Вінниця, 2017); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» – ВОТТП-2017 (Одеса, 2017); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» - СПРТП-2017 (Вінниця, 2017); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації» (Вінниця, 2017); XXV Міжнародній науково-практичній конференції «Microcad-2017» (Харків, 2017); I Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії», (Київ, 2017); XVII Міжнародній науково-технічній конференції, (м. Одеса, 2018).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 23 роботи, з них: 19 статей у наукових фахових виданнях України, що включені до наукометричних баз даних; 4 статті, які включені в міжнародні видання; 7 тез доповідей на наукових конференціях та конгресах; 14 патентів та свідоцтв України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шістьох розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 346 сторінок, 91 рисунок по тексту, 23 таблиці по тексту, список використаних джерел з 258 найменувань на 28 сторінках, 6 додатків на 40 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано проблему дослідження та актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження. Викладено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, наведено дані щодо впровадження дисертаційних результатів..

У першому розділі проведено аналіз проблеми підвищення чутливості і швидкодії засобів контролю експлуатаційної надійності силового електротехнічного обладнання (СЕТО). Визначені джерела внутрішнього та зовнішнього впливу на експлуатаційну надійність, показані сучасні тенденції удосконалення систем профілактичного контролю і діагностики порушень працездатності СЕТО в Україні і за кордоном.

Показано, що відсутність комплексного підходу до розгляду дихотомії

«електрообладнання + система електропостачання» як єдиного цілого, є однією з причин виникнення непрогнозованих відхилень в нормальній роботі обладнання, що призводить до отримання недостатніх даних про його технічний стан. Рішення поставлених проблем можливе за рахунок удосконалення існуючих та розробки нових методів і засобів, що дозволяють представити систему діагностування, прогнозування та захисту у вигляді єдиного комплексу «СЕТО + система електропостачання», який підвищить надійність і безаварійність роботи СЕТО.

Проведене дослідження виявило недостатньо вивчені питання розроблення теоретичних і практичних методів діагностування пошкоджень і причин, що викликають спільно з системою електропостачання зупинку і поломку СЕТО.

При цьому недостатньо досліджено: взаємний вплив відхилень і несиметрії напруги мережі живлення на теплові процеси, що протікають в елементах СЕТО; енергозберігаючі методи контролю стану ізоляції електричної частини СЕТО і живильних ліній; оцінка і діагностування стану болтових струмоведучих з'єднань; прогнозування стану струмоведучих з'єднань і, в разі його ослаблення, визначення часу розвитку аварійного процесу; вплив товщини і виду пилового забруднення елементів СЕТО на теплові та діелектричні властивості ізоляції; вплив провалів напруги на роботу асинхронних двигунів; принципи побудови єдиної замкнутої системи діагностування і управління електротехнічними системами і комплексами.

В результаті накопичення ушкоджень відбувається погіршення робочих характеристик, виникає необхідність неруйнівного контролю цих процесів. Моніторинг передбачає безперервну або періодичну реєстрацію характеристик окремих компонент або системи в цілому. Для цих цілей використовуються одна або кілька характеристик, які дають інформацію про стан об'єкта. При цьому для характеристик, які виконують функцію попередження, повинні бути відомі критичні значення.

Значна частина загальних експлуатаційних витрат підприємств витрачається на ремонт і технічне обслуговування електроустаткування. Тому особливу важливість мають питання оцінювання поточного стану використовуваного електроустаткування, своєчасної діагностики аварійних і передаварійних режимів його роботи, оцінки залишкового ресурсу. Складність технічної діагностики електрообладнання технологічних комплексів, особливо в гірничій і нафтогазовій промисловості, зумовлена його широкою номенклатурою, специфікою виконання і режимів роботи.

Метою діагностики електротехнічних комплексів є підвищення їх надійності та збільшення технічного ресурсу. Підвищення надійності досягається за рахунок раннього виявлення дефектів і несправностей, що дозволяє усунути їх під час технічного обслуговування і виключає відмови під час роботи. Підвищення технічного ресурсу систем відповідального призначення забезпечується за рахунок переходу до їх технічного обслуговування за станом.

В даний час для багатьох галузей промисловості характерний перехід від технічного обслуговування обладнання за регламентом або за виходом з ладу до обслуговування за фактичним станом. Причому останнє забезпечує значне скорочення експлуатаційних витрат.

Для переходу до нових форм технічного обслуговування необхідно мати відповідні теоретичне підґрунтя і системи технічної діагностики, які забезпечують адекватну оцінку поточного стану обладнання та прогноз його подальшої працездатності.

У другому розділі розглянуто причини зміни властивостей ізоляції, проаналізовані математичні моделі та запропоновано нові методи контролю її стану.

Погіршення якості ізоляції призводить до зниження експлуатаційної надійності ЕТО через появу параметричних відмов. Фактично погіршуються показники не тільки безвідмовності, а й ремонтпридатності, оскільки змінюється ймовірнісна модель випадкових напрацювань, як до відмови, так і на відмову. В останньому випадку для забезпечення нормативного технічного ресурсу необхідно зменшити міжремонтний інтервал, адаптуючи систему СЕТО.

Даний розділ присвячений дослідженню математичної моделі впливу на об'ємний і поверхневий опір ізоляції такими факторами, як несиметрія і відхилення напруг в мережі живлення, зміна температури режимів ЕТО, поява кумулятивних, пилових впливів.

Оскільки нагрівостійкість визначається швидкісною характеристикою старіння ізоляції під впливом підвищеної температури, особливого значення набувають методи розрахунку швидкості старіння ізоляції, в тому числі і метод, який визначає термін служби ізоляції. Додатковий нагрів ізоляції викликає відхилення напруг, несиметрію напруг і струмів, викликає дисбаланс фазних опорів. Виявлення, захист і облік теплового старіння ізоляції вимагають удосконалення існуючих теплових моделей і методів неруйнівного контролю.

Встановлено взаємозв'язок між коефіцієнтом несиметрії і відхиленням напруг, що дозволяє спростити процедури визначення втрат потужності в завантаженій фазі ЕО. При умові $U_1=U_H$, як одиничний випадок, коефіцієнт несиметрії, визначається за формулою:

$$k_{2U} = (U_2/U_i) \cdot 100\%, \quad (1)$$

де U_1, U_2 – напруги прямої і зворотної послідовностей; U_H – номінальна напруга.

Якщо згідно з методом симетричних складових фазові напруги визначити виразами:

$$\dot{U}_a = |U_i|; \dot{U}_b = |U_i| a^2; \dot{U}_c = |U_i| a, \quad (2)$$

де $a = -0,5 + j0,866$ – фазний множник або оператор повороту, то система фазових напруг при наявності несиметрії і відхилень визначиться наступним чином:

$$\dot{U}_a = D|U_i|; \dot{U}_b = M|U_i|a^2 e^{j\varphi_m}; \dot{U}_c = N|U_i|ae^{j\varphi_n}, \quad (3)$$

де D, M, N – коефіцієнти, що враховують кратність зміни фазових напруг.

Відповідно напруги прямої U_1 , зворотної U_2 і нульової U_0 послідовностей з врахуванням кратності зміни фазних напруг мають вигляд:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}CU_i e^{j\varphi_1}; \dot{U}_2 = \frac{1}{3}BU_i e^{j\varphi_2}; \dot{U}_0 = \frac{1}{3}T|U_i|e^{j\varphi_0}, \quad (4)$$

де

$$C = \sqrt{D^2 + M^2 + N^2 + 2D(M \cos \varphi_m + N \cos \varphi_n + 2MN \cos(\varphi_m - \varphi_n))};$$

$$B = \sqrt{D^2 + M^2 + N^2 + 2D\left(M \cos\left(\varphi_m + \frac{2\pi}{3}\right) + N \cos\left(\varphi_n + \frac{4\pi}{3}\right) + 2MN \cos\left(\varphi_m - \varphi_n + \frac{4\pi}{3}\right)\right)};$$

$$T = \sqrt{D^2 + M^2 + N^2 + 2D\left(M \cos\left(\varphi_m + \frac{4\pi}{3}\right) + N \cos\left(\varphi_n + \frac{2\pi}{3}\right) + 2MN \cos\left(\varphi_m - \varphi_n + \frac{2\pi}{3}\right)\right)}.$$

Коефіцієнт несиметрії напруг визначається, як

$$k_{2U} = (B/C) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Представивши модуль напруги прямої послідовності в вигляді

$$|\dot{U}_1| = C \frac{U_H}{3} \quad (6)$$

отримаємо

$$C = 3(1 + \Delta U). \quad (7)$$

Значення коефіцієнта несиметрії при наявності відхилень напруг визначиться за виразом

$$k_{2U} = \sqrt{1 - \frac{k_2}{9(1 + \Delta U)}}. \quad (8)$$

Відповідно відхилення напруги:

$$\Delta U = \sqrt{\frac{k_2}{9(1 - k_{2U}^2)}} - 1, \quad (9)$$

де

$$k_2 = 3 \left[MD \left(\cos \varphi_m + \sqrt{3} \sin \varphi_m \right) + ND \left(\cos \varphi_n - \sqrt{3} \sin \varphi_n \right) + MN \left(\cos (\varphi_m - \varphi_n) - \sqrt{3} \sin (\varphi_m - \varphi_n) \right) \right].$$

Потужність найбільш завантаженої фази

$$P_{\max} = P_i (1 + \Delta U)^2 \left[1 + k_{2U}^2 k_n^2 k_{\Delta U}^2 + 2k_{2U} k_{\Delta U} k_n \cos (\varphi_1 - \varphi_2) \right], \quad (10)$$

де P_n – потужність фази асинхронного двигуна при номінальному навантаженні; k_n – кратність пускового струму; $k_{\Delta U}$ – коефіцієнт, що враховує зміну опору зворотної послідовності при відхиленні напруги від номінальної. Максимальна потужність в фазі буде при різниці між кутами напруги прямої і зворотної послідовностей рівній нулю.

Тепло, що виділяється за одиницю часу в обмотці статора ЕД, пропорційне потужності електричних втрат, тоді:

$$\Delta \theta_{уст} = \Delta \theta_n (\Delta P / \Delta P_n), \quad (11)$$

де $\Delta \theta_n$ – перевищення температури обмоток щодо номінального режиму; ΔP_n – втрати потужності в номінальному режимі роботи АД; ΔP – втрати потужності, що відповідають температурі $\Delta T_{уст}$.

Перевищення температури обмотки при відхиленнях показника якості електроенергії в мережі визначається виразом:

$$\Delta \theta_{нес.} = \Delta \theta_n \left[(1 + \Delta U)^2 \left(1 + K_{21}^2 + 2K_{21} \cos (\varphi_1 - \varphi_2) \right) \right] \left(1 - e^{-t/\tau} \right). \quad (12)$$

Термін служби ізоляції при роботі ЕД в умовах несиметрії і відхилень напруги в мережі живлення і перевищення температури навколишнього середовища дорівнює:

$$t = t_n e^{-\left(\Delta \theta_p + \Delta \theta_{нес.} + \Delta \theta_{\Delta U} + \Delta \theta_{о.с} \right) / \Delta \theta}, \quad (13)$$

де t_i – нормативний термін експлуатації, $\Delta \theta_p$ – перевищення температури ізоляції, викликане струмом навантаження при зміні технологічного режиму; $\Delta \theta_{нес.}, \Delta \theta_{\Delta U}$ – додаткове збільшення температури ізоляції обмоток ЕД, викликане наявністю несиметрії та відхиленнями напруги в мережі; $\Delta \theta_{о.с}$ – додаткове збільшення температури ізоляції обмоток ЕД, викликане перевищенням температури навколишнього повітря відносно 24 °С.

У розроблених технічних засобах прогнозування передаварійних ситуацій і встановлення часу профілактичних робіт використано залишковий термін служби ізоляції – $t_{зал.}$, який визначається як:

$$t_{зал.} = t_n - \sum_i^n t_i, \quad (14)$$

де t_i – час роботи ЕД з тепловими навантаженнями, викликаними відхиленнями та несиметрією напруг мережі, технологічними перевантаженнями і динамічними коливаннями температури навколишнього повітря.

Досліджено математичну модель контролю стану ізоляції ЕО, що працює в умовах струмового перевантаження і кумулятивного запилення. Виявлені причини локального перегріву ізоляції АД, працюючих в умовах запилення, та розроблено новий метод діагностики та захисту АД при температурному перевантаженні, суть якого полягає в наступному:

- на двох ділянках поверхні ізоляції елемента ЕО, схильної і несхильної до запилення встановлюють два термодавачі і отримують таким чином два значення температури з протилежних поверхонь ізоляції - $\theta_{дат 1}, \theta_{дат 2}$;

- порівнюють отримані значення температур між собою і з температурою, величина, якої дорівнює допустимому критичному значенню;

- якщо різниця в значеннях температур склала величину більше 5°C і виконуються нерівності $\theta_{дав.1} > \theta_{дав.2} + 5^\circ\text{C}$, $\theta_{дав.1} < 100^\circ\text{C}$, то діагностується, що запилення ізоляції шаром пилу перевищує задану величину. Виконання умови нерівності визначає наявність шару пилу на поверхні ізоляції;

- при одночасному рості величин температур двох давачів і виконанні нерівності $\theta_{дат 1} = \theta_{дат 2} \geq 100^\circ\text{C}$ виконання нерівності є діагностичним критерієм визначення струмового перевантаження ЕО.

Дослідження математичної моделі теплового методу контролю струмового перевантаження ЕО і локального перегріву ізоляції проведено на основі рівняння теплового балансу, рішення якого при сталому тепловому режимі, має вигляд:

$$\Delta P = k_{\text{тп}} S_{\text{пд}} (\theta_{об} - \theta_{ос}), \quad (15)$$

де $\theta_{об}$ – температура обмотки, $^\circ\text{C}$; $\theta_{ос}$ – температура навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$; $k_{\text{тп}}$ - коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/\text{см}^2\text{град}$; $S_{\text{пд}}$ - площа поверхні давача, см^2 .

Вираз для визначення приросту товщини шару пилу за умови допустимого нагріву ізоляції обмоток статора ЕД визначиться виразом:

$$\Delta h = \lambda S_{\text{нд}} (\theta_{\text{yc2}} - \theta_{\text{yc1}}) / l_{\text{раб}}^2 Rk_I, \quad (16)$$

де $\theta_{\text{yc1}} = l_{\text{раб}}^2 Rk_I / k_{\text{тп}} S_{\text{пд}}$ – температура ізоляції і давача, непокритих пилом; θ_{yc2} – температура ізоляції й давача під шаром пилу завтовшки h ; k_I – коефіцієнт кратності струму навантаження; λ - коефіцієнт теплопровідності пилу.

Допустима товщина пилового покриття, що визначається з умови неприпустимості локального перегріву ізоляції більше 5°C , визначається за виразом:

$$\Delta h_{\text{дон}} = \frac{S_{\text{пд}}}{l_{\text{раб}}^2 R k_I} 5\lambda. \quad (17)$$

Розроблено тестові булеві функції методу контролю струмового перевантаження ЕО і локального перегріву ізоляції.

Позначимо аргументи булевих змінних як:

$X_1 = \langle 1 \rangle$ - при виконанні умов $T_{\text{дат 1}} < T_{\text{кр}}$,

$X_2 = \langle 1 \rangle$ - при виконанні умов $T_{\text{дат 2}} < T_{\text{кр}}$,

$X_3 = \langle 1 \rangle$ - при виконанні умов $T_{\text{дат 1}} - T_{\text{дат 2}} \geq 5^\circ\text{C}$,

$X_4 = \langle 1 \rangle$ - при виконанні умов $T_{\text{дат 1}} = (T_{\text{дат 2}} \pm 4^\circ\text{C}) > 100^\circ\text{C}$.

Мінімізована диз'юнктивна нормальна форма визначається як

$$F(X_1, X_2, X_3, X_4) = (X_1 \cup X_2 \cup \bar{X}_3 \cup \bar{X}_4) \cup (X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup \bar{X}_4) \cup (X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup X_4).$$

Проведено дослідження математичної моделі контролю стану ізоляції АД, що працює в умовах локальної компенсації реактивної потужності.

$$R_{\text{із.}} = f\left(\frac{du_{\text{бк max}}}{dt}\right). \quad (18)$$

Розроблено енергозберігаючий метод діагностики стану ізоляції кабелю живлення та ізоляції ЕО і контролю режимів мережі живлення в якому:

- у робочому режимі ЕО проводиться локальна компенсація реактивної потужності за рахунок паралельного включення ЕО і батареї конденсаторів;

- у робочому режимі ЕО вимірюють зміни величин фазних напруг на клеммах БК, відсутність однієї або двох фазних напруг визначає наявність неповнофазних режимів або коротких замикань в мережі живлення;

- у момент відключення ЕО від мережі відбувається визначення максимального значення напруги на клеммах одного з конденсаторів. Конденсатор з найбільшою напругою підключається до клем «фаза-корпус» ЕО і проводять вимірювання швидкості розряду БК на опір ізоляції ЕО і кабелю живлення. Різні значення швидкості зміни напруги на клеммах конденсатора відповідають різним значенням опорів ізоляції ЕО і кабелю живлення. Залежно від величини активної складової опору ізоляції та опору кабелю живлення перехідний процес загасання напруги на клеммах конденсатора може бути як періодичним, так і аперіодичним. Зміна режиму перехідного процесу загасання є критерієм визначенням зниження величини опору ізоляції нижче допустимого значення.

Процес розряду БК описує диференціальне рівняння другого порядку

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_g}{L_{\text{да}}} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{L_{\text{да}} C_{\text{бк}}} = 0. \quad (19)$$

При $\frac{1}{L_{\partial a} C_{\partial k}} < \left(\frac{R_g}{2L_{\partial a}}\right)^2$ перехідний процес розряду БК носить

апериодичний характер. Швидкість зміни напруги U_{BK} залежить від величини R_g .

Результати математичного моделювання (рис. 1) дозволили встановити числові значення швидкості розряду БК, що визначають порогові величини активного і ємнісного опору, та використовувати їх величини у пристрої діагностики стану ізоляції ЕО і кабельної лінії.

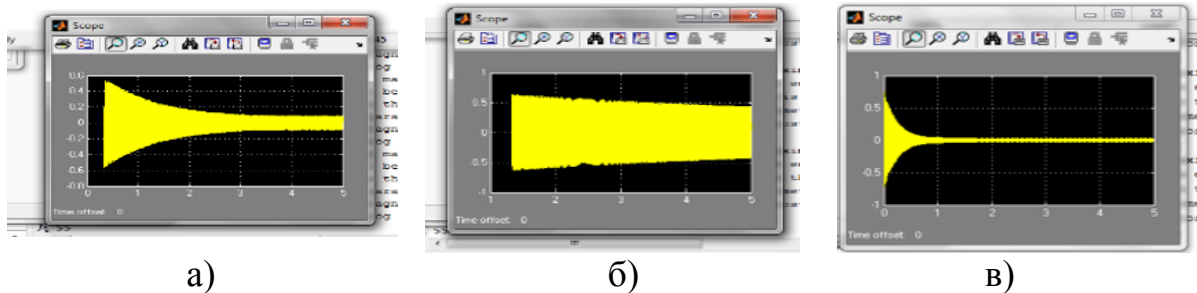


Рис. 1 Результати моделювання: а) швидкість розряду дорівнює 0,1 в/с; б) швидкість розряду дорівнює 0,01в/с; в) швидкість розряду дорівнює 0,5в/с.

Швидкість розряду БК, яка дорівнює 0,5 в/с є критерієм діагностики пошкодження ізоляції.

В мікропроцесорних системах діагностики і захисту ЕО перехід об'єкта, що діагностується, в режим технологічної роботи і в режим технологічної паузи, а так само, перехід зі стану «справний» в стан «несправний» запропоновано аналітично описувати за допомогою оціночних булевих функцій.

Визначимо змінні аргументи булевої функції як:

$X_1 = \langle 1 \rangle$ – команда включення об'єкта в технологічний режим;

$X_1 = \langle 0 \rangle$ – команда переходу об'єкта в режим технологічної паузи;

$X_2 = \langle 1 \rangle$ - виконання умови $U_{AB} \neq 0$, наявність лінійної напруги;

$X_2 = \langle 0 \rangle$ - виконання умови $U_{AB} = 0$, відсутність лінійної напруги;

$X_3 = \langle 1 \rangle$ - виконання умови $U_{BC} \neq 0$, наявність лінійної напруги;

$X_3 = \langle 0 \rangle$ - виконання умови $U_{BC} = 0$, відсутність лінійної напруги;

$X_4 = \langle 1 \rangle$ - виконання умови $U_{CA} \neq 0$, наявність лінійної напруги;

$X_4 = \langle 0 \rangle$ - виконання умови $U_{CA} = 0$, відсутність лінійної напруги;

$X_5 = \langle 1 \rangle$ - виконання умови $\frac{dU_{BK}}{dt} \geq V_{кр}$ – опір ізоляції дорівнює або менше 0,5 мОм;

$X_5 = \langle 0 \rangle$ - виконання умови $\frac{dU_{BK}}{dt} \leq V_{кр}$ – опір ізоляції більше 0,5 мОм – «справний стан»;

Мінімізована диз'юнктивна нормальна форма визначиться як

$$F(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = (X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup X_4 \cup \bar{X}_5) \cup (\bar{X}_1 \cup \bar{X}_2 \cup \bar{X}_3 \cup \bar{X}_4 \cup X_5). \quad (20)$$

Проведено визначення відносної та абсолютної похибок, а відповідно, і меж довірчих інтервалів для контролю опору ізоляції

$$R_{iz} = \frac{dU_{кб}}{dt} \quad (21)$$

Для вимірювання напруги на клеммах БК використано давач напруги LV-25P з гальванічною розв'язкою між первинною (силовою) і вторинною (вимірювальною) ланками. Коефіцієнт перетворення складає 2500:1000, точність перетворення складає $\Delta U = \pm 2\%$, час вимірюється з похибкою не більше $\Delta t = \pm 0,5\%$.

Відносна похибка, відповідно, $\Delta R = \pm \sqrt{\Delta U^2 + \Delta t^2} = \pm 2,06\%$. Таким чином, відносна похибка вимірювання опору ізоляції не перевищує $\pm 2,06\%$.

Абсолютна похибка вимірюваного опору ізоляції при критичному значенні 0,5 мОм складе: $\Delta R_{абс} = \pm 0,5 \cdot 2,06:100 = \pm 0,01$ мОм.

На підставі даних розрахунків можна стверджувати, що дійсне значення опору ізоляції при критичній величині знаходиться в інтервалі: $(0,5 - 0,01) \text{ мОм} < R_{из} < (0,5 + 0,01) \text{ мОм}$ при ймовірності $P=0,95$.

Термін експлуатації ЕД, що працює в умовах, які динамічно змінюються (підвищена вологість, запиленість, тривалі технологічні паузи), становить 1,5 – 2,3 роки, при нормативному експлуатаційному режимі - 25 років.

Досліджено математичну модель методу діагностування технологічного зносу ізоляції за критеріями зволоження і запилення провідним і непровідним пилом, яка складається з двох етапів;

Перший етап – $R_{из.дон.} = f_1(R_i, G_i, R_{дон}, G_{дон})$ визначає природне старіння ізоляції, її зволоження і покриття пилом, що проводить струм.

Другий етап – $G_{из.дон.} = f_2\left(f_1, \frac{dG}{dt_i}, \frac{dG}{dt_{дон}}\right)$, який виконується за першим

ступенем, визначає момент покриття ізоляції пилом, що не проводить струм.

Розроблено метод інформаційного забезпечення, суть якого полягає в тому, що:

- проводиться циклічний вимір об'ємного опору ізоляції після кожного відключення ЕО від мережі живлення;

- порівнюються отримані значення об'ємного опору ізоляції з граничною величиною, яка дорівнює 0,5 мОм, та визначається повне зношення ізоляції за рахунок її природного старіння;

- після кожного відключення ЕД від мережі та зміни об'ємного опору встановлюється граничне значення, яке визначає допустимий рівень зниження величини об'ємного опору ізоляції при її зволоженні, що є визначальним моментом для включення джерела підсушування. Вона ж, після кожного відключення ЕО від мережі живлення, коригується на величину ΔR , фіксуючи, тим самим, величину зниження об'ємного опору ізоляції за рахунок її

природного старіння за період роботи ЕО;

- у робочому і неробочому режимах ЕО безперервно вимірюють поверхневу провідність ізоляції, порівнюючи її значення із заданою встановленою величиною, яка визначає гранично допустиме забруднення поверхні ізоляції провідним пилом;

- при виявленні зволоження ізоляції підключають низьковольтне джерело живлення. У процесі нагрівання ізоляції (для видалення вологи) вимірюють швидкість зміни поверхневої провідності ізоляції і порівнюють отримане значення із заданою величиною. Досягнення швидкістю зміни поверхневої провідності заданої величини є визначальним моментом діагностуючого покриття поверхні ізоляції провідним або непровідним пилом і її зволоження.

Для аналізу причин появи струму, що протікає по поверхні ізоляції, і виявлення чинників, які впливають на його величину, розглянуто ділянку ізоляційного матеріалу з неоднорідними за товщиною діелектричними властивостями. Умовно на прямолінійній ділянці ізоляції вибрано дві точки, що характеризують дві різні величини опору $Z_{i3,1}$, $Z_{i3,2}$. Значення опору ізоляції першої точки, яка піддається лише природному старінню, більше ніж величина опору другої точки, яку приймемо за базову величину. Тоді, струми витоків в точках 1 і 2 визначаються відповідно

$$I_{\text{вум},1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{i3,1}}, \quad I_{\text{вум},2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{i3,2}}, \quad (22)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга; U_1 – напруга на поверхні ізоляції в точці 1 і U_2 – відповідно в точці 2; $Z_{i3,1}$, $Z_{i3,2}$ – опір ізоляції в точках 1 і 2.

При відсутності неоднорідності і мікротріщин в ізоляційному матеріалі, струми в точках 1 і 2 рівні ($I_{\text{вум}1}=I_{\text{вум}2}$), рівні і напруги U_1 і U_2 на поверхні ізоляції в цих точках, оскільки різниця потенціалів $\Delta\varphi_{1,2}=(U_1-U_2)=0$, а струм $I_{\text{нов}}$ відсутній.

Якщо умови експлуатації ізоляції в точках 1 і 2 різні, то різні і температурні, механічні дії, об'ємна неоднорідність ізоляційного матеріалу, що призведе до нерівності величини опорів ізоляції в цих точках.

Позначимо величину опору $Z_{i3,2}$ в точці 2 через значення величини опору $Z_{i3,1}$ в точці 1:

$$Z_{i3,2} = Z_{i3,1} - \Delta Z, \quad (23)$$

де ΔZ – значення зниження опору ізоляції.

Струми витоків в точках 1 і 2 визначаються як:

$$I_{\text{вум}1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{i3,1}}. \quad (24)$$

З'явиться різниця потенціалів на поверхні ізоляції між точками 1 і 2, що визначається за формулою:

$$U_1 = U_\phi - I_{ym1} Z_{i31}, \quad (25)$$

$$U_2 = U_\phi - I_{ym2} (Z_{i31} - \Delta Z), \quad (26)$$

$$\Delta \phi_{1,2} = I_{ym2} \Delta Z. \quad (27)$$

Наявність провідного пилу або зволоженого непровідного пилу на поверхні ізоляції, призводить до появи поверхневого струму, який визначається як:

$$I_{нов} = \frac{\Delta \phi_{1,2}}{R_{нов}} = \frac{I_{ym} \Delta Z}{R_{нов}}, \quad (28)$$

де $R_{нов}$ – величина опору пилу на поверхні ізоляції між точками 1 і 2; при $\Delta Z \rightarrow 0$, поверхневі струми відсутні.

Величина $R_{нов}$ дорівнює еквівалентному опору пилу, який залежить від товщини шару пилу h , відстані $l_{1,2}$ між точками 1 і 2, питомому опору матеріалу пилу $\rho_{пилу}$, і величині опору, який спричинений наявністю вологи. Поверхневий опір розраховується за виразом:

$$R_{нов} = \frac{1}{G_{нов}} = \frac{1}{G_{пил} + G_{із.мат.} + G_{вл}} \frac{1}{S}, \quad (29)$$

де $G_{нов}$ – еквівалентна питома провідність; $G_{пил}$ – питома провідність пилу; $G_{вл}$ – питома провідність вологи; $G_{із.мат.}$ – питома поверхнева провідність ізоляції; l – довжина ділянки, яка покрита пилом; S – площа перетину шару пилу.

Величина поверхневого опору $R_{нов}$ змінюється від 0 і до нескінченно великої величини, відповідно, поверхневий струм також змінюється від нульового значення до великої величини. Навіть незначні величини поверхневих струмів призводять до нагрівання струмопровідних містків і локального пошкодження ізоляції.

Для виявлення запылення ізоляції обмоток провідним пилом вимірюваними параметрами є напруга, яка додається до давача поверхневого стану, і сила струму, що залежить від товщини шару пилу. Контрольований параметр є товщина шару пилу еквівалентний поверхневій провідності – $G_{нов} = \frac{I_{нов}}{U_{дат}}$.

Для визначення товщини шару запылення ізоляції обмоток ЕД непровідним пилом вимірюваними параметрами є швидкість зміни поверхневої провідності

$$V_{нов} = \frac{dG_{нов}}{dt}.$$

Для вимірювання напруги і струмів використані вимірювальні пристрої з класом точності до $k=1$. Час вимірюється з похибкою не більше $\Delta t = \mp 0,2\%$.

Відносна похибка для опору ізоляції. $R_{\text{изол}}$, відповідно, $\Delta R = \mp \sqrt{\Delta U^2 + \Delta I^2} = \mp 1,41\%$.

Абсолютна похибка вимірюного опору ізоляції при критичному значенні 0,5 мОм складе: $\Delta R_{\text{абс}} = \mp 0,5 \cdot 1,41:100 = \mp 0,007$ мОм.

На основі даних розрахунків можна стверджувати, що дійсне значення опору ізоляції при критичній величині знаходиться в межах:

$$(0,5 - 0,007) \text{ мОм} < R_{\text{из}} < (0,5 + 0,007) \text{ мОм} \text{ при ймовірності } P=0,95.$$

На підставі даних розрахунків можна стверджувати, що дійсне значення поверхневого опору ізоляції, при критичній величині знаходиться в інтервалі: $(3,00 - 0,042) \text{ мОм} < R_{\text{пов}} < (3,00 + 0,042) \text{ мОм}$ при ймовірності $P=0,95$.

Відносна похибка для визначення товщини пилового непровідного покриття $h_{\text{неп}}$, відповідно, $\Delta h_{\text{неп}} = \mp \sqrt{\Delta U^2 + \Delta T^2 + \Delta I^2} = \mp 1,43\%$.

Абсолютна похибка вимірюної товщини шару пилу на ізоляції при критичному значенні $\Delta h_{\text{неп}} = 2 \text{ см}$ складе: $\Delta h_{\text{неп}} = \mp 2,0 \cdot 1,43:100 = \mp 0,029$ см.

На підставі даних розрахунків можна стверджувати, що дійсне значення товщини шару пилу на поверхні ізоляції, при критичній величині, знаходиться в інтервалі: $(2,00 - 0,029) \text{ см} < \Delta h_{\text{неп}} < (2,00 + 0,029) \text{ см}$ при ймовірності $P=0,95$.

Для реалізації методу розроблено мікропроцесорний пристрій та тестові булеві функції.

Для діагностування стану ізоляції введено аргументи:

$X_1 = \langle 1 \rangle$ – виконання технологічного режиму,

$X_2 = \langle 1 \rangle$ – при виконання умов $G_{\text{пов}} \geq G_{\text{кр}}$,

$X_3 = \langle 1 \rangle$ – при виконання умов $R_{\text{из}} \leq R_{\text{уст}}$,

$X_4 = \langle 1 \rangle$ – виконання включення ланок підсушування ізоляції обмоток ЕД,

$X_5 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні умов $\frac{dG_{\text{пов}}}{dt} \leq V_{\text{доп}}$,

$X_6 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні умов $R_{\text{из}} \leq 0,5 \text{ мОм}$.

Мінімізовані оцінки булевих функцій для виявлення ослабленого і аварійного режимів КБЗ мають вигляд:

$$\begin{aligned} F(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) = & (X_1 \cup \bar{X}_2 \cup \bar{X}_3 \cup \bar{X}_4 \cup X_5 \cap \bar{X}_6) \cap \\ & \cap (X_1 \cup X_2 \cup \bar{X}_3 \cup \bar{X}_4 \cup \bar{X}_5 \cap \bar{X}_6) \cap \\ & \cap (\bar{X}_1 \cup \bar{X}_2 \cup \bar{X}_3 \cup \bar{X}_4 \cup X_5 \cap \bar{X}_6) \cap \\ & \cap (\bar{X}_1 \cup \bar{X}_2 \cup \bar{X}_3 \cup \bar{X}_4 \cup \bar{X}_5 \cap \bar{X}_6) \cap \\ & \cup (\bar{X}_1 \cup \bar{X}_2 \cup X_2 \cup X_4 \cup X_5 \cap \bar{X}_6) \cap \\ & \cup (\bar{X}_1 \cup \bar{X}_2 \cup X_3 \cup \bar{X}_4 \cup X_5 \cap 6). \end{aligned}$$

Третій розділ присвячений вирішенню двох задач: розробці методу виявлення початкового моменту зміни механічної щільності болтових струмоведучих з'єднань (БСЗ) та розробці методу контролю динаміки зміни щільності БСЗ в часі і прогнозування залишкового ресурсу експлуатації БСЗ.

Найбільшою проблемою є отримання вимірювальної інформації про початок зміни перехідного опору БСЗ в режимі реального часу.

Функціональна структура нового методу полягає в наступному:

- виявляються ділянки стаціонарності контрольованих параметрів, температура БСЗ, струм навантаження, температура навколишнього середовища;

- контактено вимірюється температуру БСЗ $\theta_{убз}$;

- вимірюється струм, що протікає в цьому БСЗ, і визначається розрахункове значення температури справного БСЗ - $\theta_{сі}$;

- вимірюється температура навколишнього повітря - $\theta_{нс}$;

- коректується розрахункове значення температури справного БСЗ - $\theta_{кр}$ з урахуванням зміни температури навколишнього повітря $\theta_{нс}$;

- порівнюються значення температур $\theta_{кр}$ і $\theta_{убз}$. По перевищенню температури БСЗ, яка розрахована, роблять висновок про збільшення його перехідного опору, що є критерієм визначення початкового моменту розвитку аварійної ситуації;

- при досягненні температурою БСЗ визначеного критичного значення, проводиться відключення обладнання від мережі.

Процес нагріву БСЗ, викликаного втратами в з'єднанні, що викликані струмами навантаження, з достатньою для практичних цілей точністю можна описати диференціальним рівнянням нагріву однорідного тіла. Розв'язок рівняння відомий і має вигляд:

$$\theta_{бз} = \theta_{убз} - (\theta_{убз} - \theta_{нач}) e^{-t/\tau}, \quad (30)$$

де $\theta_{бз}$ – температура БСЗ; $\theta_{убз}$ - температура БСЗ у сталому режимі; τ – постійна нагріву БСЗ; $\theta_{нач}$ – початкова температура БСЗ, що викликана початковими втратами та температурою навколишнього повітря.

Температура БСЗ в сталому режимі, з урахуванням збільшення температури навколишнього середовища, де за нульове значення прийнято 24°C , і при відсутності нагріву початковими втратами попереднього струмового режиму, визначається виразом:

$$\theta_{убз} = \frac{I_{нагр}^2}{\alpha F} (R_{бс} + R_{пр}) + 24^{\circ}\text{C} + \Delta\theta, \quad (31)$$

де $\Delta\theta = \theta_{нс} - 24^{\circ}\text{C}$; $I_{нагр}$ – струм навантаження; $R_{бс}$, $R_{пр}$ – відповідно опір матеріалу БСЗ і перехідний опір БСЗ; $\theta_{нс}$ – температура навколишнього середовища.

Визначити початковий момент ослаблення БСЗ для стаціонарних і безперервних процесів зміни струму та температури навколишнього повітря дозволяють тестові оціночні булеві функції.

Введені аргументи булевих змінних характерних режимів експлуатації БСЗ як

$X_1 = \langle\langle 0 \rangle\rangle$ – логічний нуль, при відсутності струму;

$X_1 = \langle\langle 1 \rangle\rangle$ – логічна одиниця, при протіканні струму в БСЗ;

$X_2 = \langle\langle 0 \rangle\rangle$ при виконанні нерівності $(\theta_{cl} + (24 \text{ }^\circ\text{C} - \theta_{nc})) > (\theta_{бз})$;

$X_2 = \langle\langle 1 \rangle\rangle$ при виконанні нерівності $(\theta_{cl} + (24 \text{ }^\circ\text{C} - \theta_{nc})) < (\theta_{бз})$;

$X_3 = \langle\langle 0 \rangle\rangle$ при виконанні нерівності $(\theta_{бз}) < (\theta_{кр})$;

$X_3 = \langle\langle 1 \rangle\rangle$ при виконанні нерівності $(\theta_{бз}) > (\theta_{кр})$.

Досконалою диз'юнктивною новою формою ДДНФ, що описує стан БСЗ є вираз:

$$F = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \cup (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap \bar{X}_2 \cap X_3) \quad (32)$$

де \cup, \cap, \bar{X} – відповідно символи кон'юнкції, диз'юнкції і заперечення.

Мінімізовані булеві функції для різних режимів болтового з'єднання мають вигляд:

нормальному режиму роботи відповідає оціночна функція

$$F_{\text{н.р.}} = (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) = (1, 0, 0); \quad (33)$$

настанню початкового моменту ослаблення болтового з'єднання відповідає оціночна функція

$$F_{\text{осл. бз}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) = (1, 1, 0); \quad (34)$$

настанню аварійного режиму, що призводить до відключення об'єкта, відповідає оціночна функція виду

$$F_{\text{ав.р.}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) = (1, 1, 1) \quad (35)$$

В режимі нестационарності струмового навантаження та температури навколишнього повітря важливим є виявлення ділянок стаціонарності контрольованих параметрів. Для побудови діагностичних тестів виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ на ділянках стаціонарності введені додаткові аргументи булевих змінних:

$X_4 = \langle\langle 0 \rangle\rangle$ - при виконанні умови $\frac{dI_H}{dt} \neq 0$,

$X_4 = \langle\langle 1 \rangle\rangle$ - при виконанні умови $\frac{dI_H}{dt} = 0$.

$X_5 = \langle\langle 0 \rangle\rangle$ - при виконанні умови $\frac{d\theta_{nc}}{dt} \neq 0$,

$X_5 = \langle\langle 1 \rangle\rangle$ - при виконанні умови $\frac{d\theta_{nc}}{dt} = 0$.

$X_6 = \langle\langle 0 \rangle\rangle$ - при виконанні умови $\frac{d\theta_{бз}}{dt} \neq 0$,

$X_6 = \langle 1 \rangle$ - при виконанні умови $\frac{d\theta_{63}}{dt} = 0$.

Мінімізована диз'юнктивна булева функція для виявлення ослабленого та аварійного режимів БСЗ має вигляд:

наступу початкового моменту ослаблення БСЗ відповідає функція:

$$F_{\text{осл.бз}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 0, 1, 1, 1); \quad (36)$$

настанню аварійного режиму, що призводить до відключення об'єкта, відповідає функція булевої змінної

$$F_{\text{ав.р}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 1, 1, 1, 1) \quad (37)$$

де \sim - символ еквівалентності.

В режимах випадкового та нестационарного струмового навантаження та динамічних змінах температури навколишнього повітря важливим є виявлення ділянок стаціонарності контрольованих параметрів. Вони визначаються там, де відсутні перехідні процеси, з допомогою порівняння математичних очікувань струму, температури навколишнього повітря і температури болтового з'єднання.

Величина розрахункової, корегованої температури справного БСЗ в сталому режимі визначиться як:

$$\theta_{\text{кр}} = \frac{(M(I) + \sigma(I))^2}{\alpha F} (R_{63} + R_{\text{пр}}) + (24^\circ\text{C} + \Delta\theta), \quad (38)$$

де $\Delta\theta = (M_{\theta_{\text{нс}}} + \sigma_{\theta_{\text{нс}}}) - 24^\circ\text{C}$; $M(I)$ – математичне очікування струму навантаження на заданому інтервалі часу; σ_I – середньоквадратичне відхилення струму навантаження; $\sigma_{\theta_{\text{нс}}}$ – середньоквадратичне відхилення температури навколишнього повітря; $M_{\theta_{\text{нс}}}$ – математичне очікування температури навколишнього повітря.

Для побудови діагностичних тестів виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ для ділянок стаціонарності введено аргументи булевих змінних:

$X_4 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні умови $M_{I,i} - M_{I,i+1} \neq 0$;

$X_4 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні умови $M_{I,i} - M_{I,i+1} = 0$;

$X_5 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\theta_{\text{нс},i}} - M_{\theta_{\text{нс},i+1}} \neq 0$;

$X_5 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\theta_{\text{нс},i}} - M_{\theta_{\text{нс},i+1}} = 0$;

$X_6 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\theta_{63,i}} - M_{\theta_{63,i+1}} \neq 0$;

$X_6 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\theta_{63,i}} - M_{\theta_{63,i+1}} = 0$.

Оціночні булеві функції для виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ та аварійного режиму при випадкових змінах струму будуть визначатися наступними виразами:

настанню початкового моменту ослаблення БСЗ відповідає функція

$$F_{\text{ост.бз}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 0, 1, 1, 1); \quad (39)$$

настанню аварійного режиму, що призводить до відключення об'єкта, відповідає функція

$$F_{\text{ав.р}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 1, 1, 1, 1). \quad (40)$$

Для діагностування стану БСЗ у перехідному режимі розроблено метод діагностування і прогнозування його стану. Новизна методу полягає в тому, що зміна величини постійної нагріву БСЗ вважається інформаційним діагностичним параметром, за умови, що постійна нагріву є константою ЕО і аварійний стан ЕО не змінює величини струму, який протікає в ньому.

Досліджено математичну модель методу в якому залежність параметрів способу представлена виразом:

$$\tau = f(t, R_c, I_n^2, \Delta T_{nc}) \quad (41)$$

Алгоритм дій у розробленому методі полягає в наступному:

- при включенні ЕО в роботу, вимірюють струм, що протікає в БСЗ, температуру його навколишнього повітря;
- контроль температури проводиться до моменту настання усталеного режиму та визначається величина постійної нагріву і швидкість її зміни. Отримані значення запам'ятовуються та зберігаються як контрольні (базові) значення;
- при зміні величини струму навантаження, що протікає в БСЗ, або температури навколишнього повітря відбудеться зміна температури самого з'єднання; при цьому фіксують величину приросту його температури і час, протягом якого відбудеться ця зміна. Проводиться розрахунок постійної та швидкості нагріву БСЗ, величина перехідного опору;
- отримані розрахункові значення параметрів БСЗ порівнюються з початковими базовими значеннями;
- при різниці значень величин постійних нагріву менше 10% – робиться висновок про нормальний стан БСЗ;
- при різниці значень величин постійних нагріву більше 10% – робиться висновок про початок його ослаблення;
- розраховується прогнозований термін досягнення температурою болтового з'єднання допустимого значення;
- при досягненні температурою з'єднання допустимого значення обладнання відключається від мережі живлення.

У четвертому розділі представлені технічні рішення, які розроблені на базі результатів теоретичних досліджень, проведених в розділах 2 і 3, що дозволили встановити нові закономірності виявлення і розпізнання дефектів, підвищити швидкодію і чутливість технічних засобів контролю параметрів розпізнавання передаварійних ситуацій.

Розроблено багаторівневу діагностичну систему захисту ЕК у якій визначені рівні захисту та їх черговість роботи.

Перший рівень захисту – це діагностика стану мережі живлення.

Обов'язковою умовою для першого рівня захисту є виконання своїх функцій п'ятим рівнем захисту, тобто, перевірки наявності блокування від підключення ЕО до мережі живлення.

Другий рівень – це діагностика причин обриву струмоведучих ліній, яка виконується за умови проходження першого рівня і включення ЕО.

Третій рівень захисту – це температурний захист ЕО і діагностика причин виникнення теплових перевантажень. Обов'язковою умовою для виконання функцій захисту третього рівня є виконання функцій захистів першого і другого рівнів.

Четвертий рівень захисту – це виявлення початкового моменту ослаблення струмоведучого болтового з'єднання і прогнозування часу розвитку аварійної ситуації.

П'ятий рівень захисту - забезпечення надійного включення ЕО в мережу; своєчасна сигналізація про зниження опору ізоляції до значення 1 МОм;

Прикладом використання багаторівневої системи діагностики та захисту є захист рентгенівського комп'ютерного томографа (РКТ) потужністю 120 кВт. Забезпечення безаварійної роботи РКТ полягає в тому, щоб в аварійних випадках забезпечити його відключення без поломок. Новизна удосконаленого методу захисту РКТ полягає у наступному:

1. У початковий момент включення РКТ вимірюються рівні лінійних напруг мережі живлення і визначається наявність неповнофазної напруги в мережі.

2. В процесі роботи проводиться моніторинг зміни фронту першої гармонійної складової синусоїди лінійних напруг мережі з частотою опитування не менше 0,001 с. Визначається швидкість росту напруги і вона порівнюється із заданою величиною, за якою судять про рівень провалу напруги в мережі живлення.

3. У коло струму вмикають твердотільні реле (сімістори), управління якими здійснюється за рівнями лінійної напруги.

4. Після підключення РКТ до мережі живлення вимірюється сила фазних струмів. Наявність трьох фазних струмів визначає цілісність струмових ліній.

5. Паралельно РКТ включається блок конденсаторів (БК) для компенсації реактивної потужності.

6. При діагностуванні провалу напруги або наявності неповнофазного режиму мережі живлення твердотільне реле розмикає струмовий ланцюг. Момент розмикання струмових кіл визначено нульовими значеннями фазних струмів, а енергія, накопичена в БК, утримує напругу на клеммах АД до розмикання струмових кіл.

У розробленому методі для діагностування аварійних режимів мережі живлення використано швидкісну характеристику зміни фронту напруги першої гармонійної складової. Визначено діапазон зміни швидкісної характеристики при виявленні провалів, відхилень напруги і встановлено межі

режимних зон роботи РКТ при зміні швидкості фронту напруги в нормальних і аварійних режимах мережі, визначено поріг чутливості при переході швидкісної характеристики з однієї режимної зони в іншу.

Обов'язковою умовою застосування швидкісної характеристики зміни фронту кривої напруги для діагностики режиму мережі живлення і захисту трифазного споживача є зміна позначки миттєвого значення лінійної напруги і рівність його величини нульовому значенню. При контролі швидкості зміни трьох лінійних напруг виявлення аномального режиму мережі відбувається за 6,66 мс, що в три рази збільшує чутливість системи діагностики і захисту РКТ.

Розглянуто приклад використання багаторівневої діагностичної системи як інформаційної системи діагностики та захисту групи електродвигунів з використанням каналу зв'язку GSM-GPRS.

Отримання інформації про стан кожної одиниці обладнання потребує вирішення наступних завдань:

- визначення можливої кількості опитаних одиниць обладнання;
- визначення тривалості інтервалів між отриманням інформації про стан об'єкта;
- коригування інтервалу опитування при виявленні початкового моменту утворення передаварійний ситуації;
- максимального здешевлення інформаційного комплексу діагностики і захисту електрообладнання.

Початковий період опитування τ_{p1} при роботі двигуна в нормальному режимі, повинен задовольняти умові:

$$\tau_{p1} \leq \tau_{доп} (0,5...0,6), \quad (43)$$

де $\tau_{доп}$ – допустимий час роботи двигуна з перевантаженням і визначається при роботі двигуна в двофазному режимі.

Початковий період опитування τ_{pi} , при роботі двигуна в нормальному режимі, повинен задовольняти умові:

$$\tau_{pi} > n(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4), \quad (44)$$

де $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ - час, необхідний для опитування датчиків, обробки первинної інформації, передачі первинної інформації на головний сервер, прийняття рішення і спрацьовування комутаційної апаратури. Величина наступного періоду отримання інформації про протікання аварійного стану двигуна визначається виразом:

$$\tau_{p(i+1)} = \frac{2\delta(\theta_{крт} \text{ } ^\circ\text{C})}{\theta \text{ } ^\circ\text{C}} \tau_{pi}, \quad (45)$$

де δ – межа довірчого інтервалу, обумовлена класом точності вимірювальних засобів; $\theta_{\text{крт}}^{\circ\text{C}}$ - критична температура нагріву ізоляції, досягнення якої є визначальним моментом відключення електродвигун від мережі; $\Delta\theta^{\circ\text{C}}$ - приріст температури за період часу між попереднім і подальшим опитуваннями.

Час роботи електродвигуна в період з моменту визначення передаварійної ситуації до досягнення температурою ізоляції критичного значення визначається виразом:

$$\tau = \tau_{\text{н}} \ln \frac{\theta_{\text{крт}}^{\circ\text{C}} - \theta_{\text{нор}}^{\circ\text{C}}}{\theta_{\text{крт}}^{\circ\text{C}} - \theta_1^{\circ\text{C}}}, \quad (46)$$

де θ_1 – значення температури при першому вимірі в момент виявлення передаварійної ситуації; $\theta_{\text{нор}}$ – температура електродвигуна в нормальному режимі роботи.

Число електродвигунів в єдиній інформаційній системі при виконанні умови $\tau_{p(i+1)} = \min \tau_p$ визначиться виразом:

$$n \leq \frac{\min \tau_p}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4}. \quad (47)$$

Для оцінки процесів, що відбуваються в двигуні при його роботі в умовах несиметрії напруг, використовувалася імітаційна модель в системі MATLAB з розширенням Simulink.

Проаналізовано залежність крутного моменту від наявності несиметрії мережі живлення:

$$M = M_1 + M_2 = \left(m_1 I_{21}'^2 \frac{r_2'}{s} - m_1 I_{22}'^2 \frac{r_2'}{2-s} \right) \frac{P}{\omega_1}, \quad (48)$$

де M_1 – обертальний момент прямої послідовності; M_2 - обертальний момент зворотної послідовності; m_1 - кількість фаз; $I_{21}'^2$ - струм прямої послідовності у вторинній обмотці; $I_{22}'^2$ - струм зворотної послідовності у вторинній обмотці; r_2' - приведений активний опір фаз обмотки ротора; p - кількість пар полюсів; ω_1 - кутова швидкість; s – ковзання.

Зменшення крутного моменту призводить до уповільнення руху конвеєрної лінії. При коефіцієнті несиметрії, що дорівнює 2%, продуктивність перевантажувального комплексу знижується на 5,8%.

П'ятий розділ розглядає умови адаптації багаторівневої системи керування діагностики та захисту електрообладнання (БСКДтаЗ ЕО) в різні технологічні лінії та середовища, при цьому метою є розробка пристроїв та програмних алгоритмів, що дозволяють підвищити точність та чутливість технічних засобів діагностики передаварійних ситуацій, що виникають в ході нормальної експлуатації та захисту ЕО ЕТК.

Для ЕО, що працює в умовах запиленості і вологості розроблено пристрій, блок-схема якого представлена на рис. 2.

Особливість розробленого пристрою полягає в черговості виконання етапів виявлення та розпізнання причин зміни стану ізоляції ЕД.

На першому етапі виявляється технологічне старіння ізоляції.

На другому етапі виявляється покриття ізоляції провідним пилом.

На третьому етапі проводиться виявлення зволоження ізоляції двигуна.

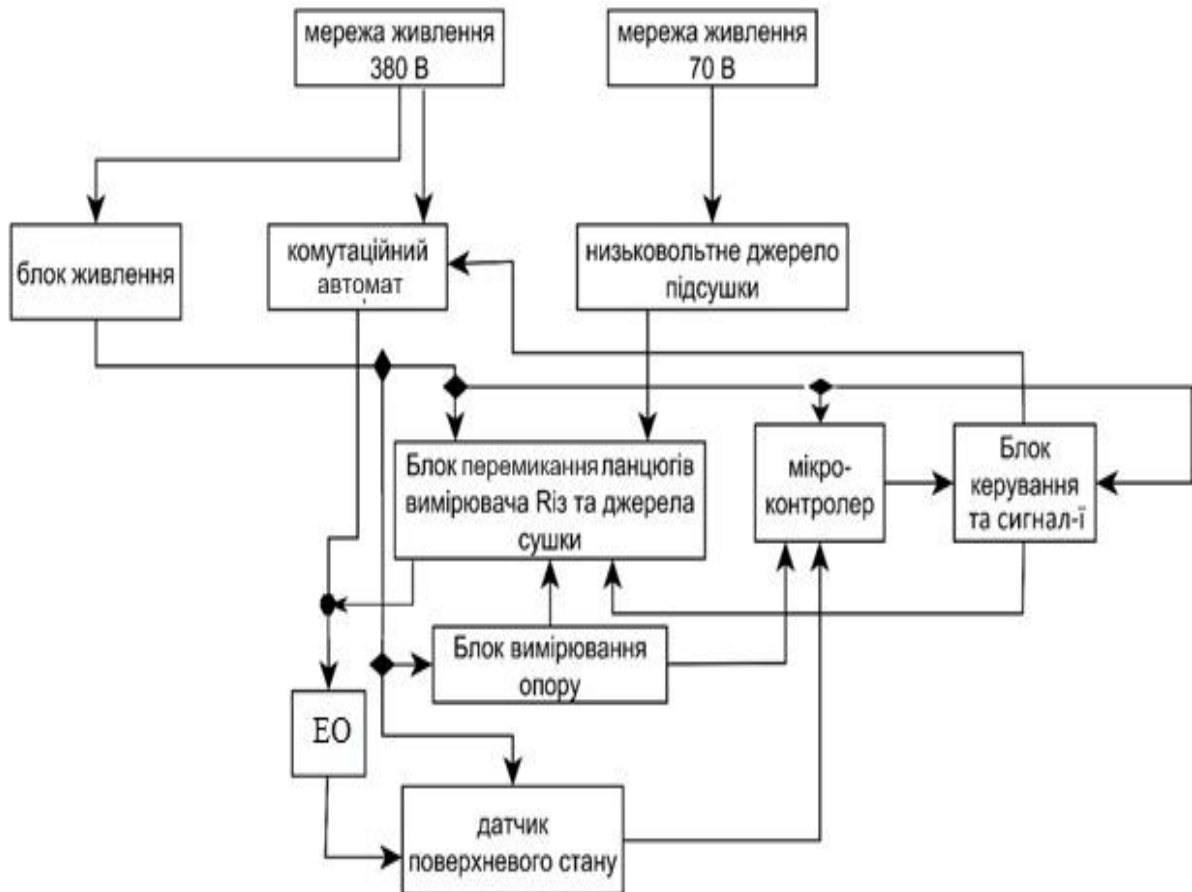


Рис. 2 Блок-схема пристрою діагностики стану ізоляції, виявлення технологічного старіння, товщини та виду пилу на поверхні ізоляції

Після вимірювання опору ізоляції проводиться корекція величини вимірюваного опору

$$R_{\text{кор.из}} = K_{t^{\circ}\text{C}} R_{\text{изм1}},$$

де $K_{t^{\circ}\text{C}}$ – температурний коефіцієнт, що показує зміну величини опору ізоляції при її охолодженні.

У період технологічної паузи ізоляція обмоток двигуна піддається зволоженню, її опір зменшується.

Захист ізоляції від зволоження здійснюється її підігрівом від низьковольтного джерела живлення.

Момент підключення джерела підігріву до обмоток ЕД визначається зниженням опору ізоляції до величини граничного значення, чому послуговує вираз: $R_{уст.} = R_{кор.із.} - 0,15R_{кор.із.}$

Джерело низької напруги підключається на 30 хвилин. Після його відключення вимірюється опір ізоляції, та при виконанні умови $R_{уст.} > R_{изм1}$ знову підключаються джерело низької напруги до обмоток ЕД.

Настання чергової технологічної паузи призведе до визначення нового значення. $R_{кор.із}$ и $R_{уст.}$

На четвертому етапі визначається запилення ізоляції непровідним пилом.

Для ЕД, які працюють в умовах тривалих технологічних пауз, розроблені пристрої та програмне забезпечення контролю стану ізоляції ЕО для одноступінчастої та багатоступінчастої локальної компенсації реактивної потужності. На рис. 3, приведена блок-схема пристрою для одноступінчастої компенсації реактивної потужності.

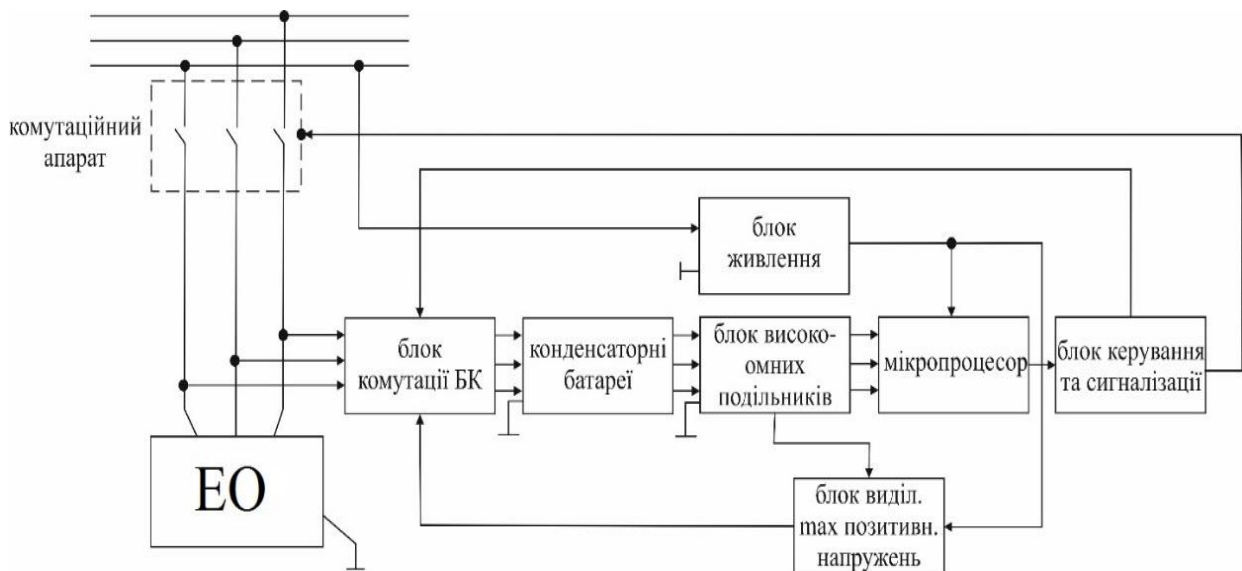


Рис. 3 Блок-схема пристрою контролю стану ізоляції ЕО та режимів мережі живлення при одноступінчастій компенсації реактивної потужності

Робота пристрою полягає у наступному.

У режимі роботи ЕО відбувається контроль одно-, дво-, трифазних коротких замикань, неповнофазних режимів і провалів напруги в мережі живлення за величиною швидкості зміни напруги на клеммах БК.

У режимі технологічної паузи використовується енергія, накопичена в батареї конденсаторів для контролю технологічного старіння ізоляції – за рахунок вимірювання швидкості розряду БК.

Для ЕД, які працюють в умовах підвищеної запиленості, розроблено пристрій їх температурного захисту і визначення товщини шару пилу на поверхні ізоляції, блок схема якого приведена на рис. 4.

Особливістю розробленого пристрою є наступне.

На поверхні обмоток ЕД, схильних і не схильних до запилення, встановлюються температурні датчики.

За значеннями температур датчиків виявляється струмове перевантаження, граничне локальне запилення ізоляції і визначається товщина пилового покриття обмотки.

Виявлення граничного запилення визначає момент проведення профілактичних заходів. Виявлення струмового перевантаження визначає момент відключення ЕД від мережі.

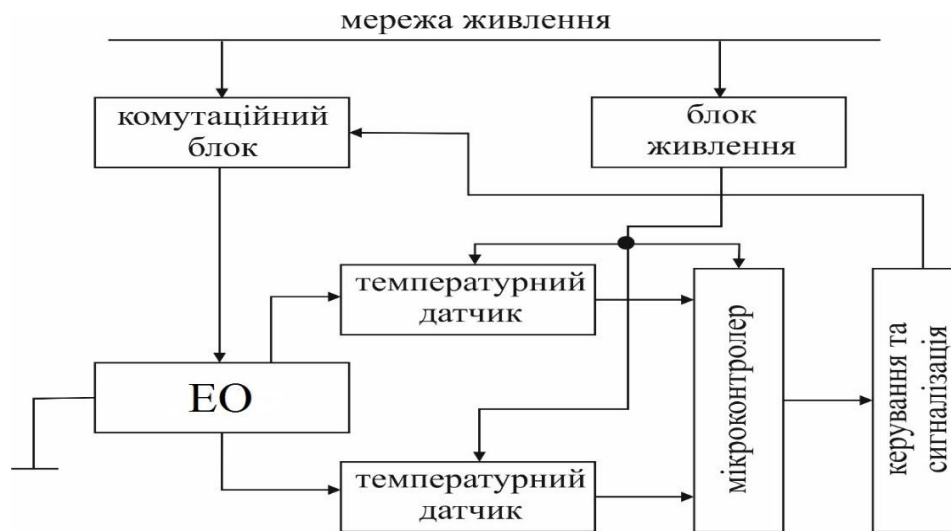


Рис. 4 Блок-схема пристрою діагностики причин теплового навантаження та температурного захисту ЕО

Розроблені пристрої діагностики стану струмоведучих БСЗ, які класифікуються наступним чином.

1. Пристрої, що діагностують стан віддалених струмоведучих болтових з'єднань, обслуговування яких важко виконувати.

2. Пристрої, що діагностують стан струмоведучих болтових з'єднань для отримання електропостачання від системи змінної трифазної напруги.

3. Пристрої, що діагностують стан БСЗ і цілісність струмових ланцюгів.

Для БСЗ високовольтної лінії електропередачі, БСЗ встановлені в щитах і т.д. розроблено пристрій, в якому в якості живлення блоків використано трансформатор струму, а передача отриманої інформації про стан БСЗ здійснюється за допомогою приймача сигналів, який використовує GSM-GPRS канал зв'язку. Поряд з ослабленням болтового з'єднання визначається обрив кола струму чи неповнофазний режим мережі живлення. Розроблено пристрій діагностування ослаблення БСЗ і обриву струмоведучих частин системи електропостачання, (рис. 5), в якому, досягається можливість виявити початковий момент ослаблення одного з болтових з'єднань в вузлах струмоведучих частин системи, контролювати появу неповнофазного режиму живлення електроустановки при обриві струмоведучих ліній або неповнофазного режиму напруги в мережі живлення.

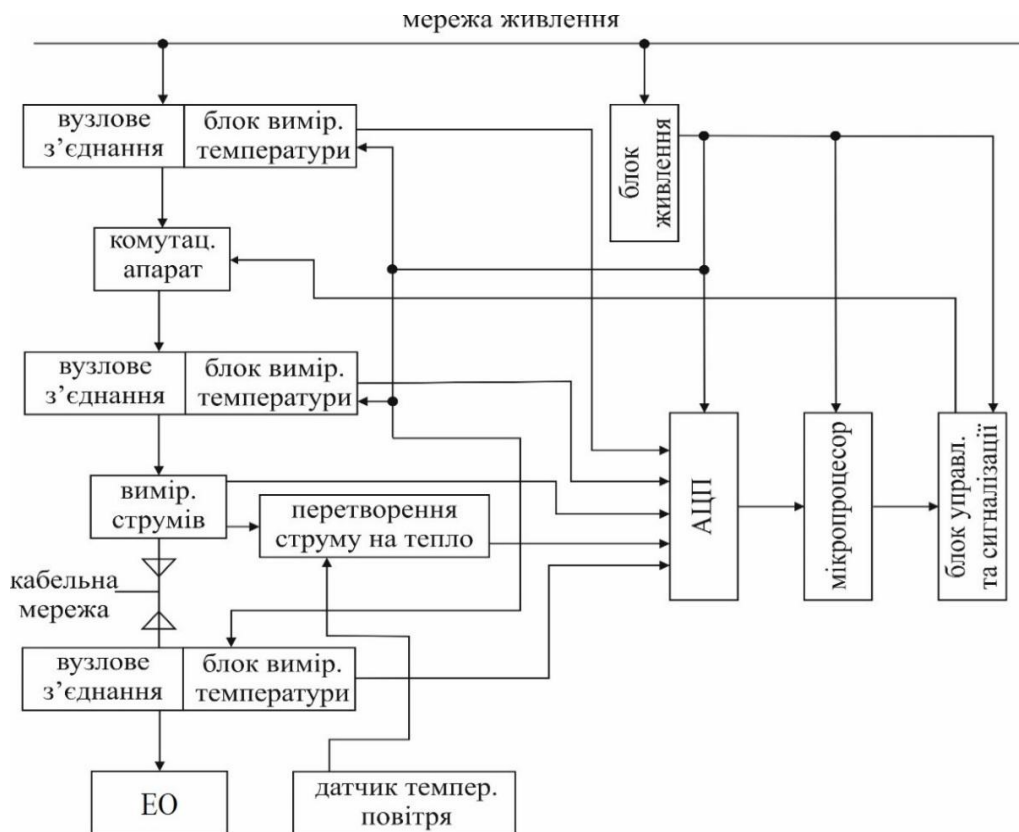


Рис. 5 Блок схема пристрою контролю стану болтових струмоведучих з'єднань і струмоведучих ліній трифазної напруги

У шостому розділі. розглянуті питання оцінки ефективності використання розроблених методів та багаторівневої системи управління, діагностики та захисту ЕО ЕТК. Традиційні засоби захисту ЕО реагують на відключення від мережі живлення при досягненні контрольованим параметром критичного або встановленого значення, що не завжди ефективно, а існуючі критерії оцінки ефективності роботи системи захисту не завжди коректні. Розроблена методика багатокритеріальної оцінки ефективності роботи системи діагностики і захисту у якості якого запропоновано використовувати потенційно відвернений збиток.

На рис. 6 наведена схема взаємозв'язку рівнів захисту ЕО і факторів, що впливають на нього.

Багаторівнева критеріальна оцінка складається з декількох рівнів:

- у першому, верхньому рівні оцінки у якості основного критерію ефективності запропоновано математичне очікування множини $Y = \{y_i\}$, що складається з вартості відвернених збитків;

- у другому рівні використовується множина $C = \{c_i\}$ - вартісних показників елементної бази для окремих засобів захисту ЕО;

- третій рівень оцінки визначає властивості конструкції системи захисту ЕО з допомогою множини $B = \{b_i\}$. Множина $B = \{b_i\}$ визначає здатність системи захисту до виконання максимально необхідного діапазону та зон дії. тобто здатність системи вирішувати свої завдання за проміжки відведеного часу, у ньому формуються показники надійності, швидкодії, селективності, чутливості.



Рис. 6 Схема багатокритеріального вибору захисту EO

Вартісний показник системи захисту EO визначиться виразом:

$$C = \sum_{i=1}^n c_i, \quad (49)$$

де n – кількість додаткових елементів, блоків і засобів системи захисту EO, що розширюють функціональні можливості і зони дії системи; c_i – одинична вартість елементів (блоків, засобів та ін.), яка дорівнює

$$c_i = D \cap B. \quad (50)$$

Повний відвернений збиток Y визначиться виразом:

$$Y = \sum_{i=1}^s y_i, \quad (51)$$

де s - кількість врахованих одиничних збитків; y_i - одиничні відвернені збитки.

Математична модель повного відверненого збитку Y має вигляд:

$$Y = C \cap D \cap B. \quad (52)$$

Критерієм ефективності роботи системи захисту можна вважати коефіцієнт окупності $K_{ок}$, який визначиться як

$$K_{ок} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{\sum_{i=1}^s y_i} \quad (53)$$

Числовий діапазон зміни $K_{ок}$ може становити від 1 року до 7 років.

Кількісною оцінкою показників роботи системи передаварійної діагностики та захисту ЕО при відхиленні показників якості електроенергії (ПЯЕ) від нормованих величин є укрупнені наведені матеріальні витрати (збитки) в порівнянні з режимом номінальних ПЯЕ мережі, які визначаються виразом:

$$\Delta Z = \Delta Z_{\Delta Q} + \Delta Z_{\Delta P} + \Delta Z_{стр.изол} + \Delta Z_{произ} + \Delta Z_{прос.обор}, \quad (54)$$

де $\Delta Z_{\Delta Q}$ - збиток, пов'язаний з втратами активної енергії в лінії електропередачі; $\Delta Z_{\Delta P}$ - збиток активних втрат, пов'язаний з приростом споживання активної потужності; $\Delta Z_{стр.изол}$ - збиток, пов'язаний з тепловим скороченням терміну служби ізоляції електрообладнання; $\Delta Z_{произ}$ - збиток, пов'язаний з збільшення часу обстеження; $\Delta Z_{прос.обор}$ - збиток, пов'язаний з простоем устаткування і його ремонтом.

Оцінкою ефективності роботи системи захисту ЕО є термін її окупності, визначений відношенням вартості системи захисту і величини запобігання шкоди.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі поставлена та вирішена науково-технічна проблема розвитку та підвищення ефективності функціонування систем діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів, що має важливе значення для забезпечення експлуатаційної надійності систем електропостачання.

В рамках даного напрямку отримані наступні результати:

1. Для оцінки ефективності існуючих методів і засобів діагностики, контролю та захисту технічного стану електрообладнання необхідно використовувати комплексний підхід до розгляду дихотомії «еклектрообладнання + система електропостачання» як єдиного цілого, недостатня увага до якого являється однією з причин виникнення непрогнозованих відхилень в нормальній роботі обладнання.

2. Для отримання умов появи та розвитку аварійних ситуацій у болтових струмопровідних з'єднаннях необхідно використовувати метод, який оснований на контролі струмів навантаження та температури навколишнього середовища за критерієм зміни постійного нагріву болтових з'єднань, який однозначно визначає режим «норма» (різниця значень постійної нагріву менше 10 %) і режим «аварія» (дефект) (різниця значень постійної нагріву більше 10 %).

3. На основі аналізу математичної моделі встановлено, що для оцінювання стану ізоляції елементів електротехнічного комплексу та її теплового старіння необхідно використовувати взаємозв'язок зміни коефіцієнта несиметрії напруг, відхилення лінійної напруги мережі і динамічних змін температури навколишнього середовища із залишковим експлуатаційним терміном електрообладнання. Значення коефіцієнта несиметрії не повинно бути нижче нормованої величини на 5 %, а температура навколишнього середовища більше 30 °С.

4. Для контролю стану ізоляції, режимів мережі живлення і своєчасного запобігання виходу з ладу електрообладнання необхідно використовувати напругу на конденсаторах блоку живлення під час розряду запасеної в них енергії. Встановлено, що при зміні швидкості розряду від 0,01 В/с до 0,5 В/с ізоляція знаходиться в нормальному стані, коли швидкість розряду перевищує 0,5 В/с - це визначає передаварійний та аварійний режими.

5. Для визначення початкового моменту виникнення і розвитку аварійних ситуацій при ослабленні болтових з'єднань необхідно використовувати залежність температури струмоведучого з'єднання від різних значень та режимів струмового навантаження. Зміна навантаження від 0,8 до 1,1 номінального значення спричиняє зміну температури болтового струмоведучого з'єднання від 5°С до 10°С, що свідчить про початок появи аварійної ситуації.

6. Для діагностики локальних перегрівів ізоляції, які викликані пиловим покриттям різної провідності і струмовим навантаженням, необхідно використовувати метод контролю двох значень температур, який дозволяє виявити закономірність діагностики температурного перевантаження електродвигунів і здійснити захист ізоляції від локального перегріву за умови, що різниця температур поверхні запиленої і не запиленої ізоляції не перевищує 5°С.

7. На основі теоретичного обґрунтування встановлено, що для діагностування типових перенавантажень і температурного захисту асинхронних двигунів при провалах напруги і локальному перегріві ізоляції необхідно використовувати метод включення паралельно живленню асинхронних двигунів батарей конденсаторів і послідовного включення твердотільних реле. Метод забезпечує безаварійне відключення асинхронних двигунів при проходженні фазового струму нульового значення та часову затримку падіння напруги на клеммах їх живлення.

8. Для виявлення початку виникнення аварійної ситуації необхідно використовувати булеві функції та обґрунтовані довірчі інтервали розрахункових температур болтового з'єднання та ізоляції електрообладнання при перехідному режимі зміни струму навантаження. Доведено, що величина похибки вимірювань струму для межі вимірювань 100 А становить 0,15 %, розрахункова температура визначається з імовірністю 0,955.

9. Для отримання закономірностей в розроблених методах та оцінки величин критеріальних параметрів і довірчих інтервалів необхідно використовувати розроблену структурну схему багаторівневої системи

контролю та управління електротехнічними комплексами.

10. Для оцінки ефективності роботи системи захисту електрообладнання необхідно використовувати термін її окупності, визначений відношенням вартості системи захисту і величини запобігання шкоди, який може бути від 30000,0 грн./рік до 300000,0 грн./рік.

11. Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державне підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 993915,04 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 280450,85 грн./рік; «Тернопільський медичний центр ТОВ «Мевіз». У навчальному процесі Приазовського державного технічного університету (м. Маріуполь) теоретичні дослідження знайшли застосування, пов'язане з вивченням теоретичних питань неруйнуючих засобів та методів діагностики електрообладнання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кривонос В.Е. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях несимметрии питающей сети / В.Е. Кривонос, В.В. Василенко // Научный вестник ДГМА.- Краматорск: ДГМА.- 2012.- Вып. 2 (10Е).- С. 14-24.

2. Кривонос В.Е. Управление сроком службы изоляции по скоростным характеристикам нагрева / В.Е. Кривонос, С.В. Василенко // Електротехніка та енергетика: зб. наук. пр. ДонНДУ.- Донецьк: ДонНДУ.- 2011.- Вип. 11.- С. 205-210.

3. Кривонос В.Е. Диагностика состояния изоляции асинхронного двигателя и питающего кабеля в условиях локальной компенсации / В.Е. Кривонос // Белорусский национальный технический университет. «Энергетика». Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.- Минск: БНТУ.- 2017.- №6.- С. 35-40.

4. Кривонос В.Е. Диагностика и защита изоляции обмоток асинхронных двигателей, работающих в агрессивной среде / В.Е. Кривонос, С.В. Василенко // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. науч. раб.– Мариуполь: ПГТУ.– 2015.- Вып.31.– С. 148-155.

5. Кривонос В.Е. Статические источники реактивной мощности при диагностике состояния изоляции асинхронных двигателей и питающего кабеля в условиях локальной компенсации / В. Е. Кривонос // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. науч. раб.- Мариуполь: ПГТУ.- 2016.- Вип. 33.- С. 123-130.

6. Кривонос В.Е. Критерии диагностики винтовых соединений в ультразвуковой томографической аппаратуре / В.Е. Кривонос, С.М. Злепко, Р.М. Вирозуб, Д.М. Барановский // Міжнародний науково-технічний журнал.- Хмельницьк: ХНУ.-2017.-№1.- С.140-144.

7. Кривонос В.Е. Методики розрахунку ефективності медичних інформаційних систем і технологій / В.Є. Кривонос, С.В. Тимчик, Н.В. Тітова, О.С. Козоріз, Д.М. Барановський, М.В. Бачинський // Вісник

Херсонського національного технічного університету.-Херсон: ХНТУ.- 2017. – № 1 (60). – С. 176-188.

8. Кривонос В.Е. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей / В.Е. Кривонос, С.В. Василенко // Белорусский национальный технический университет. «Энергетика». Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.- Минск: БНТУ.- 2015.- №6.- С.35-40.

9. Кривонос В.Е. Прогнозирование времени протекания аварийного процесса в соединениях токоведущих частей медицинского оборудования / В.Е. Кривонос, М.В. Бачинский, Д.Х. Штофель, И.А. Криворучко // Міжнародний науково-технічний журнал.- Хмельницьк: ВОТТП.- 2017.-Вип. №2.- С.131-138.

10. Кривонос В.Е.. Влияние качества электроэнергии на работу диагностического медицинского оборудования / В.Е. Кривонос, Л.Г. Коваль, М.В. Бачинский, О.Ю. Балалаева, Д.Н. Барановский // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія.- Вінниця:ВНТУ.- 2018.- Том 40, №23.- С. 10-17.

11. Кривонос В.Е. Скоростная характеристика фронта напряжения как информационный параметр в системах диагностики и защиты РКТ / В.Е. Кривонос, С.В. Павлов, С.М. Злепко // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. науч. раб. Выпуск №35 (Серия: Технические науки). - Мариуполь, ПГТУ.- 2018.– Вып. 35.- С.146-156.

12. Кривонос В.Е.. Использование скоростных изменений сопротивлений изоляции в диагностических средствах защиты медицинского оборудования / В.Е. Кривонос, С.М. Злепко, Л.Г. Коваль // Вісник Херсонського національного технічного університету. - Херсон: «ХНТУ».- 2017.- Вип. №4 (6630).-С. 55-61.

13. Kryvonosov V.E. Simulation of data safety components for corporative systems / Proceedings of SPIE / V.E. Kryvonosov, S.A. Yarenko, E.V. Kuzmina, T.O. Vavchu-kand // The International Society for Optical Engineering. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. -Wilga, Poland. 2017. – Vol. 10445. - Номер статті 104451R.

14. Кривонос В.Е. Комплексная защита компьютерных рентгеновских томографом от нестабильности и провалов питающего напряжения / В.Е. Кривонос, С.М. Злепко, С.В. Павлов, Д.М. Барановский // Вісник Хмельницького національного університету. -Хмельницьк: «ХНУ».- 2017. - Вип. №5. - С.192-202.

15. Кривонос В.Е.. Критерий оценки эффективности использования системы защиты медицинского оборудования / В. Е. Кривонос, Е.Л. Пиротти, С.М. Злепко / Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського; зб. наук. пр.- Київ: ТНУ ім. Вернадського».- 2018. – Вип. №2. – Т. 29(68). – С. 73-78.

16. Кривонос В.Є.. Аналіз джерел факторів негативного впливу на експлуатаційну надійність силового електротехнічного обладнання за даними літературного контенту / Кривонос В.Є., Пиротті Є.Л., Коваль Л.Г.,

Паламарчук М.І. // Вісник Хмельницького національного університету.- Хмельницьк: ХНУ.- 2019.- Вип. № 1. - С. 249-253.

17. Кривонос В.Є. Критерій створення багаторівневої системи діагностування, управління та захисту електрообладнання / В.Є. Кривонос, С.М. Злепко, Є.Л. Піротті // Вісник Приазовського державного технічного університету; зб. наук. праць.- Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ».- 2019. - Вип. 37.- 2019. - С. 136-142.

18. Kryvonosov V. Diagnostics of the pre-fault situation of the bolted current-carrying joint in the conditions of changing regime parameters / V. Kryvonosov // Technology audit and production reserves. - 2019. - №1/1 (45). – P. 50 - 58.

19. Kryvonosov V.E. Frequency-selective heart defibrillation model / V.E. Kryvonosov, T.A. Smerdova, E.L. Pirotti, M.V. Bachinsky // Information Technology in Medical Diagnostics II.- London: CRC Press, Balkema book, Taylor & Francis Group - PP. 179-184.

20. Кривонос В.Е. Влияния класса точности измерительных средств на достоверность диагностики и защиты электрооборудования / В.Е. Кривонос, В.В. Кухарчук, Е.Л. Піротті, С.М. Злепко // Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. Наука та виробництво.- Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ».- 2019. - Вип.20. - С.273-284.

21. Кривонос В.Є. Методики розрахунку ефективності медичних інформаційних систем і технологій / В.Є. Кривонос, С.В. Тимчик, Н.В. Тітова, О.С. Козоріз, Д.М. Барановський, М.В. Бачинський, В.О. Новіков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ.- 2017. – № 1 (60). – С. 176-188.

22. Кривонос В.Е. Влияния качества электроэнергии на работу электродвигателей Мариупольского торгового порта / В.Е. Кривонос, В.Г. Скосырев // Slovak international scientific journal.-2019.- №28.-С.28-38.

23. Кривонос В.Е. Диагностика предаварийного состояния болтового токоведущего соединения при стационарном и нестационарном режимах токов / В.Е. Кривонос, В.В. Кухарчук, С.М. Злепко, Е.Л. Піротті //Osterreichisches multiscience Journal.- Innsbruck: Austria.- 2019.-Vol. 1, № 17- С. 54-59.

Опубліковані праці апробаційного характеру

1. Кривонос В.Е Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях несимметрии напряжения: тези Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод: Всеукраинская научно-техн. конф., ДГМА, г. Краматорск, 17-21 декабря 2012г. / Кривонос В.Е., Василенко С.В./ - Краматорск: «ДГМА», 2012. - С. 197-199.

2. Кривонос В.Е. Неразрушающие методы диагностики состояния обмоток электродвигателей. Университетская наука 2013: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь / В.Е. Кривонос, С.В. Василенко /. 14-16 апреля 2013г. -Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2013. - Т. II. - С.23-24.

3. Кривонос В.Е. Определение постоянного нагрева. Критерий диагностирования состояния болтовых соединений. Проблеми сучасної

енергетики і автоматики в системі природокористування: Міжнародна науково-техн. конф., Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 14-18 листопада 2016 р. / В.Е. Кривоносів, О.Ю. Азархов, Шайко-Шайковський О.Г /.- Київ: «НУБіПУ», 2016. - С. 226-227.

4. Кривоносів В.Е., Василенко С.В. Усовершенствование расчета теплового режима наиболее загруженной обмотки асинхронного двигателя. Университетская наука - 2016: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, 19-20 мая 2016 г.-Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2016. - Т. II. - С. 209-210.

5. Кривоносів В.Є. Особливості експертних систем для діагностики технічного стану біомедичної апаратури. Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: I Міжнародна науково-техн. конф., м. Харків, 07-08 грудня 2017 р. / С.В. Павлов, С.М. Злепко, В.Є. Кривоносів / – Харків : ФОП Мезіна В.В. – Ч. III. – С. 79-80.

6. Кривоносів В.Е Усовершенствование принципа диагностирования и защиты электродвигателя. Университетская наука - 2017: Международная научно-техн. конф., ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, 18-19 мая 2017 г./ В.Е. Кривоносів, В.Г. Скосырев /.- Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017. - Т. I. - С. 269-270.

7. Кривоносів В.Є Перспективи розвитку інформаційно-діагностичних засобів управління та захисту медичного обладнання. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: XVIII Міжнародна науково-технічна конф., Одеська національна академія ім. О.С. Попова, м. Одеса (Затока), 8-13 червня 2018 р. / В.Є. Кривоносів, Є.Л. Пиротті, О.Ю. Азархов та ін/ - Одеса: «ОНА ім. О.С. Попова», 2018. – С. 133-134.

Патенти та свідоцтва

1. А.С. № 1584028 СССР. МПК H012H 7/08/ Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий / Жежеленко И.В., Кривоносів В. Е., Рыбалко Б. Ф. 1990 г. бюл. № 29.

2. Пат. № 98353 Україна, МПК H02K15\12(2006.01), G01R31\34(2006.01)., Спосіб контролю зміни опору ізоляції електродвигуна й живильного кабелю// Кривоносів В.Є. // №а201005384; Заявл. 05.05.2010: Опуб. 10.05.2012, Бюл. №9.- 6 с.

3. Пат. № 98721 Україна МПК H02K15\12(2006.01), G01R31\34(2006.01)., Пристрій контролю і захисту електроустаткування// Кривоносів В.Є., Д'яченко М.Д. // №а2011 01572, Заявл. 11.02.2011: Опуб. 11.06.2012, Бюл. №11.-6 с.

4. Пат. №101849 Україна МПКG01R 31\34(2006). Спосіб виявлення і розпізнавання дефектів ізоляції електродвигунів, які працюють в агресивних середовищах, і пристрій для його реалізації. // Кривоносів В.Є.// №а2011 04406, : Опуб. 15.05.2013, Бюл. №9.-5с.

5. Пат. №106175 Україна МПКH02H 5\04). Пристрій контролю і діагностики стану болтових з'єднань електрообладнання що працює зі змінним навантаженням. // Кривоносів В.Є.// №а201310825, опуб. 25.07.2014:Бюл. № 14.- 4с.

6. Пат. № 107749 Україна МПКН02Н 5\04. Спосіб контролю за станом болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням. // Кривоносів В.Є. // 2006.01) №а201309491, опуб. 10.02.2014: Бюл. № 3.- 4с.

7. Пат. № 107898 Україна Спосіб контролю і теплового захисту обмоток електричних машин, які працюють у запиленому середовищі.//Кривоносів В.Є., Жежеленко І.В. Московец О.А. Василенко С.В. (2006.01) №а201401923, опуб. 25.02.2015: Бюл. № 4.- 5с.

8. Пат. № 115511 Україна МПКН02Н 5\04. Пристрій діагностування й захисту електродвигуна. // Кривоносів В.Є. Азархов А.Ю, Шайко-Шайковський А.Г., Скосирев В.Г. №а201611162, опуб. 10.11.2017 :Бюл. № 21.- 4с.

9. Пат. № 117605 Україна Спосіб діагностування та прогнозування стану болтових з'єднань електрообладнання // Кривоносів В.Є., Шайко-Шайковський О. Г., Азархов О.Ю., Сорочан О.М. (2006.01) №а201608442, опуб. 27.08.2018: Бюл. № 16.- 7с.

10. Пат. № 118399 Україна ,МПК Н02Н 3\26. Пристрій захисту рентгенівського комп'ютерного томографа//Кривоносів В.Є., Злепко С.М., Азархов О.Ю., Коваль Л. Г. Заявл. № 201703752 18.04.2017; Опуб.10.01.2019; Бюл. № 1.- 6 с.

11. Комп'ютерна програма "Діагноста причин температурного перевантаження і захист електроустаткування від перегрівання». / Кривоносів В.Є. Свід № 77424 від 06.03.2018 р.

12. Комп'ютерна програма «Контроль стану ізоляції, режимів мережі і захисту електрообладнання від аварійних режимів» / Кривоносів В.Є. Свід. № 77425 від 06.03.2018 р.

13. Комп'ютерна програма «Діагностика стану болтових з'єднань і контролю цілісності струмових ланцюгів" / Кривоносів В.Є, Злепко С.М., Піротті Є.Л, Кривоносів В. В., Борякін А. О. Свід. № 77423 від 06.03.2018 р.

14. Комп'ютерна програма «Контроль, діагностика, захист ізоляції від покриття провідним, непровідним пилами, зволоження та природного старіння»/ Кривоносів В.Є., Кривоносів В.В., Борякін А.О. Свідоцтво № 76677, реєстр. 06.02.2018 р.

АНОТАЦІЯ

Кривоносів В.Є. Розвиток та підвищення ефективності функціонування систем діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. - Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. - Харків, 2019.

В електротехнічних комплексах (ЕТК) недостатньо вивчені питання розробки теоретичних і практичних методів передаварійного діагностування їх пошкоджень і причин поломок, які зумовлені сукупністю динамічних змін в

системі електропостачання та параметрах оточуючого середовища, що призводить до зупинок та поломок електрообладнання (ЕО).

Відсутність комплексного підходу до розгляду дихотомії «ЕТК + система електропостачання» як єдиного цілого, є однією з причин виникнення непрогнозованих відхилень в нормальній роботі обладнання, що призводить до браку продукції, а в медичній галузі – до отримання недостовірних даних про стан обстежуваного пацієнта, а значить – до невірної діагнозу і вибору неадекватної тактики лікування. У роботі удосконалені методи неруйнівного контролю в системах управління електротехнічними комплексами з одночасним підвищенням достовірності отриманих результатів шляхом розроблення методів, моделей, принципів та критеріїв і багаторівневої системи контролю та управління електротехнічними комплексами. Розроблено метод моніторингу напруги, струмів навантаження і стану мережі живлення струмоведучих з'єднань ЕТК, суть якого полягає в послідовному підключенні до мережі живлення твердотільних реле і ЕТК з паралельно підключеною батареєю конденсаторів. Для оцінювання якості діагностики стану мережі живлення ЕТК запропоновано використовувати інформаційний критерій, представлений градієнтом напруги на клеммах конденсаторів блоку компенсації реактивної потужності. Визначено нерівності для змінних температурних параметрів болтового з'єднання, виконання яких, однозначно, визначає початковий момент ослаблення струмоведучого болтового з'єднання. Удосконалено математичну модель динаміки старіння ізоляції кабелів мережі живлення, яка встановлює взаємозв'язок між відхиленнями коефіцієнта несиметрії напруг і лінійної напруги. В роботі розроблено багаторівневу діагностичну систему контролю та управління ЕО, яка встановлює взаємозв'язок між блоками всередині системи, рівнями захистів «ЕО+ живлення мережі», їх черговості, функціями і параметрами діагностування, а управління рівнями захистів забезпечило безаварійну роботу обладнання та високу якість роботи.

Ключові слова: методи неруйнівного контролю, показники якості електроенергії, ізоляція електродвигуна, тепловий контроль, захист електрообладнання, струмоведуче болтове з'єднання, діагностична система, багаторівневий критерій, прогнозування передаварійної ситуації.

АННОТАЦИЯ

Кривонос В.Е. Развитие и повышение эффективности функционирования систем диагностики, контроля и защиты электротехнических комплексов. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. - Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко.- Харьков, 2019.

Электрооборудование (ЭО) в составе электротехнических комплексов (ЭТК) часто работает в сложных условиях, его нагрузки далеко не всегда

соответствуют номинальной мощности, а подведенное напряжение трехфазной сети часто нестабильно, с переменной асимметрией и отклонениями, что обусловлено смешанным подключением однофазных и трехфазных потребителей, мощность которых соизмерима с мощностью используемого ЭО. Многие производственные технологические процессы выполняются в условиях, неблагоприятных для ЭО, таких как воздействия разрушающих динамично изменяющихся факторов окружающей среды, пыли, влажности и присутствия агрессивных газов в технологических помещениях. В связи с этим вопросы неразрушающего контроля, выявления предаварийной диагностики и прогнозирования состояния ЭО являются актуальными и позволяют перейти от системы планово-предупредительных ремонтов к проведению профилактических работ по факту их выявления.

Отсутствие комплексного подхода к рассмотрению дихотомии «ЭТК + система электроснабжения» как единого целого, является одной из причин возникновения непрогнозируемых отклонений в нормальной работе оборудования, что приводит к снижению выпуска продукции, а в медицинской отрасли - к получению недостоверных данных о состоянии обследуемого пациента, а значит - к неверному диагнозу и выбору неадекватной тактики лечения. В работе усовершенствованы методы неразрушающего контроля в системах управления электротехническими комплексами с одновременным повышением достоверности полученных результатов путем разработки методов, моделей, принципов и критериев и многоуровневой системы контроля и управления этими комплексами. Разработан метод мониторинга напряжения, токов нагрузки и состояния сети питания токоведущих соединений ЭТК, суть которого заключается в последовательном подключении к сети питания твердотельных реле и ЭТК с параллельно подключенной батареей конденсаторов. Для оценки качества диагностики состояния сети питания ЭТК предложено использовать информационный критерий, представленный градиентом напряжения на клеммах конденсаторов блока компенсации реактивной мощности. Определены неравенства для переменных температурных параметров болтового соединения, выполнение которых однозначно определяет начальный момент ослабления токоведущего болтового соединения. Усовершенствована математическая модель динамики старения изоляции кабелей сети, которая устанавливает взаимосвязь между отклонениями коэффициента несимметрии напряжений и линейного напряжения. В работе разработана многоуровневая диагностическая система контроля и управления ЭО, которая устанавливает взаимосвязь между блоками внутри системы, уровнями защит «ЭО + питание сети», их очередности, функциями и параметрами диагностики, а управление уровнями защит обеспечило безаварийную работу оборудования и высокое качество работы.

Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, показатели качества электроэнергии, изоляция электродвигателя, тепловой контроль, защита электрооборудования, токоведущие болтовое соединение, диагностическая система, многоуровневый критерий, прогнозирование предаварийной ситуации.

SUMMARY

Krivososov V.E. Development and increases of functional efficiency of diagnostic systems for the control and protection of electrotechnical complexes. -

As a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.09.03. - electrotechnical complexes and systems. - Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko. - Kharkiv, 2019.

For the electrotechnical complexes (ETC) the development of theoretical and practical methods for the diagnosis of their damage and the causes of breakdowns that are caused by a combination of dynamic changes in the power supply system and the parameters of the environment that leads to stops and breakdowns of electrical equipment (EE) is not sufficiently studied.

The lack of an integrated approach to the consideration of the ETC + power system dichotomy as a single entity is one of the causes of unpredictable deviations in the normal operation of equipment, which leads to shortages of products and in the medical sector to false data obtained about the condition of the patient being examined, what leads to the wrong diagnosis and the choice of inadequate treatment tactics. In this work, methods of non-destructive control in control systems of electrotechnical systems are improved, while the reliability of the obtained results is improved through development of methods, models, principles and criteria, and a multi-level system of control and management of electrical engineering complexes. The method of monitoring the voltage, load currents and the state of the power supply of current-carrying connections of ETC, the essence of which is in the serial connection to the power supply of solid state relays and ETC with a parallel connected battery of capacitors, was developed. In order to assess the quality of the diagnostics of the state of the ETC network it is proposed to use the information criterion presented by the gradient voltage at the terminals of the capacitors of the reactive power compensation unit. The inequalities for variable temperature parameters of bolted connection are determined. Their execution, unambiguously, determines the initial moment of attenuation of the current-carrying bolted connection. The mathematical model of the aging dynamics of insulation of cables of the power supply, which establishes the relationship between the deviations of the coefficient of voltage asymmetry and linear voltage, is improved. In this work, a multi-level diagnostic control and management system for EE is developed, which establishes the interconnection between the units inside the system, the levels of protection "EE + power of the network", their priorities, functions and parameters of diagnostics, and management of the levels of protection provided the trouble-free operation of equipment and high quality of work.

Key words: methods of non-destructive control, indicators of electric power quality, isolation of an electric motor, thermal control, protection of electrical equipment, current-acting bolted connection, diagnostic system, multilevel criterion, forecasting of a transition situation.

Підписано до друку – 02.09.2019 р.
Комп'ютерний набір та верстка Полянова Н.В.
Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.
Ум. друк. 0,765
Замовлення № 44/032017. Наклад 100 прим.

Друкарня ФОП Олейникова Ю.В.

м. Харків, вул. Різдвяна (Енгельса) 29А,
тел.: +38(057)7-529-729

Свідоцтво про реєстрацію:
Серія ХК, № 163 від 20.12.2005 р.