

АНОТАЦІЯ

Стуліщенко А.С. Високочастотна діагностика ізоляції обмоток низьковольтних асинхронних двигунів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої проблеми діагностики міжвиткових замикань і пробойів ізоляції на корпус в багатовиткових виспних обмотках низьковольтних асинхронних двигунів. Робота зосереджена на розробці та використанні прогресивних методик, що дозволяють ефективно виявляти та оцінювати дефекти ізоляції в таких обмотках.

У вступі даної дисертації детально обґрунтовано актуальність розробки високочастотних методів для діагностики ізоляції обмоток електромеханічних пристроїв та виявлення виткових замикань. Загальна характеристика роботи включає в себе детальний огляд досліджуваних питань і пропонує методику. Подано загальну характеристику роботи, сформульована її мета, основні задачі, об'єкт та предмет досліджень, наведена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі охоплюється важливий аспект дослідження - вивчення і аналіз проблем, що виникають через відмову ізоляції електричних машин. Зокрема, звертається увага на обговорення різних методів діагностики та контролю, які використовуються у сучасному виробничому середовищі. У цілому, цей розділ вирішує важливе завдання - початковий аналіз ситуації, що допомагає встановити основу для детального і ретельного дослідження проблеми, надає перспективи для вибору оптимальних методів контролю та діагностики ізоляції.

Другий розділ зосереджений на визначенні та обґрунтуванні найбільш ефективних методів діагностичного випробування для визначення відмов ізоляції електромеханічних пристроїв. Формуються критерії для вибору діагностичних параметрів, засновуючись на дослідницькій роботі, виконаній у першому розділі. Виконаний перехід до аналізу машин зі всипними обмотками, які були експлуатовані протягом значного періоду часу, і вивчений вплив тривалого використання на їхню надійність та продуктивність.

Третій розділ присвячено створенню детальних моделей для аналізу та виявлення відмов ізоляції в електромеханічних пристроях.

Розділ розпочинається з аналізу зовнішніх перенапруг та комутаційних перенапруг, які виникають в обмотці при включенні. Наступний етап - розгляд перехідних процесів при комутації та комутаційних процесів при розриві струму. Ці розділи дають чітке уявлення про процеси, які відбуваються в обмотках при роботі електромеханічного пристрою.

Далі здійснено дослідне визначення процесів відключення, порівняння дослідних і розрахункових даних. По результатам цих аналізів розроблена математична модель обмотки на основі якої, ми аналізуємо втрати в ізоляції та електромагнітному полі.

Четвертий розділ присвячено визначенню ключових параметрів, які впливають на частотні характеристики електричних машин.

Початковий фокус в цьому розділі - це детальний аналіз параметрів машини та їх впливу на частотні характеристики. Цей аналіз розширюється, досліджуючи залежності параметрів обмоток від частоти.

Далі проводиться експериментальне визначення параметрів, що дозволяє отримати реальні значення та порівняти їх із теоретичними моделями.

Важливим аспектом розділу є аналіз частотних залежностей вхідних опорів. Це дозволяє глибше зрозуміти поведінку системи та визначити критичні частотні точки для діагностичних цілей.

П'ятий розділ розкриває процес експериментального дослідження дефектів та аномалій в ізоляції електричних машин.

Зосередженість на експериментальному моделюванні дефектів в корпусній і міжвитковій ізоляції допомагає інтенсифікувати дослідження і перетворити теоретичні знання на практичні.

Аналіз включає розрахунок додаткової ємності, що утворюється в результаті старіння та зволоження ізоляції, що має важливе значення для оцінки стану обмотки.

На наступному етапі моделюється міжвитковий дефект в міжвитковій ізоляції при різних станах ізоляції, що надає цінні висновки про вплив стану ізоляції на якість обмотки.

Шостий розділ є підсумковим візуальним представленням процесу діагностики дефектів в ізоляції. В цьому розділі використовується MatLab Simulink для створення багатоланкової схеми, яка моделює дефекти ізоляції електричних машин, що дозволяє візуалізувати та аналізувати динаміку цих дефектів.

Ключові аспекти моделювання включають міжвитковий дефект в міжвитковій ізоляції, пробій ізоляції всипної обмотки на корпус, та вплив старіння та зволоження на параметри дефектної ізоляційної системи.

Аналіз результатів моделювання та їх порівняння з експериментальними даними забезпечує цінні висновки щодо адекватності моделі і можливості її використання для прогнозування відмов ізоляції.

На закінчення розроблено рекомендації щодо використання результатів моделювання для діагностики та прогнозування відмов, які покращують процедуру діагностики ізоляції в електричних машинах.

Розроблені методики та процедури для всебічного аналізу ізоляційних систем у звичайних електричних машинах із всипними обмотками. Ці методики відрізняються від традиційних підходів, оскільки вони дозволяють чітко розрізняти між тими дефектами ізоляції, які можна виправити під час

стандартного технічного обслуговування, та тими, які є критичними і можуть призвести до повної відмови машини.

Метод спрямований на підвищення чутливості виявлення дефектів ізоляції обмоток базується на детальному аналізі вхідного опору під час резонансу струмів і напруг у конкретних тестових умовах. Цей метод використовує спеціально створений резонанс на штучних частотах з допомогою додаткових елементів, знижуючи втрати у складному коливальному контурі.

Створені унікальні математичні моделі для аналізу високочастотних процесів в ізоляційних системах. Ці моделі використовують складні багатоланкові схеми заміщення для вкраплених обмоток і дозволяють моделювати різноманітні дефекти ізоляції, як локальні, так і загальні.

У рамках дисертаційного дослідження реалізована серія експериментів, метою яких було встановлення характеристик обмоток. В ході цих досліджень застосовані інноваційні методи вимірювання та інструменти, що сприяли аналізу розмірів та динаміки зміни параметрів обмоток електродвигунів. Розроблена нова методика, заснована на використанні декремента згасання коливань як показника стану ізоляції. Такий підхід допоміг виявити рівень деградації ізоляції та оцінити ризики потенційних несправностей. Дослідження декремента згасання виявило його значну інформативність для цілей діагностики ізоляції. Проведено аналіз частотних залежностей та коливальних характеристик, що підтвердило їх схожість у висновках. Це вказує на високу ефективність обох методів для діагностування ізоляції та їх придатність для інтегрованого використання у прогнозуванні несправностей. Результати експериментів підтвердили теоретичні гіпотези, наголошуючи на значущості досліджень для покращення методів діагностики та прогнозування відмов ізоляції в універсальних електродвигунах змінного струму з високими обмотками.

Результати роботи впроваджено: в КП «Міськводоканал» СМР м. Суми.

Ключові слова: високочастотні процеси, асинхронний двигун, діагностика, полімерна ізоляція, математичне моделювання, моделювання, технічний стан, дефекти, генератор, магнітне поле, схема обмотки, електромагнітне поле, енергоефективність, магнітна індукція, механічне коло.

ABSTRACT

Stulishenko A.S. High-Frequency Diagnostics of Insulation in Low-Voltage Asynchronous Motors – Qualifying scientific work as a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 – Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is dedicated to solving the important problem of diagnosing inter-turn short circuits and insulation breakdowns to the housing in multi-turn bulk windings of low-voltage asynchronous motors. The work focuses on developing and applying advanced techniques that effectively detect and evaluate insulation defects in such windings.

The introduction of this dissertation thoroughly substantiates the relevance of developing high-frequency methods for diagnosing the insulation of electromechanical device windings and detecting turn-to-turn short circuits. The general characteristics of the work include a detailed overview of the researched issues and proposed methodologies. It presents a general characterization of the work, formulates its purpose, main tasks, object and subject of research, indicates the scientific novelty and practical value of the obtained results.

The first chapter covers an important aspect of research - studying and analyzing problems arising due to the failure of electrical machine insulation. In particular, attention is paid to discussing various diagnostic and control methods used in the modern production environment. Overall, this chapter addresses an important task - initial analysis of the situation, which helps establish a foundation for detailed and thorough investigation of the problem, providing perspectives for choosing optimal control and diagnostic methods for insulation.

The second chapter is focused on identifying and substantiating the most effective diagnostic testing methods for determining insulation failures in electromechanical devices. Criteria for selecting diagnostic parameters are formed,

based on the research conducted in the first chapter. It transitions to analyzing machines with bulk windings that have been operated over a significant period of time, examining the impact of prolonged use on their reliability and performance.

The third chapter is devoted to creating detailed models for analyzing and detecting insulation failures in electromechanical devices. The chapter begins with an analysis of external overvoltages and switching surges that occur in the winding during switching. The next stage is the examination of transient processes during switching and switching processes during current interruption. These sections provide a clear understanding of the processes occurring in the windings during the operation of an electromechanical device.

Subsequently, experimental determination of disconnection processes is carried out, comparing experimental and calculated data. Based on these analyses, a mathematical model of the winding is developed, on the basis of which, we analyze losses in insulation and the electromagnetic field.

The fourth chapter is dedicated to identifying key parameters that affect the frequency characteristics of electrical machines. The initial focus in this chapter is a detailed analysis of the machine's parameters and their impact on frequency characteristics. This analysis is expanded by exploring the dependencies of winding parameters on frequency. Next, experimental determination of parameters is conducted, allowing for the acquisition of actual values and their comparison with theoretical models. An important aspect of the chapter is the analysis of frequency dependencies of input impedances. This enables a deeper understanding of the system behavior and identification of critical frequency points for diagnostic purposes.

The fifth chapter reveals the process of experimental investigation of defects and anomalies in the insulation of electrical machines. Focusing on experimental modeling of defects in housing and inter-turn insulation helps intensify the research and transform theoretical knowledge into practical application. The analysis includes the calculation of additional capacitance formed as a result of aging and moisture in insulation, which is important for assessing the condition of the winding. In the next

stage, an inter-turn defect in the inter-turn insulation is modeled under different insulation conditions, providing valuable insights into the effect of the insulation condition on winding quality.

The sixth chapter is a conclusive visual representation of the process of diagnosing defects in insulation. This chapter uses MatLab Simulink to create a multi-link diagram that models insulation defects in electrical machines, allowing for the visualization and analysis of the dynamics of these defects.

Key aspects of modeling include an inter-turn defect in inter-turn insulation, breakdown of bulk winding insulation to the housing, and the effect of aging and moisture on the parameters of the defective insulation system. The analysis of modeling results and their comparison with experimental data provides valuable conclusions about the adequacy of the model and its potential use for predicting insulation failures.

In conclusion, recommendations have been developed regarding the use of modeling results for diagnostics and prediction of failures, which improve the procedure for diagnosing insulation in electrical machines.

Methods and procedures have been developed for a comprehensive analysis of insulation systems in standard electrical machines with bulk windings. These methodologies differ from traditional approaches, as they clearly distinguish between insulation defects that can be rectified during standard maintenance and those that are critical and can lead to complete machine failure.

The method is aimed at increasing the sensitivity of detecting insulation defects in windings and is based on a detailed analysis of input resistance during resonance of currents and voltages under specific test conditions. This method uses a specially created resonance at artificial frequencies with additional elements, reducing losses in the complex oscillatory circuit. Unique mathematical models have been created for analyzing high-frequency processes in insulation systems.

These models use complex multi-link replacement circuits for embedded windings and allow for modeling various insulation defects, both local and general.

Within the framework of the dissertation research, a series of experiments was carried out, the purpose of which was to establish the characteristics of windings.

During these studies, innovative measurement methods and tools were applied, facilitating the analysis of the size and dynamics of changes in motor winding parameters. A new methodology based on the use of the decay decrement of oscillations as an indicator of insulation condition has been developed. This approach helped to detect the level of insulation degradation and assess the risks of potential malfunctions. The study of the decay decrement revealed its significant informativeness for insulation diagnostic purposes. An analysis of frequency dependencies and oscillatory characteristics was conducted, confirming their similarity in conclusions. This indicates the high efficiency of both methods for diagnosing insulation and their suitability for integrated use in predicting faults. The results of the experiments confirmed the theoretical hypotheses, emphasizing the significance of the research in improving the methods of diagnostics and prediction of insulation failures in universal AC motors with bulk windings.

The results of the work have been implemented at KP "Miskvodokanal" of the Sumy City Council, Sumy City.

Key words: high-frequency processes, asynchronous motor, diagnostics, polymer insulation, mathematical modeling, modeling, technical condition, defects, generator, magnetic field, winding scheme, electromagnetic field, energy efficiency, magnetic induction, mechanical circuit.