УДК 621.313.333:621.039.58 **DOI: 10.33042/2522-1809-2025-1-189-43-51**

А.В. Гордієнко

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Україна

АНАЛІЗ ІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ГОЛОВНИХ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ НАСОСІВ ВВЕР-1000 З МЕТОЮ ЇЇ МОДЕРНІЗІЦІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ

У статті запропоновано метод дослідження впливу зміни геометрії провідника та ізоляції на термін служби ізоляційних систем електродвигуна. Проведено порівняльний аналіз аналітичних методів та чисельного моделювання з метою пошуку рішень для модернізації конструкції обмоток та підвищення експлуатаційної надійності електричних машин.

Ключові слова: *асинхронний двигун, системи високовольтної ізоляції, термін експлуатації, моделювання теплових процесів*

Постановка проблеми

Електродвигуни головних циркуляційних насосів (ГЦН) реакторів ВВЕР-1000 відіграють ключову роль у забезпеченні надійності та безпеки роботи атомних станцій. Головні циркуляційні насоси (ГЦН-195) забезпечують примусову циркуляцію теплоносія у першому контурі реакторних установок типу ВВЕР-1000. Для приводу цих насосів використовують вертикальний асинхронний електродвигун ВАЗ 215/109-6АМО5, виготовлений відповідно до технічних умов ТУ 16-510.673-81. Цей електродвигун має закриту конструкцію із самовентилюючим ротором, що забезпечує ефективне охолодження та підвищує надійність роботи. Використання таких насосів є важливим для підтримки стабільної роботи реакторних установок, оскільки вони забезпечують безперервну циркуляцію води, необхідну для відведення тепла від активної зони реактора та підтримки безпеки в процесі експлуатації. В Україні експлуатується 13 енергоблоків із цим типом реакторів.

Одним із найбільш критичних елементів, що впливають на довговічність та надійність роботи електродвигунів, є система ізоляції їх обмоток. Ізоляційні матеріали зазнають впливу ряду факторів, серед яких підвищена температура займає центральне місце.

Вплив підвищеної температури на систему ізоляції призводить до прискореного старіння матеріалів, що проявляється у зниженні їхньої електричної міцності, механічної стійкості. Це, своєю чергою, підвищує ризик виникнення відмов, що категорично неприпустимо за умов експлуатації устаткування атомної енергетики. Крім того, на тлі високих температур посилюється негативний вплив інших факторів, таких як електричні поля[1], теплові фактори[2], радіаційне випромінювання[3] та хімічно активні речовини, що створює додаткові загрози для системи ізоляції.

У цій роботі буде запропоновано новий підхід до розрахунку довговічності систем ізоляції, що ґрунтується на використанні моделювання обмоток статора та ізоляційних систем у програмному комплексі ANSYS Motor-CAD [4]. Цей підхід дозволить визначити оптимальні параметри перерізу провідників та характеристики ізоляційних систем, за яких температура нагрівання обмоток буде мінімізована.

Проведення такого моделювання забезпечить можливість комплексної оцінки ізоляційної системи та отримання прогнозованих даних про термін її експлуатації. Застосування сучасних методів моделювання, таких як ANSYS Motor-CAD, дозволяє враховувати складні теплові та електромагнітні процеси, що робить цей підхід більш точним та ефективним для аналізу та оптимізації ізоляційних систем.

На наступному етапі планується виготовлення дослідних зразків ізоляційних систем із вибраних матеріалів, представлених у попередньому дослідженні. Для дослідних зразків будуть проведені високовольтні випробування, результати яких стануть основою розрахунку терміну служби ізоляційної системи з використанням раніше виведених емпіричних формул. Отримані дані про термін служби будуть зіставлені з метою оцінки ефективності запропонованих рішень.

© А.В. Гордієнко

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання довговічності електричної ізоляції електродвигунів викликає значний інтерес у науковому співтоваристві, що підтверджується численними оглядами та методиками розрахунків терміну служби ізоляційних матеріалів[5-11]. Актуальність цієї теми зростає в умовах збільшення обсягів виробництва електроенергії та посилення вимог до безпечної експлуатації електродвигунів, особливо тих, що використовуються в системах охолодження першого контуру атомних електростанцій.

Методика, представлена у роботі [7], має глибоку аналітичну основу, що забезпечує її теоретичну значимість. Проте донедавна даний метод у відсутності конкретного підтвердження окремих типів ізоляційних матеріалів, яке застосування обмежувалося загальними рекомендаціями. Це створювало певні труднощі у практичному використанні методики, оскільки відсутність специфічних даних для різних ізоляційних систем ускладнювало оцінку її ефективності реальних умовах експлуатації.

Крім того, метод [7, 8] не передбачає інтеграції з моделюванням електродвигунів та систем ізоляції, а також подальшого зіставлення результатів із даними високовольтних випробувань. Такий підхід обмежує можливості комплексної оцінки ізоляційних систем, що потребує більш різнобічного та детального підходу. В рамках цього дослідження передбачається усунути ці обмеження, поєднуючи моделювання, експериментальні випробування та розрахункові методи для отримання більш точних даних про термін служби ізоляційних систем.

Мета статті

Метою цієї статті є модернізація систем ізоляції стрижневих обмоток статора електродвигуна ВАЗ 215/109-6АМО5 з метою збільшення терміну їх експлуатації, при цьому без зміни електромеханічних та енергетичних характеристик електродвигуна.

Особлива увага приділяється збереженню вихідних параметрів двигуна, таких як потужність, ККД коефіцієнт потужності, номінальний момент на валу, що є важливою умовою для успішної реалізації модернізації.

Модернізація ізоляційних систем базуватиметься на використанні сучасних матеріалів вітчизняного виробництва та передових технологій. Ключовим інструментом у процесі стане застосування методів чисельного моделювання. Зокрема, використання програмного комплексу ANSYS Motor-CAD дозволить провести оптимізацію параметрів обмоток та ізоляції, що забезпечить зниження теплових втрат та надасть можливість оцінити вплив нових ізоляційних систем на довговічність та надійність роботи електродвигуна.

Таким чином, основна мета статті полягає у створенні науково обґрунтованого підходу до покращення ізоляційних систем, який забезпечить підвищення надійності та довговічності систем ізоляції електродвигунів загалом, а не лише використовуваних у критично важливих системах, таких як охолодження першого контуру атомних електростанцій.

Виклад основного матеріалу

Вступ. Як було зазначено в попередньому дослідженні, [12] у програмному комплексі ANSYS Motor-CAD вдалося успішно змоделювати базову модель електродвигуна із заводськими характеристиками. Для модернізації системи ізоляції запропоновано провести оптимізацію перерізу мідних провідників у бік збільшення. В рамках вже створеної моделі планується збільшити переріз міді, що дозволить покращити електричні характеристики двигуна.

Розміри перерізу мідних провідників ПСЛДКТ за висотою та шириною будуть визначені відповідно до вимог технічних умов ТУ 16.К71-129 та ТУ У 31.3-00214534-031. Такий підхід забезпечить відповідність сучасним стандартам та технічним умовам.

Проектування ізоляційних систем у програмному комплексі ANSYS Motor-CAD значно спрощується завдяки можливості прямого завдання параметрів перерізу мідних провідників. Цей метод дозволяє ефективно інтегрувати геометричні та електричні характеристики провідників у процес моделювання, що сприяє більш точній оцінці теплових та електричних параметрів системи.

Електромагнітне моделювання. Для При проектуванні систем ізоляції електричних машин необхідно орієнтуватися на встановлені на практиці допуски для товщини корпусної ізоляції. Згідно з даними, представленими в літературі [13-15], одностороння товщина ізоляції для електричних машин з номінальною робочою напругою 6 кВ повинна знаходитися в межах 2–3 мм (Табл.1).

Слід враховувати, що надмірне зменшення товщини ізоляційного шару призводить до зниження електричної міцності системи ізоляції, що може негативно позначитися на надійності та довговічності обладнання. Тому важливо дотримуватись рекомендованих значень, щоб забезпечити стабільну експлуатацію та мінімізувати ризик електричних пробоїв. На рис. 1 представлена схема заповнення паза статора електродвигуна, що демонструє розподіл обмоток та їх розміщення конструкції.

Після проведення електромагнітного

моделювання обмоток із збільшеним перерізом у програмному середовищі ANSYS Motor-CAD потрібно сформувати зведену таблицю для подальшого аналізу та порівняння електромеханічних характеристик електродвигуна.

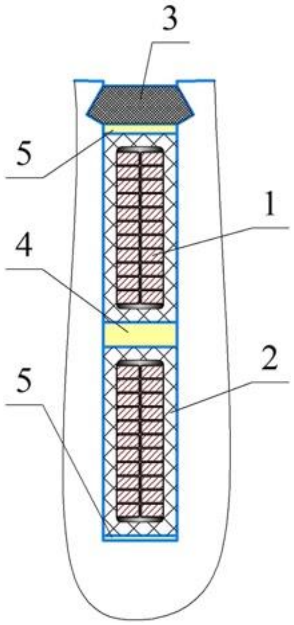


Рис. 1. Схема заповнення паза статора ВАЗ 215. 1- Провід ПСЛДКТ; 2 – корпусна ізоляція стріжня; 3 – клин пазовий; 4 – міжстрижнева ізоляційна прокладка; 5 – ізоляційна прокладка «на дно паза» та «під клин».

Збільшення перерізу стрижня досягається за рахунок збільшення площі перерізу мідного провідника при одночасному зменшенні товщини корпусної ізоляції.

Таблиця 1

Змінені основні геометричні параметри

	Розміри елементарного провідника обмотки	
	Заводського виконання	Нового виконання
Неізольований провідник, мм	2,50x4,50	2,65x5,00
Ізольований провідник, мм	2,78x4,74	2,93x5,27
Товщина ізоляції елементарного провідника, мм	0,12-0,14	
Перетин міді, мм^2	10,70	12,70
Збільшення перетину міді відносно заводського виконання, %	0	18,69
Товщина корпусної ізоляції готового стрижня, мм		
Зменшення товщини ізоляції відносно заводського виконання, %	0	13,57

Це завдання спрощується завдяки вбудованій функціональності ANSYS Motor-CAD, яка дозволяє автоматично виводити ключові параметри електродвигуна для подальшого аналізу (Рис.2).

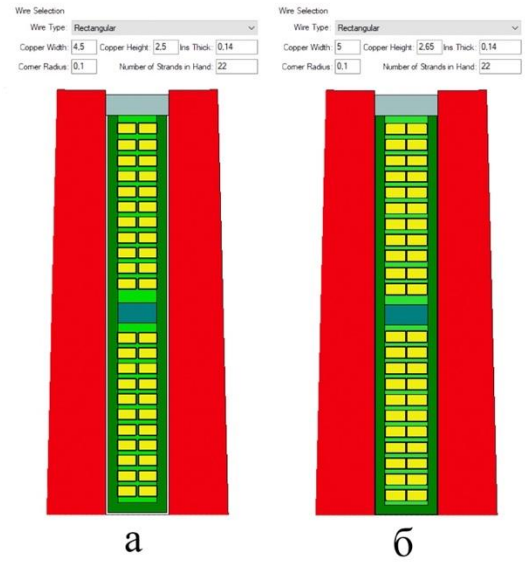


Рис. 2. Моделювання заповнення пазу в програмному середовищі ANSYS Motor-CAD: а - в заводському виконанні, б - модель зі збільшеним перерізом провідника.

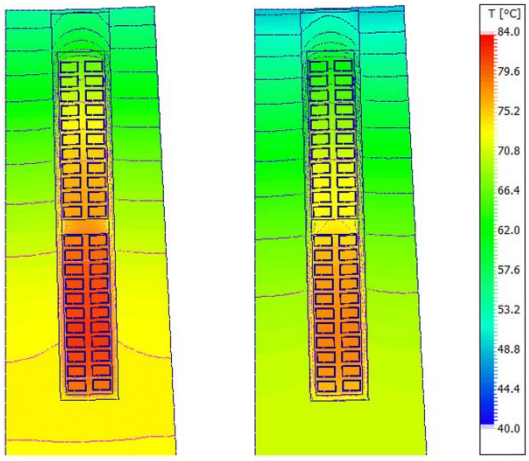
Після проведення електромагнітного моделювання обмоток із збільшеним перерізом у програмному середовищі ANSYS Motor-CAD основні параметри електродвигуна будуть систематизовані та представлені в таблиці 2 для порівняльного аналізу електромеханічних характеристик.

Також, після виконання моделювання в програмному комплексі ANSYS Motor-CAD буде сформовано електромагнітну карту статора і ротора електродвигуна. Дана карта [12] дозволить отримати додаткове підтвердження, що зміни геометричних розмірів міді та ізоляції (системи ізоляції) не призвели до зміни електромеханічних та енергетичних характеристик електродвигуна ВАЗ215.

Теплове моделювання. Після виконання та

підтвердження коректності [16, 17] електромагнітного моделювання було здійснено теплове моделювання, для виконання якого в програмному комплексі ANSYS Motor-CAD не потрібно вносити зміни до вхідних даних системи ізоляції. Це пов'язано з тим, що метою моделювання є оцінка стійкості системи ізоляції до впливу зовнішніх чинників при зменшенні її товщини. Такий підхід дозволяє зберегти вихідні параметри моделі та зосередитись на аналізі впливу геометричних змін на теплові характеристики. В результаті теплового моделювання обмоток заводського виконання та обмоток зі збільшеним перерізом міді стає можливим спостерігати пряму залежність між збільшенням перерізу обмоток та їх нагріванням. Збільшення перерізу міді призводить до зміни теплових характеристик, що дає змогу оцінити вплив геометричних параметрів на температурний режим обмоток.

На підставі проведеного дослідження [18] встановлено, що для отримання повної теплової карти (Рис.3) електродвигуна та необхідних даних для оцінки терміну служби електричної ізоляції достатньо розглянути сценарій стаціонарного режиму моделювання. Стаціонарні режими теплотехніці характеризуються незмінністю параметрів системи (таких як температура, тиск, теплообмін тощо.) у часі. Це означає, що у будь-якій



а б

Рис. 3. Теплова карта середньої температури обмотки статора електродвигуна ВА3215 у стаціонарному режимі: а – модель зі стрижнями обмотки статору заводського виконання; б - модель зі збільшеним перерізом провідника.

точці системи значення цих параметрів залишаються постійними, а система перебуває у стані теплового рівноваги. Наприклад, якщо температура обмотки статора залишається незмінною у процесі моделювання, цей режим вважатимуться стаціонарним.

Таблиця 2

Порівняння номінальних характеристик електродвигуна з результатами моделювання

Найменування	**Заводські дані ЕД**	**Моделювання в Ansys-MotorCAD, при перетині міді**	
		2,50*4,50 (стандартний перетин міді)	***2,65*5,00 (збільшенний перетин міді)***
Напруга номінальна, кВ	6,00	6,00	6,00
Потужність номінальна, МВт	8,00	8,03	8,02
Струм номінальний, А	880	881,2	880,1
Коефіцієнт корисної дії, %	98,00	98,01	98,07
Коеф. потужності	0,90	0,89	0,89
Число полюсів	6	6	6
Швидкість обертання, об/хв.	994	991	991
Номінальний момент на валу, Нм	76900	77235,2	77139,2
Перегрів ізоляції, °C	130 (допустимий)	129,7 (розрахунковий)	111,2 (розрахунковий)

Такий підхід дозволяє спростити аналіз та зосередитись на ключових характеристиках теплового стану системи. Температурні значення ключових вузлів електродвигуна, одержані в результаті моделювання, представлені в таблиці 2.

Після виконання теплового моделювання електродвигуна ВА3215 у програмному комплексі ANSYS Motor-CAD було розраховано термін служби ізоляції на основі двох моделей старіння ізоляції: закону Монтзінгера та закону Дакіна [19]. Ці залежності, вбудовані в програмне забезпечення, дозволяють оцінити довговічність ізоляції в умовах експлуатації. Температури 129,7 ºС та 111,2 ºС, використані для розрахунку терміну служби ізоляції електродвигуна ВА3215, були отримані в результаті теплового моделювання в програмному комплексі ANSYS Motor-CAD.

Результати розрахунків терміну служби ізоляції, отримані під час моделювання, наведено у таблиці (див. табл. 5).

Виготовлення дослідних зразків.

Незважаючи на те, що переріз стрижня обмотки

статора відрізняється від перерізу стрижня в заводському виконанні, пристосування, що використовуються для опресування ізоляції залишаться незмінними. Це рішення дозволяє мінімізувати зміни в конструкції обмоток та електродвигуна загалом, що спрощує процес модернізації та знижує витрати на адаптацію виробничого процесу.

На підставі результатів, представлених у статті [20], було обрано матеріал, що володіє найкращими з перерахованих матеріалів електричними характеристиками – а саме Стрічка слюдинітова просочена Елізтерм 155 ТПЛ 0,13х20, виробництва ТОВ НВК «Укрпромвпровадження», м. Київ. Цей вибір обумовлений аналізом ключових параметрів, таких як електрична міцність, тангенс кута діелектричних втрат і прогнозований час експлуатації системи ізоляції після виготовлення.

Стрижні ВА3215 в процесі виготовлення див на Рис. 4.

Процес виготовлення ізоляції стрижнів обмотки статора, як було сказано раніше, буде виконано із

Рис. 4. Готовий стрижень ВА3215(зліва знизу. Зверху – витковий стрижень ВА3215 перед накладенням корпусної ізоляції.

застосуванням технології Resin Rich [21-22], яка зарекомендувала себе як надійний та ефективний метод у виробництві електричної ізоляції. Ця технологія заснована на використанні матеріалів з високою термічною та електричною стійкістю, що забезпечує довговічність та надійність ізоляції в умовах експлуатації.

Технологія Resin Rich включає кілька ключових етапів, таких як підготовка ізоляційних матеріалів, їх рівномірне нанесення на поверхню стрижнів обмотки, термічна обробка для досягнення оптимальної адгезії і подальший контроль якості (високовольтні випробування). Такий підхід мінімізує ймовірність появи дефектів та гарантує високі експлуатаційні характеристики ізоляції.

Випробування дослідних зразків. В рамках дослідження було випробувано два виготовлені зразки (див. табл. 1), що представляють однакові ізоляційні системи, але з різними перерізами мідних провідників. Для визначення терміну служби ізоляції стрижнів електродвигуна ВА3215, виконаної за технологією Resin Rich, необхідно провести високовольтні випробування та визначити запас міцності ізоляції. Випробування кожного зразка включають такі етапи:

– Вимірювання опору ізоляції щодо корпусу.

Це стандартна операція перевірки якості ізоляції обмоток, що регламентована ГОСТ. Особлива увага приділяється коефіцієнту абсорбції (відношення R_{60}/R_{15}), що характеризує ступінь зволоження ізоляції. Значення коефіцієнта абсорбції має бути не менше ніж 1,3.

Таблиця 3

Максимальна температура окремих точок основних вузлів електродвигуна після моделювання

Найменування вузла електродвигуна	**Температура вузла при перетині міді, °C**	
	2,50*4,50 (стандартний перетин міді)	***2,65*5,00 (збільшений перетин міді)***
Навколишнє середовище	40,00	40,00
Корпус статора	40,00	40,00
Активне залізо статора (спинка)	75,68	74,97
Залізо статора (поверхня)	52,49	52,02
Залізо ротора (поверхня)	45,76	45,55
Зуб ротора	46,13	45,93
Залізо ротора	44,81	44,63
Вал	45,42	45,23
Стрижень ротора	45,69	45,49
Обмотка макс. температура	129,72	111,23
Обмотка середня температура	99,181	86,21
Обмотка міні. температура	44,89	44,42

– Вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат (δ).

Тангенс кута втрат описує енергію, що розсіюється в ізоляційному матеріалі через втрати в електричному полі. Цей параметр залежить від якості матеріалу, температури навколишнього середовища та частоти змінного струму.

Вимірювання проводяться в холодному стані ізоляції через 24 години після завершення

технологічного процесу при напругах 0,5Uном., 1,0Uном. та 1,5Uном. (в даному випадку 3, 6 та 9 кВ), що дозволяє оцінити якість опресування ізоляції.

– Визначення запасу міцності (напруги пробою ізоляції).

Це випробування дозволяє встановити максимальну напругу, яку може витримати ізоляція без руйнування.

Результати високовольтних випробувань досліджуваних зразків представлені таблиці 4.

Таблиця 4

Результати випробувань стрижнів обмотки статору.

Система ізоляції	Параметр та одиниці вимірювання	Дані вимірювань при перерізі міді	
		*2,50*4,50*	*2,65*5,00*
Reasin Rich Елізтерм 155 ТПЛ	R_{60}, ГОм	1950	1500
	R_{60}/ R_{15}	2,34	2,05
	$tg\delta U_{ном.}$	0,07843	0,07438
	Δ tgδ	0,01612	0,01563
	$U_{пр.}$, кВ	58	54

Порівняльний аналіз даних дослідження. Для оцінки часу експлуатації даної системи ізоляції буде проведено порівняльний аналіз з використанням кількох аналітичних методів, включаючи методи Монзінгера [7], Вант - Гоффа – Арреніуса [2], усередненої залежності [18] та метод пробою [20]. Ці підходи дозволяють враховувати різні аспекти старіння та деградації ізоляційних матеріалів, такі як термічне старіння, електричні навантаження та механічні впливи.

Також буде застосовано метод прямого моделювання у програмному комплексі ANSYS Motor-CAD, який дозволяє враховувати складні фізичні процеси, що відбуваються в ізоляції, та моделювати їх в умовах, наближених до реальної експлуатації. Зокрема, в ANSYS Motor-CAD будуть використані підходи Монзінгера та Дакіна [19], які дозволяють враховувати температурні та електричні навантаження на ізоляцію в динаміці.

Висновки

Аналіз отриманих даних підтвердив високий рівень узгодженості результатів розрахунків та експериментальних випробувань, що свідчить про надійність обраних методик дослідження. Для узагальнення даних та отримання остаточних результатів використали метод середнього арифметичного, що дозволило підвищити точність аналізу.

На підставі проведеного дослідження встановлено, що збільшення перерізу мідного провідника на 18,69% та одночасне зменшення товщини ізоляції на 13,57% щодо зразка заводського виконання призводить до значного збільшення терміну служби ізоляційної системи на 320,87%. Це відповідає зростанню терміну експлуатації з 131705 годин для стрижнів заводського виконання до 554311 годин для модернізованих стрижнів.

Отримані результати підтверджують значний вплив геометричних параметрів провідника та ізоляції на довговічність ізоляційної системи.

Збільшення терміну служби більш ніж тричі демонструє високу ефективність запропонованих конструктивних змін. Це відкриває можливості для застосування подібних підходів під час проектування та модернізації електричних машин.

Таблиця 5

Термін експлуатації ізоляції обмоток ВА3215.

№ з/п	Закон розрахунку	Робоча формула розрахунку	Термін експлуатації ізоляції при температурі, годин
При поперечному перетин міді - 2,65*5,00 (t_e = 111 ºC=const)			
1.	Монтзінгер	$T_e = e^{\frac{E_a}{R\theta} - G}$	642368
2.	Вант-Гофф-Арреніус	$T_e = T_1 e^{B(\frac{1}{\theta_e} - \frac{1}{\theta_1})}$	599294
3.	Монтзінгер (А. М.)[1]	$T_e = ae^{-bt_e}$	415700
4.	Дакін (А. М.)	$T_e = ae^{(-\frac{B}{\Delta\theta})}$	635500
5.	Усереднена залежність	$T_e = 7,86e^{-0,0677t_e} \cdot 10^8$	428380
6.	Метод пробою	$T_1 = (\frac{\ln U_{пр.} - \ln U_{ном.}}{\alpha}) \cdot e^{B(\frac{1}{\theta_e} - \frac{1}{\theta_1})}$	604626

Продовження табл.5

При поперечному перетин міді - 2,50*4,50 (t_e = 129 ºC =const)			
7.	Монтзінгер	$T_e = e^{\frac{E_a}{R\theta} - G}$	146099
8.	Вант-Гофф-Арреніус	$T_e = T_1 e^{B(\frac{1}{\theta_e} - \frac{1}{\theta_1})}$	136302
9.	Монтзінгер (А. М.)	$T_e = ae^{-bt_e}$	115400
10.	Дакін (А. М.)	$T_e = ae^{(-\frac{B}{\Delta\theta})}$	134500
11.	Усереднена залежність	$T_e = 7{,}86e^{-0{,}0677t_e} \cdot 10^8$	126648
12.	Метод пробою	$T_1 = (\frac{\ln U_{пр.} - \ln U_{ном.}}{\alpha}) \cdot e^{B(\frac{1}{\theta_e} - \frac{1}{\theta_1})}$	131281
[1](А. М.) -Розрахунок проводився після моделювання електродвигуна у програмі «Ansys-MotorCAD».			

З іншого боку, це дослідження підкреслює важливість оптимізації конструктивних параметрів як підвищення довговічності, а й поліпшення експлуатаційних характеристик електричних машин загалом. Збільшення терміну служби ізоляції знижує витрати на обслуговування та заміну обладнання, що особливо важливо для промислових застосувань, де стабільність та надійність електричних машин відіграють ключову роль.

Таким чином, запропоновані зміни в конструкції можуть бути використані як основа для подальшої розробки більш ефективних та довговічних ізоляційних систем. Це має практичне значення для підвищення енергоефективності, надійності та безпеки електричних машин в умовах інтенсивної експлуатації.

Література

1. *Stefan A. Busoi, Petru V. Notingher, Laurentiu M. Dumitran, Gabriel Tanasescu. The influence of temperature and electric field frequency on the dielectric properties of electrical machines insulation systems. 2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). DOI: 10.1109/ISEEE.2010.5628478*
2. *Artem Hordiienko, Oleksiy Iegorov, Natalia Potryvaieva. Heat Resistance Class Selection for the Stator Winding Insulation in the Circulation Pumps Induction Motors. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402481*
3. *Artem Hordiienko, Oleksiy Iegorov. Study of the Ionizing Radiation Influence on the Induction Motor Main Circulation Pumps Electrical Insulation. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 10.1109/MEES61502.2023.10402475*
4. *Florina-Ambrozia Coteț, Iulia Văscan, Loránd Szabó (2023)«On the Usefulness of Employing ANSYS Motor-CAD Software in Designing Permanent Magnet Synchronous Machines» epartment of Electrical Machines and Drives, Technical University of Cluj-Napoca, 400114 Cluj-Napoca, Romania Designs, 7(1), 7; https://doi.org/10.3390/designs7010007*
5. *Guastavino, F., Cordano, D., Torello, E., & Secondo, G.. "Electrical aging tests on different kind of insulating systems adopted for induction stator motor", 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). DOI: 10.1109/ceidp.2015.7352068*
6. *Leuzzi, R., Monopoli, V. G., Rovere, L., Cupertino, F., & Zanchetta, P. "Analysis and Detection of Electrical Aging Effects on High-Speed Motor Insulation", IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 1-1. DOI:10.1109/tia.2019.2929013.*
7. *Єрмолін Н.П., Жеріхін І.П. "Надійність електричних машин". Енергія, 1975. с. 71-83*
8. *Dakin, T. W. (1948). Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 67(1), 113–122. doi:10.1109/t-aiee.1948.5059649*
9. *Дьяков Е. Д., Гаряжа В. Н., Воропай В. Г. Конспект лекцій з курсу «Електротехнічні Матеріали», Харків, ХНУМГ, 2015, с 6.*
10. *Серебряков А. С. «Електротехнічне матеріалознавство. Електротехнічні матеріали Навчальний посібник». Маршрут, 2005 ISBN 5-89035-210-5 с. 112-116*
11. *Харламенков А. С. Нагрівостійкість ізоляції електроустановок// Пожежвибухобезпека/ Fire and Explosion Safety. - 2019. - Т. 28, № 1. - С. 77-79.*
12. *Гордієнко А. В. «Моделювання електромагнітних процесів в асинхронному електродвигуні циркуляційних насосів першого контуру охолодження реактору ВВЕР-1000» Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці :матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.*
13. *ТУ У 27.1-00215120-001-2021 «Обмототки статорів для ремонту машин електричних обертових понад 355 габарит.. Технічні умови»*
14. *Копілов І. П. "Проектування електричних машин", 4 видання. "Юрайт" 2011, с 516.*
15. *Бернштейн Л. М. Ізоляція електричних машин загальнопромислового застосування. Енергія, 1971 с. 150*
16. *Ablyametov Seyar Murut ugli, Toirov Olimjon Zuvurovich, Abduganiev Zhavokhir Sherzod ugli. (2024) "Analysis and reproduction of electrical machine characteristics using «Ansys-MotorCAD» International Scientific Journal Science and Innovation Special Issue: "Modern Problems and Prospects of Development of Energy Supply of Digital Technology Facilities", DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.10724507*
17. *Iegorov O., Iegorova O., Miroshnyk O., Savchenko O.,*

(2020) "Improving the accuracy of determining the parameters of induction motors in transient starting modes", ENERGETIKA, vol. 66, no. 1, pp. 15-23. DOI: 10.6001/energetika.v66i1.4295

18. Hordiienko A. «Comparative Analysis of Determining the Service Life of Powerful Asynchronous Motors Insulation by Analytical Methods and Using the ANSYS MotorCAD Software Environment» Lighting Engineering & Power Engineering 2024, Vol. 63, No. 3, 67–73, https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.3.01

19. Dakin, T. W. (1948). «Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon». Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 67(1), 113–122. DOI:10.1109/t-aiee.1948.5059649

20. А.В. Гордієнко «Інноваційний підхід до оцінки довговічності ізоляції асинхронних електродвигунів». НТЗ «Комунальне господарство міст» 2024. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-29-34

21. Безпрозванних Г. В. Конструктивно-технологічні рішення підвищення електричних характеристик високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин : монографія / Г. В. Безпрозванних, О. В. Рогинський. Харків : Друкарня Мадрид, 2023. с. ISBN 978-617-8254-06-3

22. VonRoll ISOLA. Electrical Insulation Material. Resin-RichInsulation Systems for high voltage rotating machines . V.R.I. 2003.- 27 p.

References

1. Stefan A. Busoi, Petru V. Notingher, Laurentiu M. Dumitran, Gabriel Tanasescu. The influence of temperature and electric field frequency on the dielectric properties of electrical machines insulation systems. 2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). DOI: 10.1109/ISEEE.2010.5628478

2. Artem Hordiienko, Oleksiy Iegorov, Natalia Potryvaieva. Heat Resistance Class Selection for the Stator Winding Insulation in the Circulation Pumps Induction Motors. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402481

3. Artem Hordiienko, Oleksiy Iegorov. Study of the Ionizing Radiation Influence on the Induction Motor Main Circulation Pumps Electrical Insulation. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 10.1109/MEES61502.2023.10402475

4. Florina-Ambrozia Coteț, Iulia Văscan, Loránd Szabó (2023)«On the Usefulness of Employing ANSYS Motor-CAD Software in Designing Permanent Magnet Synchronous Machines» epartment of Electrical Machines and Drives, Technical University of Cluj-Napoca, 400114 Cluj-Napoca, Romania Designs,

5. Guastavino, F., Cordano, D., Torello, E., & Secondo, G.. "Electrical aging tests on different kind of insulating systems adopted for induction stator motor", 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). DOI: 10.1109/ceidp.2015.7352068

6. Leuzzi, R., Monopoli, V. G., Rovere, L., Cupertino, F., & Zanchetta, P. "Analysis and Detection of Electrical Aging Effects on High-Speed Motor Insulation", IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 1-1. DOI:10.1109/tia.2019.2929013.

7. Ermolin, N.P., Zherikhin, I.P. "Reliability of Electric Machines". Energy, 1975. pp. 71-83

8. Dakin, T. W. (1948). Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 67(1), 113–122. doi:10.1109/t-aiee.1948.5059649

9. Dyakov, E. D., Gariazh V. N., Voropai V. G. Lecture notes for the course "Electrical Materials", Kharkov, KhNUMG, 2015, p. 6.

10. Serebryakov A. S. "Electrical Materials Science. Electrical Materials Textbook". Route, 2005 ISBN 5-89035-210-5 p. 112-116

11. Kharlamenkov A. S. Heat resistance of electrical installation insulation// Fire and Explosion Safety/ Fire and Explosion Safety. - 2019. - T. 28, No. 1. - P. 77-79.

12. Gordienko A. V. "Modeling of electromagnetic processes in an asynchronous electric motor of circulation pumps of the first cooling circuit of the VVER-1000 reactor" Innovative technologies in lighting and power engineering: materials of the International Scientific-Practical Conference, Kharkiv, May 16–17, 2024. O. M. Beketov KhNUMG.

13. TU U 27.1-00215120-001-2021 "Stator windings for repair of electric rotating machines over 355 dimensions. Technical conditions"

14. Kopilov I. P. "Design of electric machines", 4th edition. "Yurait" 2011, p. 516.

15. Bernstein L. M. Insulation of electric machines for general industrial use. Energy, 1971 p. 150

16. Ablyametov Seyar Murut ugli, Toirov Olimjon Zuvurovich, Abduganiev Zhavokhir Sherzod ugli. (2024) "Analysis and reproduction of electrical machine characteristics using ""Ansys-MotorCAD"" International Scientific Journal Science and Innovation Special Issue: "Modern Problems and Prospects of Development of Energy Supply of Digital Technology Facilities", DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.10724507

17. Iegorov O., Iegorova O., Miroshnyk O., Savchenko O., (2020) "Improving the accuracy of determining the parameters of induction motors in transient starting modes", ENERGETIKA, vol. 66, no. 1, pp. 15-23. DOI: 10.6001/energy.v66i1.4295

18. Hordiienko A. "Comparative Analysis of Determining the Service Life of Powerful Asynchronous Motors Insulation by Analytical Methods and Using the ANSYS MotorCAD Software Environment" Lighting Engineering & Power Engineering 2024, Vol. 63, No. 3, 67–73, https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.3.01

19. Dakin, T. W. (1948). "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 67(1), 113–122. DOI:10.1109/t-aiee.1948.5059649

20. A. Hordiienko"Innovative approach to assessing the durability of insulation of asynchronous electric motors ". NTZ "Communal services of cities" 2024. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-29-34

21. Bezprozvannykh G. V. Structural and technological solutions for improving the electrical characteristics of high-voltage composite electrical insulation systems of electric machines: monograph / G. V. Bezprozvannykh, O. V. Roginsky. Kharkiv: Madrid Printing House, 2023. p. ISBN 978-617-8254-06-3

22. VonRoll ISOLA. Electrical Insulation Material. Resin-RichInsulation Systems for high voltage rotating machines . V.R.I. 2003.- 27 p

Рецензент: д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри Теплотехніки та енергоефективних технологій Кунденко Микола Петрович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Автор: ГОРДІЄНКО Артем Валерійович
начальник відділу якості ТОВ «ОСК-Технолоджі», аспірант кафедри АЕіЕ Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.
E-mail- artemgordienko1791@gmail.com

ANALYSIS OF INSULATION SYSTEMS OF ELECTRIC MOTORS OF MAIN CIRCULATION PUMPS VVER-1000 WITH THE PURPOSE OF ITS MODERNIZATION AND IMPROVEMENT

A. Hordiienko
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article is devoted to the study of the influence of the geometric parameters of the conductor and insulation on the durability of the insulation systems of electrical machines. In modern industrial conditions, the reliability and durability of electrical machines play a key role, since the efficiency of many technological processes depends on their stable operation. Optimization of the design of windings and insulation is becoming an important task aimed at improving performance and reducing maintenance costs.

The paper examines approaches to optimizing insulation systems taking into account changes in the geometric parameters of the conductor and the insulation layer. The analysis provided allows us to assess the impact of such changes on the main properties of the insulation, including its resistance to electrochemical and mechanical effects. Particular attention is paid to the selection of design solutions that can be used to improve the reliability of electrical machines under high load conditions.

The research methodology includes both theoretical modeling and experimental tests to assess the properties of insulating materials and their behavior under various operating conditions.

The work also focuses on the economic aspects of increasing the durability of insulation systems. Optimizing the design not only increases the service life of electrical machines, but also helps reduce costs associated with their operation, repair, and maintenance. This is of particular importance for industries where equipment operates under intense loads and requires minimal downtime.

The article also emphasizes the importance of an integrated approach to the design of insulation systems, which includes not only the selection of suitable materials, but also their optimal combination with the design parameters of the windings. This approach improves the performance characteristics of electrical machines, increasing their service life and reducing the likelihood of failures.

The findings and practical recommendations can be used in designing new electrical machines and upgrading existing systems. This is especially relevant for industrial sectors that require high reliability of equipment and minimization of maintenance costs. Thus, the work contributes to the development of technologies for designing durable and efficient insulation systems for electrical machines in general.

Keywords: *induction motor, high-voltage insulation systems, service life, thermal process modeling.*