

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Ігнатюка Євгена Станіславовича

на тему «Діагностика шихтованих магнітопроводів електричних машин при високочастотних впливах»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації.

Актуальність дослідження стану якості міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів електричних машин загального призначення в сучасному контексті є важливим питанням. Магнітопроводи відіграють ключову роль у функціонуванні електричних машин, впливаючи на їхню ефективність, надійність та довговічність. Якість міжлистової ізоляції є визначальною для запобігання внутрішніх коротких замикань, які можуть призвести до перегріву, зниження ефективності та навіть до виходу з ладу обладнання.

Основна проблема полягає в тому, що ізоляція може деградувати з часом під впливом різних факторів, таких як вібрація, перепади температур, вологість та інші експлуатаційні умови. Ця деградація не завжди є очевидною на ранніх стадіях, тому розробка точних та ефективних методів діагностики є критично важливою. Покращення цих методів дозволить не тільки виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях, але й здійснювати превентивне обслуговування та ремонт, що допомагає уникнути дорогих та часом небезпечних поломок.

З огляду на зростаючу залежність суспільства від електроенергії та постійне збільшення потужності та складності електричних машин, актуальність таких досліджень стає ще більш важливою. Це особливо важливо у промислових застосуваннях, де ефективність та надійність обладнання можуть мати безпосередній вплив на продуктивність, безпеку праці та екологічні показники.

Враховуючи це, дослідження, спрямовані на підвищення якості міжлистової ізоляції, відіграють ключову роль у забезпеченні сталого та надійного функціонування електротехнічного обладнання. Такі дослідження не тільки сприяють подовженню терміну служби машин, але й дозволяють знижувати експлуатаційні витрати та підвищувати загальну ефективність. Отже, вони мають велике значення як для науки, так і для окремих промислових

підприємств. У перспективі, прогрес у цій області може сприяти розвитку нових стандартів та технологій в сфері діагностики електричних машин, що, в свою чергу, матиме позитивний вплив на загальну ефективність та стійкість обладнання під час роботи.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Результати досліджень виокремлюються своєрідністю наукового підходу та методів, які внесли суттєвий вклад у контроль якості міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів. Наукова новизна даної роботи полягає в кількох ключових аспектах.

По-перше, був впроваджений новий індукційний метод контролю, що відрізняється від існуючих підходів. Цей метод базується на порівнянні реакцій швидкоплинних процесів різної частоти на шляхи замикання та інтенсивність вихрових струмів при наявності та відсутності дефектів магнітопроводу.

По-друге, вперше був запропонований метод комплексної оцінки якості шихтованих магнітопроводів, ґрунтуючись на параметрах мультифізичного високочастотного електромагнітного та ударно-вібраційного процесу. Ці параметри стали вагомими діагностичними ознаками цілісності міжлистової ізоляції та рівня пресування пакету.

По-третє, була розроблена польова математична модель, яка дозволяє оцінити зв'язок параметрів високочастотних процесів в магнітних осердях з їх питомими втратами в змінних магнітних полях різної частоти. Ця модель рекомендована для використання в нормативних випробуваннях.

Отримані результати відкривають нові можливості для вдосконалення методів діагностики міжлистової ізоляції в шихтованих магнітопроводах, сприяючи підвищенню надійності роботи електричних машин та збільшенню терміну їхньої експлуатації.

У практичному плані, розроблено принципову та конструктивну схему обробки інформації про стан дефектності міжлистової ізоляції магнітопроводів, яка може бути легко інтегрована в контрольні системи. Також виготовлено макетний зразок пристрою контролю, що дозволяє оцінити інтегральний рівень якості міжлистової ізоляції та враховувати вплив локальних дефектів.

Введений комплексний метод оцінки дозволяє одночасно перевіряти стан міжлистової ізоляції та послаблення пресування пакету магнітопроводу, що є важливим кроком у поліпшенні загальної якості та надійності в процесі використання електричних машин.

Також була обґрунтована інформативна тепловізійна методика для виявлення місцевих дефектів шихтованого магнітопроводу, яка може використовуватися одночасно з ватметровим методом оцінки питомих втрат.

Методика визначення ступеня пошкодження міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів, що базується на новому тепловізійному підході, визначає новий напрямок для подальших досліджень та може служити основою для розробки більш точних та ефективних методів визначення стану ізоляції.

Загалом, отримані наукові результати створюють перспективи для подальших вдосконалень у контролі якості міжлистової ізоляції та сприяють підвищенню ефективності та тривалості служби електричних машин.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ігнатюка Є.С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям Електрична інженерія.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Ігнатюка Євгена Станіславовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріали дисертаційної роботи наведені в легкозасвоєваному порядку, спрямованому на максимальне зрозуміння читача. Мова та стиль викладання результатів визначаються як чіткі та зрозумілі, сприяючи легкості сприйняття та освоєння матеріалу. Використана наукова термінологія є стандартною і загальноприйнятою.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 224 сторінки.

У вступі дисертаційної роботи розглядається актуальна проблема, пов'язана з підвищенням надійності електричних машин. Основний фокус роботи спрямований на удосконалення методів та пристроїв для перевірки стану та

діагностики шихтованих магнітопроводів, зокрема, осердь загального і спеціального призначення. Метою дослідження є обґрунтована оцінка зміни робочих властивостей цих магнітопроводів та надання рекомендацій з подальшої їх експлуатації. У вступі увага акцентується на важливості своєчасної діагностики та контролю стану магнітопроводів для підтримання надійності електротехнічних комплексів та визначаються важливі аспекти підвищення надійності електричних машин через удосконалення методів контролю та діагностики шихтованих магнітопроводів.

У першому розділі висвітлено вплив технологічних аспектів на характеристики ламінованих магнітопроводів, а також презентовано огляд існуючих методів, що застосовуються для оцінки стану ізоляції між листами та розкриття рівня розпушування пакетів. Подано аналіз причин, які призводять до виникнення дефектів у магнітопроводах під час їх виробництва та ремонту. Проаналізовано існуючі підходи до діагностики якості сердечників, які використовуються для виявлення ушкоджень та прогнозування можливих несправностей в електромеханічних системах. Ретельно висвітлено основні види дефектів, їх вплив на загальний та локальний стан магнітопроводів, а також на ефективність роботи електричних машин в цілому. Особлива увага приділена методам діагностики магнітопроводів, таким як ватметричний аналіз, тепловізійний контроль та віброакустичні методи, які є найбільш інформативними для створення комплексної системи діагностики ламінованих сердечників.

У другому розділі викладено фізичні принципи, що стоять в основі взаємозв'язку параметрів динамічних високочастотних процесів з характеристиками втрат в магнітопроводах. Описано методику оцінки якості ламінованих сердечників, засновану на взаємодії магнітопроводу з швидкісними індукційними впливами. Наведено статистичні дані, що вказують на взаємозв'язок між параметрами швидкісних індукційних процесів в магнітопроводах та втратами від перемагнічування при роботі на промислових частотах. Проведено статистичний аналіз експериментальних даних, отриманих за допомогою високочастотного індукційного методу, для вивчення реального стану бездефектних та дефектних шихтованих магнітопроводів різної геометричної форми, потужності та полюсності. Визначено регресійну залежність та подано довірчі інтервали для точності вимірюваних діагностичних параметрів, встановлено чотири рівні дефектності магнітопроводів та відповідні діагностичні межі. Запропоновано рекомендації з коригування номінальної потужності машини в залежності від ступеня дефектності використовуваного магнітопроводу.

Третій розділ фокусується на математичному моделюванні високочастотних процесів, використовуючи запропонований індукційний метод

для оцінки якості шихтованих магнітопроводів у електричних машинах загального призначення. Здійснено комплексне польове та математичне моделювання як для дефектних, так і для бездефектних пакетів листів електротехнічної сталі за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Проаналізовано наслідки розвитку дефектів у магнітопроводах, зокрема їх вплив на втрати від вихрових струмів, шляхом моделювання змін у електричній провідності сталі, збільшення товщини листів та формування додаткових контурів вихрових струмів, що відображають як локальні, так і інтегральні дефекти. Локальні дефекти були відтворені через металеве з'єднання сусідніх пластин, тоді як інтегральні дефекти враховані за допомогою збільшення міжлистової поперечної електричної провідності сталі пакету. На основі отриманих даних була розроблена детальна польова математична модель у програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Проведено математичне моделювання та експериментальні дослідження на прикладі магнітопроводу двигуна 4A90L4Y3. Результати цих досліджень дозволили визначити діагностичні критерії для оцінки магнітопроводів з різним ступенем дефектності міжлистової ізоляції. Також проведено аналіз впливу локальних дефектів у зубцевій зоні двигуна моделі AIP100L4Y3, взятого із вбудованими термодатчиками в дефектних та бездефектних секціях. Розрахунки, здійснені на основі теплових схем заміщення та вимірювань температур під час роботи зібраної машини, дозволили оцінити локальні втрати в дефектних та бездефектних зонах, а також температури в обмотках, розташованих у цих зонах. Була проведена оцінка потенційної небезпеки локальних дефектів у зубцевій зоні магнітопроводів, яка може призвести до виходу з ладу міжвиткової ізоляції частини обмотки, розташованої в пазах між дефектними зубцями.

У четвертому розділі наведено методику оцінки стану шихтованих магнітопроводів, акцентуючи увагу на якості міжлистової ізоляції та рівні розпушування листів. Цей підхід дозволяє формулювати рекомендації з подальшого використання сердечників, ґрунтуючись на аналізі діагностичних даних, отриманих шляхом швидкодіючих індукційних впливів в поєднанні з ударно-вібраційними ефектами, а також ураховуючи дефекти різного походження. Висвітлено лабораторні зразки інформаційно-вимірювальних систем для діагностики шихтованих магнітопроводів у різних станах пресування. В розділі подано структурні схеми, розкрито алгоритми функціонування, структуру та ключові функції програмного забезпечення, що є складовою розроблених інформаційно-вимірювальних систем.

У п'ятому розділі представлено структурні та функціональні особливості експериментального прототипу, призначеного для аналізу якості шихтованих магнітопроводів за допомогою високочастотного індукційного методу. Функціональна схема включає генератор синусоїдальних коливань високої

частоти, блок силових ключів на основі польових транзисторів, блок живлення та блок обробки та аналізу даних. Система вимірювань та діагностики складається з силової та вимірювальної частин, що з'єднані індукційно через досліджуваний об'єкт із збуджувальною та вимірювальною обмотками. Цей пристрій дозволяє здійснювати оцінку якості міжлистової ізоляції магнітопроводів електричних машин без використання додаткових вимірювальних пристроїв. У розділі представлені результати досліджень магнітопроводів різної геометрії та стану якості запропонованим методом та надані рекомендації до можливої подільшої їх експлуатації.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 14 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 3 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus, з яких 3 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank.

Також результати дисертації були апробовані на 7 наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В роботі не приділено достатньо уваги зміненню гістерезисної складової втрат порівняно з вихрострумовою в залежності від погіршення магнітних властивостей в процесі експлуатації та ремонтних робіт.

2. Не показано яким, чином збільшення геометричних розмірів магнітопроводів змінює величину і форму контурів можливих міжлистових замикань і, як наслідок, загальні втрати на вихрові струми.

3. Не в повній мірі обґрунтовані межі застосування методів для оцінки якості магнітопроводів двигунів великої потужності.

4. В роботі присутні незначні стилістичні помилки.

5. Літературний огляд у контексті дослідження, яке зосереджено на використанні височастотних методів діагностики у електротехніці, здається недостатньо широким.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ігнатюка Євгена Станіславовича на тему «Діагностика шихтованих магнітопроводів електричних машин при високочастотних впливах» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для Електричної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Ігнатюк Євген Станіславович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань Електрична інженерія за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент:

Професор кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій
Національного університету біоресурсів
і природокористування України,
доктор технічних наук, професор



Микола ЗАБЛОДСЬКИЙ

М.П.

« 02 » лютого 2024 року

