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 теми дисертаційної роботи Ігнатюка Євгена Станіславовича полягає у вирішенні критично важливих питань діагностики стану шихтованих магнітопроводів та якості міжлистової ізоляції в загальнопромислових електричних машинах змінного струму.

В сучасному світі електричні машини є невід'ємною частиною майже кожної промислової, транспортної та енергетичної системи. Надійність та довговічність такого обладнання безпосередньо впливає на безпеку, ефективність та економічну вигоду від їх експлуатації. Шихтовані магнітопроводи відіграють ключову роль у функціонуванні електричних машин, а дефекти міжлистової ізоляції можуть призвести до серйозних втрат енергії, зниження продуктивності та навіть до аварій.

Аспект діагностики таких дефектів, особливо у контексті підвищення екологічних стандартів та вимог до енергоефективності, стає все більш актуальним. цінити ступінь ушкодження міжлистової ізоляції або стан шихтованих Традиційні методи діагностики часто не дозволяють своєчасно виявити та омагнітопроводів, що у свою чергу може призводити до непередбачуваних збоїв у роботі обладнання та збільшення витрат на його обслуговування та ремонт.

Дисертація Ігнатюка Є.С, пропонує комплексний підхід до діагностики, який базується на розробці та впровадженні передових методологій оцінки стану магнітних осердь. Вона включає розробку та дослідження нових методів, які можуть значно підвищити точність та ефективність діагностування, знизивши ризики для безпечної та ефективної експлуатації електричних машин. Це має велике значення для подальшого розвитку обладнання та технологій у

цій галузі, а також сприяє підвищенню загальної безпеки, надійності та ефективності використання електричних машин у різних сферах промисловості.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Дослідження базується на чіткому розумінні технічних та фізичних аспектів шихтованих магнітопроводів і міжлистової ізоляції в електричних машинах. Автором ретельно проаналізовано існуючі методи діагностики, їх обмеження та можливі напрямки покращення.

Наукова новизна роботи полягає у розробці індукційного методу для контролю якості міжлистової ізоляції, який відрізняється від існуючих методів своєю здатністю порівнювати реакції на швидкоплинні процеси різних частот у магнітних осердях. Цей метод демонструє високу точність і ефективність у виявленні дефектів, а також уможливлює більш точну оцінку загального стану магнітопроводів.

Також покращено чисельну польову математичну модель швидкоплинних процесів у шихтованому магнітному осерді, врахувавши нелінійні властивості магнітних матеріалів та явище гістерезису при зміні частоти перемагнічування. Це відкриває шляхи для більш точного моделювання та прогнозування поведінки магнітопроводів у різних умовах експлуатації.

Особливо важливим є розвиток математичної моделі, яка визначає зв'язок між параметрами високочастотних процесів у випробуваних магнітних осердях та їхніми питомими втратами. Такий підхід дозволяє глибше зрозуміти взаємозв'язки між фізичними процесами в магнітопроводах та їх функціональним станом, забезпечуючи більш точне та обґрунтоване діагностування.

Усі ці аспекти разом свідчать про високу обґрунтованість та достовірність наукових результатів, представлених у дисертації. Здобувач самостійно провів значну частину досліджень, включаючи аналіз існуючих методів, розробку нових підходів та експериментальні дослідження.

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 подаються послідовно то доступно для розуміння. Мова та стиль викладення результатів є чіткими та зрозумілими, що сприяє легкості сприйняття та засвоєння матеріалу. Використана загальноприйнята наукова термінологія, яка є ключовою для забезпечення точності та професійності наукових досліджень.

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

У вступі роботи акцентується на актуальності підвищення надійності електричних машин через вдосконалення методів та пристроїв для перевірки та діагностики шихтованих осердь. Основна мета - розробка критеріїв якості для шихтованих магнітопроводів, щоб забезпечити обґрунтоване відбракування несправних осердь та оцінку надійності електричних машин під час технічного обслуговування та ремонту. Здобувач зазначає, що хоча заміна пошкоджених машин на нові є ефективним рішенням, вона не завжди можлива через високі затрати та можливість швидкої заміни. Тому важливим є ремонт, особливо в контексті магнітопроводів, які є одними з ключових елементів електричних машин і не підлягають заміні під час ремонту. Робота включає аналіз існуючих методів діагностики, розробку нових методів, зокрема високочастотних індукційних методів, для оцінки стану магнітопроводів. Основна увага приділяється розробці комплексного методу оцінки якості магнітопроводів, що включає в себе вібродіагностику та індукційні методи. Результати дослідження мають наукову новизну та практичне значення, оскільки вони дозволяють підвищити надійність електричних машин та оптимізувати їх експлуатацію.

У першому розділі розглянуто вплив технологічних аспектів на властивості ламінованих магнітопроводів, а також представлено огляд методів, які застосовуються для оцінки стану міжлистової ізоляції та ступеня розпушування пакетів. Показано причини, що призводять до появи дефектів у магнітопроводах під час виробництва та ремонту. Проаналізовано існуючі підходи до діагностики якості сердечників, що використовуються для

виявлення ушкоджень та прогнозування потенційних несправностей в електромеханічних системах. Детально розглянуто ключові види дефектів, їх вплив на загальний та локальний стан магнітопроводів, а також на функціонування електричних машин в цілому. Особлива увага приділена ватметровому методу, тепловізійному контролю та віброакустичним методам діагностики магнітопроводів, які є найбільш інформативними для створення комплексної системи діагностики ламінованих сердечників.

У другому розділі представлено фізичні принципи, що лежать в основі взаємозв'язку параметрів високочастотних динамічних процесів із специфічними втратами в магнітопроводах. Описано методику оцінювання якості ламінованих сердечників, засновану на реакції магнітопроводу на швидкісні індукційні впливи. Подано статистичні дані, що демонструють зв'язок між параметрами швидкісних індукційних процесів у магнітопроводах та втратами на перемагнічування при роботі на промислових частотах. Виконано статистичний аналіз експериментальних даних, отриманих за допомогою високочастотного індукційного методу, для вивчення реального стану бездефектних та дефектних шихтованих магнітопроводів різних геометричних форм, потужностей та полюсностей. Визначено регресійну залежність та наведено довірчі інтервали для точності вимірюваних діагностичних параметрів, встановлено чотири технічні стани магнітопроводів та відповідні діагностичні межі. Надано рекомендації щодо коригування номінальної потужності машини в залежності від ступеня дефектності використовуваного магнітопроводу.

Третій розділ зосереджено на математичному моделюванні високочастотних процесів, використовуючи запропонований індукційний метод для оцінки якості шихтованих магнітопроводів у електричних машинах загального призначення. Виконано комплексне двовимірне математичне моделювання як для дефектних, так і для бездефектних пакетів листів електротехнічної сталі за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Аналізувалися 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 змодельовані через металеве з'єднання сусідніх пластин, тоді як інтегральні дефекти – через збільшення міжлистової поперечної електричної провідності пакету. На основі отриманих даних була створена детальна польова математична модель у програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Виконано математичне моделювання та експериментальні дослідження на прикладі магнітопроводу двигуна 4A90L4У3. Результати цих досліджень дозволили запропонувати діагностичні критерії для

оцінки магнітопроводів з різним ступенем дефектності міжлистової ізоляції. Також було проведено аналіз впливу локальних дефектів у зубцевій зоні двигуна моделі АІР100L4У3, зібраного з вбудованими термодатчиками в дефектних та бездефектних секціях. Розрахунки, виконані на основі теплових схем заміщення та виміряних 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 оцінена потенційна небезпека 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 представлено методику оцінювання стану шихтованих магнітопроводів, зосереджуючись на якості міжлистової ізоляції та ступені розпушування листів. Цей метод дозволяє формулювати рекомендації щодо подальшого використання сердечників на основі аналізу діагностичних даних, отриманих за допомогою швидкодіючих індукційних впливів в комбінації з ударно-вібраційними впливами, а також враховуючи дефекти різного походження. Розглянуто лабораторні зразки інформаційно-вимірювальних систем для діагностики шихтованих магнітопроводів у різних станах пресування. В розділі наведено структурні схеми, описано алгоритми функціонування, структуру та ключові функції програмного забезпечення, яке є частиною розроблених інформаційно-вимірювальних систем.

У п’ятому розділі показано 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, які з'єднані індукційно через досліджуваний об'єкт із збуджувальною та вимірювальною обмотками. Цей пристрій дозволяє проводити оцінку якості міжлистової ізоляції магнітопроводів електричних машин без використання додаткових вимірювальних приладів. У розділі представлені осцилограми для магнітопроводів без дефектів та з дефектами, отримані в ході експериментів на тестових частотах 10 кГц та 1 кГц.

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. Недостатність практичних прикладів порівняння розроблених методів з наявними. У дисертації докладно описані теоретичні аспекти та методологія дослідження, проте конкретні приклади їх практичного застосування та впровадження в індустрії не наведені достатньо детально.
2. Рекомендується розширити огляд сучасних досліджень та практик, які стосуються використання віброакустичних методів діагностики в електротехніці.
3. У дисертації не виявлено критичного аналізу власних розробок у порівнянні з існуючими методами. Такий аналіз був би корисним для обґрунтування переваг запропонованих методів та для визначення можливих напрямків подальшого удосконалення.
4. Дослідження зосереджено на діагностиці шихтованих магнітопроводів, проте інтеграція з ширшим контекстом електротехнічних систем та їх ефективності могла б збільшити практичну цінність дослідження.
5. Відсутність достатніх експериментальних досліджень двигунів великої потужності.

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:

Провідний науковий співробітник
Інституту електродинаміки
Національної академії наук України,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник Валерій ЗВАРИЧ

М.П. «29» січня 2024 року

Підпис Зварича засвідчую
Начальник
відділу кадрів Жуковська Л.В.
29.01.2024 р.