

М.А. КОВАЛЕНКО, В.В. ЧУМАК, І.Я. КОВАЛЕНКО, І.В. ТКАЧУК, О.В. ВИШНЕВСЬКИЙ

ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МІЖЛИСТОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ШИХТОВАНОГО МАГНІТОПРОВОДУ ВИСОКОЧАСТОТНИМ ІНДУКЦІЙНИМ МЕТОДОМ

У роботі проведено розробку пристрою для контролю якості міжлистової ізоляції шихтованого магнітопроводу височастотним індукційним методом. Актуальність дослідження зумовлена тим, що деградація ізоляції між окремими листами електротехнічної сталі призводить до зростання вихрових струмів, підвищення втрат в ньому та перегріву осердя обмотки, що істотно впливає на енергетичні показники та надійність електричних машин. Запропонований підхід базується на індукційному методі збудження магнітного поля високої частоти та вимірюванні параметрів напруги у випробуваному магнітопроводі. Для реалізації методу створено експериментальний пристрій, на основі мікроконтролера Arduino. Особливістю пристрою є можливість змінювати частоту та амплітуду в обмотці збудження, що дозволяє проводити оцінку величини вихрових струмів в магнітному осерді на характер індукованої напруги вимірювальної обмотки. Розроблена система керування пристроєм забезпечує високу повторюваність експериментів, автоматизацію вимірювального процесу та можливість інтеграції з комп'ютерною системою збору даних. Проведені експерименти показали, що зміна амплітуди сигналу вимірювальної обмотки корелює зі станом міжлистової ізоляції, що дозволяє здійснювати швидку діагностику без руйнівного контролю. Розроблений пристрій може бути використаний для контролю якості електротехнічної сталі під час виробництва магнітопроводів трансформаторів та електричних машин. Отримані результати відкривають перспективи подальшого вдосконалення систем неруйнівного контролю із застосуванням інтелектуальних методів аналізу сигналів та автоматизованої класифікації станів ізоляції.

Ключові слова: магнітне осердя, діагностування технічного стану, дефекти міжлистової ізоляції, неруйнівний контроль, пристрій для діагностування.

M.A. KOVALENKO, V.V. CHUMAK, I.Y. KOVALENKO, I.V. TKACHUK, O.V. VISHNEVSKY

DEVICE FOR QUALITY CONTROL OF LAMINATED INSULATION BY HIGH-FREQUENCY INDUCTION METHOD

The work has developed a device for quality control of inter-sheet insulation of a stacked magnetic core by the high-frequency induction method. The relevance of the study is due to the fact that the degradation of the insulation between individual sheets of electrical steel leads to an increase in eddy currents, increased losses in it and overheating of the winding core, which significantly affects the energy performance and reliability of electrical machines. The proposed approach is based on the induction method of excitation of a high-frequency magnetic field and measurement of voltage parameters in the tested magnetic core. To implement the method, an experimental device based on the Arduino microcontroller was created. A feature of the device is the ability to change the frequency and amplitude in the excitation winding, which allows assessing the magnitude of eddy currents in the magnetic core on the nature of the induced voltage of the measuring winding. The developed device control system provides high repeatability of experiments, automation of the measurement process and the possibility of integration with a computer data acquisition system. The experiments showed that the change in the amplitude of the measuring winding signal correlates with the state of the inter-sheet insulation, which allows for rapid diagnostics without destructive testing. The developed device can be used to control the quality of electrical steel during the production of magnetic cores of transformers and electrical machines. The results obtained open up prospects for further improvement of non-destructive testing systems using intelligent methods of signal analysis and automated classification of insulation states.

Keywords: magnetic core, technical condition diagnostics, inter-sheet insulation defects, non-destructive testing, diagnostic device.

Вступ. Електрична машина є основним джерелом механічної та електричної енергії і використовується у складі електромеханічних комплексів та систем на підприємствах, об'єктах критичної інфраструктури, в побутовій техніці, у складі спеціальної техніки та механізмів. Під час тривалої експлуатації, при аварійних режимах роботи, в результаті старіння та неякісного ремонту або, навіть, при порушенні технології виготовлення машини виникають дефекти, які впливають на показники її роботи. Це призводить до неможливості подальшого використання приладу та, у більш складних випадках, зупинки цілого виробничого чи технологічного процесу. Для уникнення цього варто включити до комплексу робіт по планово-попереджувальному ремонту та під час технічного обслуговування комплекс для контролю якості електричних машин [1].

Питання надійності електричних машин, тривалості їх роботи до та після ремонту є важливим економічним показником в промисловості. Магнітопровід електричної машини забезпечує магнітний зв'язок, підсилення електромагнітного поля між статором та ротором, концентрує та проводить магнітний потік, є механічним остовом для кріплення та захисту обмотки будь-якої електричної машини. Змінне магнітне поле,

що проходить по магнітному осердю, викликає втрати на гістерезис та вихрові струми [2]. Величина цих втрат залежить від типу конкретної електротехнічної сталі, технології її обробки та стану міжлистової ізоляції магнітопроводу, яка може бути пошкоджена як в процесі експлуатації та ремонту, так і при порушенні виготовлення магнітопроводів. Контроль міжлистової ізоляції дозволяє уникнути збільшення величин та контурів замикання вихрових струмів, які призводять до збільшення втрат в сталі, а отже, до посилення теплового режиму і, як наслідок, пошкодження ізоляції обмотки та виникнення міжвиткових коротких замикань в електричній машині. На даний час оцінку інтегральних дефектів проводять використовуючи вимірювання питомих втрат в магнітопроводі, а контроль ізоляції проводився за допомогою різноманітних індукційних методів контролю [3], функціональних методів [4] та тестових методів діагностування [5-7]. Проте вони вимагають високих затрат праці, людських ресурсів є довготривалими у реалізації та необхідності використання досить часто, дорогого комплексу вимірювальної апаратури та відповідної кваліфікації обслуговуючого персоналу [8].

© М.А. Коваленко, В.В. Чумак, І.Я. Коваленко, І.В. Ткачук, О.В. Вишневецький, 2025

Оскільки однією з ключових проблем у роботі електричних машин є пошкодження активної сталі, у даному дослідженні розглянуто методи та засоби діагностування стану шихтованих магнітних осердь.

Підрозділи з технічного обслуговування здійснюють контроль якості обладнання після проведення ремонтних робіт. Виявлення дефектів активної сталі електричних машин може бути виконане з високою точністю за допомогою спеціалізованих вимірювальних систем і математичного моделювання, проте такі процедури є досить трудомісткими [9]. Це призводить до необхідності діагностування магнітних осердь простішим способом за допомогою спеціалізованих малогабаритних переносних засобів. Для зменшення трудовитрат та часу виконання дослідження активної сталі електричної машини варто автоматизувати весь процес діагностування. Саме цій меті і присвячена дане дослідження [10].

Питання надійності електродвигунів є важливим економічним показником, оскільки від цього показника залежить надійність роботи енергосистеми. Необхідно, з одного боку, підвищити надійність роботи електродвигунів малої потужності та середньої потужностей і збільшити час безремонтної роботи, з іншого – підвищити післяремонтну надійність.

Крива намагнічування і магнітна проникність сталі – її головні характеристики. Магнітна проникність залежить від складу і структури матеріалу, які визначаються процесом виробництва.

У магнітних системах змінного струму проходження по магнітопроводу змінного магнітного поля створює побічний ефект – втрати на гістерезис і вихрові струми. Перші визначаються складом і структурою сталі і залежать від обраної марки сталі і технології обробки. Другі визначаються як маркою сталі, так і станом міжлистової ізоляції магнітопроводу.

Саме ця ізоляція може пошкоджуватися як в процесі експлуатації, так і при ремонтних роботах. В окремих випадках при значних порушеннях технології виробництва ізоляція може пошкодитися навіть при виготовленні магнітопроводів.

Основні типи пошкоджень можна розбити на 2 групи [11]:

1. Інтегральні дефекти ізоляції – точкові перекриття, розподілені по ширині пакета за випадковим законом;

2. Локальні дефекти – місцеві короткозамкнені зони, що перекривають частину пакета і, як правило, розташовані на активній поверхні магнітопроводу і не поширюються в глибину.

На сьогоднішній день оцінку інтегральних дефектів проводять використовуючи вимірювання питомих втрат у магнітопроводі [12]. При цьому, в процесі виготовлення або ремонту на замкнутий магнітопровід намотують маловиткову обмотку збудження, живлять змінним струмом від низьковольтного джерела і вимірюють втрати. Незважаючи на простоту, цей метод має ряд недоліків – необхідність досить потужного

джерела живлення, набору вимірювальної апаратури, намотування певної кількості витків обмотки збудження і необхідність проводити серію розрахунків для визначення питомих втрат, тобто необхідно приводити втрати до одиниці маси і індукції, які також необхідно визначити. Вплив локальних дефектів при цьому оцінюється як складова інтегральних втрат.

Необхідно відзначити, що визначення втрат у магнітопроводі є загальновизнаним методом контролю якості магнітопроводів [13]. З цієї причини неодноразово приймалися спроби поліпшення методу визначення втрат, наприклад, метод каліброваного ротора, апарат Ейнштейна і різні його модифікації [14].

Актуальність. Актуальність теми даної статті обумовлена низькою експлуатаційною надійністю електричних машин, зокрема післяремонтною надійністю, яка викликана значним впливом дефектів в магнітопроводі електричної машини (перегріву, збільшення втрат, зменшення терміну служби), що може спричинити раптовий вихід машини з ладу. У зв'язку з цим постає необхідність синтезу компактної переносної вимірювальної апаратури на основі сучасної елементної бази, опираючись на результати експериментальних досліджень та математичне моделювання, яку потребують ремонтні електроцехи для контролю якості магнітопроводів.

Проблема забезпечення якості міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів є однією з ключових проблем частково при виробництві та досить часто при експлуатації та після ремонту електричних машин. Пошкодження ізоляції між окремими листами електротехнічної сталі призводить до зростання вихрових струмів, збільшення втрат на нагрів і, як наслідок, до зниження ККД та терміну експлуатації електричних машин. Також, при роботі під перетворювачів частоти, яким характерна робота на більш високих частотах живлення, прояви цих ефектів посилюються, оскільки втрати у магнітопроводі зростають пропорційно квадрату частоти. Це може призводити до локального перегрівання окремих ділянок осердя, руйнування ізоляційного шару, а в подальшому – до погіршення магнітних властивостей матеріалу та механічних пошкоджень шихтованого магнітного осердя.

Традиційні методи контролю якості ізоляції не забезпечують достатньої точності та не дозволяють проводити оперативний контроль без розбирання осердя. У цьому сенсі особливої актуальності набуває застосування високочастотних індукційних методів, які дозволяють оцінювати стан міжлистової ізоляції за зміною параметрів електромагнітного поля. Розробка пристрою, що реалізує такий принцип, дозволить підвищити якість контролю, зменшити виробничі витрати, а також запобігти виникненню дефектів, які впливають на енергоефективність і надійність електромеханічного обладнання.

В даній роботі запропоновано новий пристрій контролю якості міжлистової ізоляції, який являє собою високочастотний генератор синусоїдної напруги з керуванням від мікроконтролера. Такий прилад дає можливість значно спростити технологію контролю якості

магнітопроводів та зменшити вплив полів розсіювання.

Метою роботи є розробка пристрою для контролю та діагностування якості міжлистової ізоляції шихтованого магнітного осердя високочастотним індукційним методом. До основних вимог, що висуваються до сучасних апаратних засобів, належать зручність експлуатації, низьке енергоспоживання, компактність, мала маса та доступна вартість.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є апаратні засоби для оцінки якості осердя електричних машин.

Функціональна схема пристрою для контролю якості міжлистової ізоляції шихтованого магнітопроводу високочастотним індукційним методом представлена на рис.1, де зображено керуючий контролер на базі Arduino, автономний інвертор напруги та досліджуване магнітне осердя.

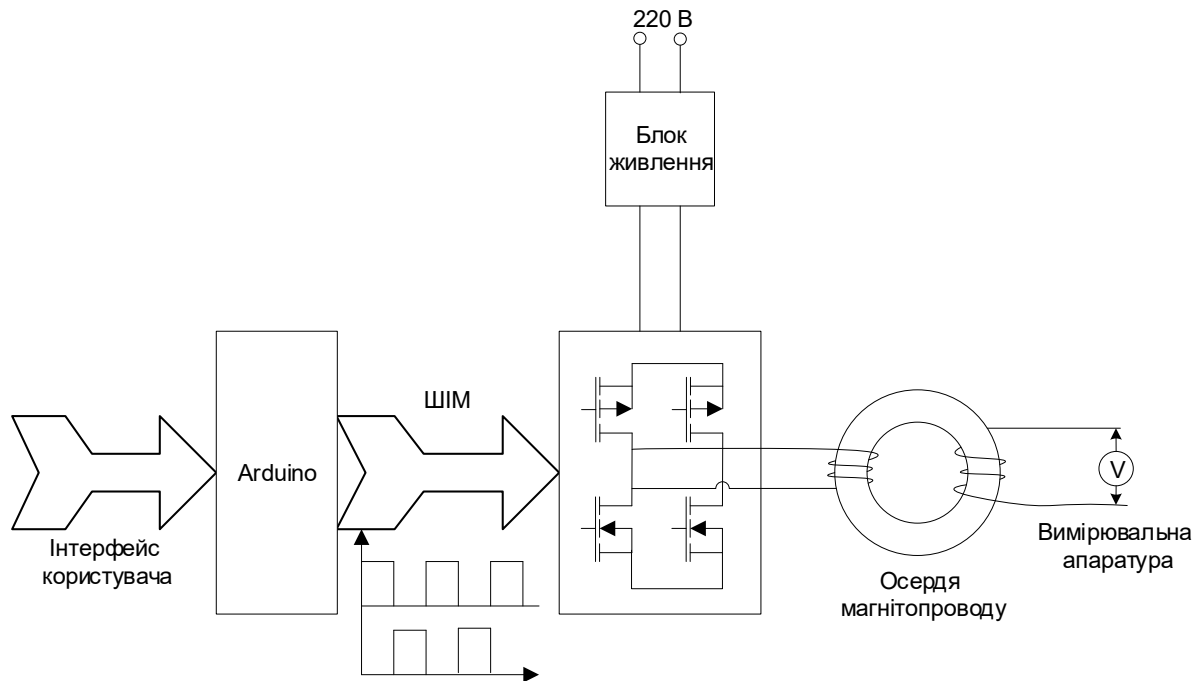


Рис. 1. Функціональна схема високочастотного генератора синусоїдної напруги з керуванням від мікроконтролера

Автономний інвертор напруги (АІН) являє собою цифро-аналоговий перетворювач, що утворює вихідний сигнал у формі синусоїди із заданими параметрами і побудований на р-канальних та п-канальних MOSFET транзисторах, які забезпечують комутацію з високою частотою. Вихідна напруга у формі синусоїди досягається шляхом комутації ключів інвертора. Розрахунок моментів вмикання і вимикання ключів, а також тривалості цих станів здійснений програмно на таймерах мікроконтролера (рис.2).

Запропонована схема є бездрайверною і дозволяє уникнути можливих затримок сигналів керування. Як видно (рис.1), дві обмотки на досліджуваному осерді утворюють трансформатор і є фільтруючим елементом, який забезпечує протікання синусоїдного струму, де первинна обмотка з'єднана з генератором синусоїдної напруги, а вторинна – з осцилографом для візуалізації даних.

При порушенні міжлистової ізоляції в першу чергу зростають вихрові струми, тому представлений пристрій для контролю якості міжлистової ізоляції повинен характеризувати інтенсивність вихрових струмів по дефектним контурам. Для цього прилад аналізує перехідний процес при зміні потоку в магнітопроводі або в зонах локальних дефектів через відключення обмотки збудження. Отримана крива перехідного процесу дозволяє знайти постійну часу короткозамкнених контурів для різних варіантів дефектності та проаналізувати її зв'язок з величиною питомих втрат в сталі. Специфікація основних елементів схеми пристрою контролю міжлистової ізоляції, що відповідає рис. 1 показано у табл. 1.

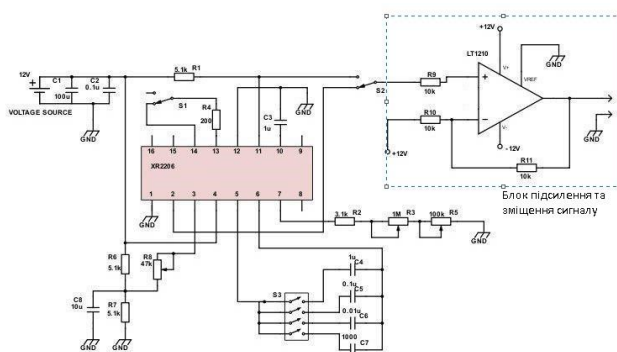


Рис. 2. Схема електрична принципова генератора високої частоти, блоку підсилення та зменшення сигналу

Таблиця 1 – Специфікація елементів схеми пристрою контролю міжлистової ізоляції

№ п/п	Найменування елемента	Тип	Примітка
1	Мікроконтролер	Arduino Uno / Mega	Формування ШІМ сигналів, керування системою
2	Інтерфейс користувача	LCD-дисплей 16x2 + кнопки	Відображення режимів роботи та налаштування
3	Блок живлення	AC/DC 220В → 12В, 5А	Живлення схеми та електронних модулів
4	Ключовий каскад (Н-мостова схема)	4×MOSFET IRF540N / IRLZ44N	Керування струмом через осердя магнітопроводу
5	Вимірювальна апаратура	Вольтметр / осцилограф	Контроль напруги на осерді
6	Осердя магнітопроводу	Шихтоване осердя із електротехнічної сталі	Предмет дослідження

За допомогою мікроконтролера побудовано інтерфейс користувача, який передбачає введення користувачем завдання частоти та індикацію параметрів поточного сигналу, розрахунок видачі сигналів керування ключами інвертора на основі введених користувачем заданих значень та їх тривалості. Також за допомогою контролера реалізовано функції захисту (від короткого замикання, просідання/втрати напруги живлення).

Розробка принципу побудови генератора високої частоти пристрою діагностування. Блок генератора високої частоти є важливим елементом пристрою діагностування, оскільки він:

- повинен мати достатню потужність для забезпечення необхідної величини первинного діагностичного імпульсу чи сигналу;
- повинен забезпечувати синусоїдальний високочастотний сигнал для збудження гармонійних коливань в досліджуваній ділянці магнітного осердя;
- повинен бути доступним і надійним в роботі.

Розроблений пристрій створено на базі монолітної інтегральної мікросхеми функціонального генератора XR2206, що дало змогу знизити собівартість конструкції без втрати її технічних параметрів. Живлення мікросхеми здійснюється від блоку живлення з напругою 12 В. Особливості обраної інтегральної схеми наступні:

- низький рівень нелінійних спотворень синусоїдальної напруги;
- можливість реалізації лінійної амплітудної модуляції;
- робочий діапазон напруг живлення становить від 10 до 26 В;
- регулювання несиметрії півперіодів у межах від 1 до 99%;
- споживана потужність не перевищує 750 мВт;
- висока стійкість до впливу температурних змін;
- стабільність роботи при коливаннях напруги

живлення.

Таким, чином, вибір даної монолітної інтегральної мікросхеми функціонального генератора XR2206, оскільки він задовольняє сформульованим вище вимогам.

Принцип роботи генератора високої частоти полягає в тому, що мікросхема XR2206 формує синусоїдальний сигнал, період якого задається параметрами зовнішнього RC-ланцюга. Зміна частоти вихідного сигналу здійснюється за допомогою перемикача S3, який має п'ять положень, що відповідають п'яти діапазонам вихідної частоти (рис. 3):

- від 1 до 10 Гц;
- від 10 до 100 Гц;
- від 100 Гц до 3 кГц;
- від 3 до 65 кГц;
- від 65 кГц до 1 МГц

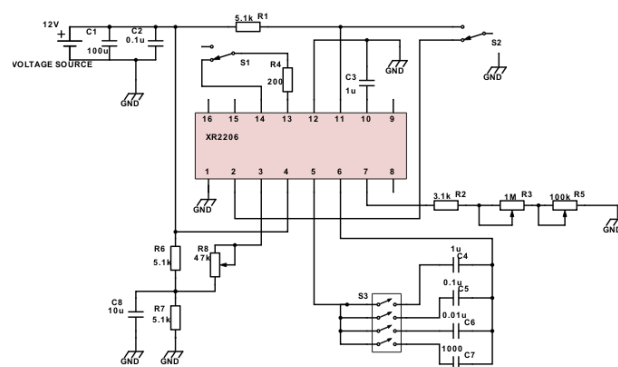


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції в розрахунковій області досліджуваного двигуна

Для налаштування частоти в межах обраного діапазону використовуються зовнішні потенціометри R3 і R5, які забезпечують плавне та грубе регулювання відповідно. Зміна їх опору впливає на сталу часу RC-ланцюга, що, у свою чергу, змінює частоту вихідного сигналу. Крім того, мікросхема XR2206 дає можливість регулювати амплітуду вихідного сигналу за допомогою потенціометра R8. Перемикач S1 дозволяє змінювати форму сигналу з синусоїдальної на трикутну, а перемикач S2 – на прямокутну.

Параметри вихідного синусоїдального гармонійного сигналу є такими:

- напруга на виході становить 0–3 В;
- вихідний струм дорівнює 20 мА;
- опір виходу – 600 Ом;
- діапазон регулювання частоти лежить у межах від 1 Гц до 1 МГц;
- рівень гармонійних спотворень не перевищує 1% при частоті 1 кГц.

Для зменшення кількості витків на силовій і вимірювальних обмотках, розміщених на осерді, необхідно підвищити рівень вихідного сигналу генератора. З цією метою використано операційний підсилювач LT1210, який разом із резисторами R9, R10 та R11 утворює каскад підсилення і зміщення сигналу (рис. 3).

Під час підключення магнітопроводу до пристрою контролю міжлистової ізоляції та при зміні частоти живлення відбувається спотворення форми синусоїдального сигналу. Для корекції цього ефекту в схемі (рис. 2)

передбачено резистори R9, R10 і R11, які за потреби можуть бути замінені потенціометрами. Операційний підсилювач LT1210 живиться від двополярного джерела 12 В, а після підсилення сигналу забезпечує вихідний струм до 1 А, що є достатнім для проведення експериментів із контролю якості шихтованих магнітних осердь.

Використання мікроконтролера Arduino для розробки блоку індикації пристрою. Вимірювально-індикаційний модуль побудовано на основі мікроконтролера Arduino, який потребує програмного забезпечення для керування роботою пристрою. У даному випадку система включає такі функціональні блоки:

- модуль вимірювання;
- модуль еталонної величини;
- компаратор сигналів;
- індикація результатів вимірювання.

Принципова електрична схема вимірювального модуля та індикатора наведена на рис. 4.

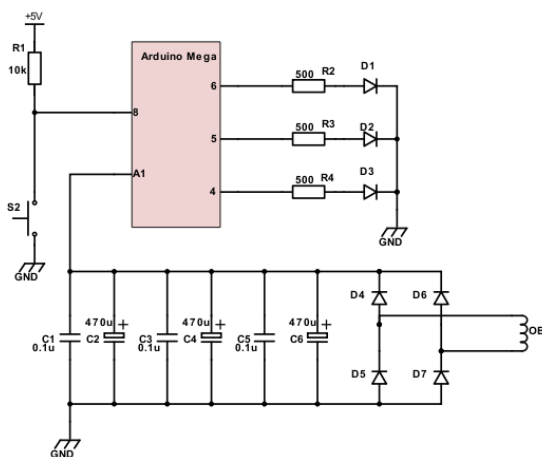


Рис. 4. Схема електрична принципова блоку індикації на базі Arduino

Arduino є популярною відкритою апаратно-програмною платформою, призначеною для швидкої розробки електронних систем. Вона широко використовується завдяки простоті мови програмування, зручності підключення компонентів та великій кількості сумісних модулів – таких як датчики, екрани, контролери, комунікаційні пристрої, GPS-модулі тощо. Завдяки цьому Arduino знаходить застосування в системах автоматизації, зокрема в робототехніці, метеостанціях, вимірювальних приладах і радіокерованих пристроях.

Принцип роботи індикатора. При подачі на силову обмотку синусоїдального сигналу певної частоти на вимірювальній обмотці індукуються сигнали тієї ж частоти, близький за формою до синусоїди. Після натискання кнопки S2 цей сигнал проходить через діодний міст D4–D7 (рис. 5), де перетворюється в однополярний, а далі згладжується конденсаторами C1–C6 (рис. 4), набуваючи вигляду постійної напруги, пропорційної амплітуді сигналу на вимірювальній обмотці.

Отримане значення напруги зберігається в пам'яті мікроконтролера. При зміні частоти генератора процес повторюється, а після третього натискання кнопки Arduino виконує розрахунки відповідно до заданого алгоритму та подає результат у вигляді світлової

індикації певного кольору.

Програмний код роботи індикатора не наводиться у статті для спрощення викладу матеріалу.

Індикатор дозволяє визначити три стани магнітопроводу:

- зелений колір – осердя справне, дефекти відсутні;
- жовтий колір – наявні незначні пошкодження, подальша експлуатація допустима;
- червоний колір – критичний стан, використання осердя заборонено.

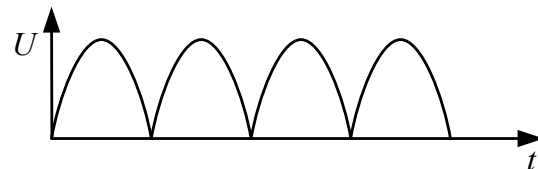


Рис. 5. Величина вихідної напруги випрямляча блоку індикації без фільтруючого конденсатора

Практична реалізація пристрою для контролю якості шихтованого магнітного осердя на основі високочастотного індукційного методу.

На рис. 6 представлено основні етапи складання ключових компонентів за зовнішній вигляд окремих компонентів цієї установки, яка використовується для діагностики якості активної сталі електромеханічних перетворювачів енергії.

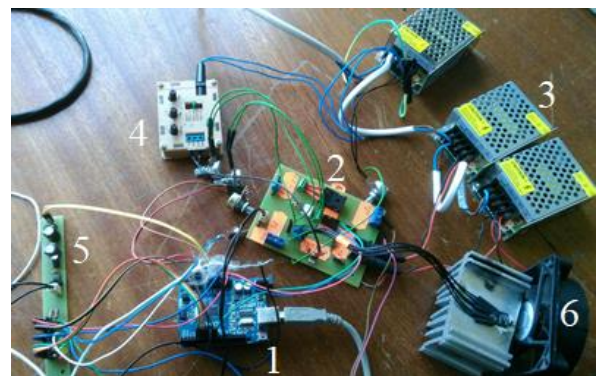


Рис. 6. Експериментальна установка по дослідженню магнітопроводів на основі індукційного високочастотного методу без корпусу

На рис. 6 представлено лабораторний макет пристрою для контролю якості міжлистової ізоляції шихтованого магнітопроводу, реалізований відповідно до принципової схеми, розробленої в рамках даного дослідження. Конструкція містить основні функціональні вузли системи керування, живлення та вимірювання:

1) Мікроконтролер Arduino Uno – центральний елемент керування системи. Він формує сигнали ШІМ для керування силовим каскадом та забезпечує взаємодію з інтерфейсом користувача;

2) Силовий каскад на базі транзисторних ключів (MOSFET-модулі) – використовується для формування високочастотних збуджувальних імпульсів у випробувальному осерді. Монтаж виконано на окремій платі з елементами захисту та гальванічної роз'язки;

3) Блоки живлення імпульсного типу –

забезпечують стабілізовані напруги для живлення мікроконтролера, підсилювача потужності та вимірювальної частини. На рис. 6 показано три модулі живлення з вихідними напругами 5 В, 12 В та 24 В;

4) Вимірювальна частина пристрою – містить плату з підсилювачем сигналів індукції та вузлом оцифрування;

5) Керуюча панель з елементами регулювання – потенціометри та перемикачі, розміщені на окремій платі, використовуються для зміни частоти та амплітуди збуджувальних імпульсів, а також вибору режимів вимірювання;

6) Вентилятор з радіатором – елемент системи охолодження, що відводить тепло від силових транзисторів під час роботи пристрою на високих частотах та навантаженнях.

Рис. 7 ілюструє форму хвилі на виході високочастотного генератора: це чистий синусоїдний сигнал, отриманий під час функціонування без підключеного навантаження (режим неробочого ходу).

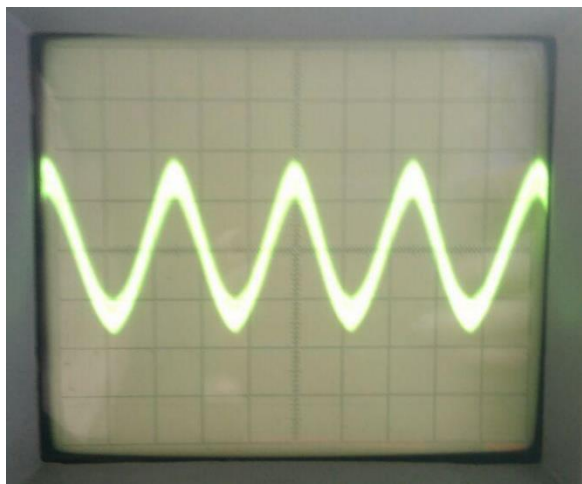


Рис. 7. Синусоїдальний сигнал на виході генератора високої частоти при роботі на холостому ході частотою 4 кГц і напругою 180 мВ

Отже, можна зробити висновок, що проектне рішення ВЧ-генератора є ефективним: він стабільно видає синусоїдальний сигнал із задовільною якістю (без шуму та сторонніх перешкод).

Силова частина пристрою контролю міжлистової ізоляції (силовий комутатор). Комутатор у пристрої для контролю якості міжлистової ізоляції електротехнічної сталі виконує ключову функцію керування послідовністю подачі сигналів на вимірювальні канали та автоматизації процесу тестування. Його основне призначення полягає у забезпеченні точного, швидкого й безпечного перемикачів між різними ділянками або зразками магнітопроводу без необхідності ручного втручання оператора.

На рис. 8 показано принципову блок-схему комутуючого пристрою, який використовується для оцінки стану електротехнічної сталі.

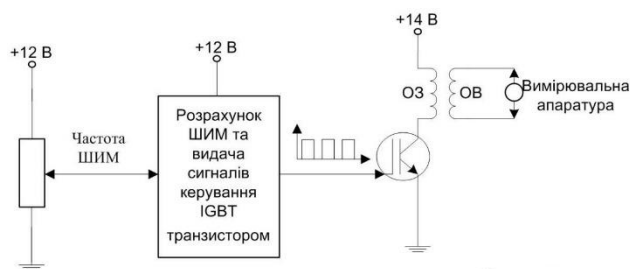


Рис. 8. Функціональна схема комутатора

На рис. 8 показано: ОЗ – обмотка збудження, ОВ – вимірювальна обмотка.

До складу пристрою входять генератор широтно-імпульсного сигналу та досліджуваний статор електричної машини. Взаємодія силової та вимірювальної частин системи здійснюється індукційним способом через об'єкт контролю за допомогою двох обмоток – збудження та вимірювальної, що розташовуються на його поверхні в протилежних точках, для зменшення впливу одна на одну.

Комутатор у даній схемі виконує дві ключові функції:

1. Забезпечує початкову комутацію обмотки збудження;
2. Формує періодичність імпульсів, необхідну для коректної обробки сигналів.

Основною функцією комутатора є реалізація первинної комутації системи. Тип комутаційних елементів обирається залежно від вимог експерименту. У більшості випадків слід забезпечити високу швидкість при одночасному комутуванні значних струмів, що є технічно складним завданням. Так, тиристори здатні працювати з великими струмами, однак характеризуються недостатньою швидкістю.

Найбільш оптимальним рішенням є застосування IGBT-транзисторів, які поєднують властивості біполярних і польових транзисторів. Вони забезпечують час увімкнення 0,2–0,4 мкс і час вимкнення 0,2–1,5 мкс, витримуючи напругу до 3,5 кВ і струми до 1200 А. Використання таких транзисторів дозволяє отримати напругу порядку сотень вольт на виток індуктора. Подальше підвищення робочої напруги обмежується ЕРС, що виникає в обмотці збудження під час розмикання (експериментально до 800 В), аби запобігти пробією елементів.

Комутатор має генерувати імпульси таким чином, щоб сигнал встигав стабілізуватися до моменту відключення і повністю згасав перед наступним імпульсом. При цьому частота повторення імпульсів має бути достатньою для швидкого збору та аналізу вимірюваних даних.

Принцип побудови апаратної частини комутатора діагностичного приладу. Для реалізації системи комутації розроблено електричну принципову схему (рис. 9).

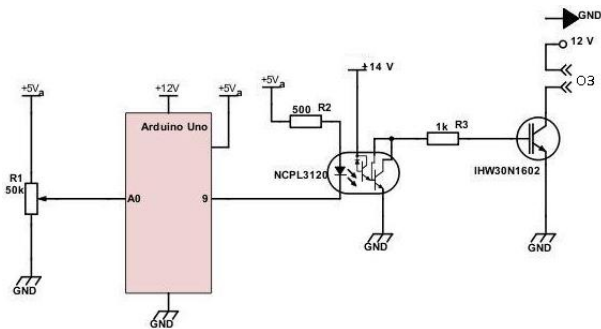


Рис. 9. Принципова електрична схема комутатора

Резистори R2 і R3 обмежують струм, що надходить до оптопара та бази транзистора. Потенціометр R1 використовується для регулювання ширини імпульсів ШІМ-сигналу, який подається на обмотку збудження.

Мікроконтролер Arduino виконує зчитування сигналу з потенціометра R1, обробляє його і генерує керуючі імпульси, які визначають моменти відкриття та закриття транзистора. Оптопара NCPL3120, що складається з інфрачервоного світлодіода та фототранзистора, забезпечує гальванічну розв'язку між силовою частиною та колом керування, запобігаючи пошкодженню мікроконтролера у разі перевантаження або короткого замикання.

Як комутаційний елемент застосовується IGBT-транзистор типу IHW30N1602, який поєднує високу потужність і швидкодію. Його основні параметри:

- струм колектора – 30 А;
- напруга колектор-емітер – 1600 В;
- струм керування базою – 5 мА;
- напруга база-емітер – 15 В.

Висока потужність транзистора обрана з огляду на необхідність забезпечення якісного перехідного процесу під час дослідження властивостей електротехнічної сталі. При напрузі живлення колектора близько 50 В і струмі до кількох ампер можливе формування перехідної напруги в обмотці збудження до 800 В.

Роботою комутатора керує Arduino за попередньо запрограмованим алгоритмом. Після подачі живлення мікроконтролер зчитує положення потенціометра R1, перетворює це значення у ширину імпульсу та формує відповідний ШІМ-сигнал на цифровому піні №9. Оптопара NCPL3120 передає цей сигнал на IGBT-транзистор, забезпечуючи його відкриття та закриття. Під час подачі логічної «1» транзистор відкривається, пропускаючи струм 1–2 А при живленні 12 В; при логічному «0» транзистор миттєво замикається.

У результаті в обмотці збудження виникають перехідні процеси, спостереження за якими здійснюється через вимірювальну обмотку за допомогою осцилографа.

На рис. 10 представлено зовнішній вигляд комутатора, призначеного для контролю якості активної сталі із застосуванням індукційного високочастотного методу.

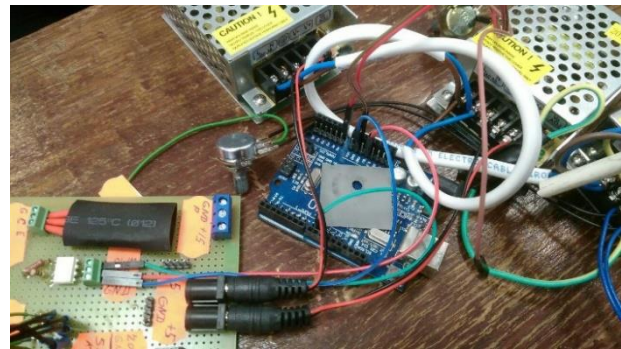


Рис. 10. Експериментальна установка по дослідженню магнітопроводів на основі комутатора

Для регулювання частоти та амплітуди поданого сигналу використовується потенціометр, який підключений до аналогового входу Arduino і дозволяє змінювати параметри ШІМ у реальному часі. Вихідні сигнали після проходження через комутатор надходять до вимірювальної апаратури, де фіксуються параметри напруги, струму та фази, що дозволяє оцінити стан ізоляції та електромагнітні властивості осердя.

Монтаж елементів виконаний на макетній платі, що дає змогу змінювати конфігурацію кола, підключати різні типи датчиків та зразків магнітопроводів. Для екранування дроселів обмотки збудження та вимірювальної обмотки використовуються екрановані дроти та окреме заземлення для силової й вимірювальної частин.

Випробування пристрою діагностування якості магнітного осердя високочастотним методом. Експериментальні дослідження для оцінки якості магнітного проводились із використанням магнітного осердя з імітацією обмотки статора, таким чином як це показано на рис. 11 з метою наближення експерименту до реальних умов випробувань шихтованих магнітних осердь. Ефект, створюваний мідною обмоткою статора, є незначним, тому він не здатен спотворити отримані експериментальні дані.

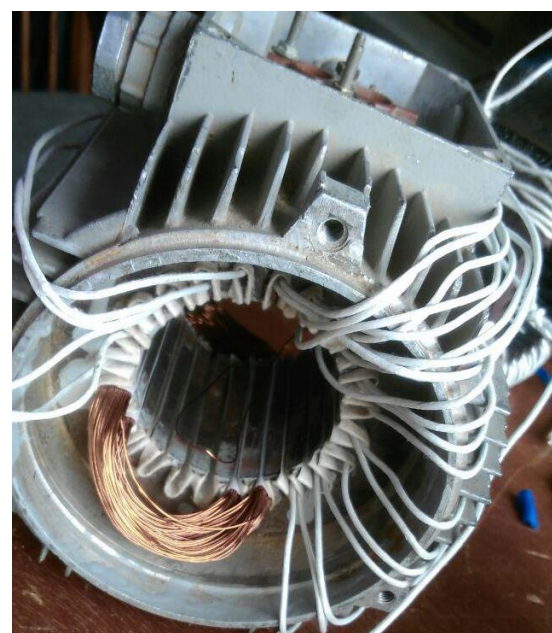


Рис. 11. Досліджуваний статор електричної машини з мідною обмоткою

Із використанням аналогового осцилографа проведено дослідження магнітного осердя даного двигуна із цілими та ушкодженими ділянками магнітного осердя. Для спрощення експериментальних досліджень, обмотка збудження та вимірювання складаються з 6 витків. Результати досліджень показано на рис. 12 та рис. 13.

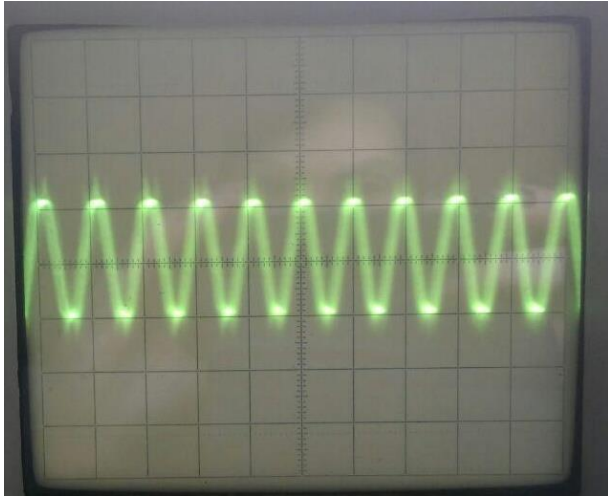


Рис. 12. Синусоїдний сигнал на вимірювальній обмотці для бездефектної області магнітного осердя: частота 10 кГц, амплітуда 1,1 В

Сигнал на рис. 12 є стабільним синусоїдальним коливанням із невеликою амплітудою та відносно високою частотою, що свідчить про стабільну роботу апаратної частини досліджуваного пристрою.

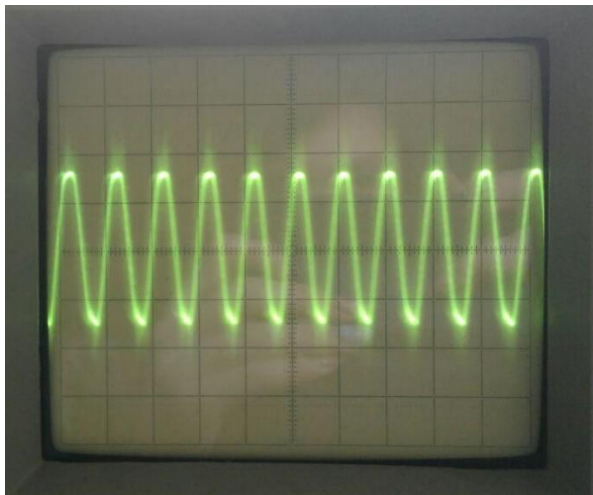


Рис. 13. Синусоїдний сигнал на вимірювальній обмотці з дефектом в частині магнітопроводу: частота 10 кГц, амплітуда 750 мВ

Аналіз експериментально зафіксованих осцилограм свідчить, що дефект магнітопроводу досліджуваного статора асинхронного двигуна спричиняє зниження амплітуди гармонійного вихідного сигналу. Це пояснюється дією вихрових струмів, дія яких збільшується в області дефектних зон магнітопроводу.

Висновки.

1. Для розробки пристрою діагностики шихтованих магнітних розроблено два ключових елементи його

системи: височастотний генератор для тестування та пристрій комутації для оцінки стану магнітопроводу. Проведені експерименти підтверджують, що показники пошкодженого осердя суттєво відмінні від показників цілого (неушкодженого) зразка.

2. Пристрій для діагностики шихтованого магнітного осердя реалізовано з використанням аналогових елементів (логічних компонентів). Такий вибір зумовлений істотним зниженням собівартості порівняно з цифровими аналогами. Пристрій забезпечує високу якість синусоїдального сигналу на виході, яка живить обмотку збудження. Однак, при підключенні індуктивного навантаження спостерігається погіршення форми вихідної напруги. Це викривлення спричинене низьким значенням індуктивності обмотки збудження та недостатньою напругою джерела живлення. Потіки розсіювання також впливають на дане спотворення.

3. З метою автоматизації відображення даних та підвищення зручності ідентифікації стану магнітного осердя, до височастотного генератора додано систему індикаторів. Ця система, реалізована на базі мікроконтролера Arduino, класифікує магнітопровід за трьома якісними станами. Проведені експерименти встановили, що пошкодження магнітного осердя викликає зниження амплітуди вихідного сигналу. Фізично цей ефект пояснюється розширенням замкнених контурів для вихрових струмів у дефектних зонах.

Список літератури

1. Chumak, V.V., Kovalenko M.A., Trotsenko, Y.O., Stulishenko, A.S., & Tymoshchuk, O.L. (2022). High-frequency methods for detecting insulation defects in mesh winding generators of power plants based on renewable energy sources. *Vidnovluyana Energetika*, (4(71), 56-63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).56-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).56-63).
2. Chumack, V., Kovalenko, M., Tymoshchuk, O., Stulishenko, A., & Ihnatiuk, Y. (2023). Design of a multilink system for calculating high-frequency processes in electric machines with mesh windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8 (123), 54-63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282375>.
3. Chumack, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Bazenov, V., Ihnatiuk, Y., & Stulishenko, A. (2023). Research of high-frequency remagnetization model in laminated magnetic cores of electromechanical and electromagnetic energy converters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (124), 6-15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286002>.
4. V.V. Chumak, Y.O. Trotsenko, M.A. Kovalenko, Y.S. Ihnatiuk, A.S. Stulishenko. Study of physical processes in laminated magnetic cores of electric machines. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 4. – с. 37-43.
5. Chumak, V. V., Kovalenko M. A., Trotsenko, Y. O., Stulishenko, A. S., & Tymoshchuk, O. L. (2023). High-frequency methods for detecting insulation defects in mesh winding generators of power plants based on renewable energy sources. *Renewable and Hydrogen Energy*, (4(71), 56-63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).56-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).56-63).
6. Чумак, В., Коваленко, М., Тимошук, О., Ігнатюк, Є., & Коваленко, І. (2023). Комплексна оцінка якості ламінованих осердь електричних машин височастотним індукційно-вібраційним методом. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 2 (10), 26-32. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.2.05>.
7. Eldieb, Ashraf & Anayi, Fatih & Fahmy, Ashraf. (2015). Investigation of short-circuit fault effects on non-oriented steel at different range of magnetisations. 1-6. 10.1109/UPEC.2015.7339881.
8. Bertenshaw, D.R. & Ho, Choon & Smith, A.C. & Sasic, Mladen & Chan, Trina. (2016). Electromagnetic modelling and detection of

- buried stator core faults. IET Electric Power Applications. 11. 10.1049/iet-epa.2016.0470.
- A. C. Smith, D. Bertenshaw, C. W. Ho, T. Chan and M. Sasic, "Detection of stator core faults in large turbo-generators," 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, FL, USA, 2009, pp. 763-770, doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075290.
 9. Bertenshaw, D.R. & Smith, A.C. & Ho, C.W. & Chan, T. & Sasic, M.. (2012). Detection of stator core faults in large electrical machines. Electric Power Applications, IET. 6. 295-301. 10.1049/iet-epa.2011.0125.
 10. Lee, K.; Hong, J.; Lee, K.-W.; Lee, S.B.; Wiedenbrug, E.J. A stator-core quality-assessment technique for inverter-fed induction machines. IEEE Trans. Ind. Appl. 2010, 46, 213–221. DOI: 10.1109/TIA.2009.2036527.
 11. Romary, R.; Jelassi, S.; Brudny, J.F. Stator-interlaminar-fault detection using an external-flux-density sensor. IEEE Trans. Ind. Electron. 2010, 57, 237–243. DOI: 10.1109/TIE.2009.2029525.
 12. Ho, C.W., Bertenshaw, D.R., Smith, A.C., Chan, T. and Sasic, M. (2014). Three-dimensional finite element analysis of large electrical machine stator core faults. IET Electric Power Applications, 8: 60-67. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2013.0065>.
 13. Frosini, Lucia. (2020). Novel Diagnostic Techniques for Rotating Electrical Machines—A Review. Energies. 13. 5066. 10.3390/en13195066.
 5. Chumak, V. V., Kovalenko M. A., Trotsenko, Y. O., Stulishenko, A. S., & Tymoshchuk, O. L. (2023). High-frequency methods for detecting insulation defects in mesh winding generators of power plants based on renewable energy sources. Renewable and Hydrogen Energy, 4(71), 56-63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).56-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).56-63).
 6. Chumak, V., Kovalenko, M., Tymoshchuk, O., Ihnatiuk, Ye., & Kovalenko, I. (2023). Kompleksna otsinka yakosti laminovanykh oserd elektrychnykh mashyn vysokochastotnym induktsiino-vibratsiynym metodom. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonaluvannya elektrychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I praktyka, 2 (10), 26–32. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.2.05>.
 7. Eldieb, Ashraf & Anayi, Fatih & Fahmy, Ashraf. (2015). Investigation of short-circuit fault effects on non-oriented steel at different range of magnetisations. 1-6. 10.1109/UPEC.2015.7339881.
 8. Bertenshaw, D.R. & Ho, Choon & Smith, A.C. & Sasic, Mladen & Chan, Trina. (2016). Electromagnetic modelling and detection of buried stator core faults. IET Electric Power Applications. 11. 10.1049/iet-epa.2016.0470.
 - A. C. Smith, D. Bertenshaw, C. W. Ho, T. Chan and M. Sasic, "Detection of stator core faults in large turbo-generators," 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, FL, USA, 2009, pp. 763-770, doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075290.
 9. Bertenshaw, D.R. & Smith, A.C. & Ho, C.W. & Chan, T. & Sasic, M.. (2012). Detection of stator core faults in large electrical machines. Electric Power Applications, IET. 6. 295-301. 10.1049/iet-epa.2011.0125.
 10. Lee, K.; Hong, J.; Lee, K.-W.; Lee, S.B.; Wiedenbrug, E.J. A stator-core quality-assessment technique for inverter-fed induction machines. IEEE Trans. Ind. Appl. 2010, 46, 213–221. DOI: 10.1109/TIA.2009.2036527.
 11. Romary, R.; Jelassi, S.; Brudny, J.F. Stator-interlaminar-fault detection using an external-flux-density sensor. IEEE Trans. Ind. Electron. 2010, 57, 237–243. DOI: 10.1109/TIE.2009.2029525.
 12. Ho, C.W., Bertenshaw, D.R., Smith, A.C., Chan, T. and Sasic, M. (2014). Three-dimensional finite element analysis of large electrical machine stator core faults. IET Electric Power Applications, 8: 60-67. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2013.0065>.
 13. Frosini, Lucia. (2020). Novel Diagnostic Techniques for Rotating Electrical Machines—A Review. Energies. 13. 5066. 10.3390/en13195066

References (transliterated)

Надійшла (received) 13.10.2025

Відомості про авторів / About the authors

Коваленко Михайло Анатолійович (Mykhaylo Kovalenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: kovalenko87ma@gmail.com.

Чумак Вадим Володимирович (Chumak Vadim Vladimirovich) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>; e-mail: chumack_kpi@ukr.net.

Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>; e-mail: 2048141@ukr.net.

Ткачук Ігор Валерійович (Tkachuk Ihor) – асистент кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>; e-mail: baja0073@gmail.com.

Вишневецький Олексій Володимирович (Alexey Vishnevsky) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", асистент кафедри електромеханіки, <https://orcid.org/0000-0001-7814-9030>; e-mail: alexeyvishn1730@gmail.com.