

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Березниченко Вікторії Олександрівни

"Ємнісні вимірювачі радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів", що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 15 "Автоматизація та приладобудування" за спеціальністю 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка"

Однією з найскладніших технічних задач в електроенергетиці України є оцінювання технічного стану потужного генеруючого устаткування ГЕС і ГАЕС. Більшість генераторів цих електростанцій була введена в експлуатацію в 50 – 80-х роках минулого століття і практично відпрацювала свій ресурс та потребує проведення заміни або проведення їх глибокої реконструкції й модернізації. Забезпечення безперебійної та надійної роботи гідрогенераторів неможливе без своєчасного виявлення дефектів, що можуть виникати при їхній експлуатації.

Системи технічної діагностики дозволяють виявляти можливі несправності гідрогенераторів на ранніх стадіях їх виникнення, прогнозувати поведінку обладнання на певний час, вести архів стану обладнання в часі, видавати рекомендації щодо необхідних заходів (в тому числі ремонтних) для попередження позапланових та аварійних зупинок. Технічні вимоги до системи технічної діагностики разом з переліком контрольованих вузлів, деталей чи елементів обладнання повинні *містити параметри, що характеризують їх стан, методи та засоби вимірювання цих параметрів.*

Особливе місце при цьому займає вимірювання параметрів биття циліндричних поверхонь валів гідрогенераторів, що дає змогу визначити стан машини як механічної системи. Інформація з параметрів биття з використанням систем контролю і діагностування дозволяє розпізнати значну кількість дефектів машини та спрогнозувати їх розвиток. Так в вертикальному гідроагрегаті визначають наступні дефекти: механічний дисбаланс ротора гідрогенератора і робочого колеса турбіни; спотворення форм ротора і статора; гідравлічний дисбаланс робочого колеса турбіни; перекіс і спотворенням лінії вала всього гідроагрегату тощо. Застосування в системах діагностування вимірювачів биття з вищими метрологічними характеристиками та функціональними можливостями дозволить покращити якість цих систем.

В сучасних системах контролю та діагностування гідрогенераторів інформацію з параметрів радіального биття отримують, використовуючи безконтактні вимірювачі переміщень. На даний час найбільш розповсюдженими є струмовихрові вимірювачі, які мають хороші метрологічні характеристики. Але їм притаманний недолік – залежність функції перетворення від металургійних та хімічних характеристик матеріалу контрольованого валу та його намагніченості, що викликає необхідність тарування. Ємнісні вимірювачі биття, які поки що використовуються в менших масштабах, не мають таких недоліків. Окрім того ємнісним сенсорам притаманна висока точність та розрізнявальна здатність, нечутливість до

електромагнітних полів, розрахунковість залежності „параметр – ємність”. Первинні перетворювачі вимірювачів можуть бути легко пристосовані до різноманітних типів гідрогенераторів. Але при створенні ємнісних вимірювачів переміщень і відстаней до заземленої поверхні, яких відноситься вимірювання биття циліндричних поверхонь валів, необхідно враховувати, що існують протиріччя між їхніми характеристиками, наприклад: "точність – складність вторинного перетворювача", "розрізнявальна здатність – складність вторинного перетворювача", "дистанційність – складність вторинного перетворювача", "діапазон вимірювання – точність", "точність – діаметр контрольованого валу". Ці проблеми для ємнісних вимірювачів биття на даний час в достатній мірі не вирішені. Саме тому дана дисертаційна робота, що присвячена вирішенню наукового завдання створенню ємнісних вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів з підвищеними метрологічними характеристиками та покращеними функціональними можливостями, є важливою та актуальною.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, у якій вирішено важливе наукове завдання створення ємнісних вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів з підвищеними метрологічними характеристиками та функціональними можливостями.

У роботі простежується внутрішня єдність наукових результатів, що свідчить про те, що ці результати отримані авторкою особисто.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, розкрито сутність і стан науково-технічної проблеми, що досліджується, наведено обґрунтування доцільності проведення досліджень, відображено зв'язок роботи з науковими програмами та планами НДР Інституту електродинаміки НАН України, сформульовано мету і завдання досліджень, методи досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено апробації роботи та публікації її результатів у наукових виданнях.

У першому розділі показано, що вимірювання параметрів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів дає змогу з використанням систем діагностування виявляти значну кількість дефектів машин і оцінювати їхній стан. Виконано огляд і аналіз сучасних методів та засобів вимірювання параметрів биття. Наведено основні системи та прилади світових виробників, які використовують на електростанціях для вимірювання параметрів радіального биття. На основі аналізу визначено, що для автоматичного безконтактного вимірювання параметрів биття найперспективнішим є застосування ємнісного методу. Окреслено шляхи підвищення якості метрологічних характеристик та покращення функціональних можливостей ємнісних вимірювачів биття.

Другий розділ присвячений дослідженню первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) ємнісних вимірювачів биття шляхом комп'ютерного моделювання. Визначено, що метод кінцевих елементів і програмний пакет Comsol Multiphysics забезпечують в порівнянні з іншими методами вищу якість досліджень. З використанням Comsol Multiphysics було досліджено три типи

ємнісних сенсорів з різними геометриями електродів: сенсора з плоскопаралельними круглими електродами, сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна та сенсора з концентричними компланарними електродами. З використанням комп'ютерних моделей було визначено функції перетворення сенсорів і оцінено вплив крайових ефектів та технологічних похибок, які виникають при виготовленні провідних поверхонь сенсорів методом друкованих плат з урахуванням характеристик і параметрів фольгованих матеріалів.

Безумовно, результати досліджень у вигляді аналітичних виразів та комп'ютерних моделей, які описують функції сенсорів перетворення та вплив основних похибок є достатньою науковою базою для розроблення лінійки вимірювачів параметрів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів, які враховують конструктивні особливості будь-якого типу зазначених машин.

У *третьому* розділі представлено результати досліджень вторинних вимірювальних перетворювачів ємнісних сенсорів биття. Визначено, що компенсаційно-мостові вторинні вимірювальні перетворювачі з аналоговим або дискретним (цифровим) виходом при вимірюванні параметрів биття забезпечують високу точність, швидкодію та завадостійкість. Використання компенсаційно-мостових вторинних вимірювальних перетворювачів є доцільним для побудови інформаційно-вимірювальних каналів вимірювання швидкозмінного процесу биття на працюючих гідрогенераторах. Коли необхідно зменшити вартість вимірювального перетворювача, або розмістити його в одному корпусі з сенсором, доцільно застосувати вторинні вимірювальні перетворювачі на основі сигма-дельта модуляторів. Вони перетворюють ємність сенсорів в цифровий код (capacitance-to-digital converter) з високою роздільною здатністю. До них відносяться серійні інтегральні мікросхеми AD774 /AD7746 та AD7747 виробництва Analog Devices.

У *четвертому* розділі представлено результати експериментальних досліджень ємнісних сенсорів та вторинних вимірювальних перетворювачів биття, описаних в попередніх розділах. Експериментально визначено функцію перетворення макетних зразків ємнісних сенсорів биття як залежність ємності від відстані до заземленої поверхні, яка імітувала вал гідрогенератора. Проведено порівняння експериментальних результатів з результатами, отриманими аналітичними методами та методом комп'ютерного моделювання.

Проведено випробування макетів на вплив температури. Визначено, що похибка ємнісного вимірювача биття в діапазоні температур від -15 до $+80$ °C не перевищує 0,4 %.

Результати досліджень впливу магнітного поля на ємнісний вторинний вимірювальний перетворювач биття продемонстрували, що поле в момент появи вносить адитивну похибку в функцію перетворення. Такий вплив легко компенсується програмними методами.

Висновки до дисертаційної роботи містять дев'ять пунктів, які характеризують отримані в роботі результати.

Список використаної літератури складається з 96 найменувань, з яких біля 60 % становлять публікації за останні 10 років.

Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень і висновків є достатнім та підтверджується проведенням комплексних досліджень із застосуванням відомих теоретичних та експериментальних методів, узгодженням теоретичних розробок з результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи базуються на результатах вирішення наукового завдання зі створення ємнісних вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів з підвищеними метрологічними характеристиками та покращеними функціональними можливостями. Висновки та рекомендації достатньо обґрунтовані коректністю постановки та розв'язання задач досліджень, застосуванням з загальновідомих положень фундаментальних законів теорії електричних кіл і електромагнітних полів, методів комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень для перевірки теоретичних положень і наукових результатів.

Достовірність результатів, отриманих аналітичними методами, підтверджується результатами комп'ютерного моделювання та експерименту. *Достовірність висновків* підтверджується коректністю постановки важливого наукового завдання роботи. Одержані нові наукові та практичні результати, які у сукупності обумовили розв'язання завдання зі створення удосконалених ємнісних вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів. Усі методи, що запропоновані в дисертаційній роботі, обґрунтовані строгими математичними викладками і підтверджуються результатами комп'ютерного моделювання та експериментів. Результати досліджень, наукові положення і висновки дисертації пройшли ґрунтовну апробацію при обговорення на науково-технічних конференціях і семінарах найвищого рівня.

Наукова новизна полягає в удосконаленні ємнісного метода вимірювання параметрів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів, що дозволяє підвищити точність, роздільну здатність і дистанційність вимірювання. Розроблено новий ємнісний сенсор биття з кільцевими концентричними компланарними електродами, який у порівнянні з аналогами є стабільнішим під час роботи в динамічному режимі за рахунок того, що струм інформаційного електричного сигналу не проходить через підшипники і корпус машини. Розроблено комп'ютерні моделі ємнісних сенсорів биття з трьома різними конфігураціями електродів для аналізування метрологічних характеристик та оцінювання впливу крайових ефектів. Розроблено комп'ютерні моделі для визначення впливу технологічних похибок виготовлення трьох типів сенсорів та їхнього монтажу на машині.

В роботі отримані *нові та важливі для практики результати*. Виготовлені на основі одержаних наукових результатів зразки вимірювачів биття можуть бути застосовані на вертикальних гідроагрегатах ПрАТ "Укргідроенерго" (Україна) в системах контролю та діагностування потужних вертикальних гідроагрегатів, що дасть змогу достовірніше виявляти дефекти

машин в процесі експлуатації і покращити оцінку стану машин в процесі експлуатації.

Наукові результати дисертації відображені в 11 наукових працях, з яких 3 опубліковано в наукових фахових виданнях, що індексуються наукометричною базою SCOPUS, а 8 – у фахових виданнях України.

Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи розглядалися на міжнародній науково-практичній конференції "Theory and practice of science: key aspects" (Italy, Rome 19-20 February 2021, I науково-технічній конференції "Молодих вчених та спеціалістів Інституту електродинаміки Національної академії наук України" (Київ, 15 березня 2021 р.) та XXXIX Науково-технічній конференції "Молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України" (до 40-річчя інституту)" (Київ, 12 травня 2021 р.), а також наукових семінарах відділу електричних та магнітних вимірювань, відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання ІЕД НАН України, на літній школі ІЕД НАН України.

Дисертація написана українською мовою. Стиль викладу матеріалів відповідає загальноприйнятному і має високий науково-професійний рівень. Оформлення дисертації відповідає чинним вимогам. Зроблений по даній роботі звіт подібності щодо перевірки на плагіат свідчить, що дисертація є результатом самостійних досліджень здобувачки.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. Як відомо (п.4 Списку використаних джерел дисертації) на функцію перетворення ємнісних сенсорів биття з будь-якою конфігурацією електродів впливає *перекіс* площини електродів відносно твірної циліндричної поверхні валу і *кривизна (радіус)* контрольованого валу. Ці похибки чомусь в дисертації не досліджені.

2. При невеликих радіусах кільцевих електродів ємнісних сенсорів за умови виготовлення їх методом друкованих плат на поверхні електродів будуть мати місце *мікронерівності та мікродеформації* (Левицкий А.С., Сурду М.Н. Прецизионный емкостный барометрический датчик. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2004. №1.С.68–74.). Було б корисно провести дослідження з оцінювання впливу зазначених нерівностей.

3. Використання струмовихрових сенсорів биття валів потужних гідрогенераторів вимагає, щоб поверхня валу, відносно якої вимірюється зміщення, була оброблена до певного класу чистоти (Lin Jackson, Bissonnette Marc R. A new capacitive proximity probe immune to electrical runout. URL:https://www.marubun.co.jp/legacy/product/measurement/electric/qgc18e000000pef-att/PCS_CMVA.pdf). В роботі не зазначено, чи існують зазначені вимоги до створених нових ємнісних сенсорів.

4. На ГЕС та ГАЕС електричні процеси в високовольтному обладнанні є джерелами потужних електромагнітних завад, в тому числі в колах передавання інформації та живлення контрольно-вимірювальної апаратури (Вошинський К.В., Левицкий А.С, Сорокіна Н.Л. Вплив електромагнітної обстановки ГЕС

на контрольно-вимірювальну апаратуру. Гідроенергетика України. 2015. №1-2. С. 33–36). Дослідження в цьому напрямку дали б змогу значно прискорити впровадження.

5. Не можна стверджувати "Набули подальшого розвитку *ємнісні методи* вимірювання параметрів радіального биття..." (наукова новизна, стор.24). – Потрібно "Набув подальшого розвитку *ємнісний метод*..."

6. Не вірно "Вперше розроблено *комп'ютеризовані* моделі ємнісних сенсорів..." (наукова новизна, стор.24). – Вірно "Вперше розроблено *комп'ютерні* моделі..."

7. Не зрозуміле речення "Для цього, були досліджені методи розрахунку, які дозволяють створити моделі сенсорів з необхідними характеристиками та провести їх дослідження, шляхом комп'ютерного моделювання" ? (Анотація, стор. 4.).

Наведені вище зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Висновок. Дисертаційна робота "Ємнісні вимірювачі радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів", що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії, за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків змістом та оформленням повністю відповідає вимогам "Порядку присудження доктора філософії ...", затвердженого Кабінетом Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а її авторка – Березниченко Вікторія Олександрівна – заслуговує на присудження їй ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка" з галузі знань 15 "Автоматизація та приладобудування".

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри
"Інформаційно-вимірювальні технології"
Національного університету
„Львівська політехніка”



Походило Є.В.

Підпис Походила Є.В. засвідчую

Вчений секретар
Національного університету
„Львівська політехніка”

кандидат технічних наук, доцент




Брилинський Р. Б.