

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Закусила Сергія Анатолійовича

" Розробка компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю
оберткових вузлів гідрогенераторів",

яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 15 "Автоматизація та приладобудування" за спеціальністю
152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка".

Ступінь актуальності обраної теми

Однією з найбільш складних і водночас критично важливих технічних проблем електроенергетики України є оцінювання фактичного технічного стану потужного генеруючого устаткування ГЕС і ГАЕС. Переважна більшість гідрогенераторів цих електростанцій була введена в експлуатацію у 30–80-х роках минулого століття, практично вичерпала свій проектний ресурс і потребує комплексної модернізації, глибокої реконструкції або повної заміни. Ситуація додатково ускладнюється пошкодженнями та руйнуваннями енергетичної інфраструктури, спричиненими воєнними діями, що призвели до зростання кількості прихованих дефектів, прискореного старіння конструктивних елементів і підвищення ризиків аварійних відмов.

За таких умов забезпечення безперебійної та надійної роботи гідрогенераторів неможливе без своєчасного виявлення експлуатаційних дефектів і деградаційних процесів на ранніх стадіях їх розвитку. Сучасні системи технічної діагностики дають змогу оперативно ідентифікувати потенційні несправності, прогнозувати поведінку обладнання в заданому часовому горизонті, формувати архів станів агрегатів у динаміці та генерувати рекомендації щодо необхідних профілактичних і ремонтних заходів з метою запобігання позаплановим та аварійним зупинкам.

При цьому технічні вимоги до систем діагностування, поряд із переліком контрольованих вузлів, деталей і елементів, мають включати параметри, що кількісно характеризують їхній стан, а також обґрунтовані методи й засоби вимірювання, адаптовані до реальних умов експлуатації, зокрема післяаварійних і поствоєнних режимів роботи енергетичного обладнання, що розроблені з світові тренди направлені на глибоку трансформацію, що зумовлено підвищеними вимогами до експлуатаційних характеристик генеруючого обладнання, його надійності, ефективності та екологічної безпеки.

Особливе місце при цьому займає контроль параметрів обертових вузлів гідрогенераторів, а саме повітряного проміжку та биття валу.

Аналіз величини та геометрії повітряного проміжку з урахуванням параметрів радіального биття вала і годографів у контрольних точках забезпечує можливість ідентифікації широкого спектра дефектів електромеханічної системи, оцінювання тенденцій їх розвитку та, зрештою, формування обґрунтованого висновку щодо поточного технічного стану як окремих вузлів, так і агрегату загалом. Зокрема, для гідроагрегатів така інформація дозволяє виявляти механічний дисбаланс ротора гідрогенератора та робочого колеса турбіни, відхилення форми ротора і статора, гідравлічну неурівноваженість робочого колеса, а також перекося й деформації осі вала гідроагрегату. Використання у діагностичних системах вимірювачів повітряного проміжку з покращеними метрологічними показниками та розширеним функціоналом створює передумови для підвищення інформативності й надійності таких систем.

Саме тому дана дисертаційна робота, що завдання, що полягає у розробці нових та удосконаленні існуючих компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів гідрогенераторів, зокрема сенсорів, математичних моделей їх вихідних сигналів і алгоритмів обробки в реальному масштабі часу з урахуванням складних та змінних експлуатаційних режимів є *актуальною*.

Структура роботи

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Вступ до дисертаційної роботи детально обґрунтовує актуальність дослідження, визначає зв'язок роботи з науково-дослідними темами інституту електродинаміки Національної академії наук України, де виконувалася дисертація, формулює її мету та завдання, визначає об'єкт, предмет та методи дослідження, а також описує наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Крім того у вступі наведено інформацію про практичне використання результатів роботи, визначається особистий внесок здобувача, містяться дані про апробацію результатів дослідження та їх висвітлення у наукових публікаціях.

У **першому** розділі наведено аналіз проблем забезпечення надійного та безпечного функціонування потужних гідрогенераторів на основі контролю їх

фактичного технічного стану. Обґрунтовано необхідність переходу від регламентного обслуговування до безперервного моніторингу обертових вузлів із використанням спеціалізованих контрольно-діагностичних систем. Розглянуто основні параметри, за змінами яких проявляється розвиток дефектів, а також фізичні процеси, що їх зумовлюють. Проаналізовано наявні системи контролю та визначено напрями їх удосконалення.

У другому розділі роботи викладено результати розроблення структури інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів, орієнтованої на роботу в реальному масштабі часу в умовах дії багатофакторних експлуатаційних збурень. Сформовано склад і взаємозв'язки основних функціональних підсистем, що базуються на використанні мультифізичних сенсорів кінематичних, вібраційних, електромагнітних, температурних та гігрометричних параметрів. Детально розглянуто інформаційно-вимірювальний канал контролю повітряного проміжку, описано його модульну архітектуру, принципи синхронізації з обертанням ротора та детерміновану організацію обміну даними. Обґрунтовано принцип функціонування перетворювача-інтегратора та виконано аналіз його часових характеристик, що підтверджує коректність вимірювального процесу за змінних швидкісних режимів. Окрему увагу приділено розробці диференційного ємнісного сенсора повітряного проміжку, інваріантного до впливу температури та вологості внутрішнього середовища гідрогенератора. Показано, що запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення точності, стабільності та інформативності вимірювань.

Третій розділ роботи присвячено реалізації математичних моделей та алгоритмів обробки сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенераторів. Основну увагу приділено формалізації процесів формування вимірювальних сигналів з урахуванням детермінованих і стохастичних складових, що виникають під впливом механічних, магнітних, гідродинамічних та термомеханічних факторів. приділено методам визначення просторового зміщення валу та побудови годографа руху центра ротора, що дозволяє підвищити інформативність діагностичних ознак і достовірність оцінювання технічного стану гідрогенератора.

Четвертий розділ дисертації присвячено висвітленню результатів проведених експериментальних досліджень компонентів інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів електродів в лабораторних умовах, а також результати його натурних випробувань на гідрогенераторі СГК 538/160-70М Київської ГЕС. Розглянуто

розробку випробувально-демонстраційного стенду, перевірку адекватності запропонованих математичних моделей і алгоритмів обробки контрольно-діагностичних сигналів, а також досліджено вплив температури та вологості робочого середовища на функцію перетворення ємнісних сенсорів і методи компенсації відповідних похибок.

Висновки по роботі узагальнюють основні отримані в дисертаційному дослідженні результати. Дисертація в цілому є структурно та змістовно гарно збалансованою роботою. Послідовність викладення її положень є логічною і такою, що побудована у відповідності з науковим методом.

Оцінка структури і змісту роботи, її завершеності та оформлення

Дисертація Закусила С.А. є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка викладена 192 сторінках машинописного тексту. Дисертація складається із анотації, вступу, 4-х розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 156 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 3 таблицями та 36 рисунками. Список використаних джерел містить 121 найменувань, з них 26 кирилицею та 95 латиницею.

Наукова новизна отриманих результатів

При виконанні дисертаційної роботи отримано такі наукові результати:

- удосконалено структуру системи контролю обертових вузлів гідрогенераторів, за рахунок застосування первинних вимірювальних перетворювачів інваріантних до впливу робочого середовища генератора та алгоритмів обробки їх інформативних сигналів, що дозволило забезпечити високий рівень інформаційної ефективності та стійкості до впливу параметрів внутрішнього середовища потужних гідрогенераторів;

- набув подальшого розвитку програмно-алгоритмічний апарат забезпечення функціонування компонентів, призначених для утворення, збирання, оброблення й виведення інформації в системі контролю обертових вузлів гідрогенераторів;

- набули подальшого розвитку математичні моделі вихідних сигналів ємнісних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенераторів, що враховують вплив температури та вологості робочого середовища досліджуваного об'єкту на точність та стабільність вимірювань;

- вперше запропоновано структуру диференціального ємнісного сенсора повітряного проміжку, інваріантного до впливу робочого середовища генератора, завдяки додаткового сенсора з електродами, геометрично подібними

змінному конденсатору, що дозволило підвищити точність вимірювання повітряного проміжку під час роботи гідроагрегату.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для компонентів засобів отримання, обробки та відображення контрольної-діагностичної інформації в системах контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів;

- розроблено та виготовлено експериментальні компоненти (ємнісного сенсору та модуля збору і попередньої обробки даних) системи контролю обертових вузлів гідрогенераторів та проведено їх випробування;

- впроваджено алгоритм попередньої обробки вихідних сигналів ємнісних сенсорів повітряного проміжку та їх відображення на Філії "Дирекція з будівництва Дністровської ГАЕС" ПрАТ "Укргідроенерго", що дозволило забезпечити можливість підвищити точність вимірювання значення повітряного проміжку в існуючих системах контролю технічного стану гідроагрегатів, за рахунок застосування інваріантних ємнісних сенсорів повітряного проміжку у штатних системах контролю та діагностування поточного технічного стану гідрогенераторів (Акт впровадження, 2024 р.);

- впроваджено як моделі вихідних сигналів сенсорів та технічну документацію на макетний зразок компоненти інформаційно-вимірювальної системи інваріантних до впливу внутрішнього середовища на ПрАТ "Укргідроенерго", що надало змогу підвищити достовірність визначення дефектів обертових вузлів генераторів під час їх експлуатації (Акт впровадження, 2024 р.)

Результати теоретичних і експериментальних досліджень, наведених в роботі, отримані особисто або за безпосередньою участю автора.

Отримані нові результати у сукупності, розв'язують актуальну науково технічну задачу покращення метрологічних характеристик та розширення функціональних інформаційно-вимірювальних каналів на основі ємнісних сенсорів для систем контролю поточного технічного стану потужних гідрогенераторів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих в дисертаційній роботі Закусила С.А. забезпечується аргументованою постановкою мети і задач дослідження, використанням сучасних коректних методів дослідження проблеми, комплексного аналізу отриманих результатів дослідження і обґрунтованістю та якісним

формулюванням отриманих висновків. Поставленим задачам відповідають методи та засоби досліджень, які забезпечили ефективність їх розв'язання.

Представлена дисертаційна робота є цілісною, логічно побудованою науковою працею, викладеною лаконічно і коректно з використанням сучасної наукової і інженерно-технічної термінології. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та висновки переконливі та обґрунтовані як з наукової, так і з технічної точок зору. Назва дисертації відповідає її змісту

Повнота викладу результатів дослідження в наукових публікаціях

Основний зміст дисертації Закусила С.А. досить повно представлено у 17 наукових працях, з яких 4 опубліковано в наукових фахових виданнях та індексуються наукометричною базою SCOPUS.

Дисертаційна робота пройшла широку апробацію, її основні положення та наукові результати розглядалися на: Міжнародній конференції "Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми "Велике будівництво" (Київ, 24–25 листопада 2022 р.); VIII Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'22" (Київ, 15–17 листопада 2022 р.); 4th International Conference "Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)". (Kryvyi Rih, 22–26 May 2023); 2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2023) International Conference (Kharkiv, 7–10 Oct. 2023 р.); X Міжнародній науково-технічній Internet-конференції "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами" (Київ, 24 листопада 2023 р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Відкрита наука України: Візійний дискурс в умовах воєнного стану" (Ужгород, 26–28 квітня 2023 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції "Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика" (Полтава, 10 листопада 2023 р.); Міжнародній науково-технічній Internet-конференції "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами" (Київ, 27 листопада 2024 р.). На зазначених конференціях результати дослідження отримали позитивну оцінку. Тому з огляду на це апробація результатів дисертаційної роботи є достатньою.

Академічна доброчесність

Очевидних ознак порушення автором академічної доброчесності, зокрема випадків оприлюднення, частково або повністю, наукових результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження та/або відтворення опублікованих текстів інших авторів без зазначення їх авторства, не виявлено.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

Загалом, позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих дисертантом результатів, варто відзначити наступні дискусійні положення і зауваження до змісту дисертаційної роботи:

1. Другий пункт наукової новизни: «набув подальшого розвитку програмно-алгоритмічний апарат забезпечення функціонування компонентів, призначених для утворення, збирання, оброблення й виведення інформації в системі контролю обертових вузлів гідрогенераторів» не можна віднести до наукової новизни роботи, він відноситься до практичного значення роботи.
2. Впровадження в Інституті металофізики ім. В.М. Курдюмова НАН України не пов'язане з результатами роботи, які виносяться на захист. (Додаток Б, Акт впровадження від 10.12. 2024 р.).
3. У постановці задач дослідження (с. 58) вказано: «у дисертаційній роботі сформульовано та розв'язується комплекс взаємопов'язаних науково-прикладних завдань, спрямованих на підвищення інформативності, точності та завадостійкості засобів отримання, передавання та відображення контрольно-діагностичних параметрів в системах контролю фактичного технічного стану гідрогенераторів», але в роботі не наведені отримані значення інформативності, точності та завадостійкості, що унеможлиблює їх порівняння з характеристиками існуючих засобів.
4. В розділі 2 не наведені технічні та метрологічні характеристики розробленої системи. Було б доцільно порівняти характеристики розробленої системи з існуючими.
5. В розділі 3 відсутня оцінка адекватності та точності запропонованих моделей.
6. Робота містить стилістичні та орфографічні помилки.

Всі наведені недоліки ніяк не впливають на позитивну оцінку дисертації. Зауваження можуть бути предметом подальших досліджень автора.

Висновок

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Закусила Сергія Анатолійовича на тему «Розробка компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів гідрогенераторів» 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 Метрології та інформаційно-вимірювальної техніки. 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 Закусило Сергій Анатолійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

Завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій
факультету робототехніки та приладобудування,
Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського",
доктор технічних наук,
доцент

Володимир ЄРЕМЕНКО

