Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

ЗАЙЦЕВ ЄВГЕН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.518.5:621.31

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОТУЖНИХ ТУРБО- ТА ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі електричних та магнітних вимірювань Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ.

Науковий консультант – доктор технічних наук, с.н.с.
Левицький Анатолій Станіславович,
Інститут електродинаміки НАН України, провідний науковий співробітник відділу електричних і магнітних вимірювань.

Офіційні опоненти:

– доктор технічних наук, професор
Єременко Володимир Станіславович,
НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", завідувач кафедри інформаційно-вимірювальної техніки;

– доктор технічних наук, професор
Щербак Леонід Миколайович,
ПВНЗ "Київський міжнародний університет", завідувач кафедри комп'ютерних наук;

– доктор технічних наук, професор
Борисенко Анатолій Миколайович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри теоретичних основ електротехніки.

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2020 р. о ____годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.02 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ – 57, проспект Перемоги, 56, тел. 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ –57, проспект Перемоги, 56.

Автореферат розісланий «___» _____2020 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради Ю.Ф. Тесик

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Проблема забезпечення стабільної та надійної експлуатації потужних турбо- та гідрогенераторів (ПГ) АЕС, ТЕС, ГЕС та ГАЕС, що входять до Об’єднаної енергетичної системи України, характеризується необхідністю модернізації енергетичного обладнання, значна доля якого була введена в експлуатацію в 50 – 70-х роках минулого століття і практично відпрацювала свій ресурс. Одним із способів виходу із ситуації є заміна обладнання на нове, але такий підхід потребує залучення великих грошових інвестицій (близько 65 млрд.$), що в наших реаліях є достатньо важким завданням. Іншим способом є використання засобів своєчасного та якісного визначення фактичного технічного стану та залишкового ресурсу експлуатації ПГ на основі сучасних та оптимальних за структурою систем діагностування, що реалізовані на основі ефективних методів і засобів виявлення дефектів в ПГ.

Застосування таких систем дозволить підвищити ефективність експлуатації обладнання, збільшити його ресурс, зменшити час й вартість обслуговування та ремонтів, знизити рівень ризиків виникнення аварій і відмов за рахунок своєчасного виявлення виникаючих дефектів в машині під час її роботи, а також прийняти правильні рішення з їх ліквідації та перейти від планових ремонтів до ремонтів за фактичним станом електроенергетичного обладнання.

Визначення та ідентифікація дефектів при проведенні діагностики ПГ базується на вимірюванні, перетворенні та обробці інформаційних сигналів. У цьому випадку значна кількість дефектів, що виникають в потужних генераторах, можуть бути виявлені під час контролю параметрів механічних дефектів, відхилення від норми яких супроводжується зміною фізичних процесів в вузлах генератора і характеризує його технічний стан.

При цьому слід враховувати, що будь-яка система контролю та технічної діагностики включає наступні компоненти: комплекс контрольованих параметрів, комплекс методів контролю цих параметрів та комплекс інформаційно-вимірювальних засобів для реалізації цих методів. Всі ці елементи взаємопов'язані і недоліки кожного з них знижують загальну ефективність діагностування електрообладнання. Тому вдосконалення одного з цих компонентів сприяє підвищенню ефективності роботи всієї системи. Компоненти, які використовуються при вимірюванні, перетворенні та аналізі контрольно-діагностичних параметрів повинні враховувати складний характер досліджуваного об'єкта, забезпечувати достовірність результатів діагностики, класифікації дефектів та необхідну завадозахищеність, а первинні джерела інформації (сенсори) відповідати певним, досить жорстким вимогам, які враховують не тільки особливості конструкції генераторів, але й робочого середовища об’єкту діагностування.

У розроблення та вирішення питань вказаної проблематики внесли вагомий вклад ряд вітчизняних та закордонних вчених: І.М. Постніков, А.К. Шидловський, Б.С. Стогній, Г.Г. Счастливий, О.І. Титко, В.П. Бабак, О.Ф. Буткевич, І.О. Глєбов, Г.М. Федоренко, Б.Г. Марченко, М.В. Мислович, В.Ю. Кучерук, З.Т. Назарчук, А.Д. Ніженський, М.Г Шульженко, А.С. Левицький,

Ю.В. Зозулін, Е.Й. Гуревич, О.С. Голоднова, В.В. Кузьмін, В.І. Мілих, Г.В. Ростик, M. Bissonnette, J. Lin, P. Talas, P. Toom, J. Rassmussen, B. Howard та інші.

Проте на даний час залишаються недостатньо розробленими теоретичні та методологічні основи проектування і практичного використання оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ до складу яких входять комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні канали (ІВК). Причинами цього є особливості отримання контрольно-діагностичної інформації в енергетиці, які головним чином визначаються нестандартністю, а інколи унікальністю генеруючого обладнання, а також недостатнім використанням можливостей сучасних комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем.

На основі вищевикладеного можна сформулювати актуальну *науково-прикладну проблему, яка* полягає у створенні теоретичних засад побудови та практичної реалізації оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів, до складу яких входять комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні канали, що мають малі розміри, є завадостійкими до дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування та забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану генераторів.

Розв’язання цієї проблеми спрямоване на створення та практичне застосування оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ з застосуванням в системах комп'ютеризованих ІВК та можливостей сучасних технологій опрацювання контрольно-діагностичної інформації, з забезпеченням функціонування елементів системи за умов дії потужних магнітних полів, з забезпеченням використання вимірювачів на генераторах різних типів за рахунок зміни первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) підсистем, а також реалізації в ІВК простих за конструкцію вторинних вимірювальних перетворювачів (ВВП).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувались в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів фундаментальних та прикладних НДР за темами:

Дисертаційна робота виконувалась у відділі електричних та магнітних вимірювань Інституту електродинаміки Національної академії наук України (ІЕД НАНУ) відповідно до планів Держбюджетних НДР, затверджених Президією НАН України, та пов’язана з наступними НДР:

«Високопродуктивні завадостійкі засоби створення, передачі та цифрової обробки сигналів вимірювальної інформації для систем безперервного моніторингу електроенергетичного устаткування» (шифр «Завадостійкість», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України №12 від 27.09.2011 р.), 2012 – 2016 рр., №ДР 0111U009252 (виконавець);

«Створення ємнісного вимірювача зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора та щитових приладів контролю параметрів електричної енергії» (шифр «Контроль-М», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №11 від 07.07.2015р.), 2016 – 2018 рр., №ДР 0115U004416 (відповідальній виконавець);

«Розробка наукових засад створення нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання контрольно-діагностичних параметрів обладнання електростанцій» (шифр «ПАРАМЕТР», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №11 від 05.07.2016 р.), 2017 – 2021 рр., №ДР 0116U007285 (виконавець);

«Створення автоматизованих багатоканальних систем контролю в електроенергетиці» (шифр «Торец», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №10 від 12.06.2018р.), 2019 – 2021 рр. №ДР 0119U001215 (відповідальній виконавець).

При виконанні цих робіт автором розроблені та науково обґрунтовані оптоелектронні системи діагностування механічних параметрів ПГ до складу яких входять комп'ютеризовані ІВК, які відповідають тенденціям розвитку засобів діагностування ПГ, а також виконані дослідження, пов’язані з визначенням технічних характеристик компонентів вимірювальних каналів цих систем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення теоретичних засад побудови, практичної реалізації і дослідження оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ, до складу яких входять комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні канали для надійного та достовірного визначення технічного стану об'єкту діагностування.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі **основні завдання:**

– аналітичні дослідження методів та засобів діагностування параметрів механічних дефектів ПГ;

– удосконалення ІВК систем діагностування механічних параметрів ПГ шляхом удосконалення існуючих та створення нових вимірювальних компонентів для на базі ємнісних та оптичних технологій та методів;

– удосконалення теоретичних засад побудови оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ, до складу яких входять комп'ютеризовані ІВК, які об’єднують переваги мікроелектронних та оптоелектронних технологій, забезпечують необхідний рівень завадостійкості до дії потужних магнітних полів об'єкту діагностування;

– розроблення компонентів систем діагностування стану спресованості осердя статора ПГ, які дозволяють підвищити точність, розрізнювальну здатність вимірювання та більш достовірно визначати місцезнаходження дефекту в осерді при його експлуатації та виготовленні;

– удосконалення систем вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів шляхом розробки та дослідження нових первинних перетворювачів (сенсорів);

– розроблення та впровадження гібридних оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ, які забезпечують підвищення якості контролю та діагностики машини;

– розроблення методів опрацювання експериментальних даних, отриманих під час вимірювання контрольно-діагностичних параметрів в ПГ;

– розробка методів побудови систем живлення ємнісних сенсорів з цифровим виходом, на основі використання автономних джерел живлення на базі

технології "Energy Harvesting" та живленням через оптоволоконні лінії з використанням фотовольтаїчних елементів;

– розроблення та дослідження компонентів ІВК оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ.

Об'єкт дослідження – процес визначення контрольно-діагностичних параметрів в потужному електроенергетичному обладнанні.

Предмет дослідження – методи, моделі, системи та методики діагностування механічних параметрів ПГ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися: методи чисельного моделювання з використанням персонального комп'ютера, методи теорії ІВС, теорія діагностики об'єктів і систем, теорія ймовірностей, методи статистичного оброблення діагностичних сигналів, теоретичні і експериментальні методи в області ємнісних та оптичних вимірювачів фізичних величин, а також оптоелектронних засобів комунікації. Теоретична частина роботи ґрунтується на аналітичних і числових методах дослідження з використанням положень математичного аналізу, теорії функцій комплексної змінної з використанням конформних відображень, теорії еліптичних функцій, теоретичних основи оптики, електротехніки та інформаційно-вимірювальних систем.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше комплексно поставлено і вирішено важливу науково-технічну проблему створення теоретичних засад побудови та реалізації оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ, до складу яких входять комп'ютеризовані ІВК. Наукова новизна міститься в наступних положеннях:

– набули подальшого розвитку математичні моделі та алгоритми забезпечення компонентів, призначених для утворення, збирання, оброблення й отримання контрольно-діагностичної інформації в оптоелектронних комп'ютеризованих системах діагностування механічних дефектів ПГ, що дає змогу підвищити достовірність їхнього діагностування;

– вперше запропоновано метод апроксимації функцій перетворення оптоелектронних вимірювачів механічних параметрів цифровими методами, що дозволило підвищити точність оцінок даних вимірювань механічних параметрів основних вузлів ПГ при мінімальному числі точок контролю отриманих експериментальних даних;

– набув подальшого розвитку метод визначення параметрів обвідної полюсів ротора гідрогенератора на основі застосування методу найменших квадратів до даних, отриманих за допомогою встановлених на розточенні осердя статора сенсорів комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору, що дало змогу зменшити у 2-3 рази вплив розкиду радіальних розмірів полюсів ротора на результат визначення параметрів таких дефектів гідрогенератора, як ексцентриситет і перекіс ротора, елліпсність розточення осердя;

– вперше запропоновано метод корекції похибки, обумовленої перекосом електродів змінного конденсатора для напівдиференціального ємнісного сенсора вимірювача зусиль в стяжних призмах осердя статора ТГ, що дало можли-

вість підвищити достовірність діагностування та контролю тиску спресованості осердя статора;

– вперше розроблено метод контролю тиску спресованості осердя статора генератора із застосуванням секторних концентричних компланарних ємнісних сенсорів ходу тарілчастих пружин в засобах стабілізації тиску пресування, який дозволив підвищити достовірність їхнього контролю;

– вперше запропоновано застосування в системах діагностування потужних гідрогенераторів ємнісних сенсорів повітряного зазору з компланарним-паралельними електродами, що забезпечує підвищення метрологічних характеристик первинних перетворювачів інформації за рахунок мінімізації впливу паразитних електричних ємностей з'єднувальних провідників між первинним (сенсором) і вторинним перетворювачем, паразитної ємності між робочим електродом сенсора і елементами його конструкції, паразитної ємності між робочим електродом сенсора і елементами конструкції гідрогенератора;

– вперше розроблено структуру апаратно-програмних засобів, які об’єднують переваги мікроелектронних та оптоелектронних технологій, що дало можливість створювати завадостійкі до дії потужних магнітних полів комп'ютеризовані ІВК оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ;

– набули подальшого розвитку методи енергозберігаючого кодування вимірювальної інформації для гібридних систем діагностування ПГ, що дозволило реалізувати простий протокол комунікації між компонентами систем контролю та діагностування потужних генераторів із застосуванням оптоволокна і знизити потужність живлення засобів отримання первинної інформації, що знаходяться в зоні дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному**:**

– розроблено структурні схеми, виготовлено та експериментально перевірено експериментальні зразки вимірювальних каналів оптоелектронних систем діагностування параметрів механічних дефектів основних вузлів (повітряного зазору, зусилля пресування, радіального биття циліндричної поверхні валу генератора), що дозволяє підвищити надійність та безпечність роботи нових та вже існуючих потужних генераторів ТЕЦ, ГЕС, АГЕС та АЕС;

– розроблено та виготовлено експериментальні зразки комп'ютеризованих ємнісних вимірювачів для систем контролю повітряного зазору капсульних гідрогенераторів СГК538/160-70М, контролю зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного генератора та зусиль пресування осердя статора та проведено їх лабораторні випробування;

– розроблено структурні схеми вимірювальних перетворювачів з автономними джерелами живленням на базі технології "Energy Harvesting" та через оптоволоконні лінії з використанням фотовольтаїчних елементів, які дозволяють зменшити вплив дії потужних магнітних полів на результат визначення контрольно-діагностичних параметрів механічних дефектів та можуть бути використані в системах контролю та діагностування потужних генераторів;

– розроблено експериментальний зразок електронно-оптичного перетворювача, який забезпечує організацію комунікації між ємнісними сенсорами з цифровим виходом та системою збирання й оброблення контрольно-діагностичної інформації систем діагностування параметрів механічних дефектів потужних генераторів та проведено його лабораторні випробування;

– розроблено методики та алгоритми діагностування механічних параметрів основних вузлів потужних генераторів при їх виготовлені, стендових випробуваннях та в умовах експлуатації енергетичних об’єктів;

– впроваджено в комплекті технічної документації та макетному зразку гібридного волоконно-оптичного комп'ютеризованого вимірювача зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного генератора на підприємстві ДП "Завод "Електроважмаш" (м. Харків), що дало змогу підвищити достовірність контролю зусилля у стяжних призмах при експлуатації потужних турбогенераторів типу ТГВ (Акт впровадження, 2018 р.);

– впроваджено як моделі, методи та компоненти оптоелектронної системи діагностування зусиль пресування осердя статора на підприємстві ДП "Завод "Електроважмаш" (м. Харків) для підвищення ефективності контролю тиску пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТ3, завдяки реалізації автоматичного контролю технологічного процесу пресування осердя статора (Акт впровадження, 2019 р., Протокол випробувань, 2019 р.);

– впроваджено методи та алгоритми обробки експериментальних даних використані ТОВ НВП "Техприлад"(м. Київ) для покращення технічних та метрологічних характеристик систем діагностування запірної апаратури трубопроводів водопостачання ТЕЦ, за рахунок зменшення впливу дії випадкових сигналів на результат вимірювання (Акт впровадження, 2019 р.);

– впроваджено методи та алгоритми вимірювання параметрів биття поверхонь елементів конструкцій використані ТОВ «Альмагруп» (м. Кременчук) для покращення технічних та метрологічних характеристик безконтактних систем обстеження та дослідження стану будівель і споруд, в тому числі і об'єктів енергетичного комплексу України (Акт впровадження, 2019 р.);

– впроваджено у навчальний процес кафедри технології та засобів механізації аграрного виробництва Полтавської державної аграрної академії під час викладання курсів "Конструювання автомобілів та тракторів", "Ремонт машин та обладнання" та "Конструювання та динаміка двигунів внутрішнього згорання" для студентів спеціальностей 133 "Галузеве машинобудування" та 208 "Агроінженерія" (Акт впровадження, 2019 р.).

Новизна одержаних технічних рішень захищена патентами України № 91534 від 10.07.2014 "Лазерний далекомір", № 115924 від 10.01.2018 "Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах", № 117841 від 10.10.2018 "Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в генераторах " та № 119101 від 25.04.2019 "Ємнісний перетворювач зусиль в стяжних призмах осердя статора турбогенератора".

Особистий внесок здобувача. Усі наукові узагальнення, положення, результати, висновки та рекомендації, викладені у дисертації, отримані автором

особисто. За час підготовки дисертаційної роботи здобувач приймав безпосередню участь та керував роботами із розробки теоретичних основ, математичного, методологічного, програмно-алгоритмічного забезпечення оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ та їх інформаційно-вимірювальних компонентів, а також проведенні їх лабораторних випробувань та впровадженні.

В опублікованих роботах, особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1, 2, 3, 4, 5, 7, 29] – розроблення структурних рішень, математичних моделей та експериментальна перевірка оптоелектронних інформаційно-вимірювальних компонентів фазових та частотнофазових волоконно-оптичних систем; [6] – розроблення та проведення досліджень програмно-алгоритмічного забезпечення для оптичних сенсорів; [8] – розроблення програмної реалізації методу оцінки похибки вимірювання; [9] – розроблення математичної моделі та її програмна реалізації для визначення похибок вимірювання; [10] – розробленя моделі для визначення для визначення впливу частоти дискретизації на похибку; [11] – визначення функцій перетворення сенсорів повітряного зазору гідрогенератора СГК538/160-70М; [12, 37] – розроблення методу визначення функцій перетворення сенсорів повітряного зазору на основі експериментальних досліджень; [13] – розрахунок похибок сенсорів повітряного зазору, зумовлених неточністю встановлення на генераторах; [14] – розроблення та створення програмно-математичного забезпечення; [15] – розробка принципів побудови гібридних волоконно-оптичних ІКВ каналів систем діагностування потужних генераторів; [16] – розроблення принципів побудови та роботи системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів; [17] – розроблення та реалізація програмно-математичного забезпечення роботи системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів; [18, 41] – розроблення принципів реалізації живлення гібридних волоконно-оптичних ІВК через оптоволоконні лінії з використанням фотовольтаїчних елементів систем діагностування потужних генераторів; [19] – обґрунтування застосування волоконно-оптичних інформаційно-вимірювальних систем для контролю зусиль в стяжних призмах; [20, 32] – проведення оцінки ефективності методу корекції похибки, яка обумовлена перекосом електродів змінного конденсатора напівдиференціального ємнісного сенсора вимірювача зусиль в стяжних призмах осердя статора турбогенератора; [21] – розроблення принципів побудови та експериментальна перевірка електронно-оптичного перетворювача інформаційних сигналів; [22] – визначення функцій перетворення "зусилля-відносна поздовжня деформація", розрахунок похибок; [23] – розроблення програмно-математичного забезпечення та реалізація вторинного вимірювального для ємнісного вимірювача зусиль в стяжних призмах; [24] – аналітичне та експериментальне визначення функцій перетворення сенсорів вимірювання ходу тарільчатих пружин силових акумуляторів; [25] – розроблення методу та математичної моделі визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора та її характеристик; [26] – розроблення та реалізація програмно-математичного забезпечення ідентифікації значення ексцентриситету ротора та його типу; [27] – визначення функції апроксимації ємнісних сенсорів з концент-

ричними компланарними електродами; [28] – розроблення методики і проведення експериментальних досліджень впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтроллера; [29] – аналітичний огляд та аналіз методів та засобів вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів; [30] – розроблення принципів побудови та визначення похибок вимірювання оптоволоконних вимірювачів; [31, 32] – розроблення принципів побудови ємнісних сенсорів повітряного зазору між статором та ротором в гідрогенераторах; [33] – розроблення методики і проведення експериментальних досліджень методу корекції похибки, яка обумовлена перекосом електродів напівдиференціального змінного конденсатора ємнісного сенсора вимірювача зусиль в стяжних призмах осердя статора ТГ; [34, 35] – розроблення методу визначення періодичних складових; [36] – аналіз впливу нерівномірності дискретизації на метрологічні характеристики оптичних моніторингових систем; [38] – розроблення принципів побудови комп'ютеризованої системи контролю механічних параметрів електрообладнання; [39, 49] – розроблення методу та математичної моделі визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора та її характеристик на основі методу статистичного аналізу кутових вимірювань; [40, 44] – розроблення принципів побудови волоконно-оптичної комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору; [42] – розроблення принципів використання та визначення функцій перетворення ємнісного сенсору повітряного зазору з компланарними електродами; [43] – експериментальне визначення функцій перетворення та проведення експериментальних досліджень; [45] – розроблення принципів побудови оптоелектронного сенсору биття валу для систем діагностування потужних генераторів; [46, 50] – розроблення принципів побудови гібридних волоконно-оптичних систем діагностування потужних генераторів, а також проведення експериментальних досліджень компонентів їх вимірювальних каналів; [47] – розроблення принципів побудови системи контролю нерівномірності пресування осердя статора турбогенераторів; [48] – розроблення принципів побудови та визначення функцій перетворення ємнісних сенсорів з компланарними електродами вимірювання ходу тарілчастих пружин силового акумулятора, який встановлюється під стяжні ребра осердя статора турбогенератора; [51] – постановка, розробка методики і проведення експериментальних досліджень впливу магнітного поля промислової частоти на метрологічні характеристики цифрових ємнісних сенсорів системи діагностування ступеню стиснення осердя статора турбогенератора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові результати та практичні розробки дисертації доповідались та обговорювались на 18 міжнародних конференціях та 1 науковому симпозіумі, а саме: X, XII Міжнародна науково – практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси». ІІРТК. (Київ, 2017, 2019); XV, XVI, XIX міжнародна науково-технічна конференція “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (Одеса,2015,2016,2019); 8-я, 9-я, 10-я Международная научно-техническая конференция "Приборостроение" (Минск, Беларусь, 2015, 2016, 2017); IV Ukrainian-German conference “Informatics. Culture. Technology” Control

systems in industry. (Odessa, Ukraine, 2016); XIII Міжнародна конференція "Контроль і управління в складних системах КУСС-2016". (Вінниця, 2016); XIV, XV, XVI Міжнародна науково-практична конференція "Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем" (Дніпро, 2016, 2017, 2018); I, II IEEE Ukraine conference on electrical and computer engineering UKRCON (Kyiv, Ukraine, 2017, Lviv, Ukraine, 2019); 2017 IEEE Microwaves, radar and remote sensing symposium. MRRS-2017. (Kyiv, Ukraine, 2017); 6-я Международная научно-техническая конференция «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (Могилев, Беларусь, 2017); II Міжнародна науково-технічна конференція "Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2017" КТІПР – 2017. (Житомир, 2017); International conference on modern electrical and energy system. MEES-17. (Kremenchuk, Ukraine, 2017); 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO-39 (Kiev, Ukraine, 2019).

Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідались та обговорювались на: науково-технічній нараді відділу Головного технолога ДП «Завод Електроважмаш» (Протокол технічної наради ДП "Завод "Електроважмаш", 2019 р., м. Харків); наукових семінарах відділу електричних та магнітних вимірювань, літній школі та вченій раді Інституту електродинаміки НАН України; Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України.

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковано у 51 друкованій праці, із них 25 статей – у наукових фахових виданнях України та 4 статті у закордонних виданнях, з яких 11 включено у Scopus та/або WOS; 4 патенти України; 18 – у матеріалах та тезах доповідей на Міжнародних конференціях та 1 – у матеріалах наукового симпозіуму, з яких 5 включено у Scopus.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота викладена на 424 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 280 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 17 таблицями та 138 рисунками. Список використаних джерел містить 398 найменування, з них 281 кирилицею та 117 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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 і планами НДР Інституту електродинаміки НАН України, сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено апробацію роботи та публікацію її результатів у наукових фахових виданнях.

У першому розділі розглянуто проблеми підвищення якості контролю та діагностування ПГ в області діагностування механічних параметрів їх основних вузлів. Показано, що складністю проведення діагностування механічних параметрів ПГ є особливість конструктивного виконання їхніх найважливіших складових частин, які в процесі роботи, особливо в перехідних режимах, зазнають значних механічних навантажень. До того ж елементи систем контролю та діагностування підлягають негативному впливу імпульсних завад, потужних магнітних полів, високої температури, підвищеної вологості, озону, перехресних наведень між комунікаційними лініями, акустичних шумів, вібрації в широкому діапазоні частот тощо, які мають місце всередині ПГ.

Показано, що термомеханічні процеси в ПГ призводять до зміни величини та форми повітряного зазору, форми ротора та статора, послаблення пружного стиснення активного заліза статора, зміни зусиль в стяжних призмах осердя та появи низькочастотних вібрацій. Зазвичай механічні дефекти в потужних генераторах визначають за допомогою вібраційних методів. В той же час зазначено, що проведення контролю лише за вібраційними параметрами дозволяє виявити далеко не всі можливі механічні дефекти машини з ефективністю, яка знаходиться в межах (залежно від особливості дефекту та типу машини) від 20 до 80%. Тому для одержання більш високої вірогідності результату діагностування в сучасні системи вібраційного контролю включають додаткові ІВК, для одержання інформації про параметри механічних дефектів основних вузлів ПГ. Тому підвищення метрологічних характеристик та завадостійкості ІВК систем діагностування та їх компонентів є актуальною задачею.

Проведено аналіз методів та засобів діагностування, а також сучасний стан розвитку та практичного застосування комп’ютеризованих систем діагностування найбільш типових параметрів механічних дефектів (параметрів повітряного зазору, спресованості осердя статора, радіального биття циліндричної поверхні вала) основних вузлів ПГ. На основі аналізу визначено перспективні напрямки подальшого розвитку систем діагностування ПГ, окреслено основні науково-технічні завдання, які необхідно вирішити для удосконалення існуючих і створення нових систем.

В результаті проведених досліджень визначено основні вимоги до систем діагностування механічних параметрів ПГ, які необхідно реалізувати в рамках виконання даної дисертаційної роботи.

Сформульовано науково-прикладну проблему, пов’язану з необхідністю розвитку теоретичних засад побудови та практичної реалізації оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ, до складу яких входять комп'ютеризовані ІВК, складові частини яких мають малі розміри, є завадостійкими до дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування та забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану генераторів.

Другий розділ присвячено розробці методів побудови оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ.

На основі огляду та аналізу визначено, що ємнісні та оптичні сенсори ІВК, які можуть працювати в умовах сильних магнітних полів, є одними з найбільш

перспективних засобів перетворення параметрів механічних дефектів в ПГ в інформаційний сигнал при вимірюванні. Використання таких сенсорів в робочих умовах ПГ дозволяє забезпечити високу точність і роздільну здатність вимірювання та довготривалу стабільність. В той же час використання оптичного волокна для передачі інформаційних сигналів та живлення первинних перетворювачів дозволяє забезпечити надійність і стійкість до негативного впливу зовнішнього та внутрішнього середовища, пожежо- та вибухобезпечність вимірювачів параметрів і каналів передавання даних, їх швидкість та завадостійкість, а також легкість інтеграції в систему технічного діагностування електроенергетичного обладнання.

Розроблено загальну класифікацію оптоелектронних систем діагностування в залежності від механічного параметру ПГ, фізичної величини, що контролюється, типу сенсора, а також стійкості до впливу магнітних полів об'єкту діагностування. У відповідності до проведеної класифікації запропоновано узагальнену структуру оптоелектронних систем діагностування параметрів механічних дефектів ПГ (рис.1). У наведеній схемі прийняті наступні позначення: ПВП – первинний вимірювальний перетворювач ІВК; ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач фізичної величини у цифровий код ІВК із відповідним програмно-математичним забезпеченням; К – керований комутатор; МК – модуль керування роботою комунікаційної підсистеми ІВК; ДЖ – джерело живлення; ПКССК – оптичний інтерфейс з перетворювачем код-світло/світло код; ВОК – волоконно-оптичний кабель; СТД – система технічної діагностики; МКСТД – модуль керування роботою системи технічного діагностування; ПМЗ – програмно-математичні засоби.

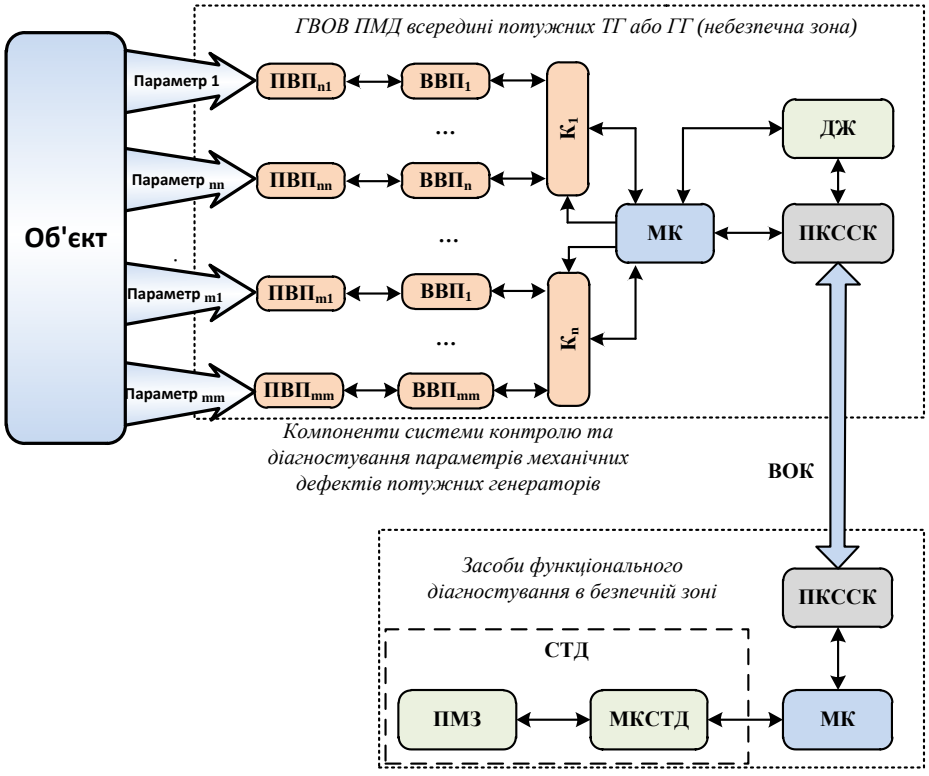

Рис.1 Загальна функціональна схема оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Особливістю системи є поєднання мікроелектронних та оптоелектронних технологій, що дало змогу створити завадостійкі до впливу потужних магнітних полів комп'ютеризовані ІВК оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ. У цьому випадку системи діагностування з ІВК, що поєднують переваги традиційних сенсорів та оптичного волокна є гібридними системами діагностування, а системи, що використовують як сенсори оптичні чутливі елементи – оптоволоконними системами діагностування.

Основним елементом гібридних систем діагностування, що визначає їх метрологічні характеристики, є гібридні волоконно-оптичні вимірювачі (ГВОВ) механічних параметрів ІВК, призначені для виконання функцій вимірювання, попереднього оброблення інформації та передачі даних за запитом (або в неперервному режимі) до модуля керування (МК) роботою комунікаційної підсистеми. На рис. 2 приведено узагальнену структуру окремого ГВОВ.

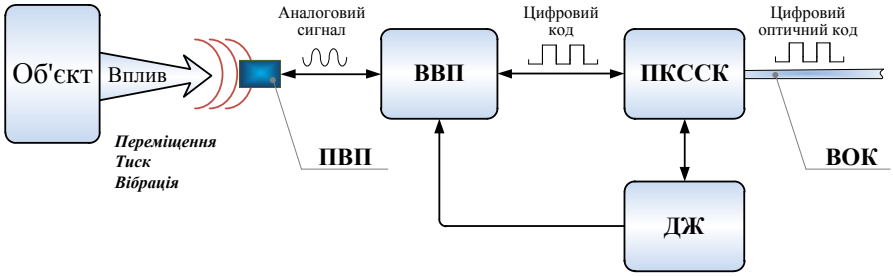

Рис. 2 Узагальнена структура ГВОВ механічних параметрів ПГ

ГВОВ механічного параметру працює наступним чином. ПВП (чутливий елемент) – перетворює величину відстані d_X між поверхнею ємнісного сенсора та заземленою поверхнею конструктивного елементу, зміщення якого контролюється, в електричну ємність C_X. Потім ця ємність перетворюється у відповідний цифровий код за допомогою ВВП. ВВП у своєму складі містить перетворювач ємність-код, мікроконтролер та відповідне програмно-математичне забезпечення, призначене для управління роботою перетворювача ємність-код та взаємодії із підсистемою МК. Окрім перерахованих блоків до складу ГВОВ механічних параметрів входить джерело живлення (ДЖ) та оптичний інтерфейс (ОІ). ОІ, у свою чергу, містить у своїй структурі перетворювач код-світло та світло-код (ПКССК), що є частиною комунікаційної системи діагностування з ГВОВ механічних параметрів ПГ.

За умови використання як первинних чутливих елементів оптоволоконних сенсорів, маємо другий тип системи – оптоволоконну систему діагностування механічних параметрів ПГ. Ця система на відміну від гібридної як ПВП та ВВП використовує відповідно волоконно-оптичний сенсор та оптико-електронну систему. У цьому разі загальна функціональна схема оптоволоконної системи діагностування ПГ є аналогічною гібридній.

Проведені теоретичні дослідження дають можливість реалізувати досить прості за конструкцією і технологією виготовлення вимірювачі із ємнісними або оптичними сенсорами, які мають широкий діапазон вимірювання і, водночас, високу розрізнювальну здатність. Це дозволяє досить просто адаптувати їх до ви-

мірювання необхідного конкретного механічного параметру, що вимагає досягнення компромісу в виборі необхідної швидкодії, діапазону вимірювання, вартості і розрізнювальної здатності. Окрім того, адаптація у більшості випадків може виконуватися програмними засобами, а також, за необхідності, заміною первинних вимірювальних перетворювачів без зміни всієї структури системи діагностування. З використання зазначених принципів побудови було розроблено ряд спеціалізованих комп'ютеризованих оптоелектронних системи діагностики механічних параметрів ПГ.

На рис. 3 представлено розроблену гібридну система вимірювання повітряного зазору капсульних ГГ СГК538/160–70М. На схемі показано фрагмент повітряного зазору ГГ із встановленим на осерді статора 3, а також узагальнену блок-схему апаратно-програмного забезпечення ЕОВ. На схемі прийняті наступні позначення: 1 – ротор; 2 – полюс ротора; 3 – осердя статора; 4 – волоконно-оптичний канал передачі інформації; 5 – оптоволоконний джут волоконно-оптичного каналу передачі живлення; Інт – інтерфейс; ОЕП – оптоелектронний перетворювач інформаційних сигналів; СК – система керування; БЖМ – блок живлення ГЕОВ в ізольованій зоні; ФВП – фотовольтаїчний перетворювач; ПП – підвищуючий перетворювач типу DC/DC; АМЗ – апаратно-програмні засоби; ПСК – програмно-алгоритмічні засоби керування роботою; САІ – система аналізу інформації; БРК – засоби реєстрації інформації; ІК – інтерфейс користувача; R_{rot} – радіус обвідної полюсів ротора; d_{VZ} – повітряний зазор; Δ – товщина електрода сенсора.

В запропонованій схемі ємність C_x, залежить від відстань d_x між загальною поверхнею електродів сенсора і поверхнею окремого полюса ротора. Запропонована схема діагностування повітряного зазору при зміні первинного перетворювача на інший тип може бути використана для вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів ПГ.

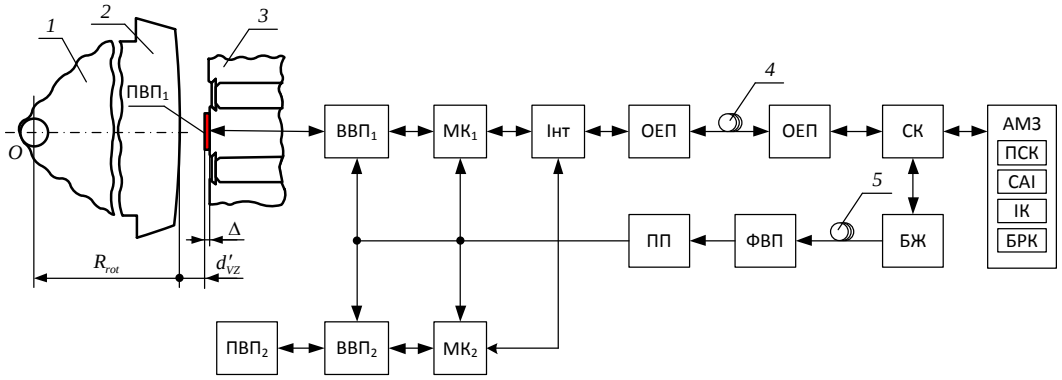

Рис. 3 Гібридна система діагностування повітряного зазору в капсульних ГГ СГК538/160–70М

Для ефективного діагностування ступеню стиснення шихтованого заліза осердя статора ТГ запропоновано схему гібридної системи (рис.4). На схемі прийняті наступні позначе ння: ПНС – перетворювач світло-код; ВОК Д1…ВОК Дn – ВОК для передачі даних; ВОК Ж – ВОК для передачі живлення; ПСН – перетворювач світло-код; ППЗД – пристрій перетворення та збирання даних; БКПМЗ - блок ке-

рування та програмно-математичного забезпечення; БДВЦ – блок ємнісних датчиків з цифровим виходом; СМ – система моніторингу.

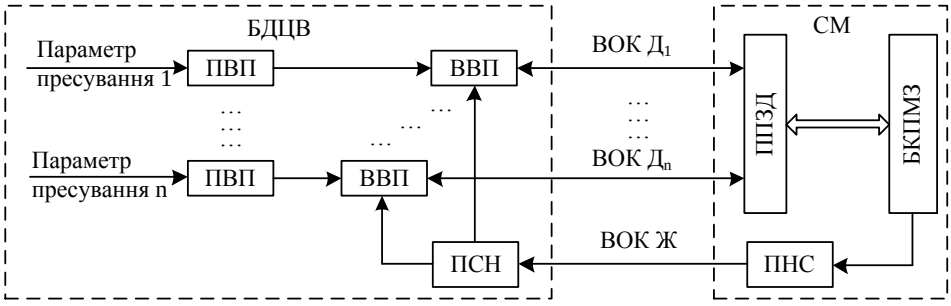

Рис. 4 Гібридна система діагностування та контролю зусилля пресування осердя статора ТГ

Використання в якості ПВП спеціалізованих вимірювачів ємнісного типу, забезпечує необхідні метрологічні характеристики під час контролю ступеню стиснення осердя статора ТГ. Сенсори в системі вимірюють зусилля в стяжних призмах осердя статора ТГ і розміщуються рівномірно по колу під кожною гайкою з двох сторін осердя статора ТГ, що дає можливість отримати повну картину стану спресованості осердя.

Для забезпечення компактності побудови приведених систем діагностування використовується спеціалізовані ємнісні сенсори у сукупності з поширеними мікросхемами перетворювачами ємність-код (CDC) та ВОК для передачі даних і живлення мікроелектронних елементів сенсора.

Дослідження структур гібридних систем діагностування дозволило встановити, що їх **перевагами є**: завадостійкість до потужних магнітних полів промислової частоти, можливість використання традиційних стандартних сенсорів, низька вартість, легкість в обслуговуванні та налагодженні. **Недоліками є**: обмежена точність та швидкодія, що зумовлена характеристиками традиційних сенсорів та відповідних мікроконтролерних перетворювачів фізичної величини у цифровий код , які мають обмежену роздільну здатність, необхідність використання хоча і економічної, але багатокомпонентної мікроелектронної бази безпосередньо в зоні контролю механічного параметру. В значній мірі наведених недоліків позбавлені оптоволоконні системи діагностування, хоча й мають більшу вартість засобів, що розміщуються в "безпечній зоні".

Враховуючи вище наведене, для реалізації ефективної системи діагностування повітряного зазору між ротором та статором, особливо під час експлуатації машини, розроблено блок-схему системи діагностування із використанням ОВ відбивного типу та ЛЧМ-модуляцією оптичного потоку (рис. 5), на якій прийняті наступні позначення: МСЧ – малогабаритний двоканальний синтезатор частоти; Гт – генератор тактовий; ЛВ – лазерний випромінювач; Зм – змішувачі; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦСП – цифровий сигнальний процесор; КК – оптична комірка Керра; Л – лінзи; ОЛЗ – оптична лінія затримки; НД – напівпрозоре дзеркало; ОР – оптичний розгалужувач; ОВ – оптоволокно; ОА – оптичний адаптер; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина; ОВЛ – оптоволоконна лінія; ОС – оптичний сенсор. Інформаційним параметром системи є різниця частот між зондуючим і прийнятим випромінюванням, зумовлена

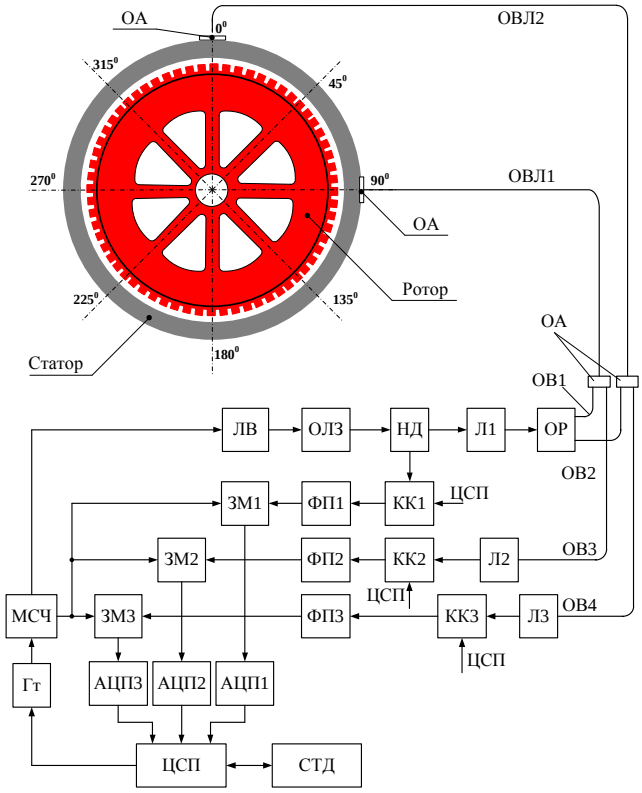

Рис. 5 Блок-схема оптоволоконної системи діагностування параметрів повітряного зазору ГГ

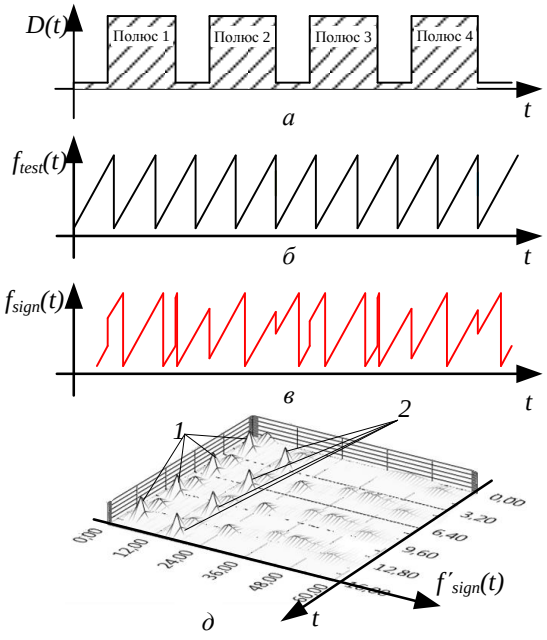

Рис. 6 Часові діаграми

різницею швидкостей поширення оптичного сигналу. В цьому випадку має місце часова затримка, яка визначається в залежності від різниці миттєвих значень частот зондуючого та прийнятого сигналів. Для формування сигналу використовується малогабаритний синтезатор частоти МСЧ, побудований з використанням інтегральної мікросхеми AD98951. На рис. 6 показано часові діаграми сигналів системи контролю та діагностики повітряного зазору в декартовій системі координат, які отримані в результаті застосування розроблених програмно-математи-чних засобів статистичного аналізу.

Часову діаграму зміни частоти сигналу зондування $f_{test}(t)$ зображено на рис. 6, б., зміни частоти прийнятого сигналу $f_{sign}(t)$ показана на рис. 6, в. На рис. 6, д (1 – спектральні складові, що прямопропорційні значенню відстані до полюсів; 2 – спектральні складові, що прямопропорційні значенню відстані до "дна" міжполюсного простору). Для аналізу отриманих інформаційних сигналів застосовувалося ковзне перетворення на основі швидкого перетворення Фур'є з розміщенням отриманих спектрограм в режимі «водоспад»(рис.6, д).

Для діагностування відносного значення радіального биття циліндричних поверхонь вала ротора ПГ запропоновано схему приведену на рис. 7, на якій: ВОК1, ВОК2 – волоконно-оптичні кабелі; ВОЛ1 ... ВОЛ6 – волоконно-оптичні лінії; ВОЖ1, ВОЖ2 – волоконно-оптичні джгути; ОС1, ОС2 – оптичні сплітери (розгалуджувачі); П – поляризатор; СДз – система дзеркал; Ф – оптичний фільтр; А - аналізатор; ПЛВ – напівпровідниковий лазерний випромінювач; ФД1, ФД2 - фотодетектори (pin фотодіоди); ІУ1, ІУ2 – виборчі підсилювачі; МС – малогабаритний синтезатор частоти; Д – драйвер ПЛІ; Інт – інтерфейс; Гт – генератор тактовий; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦСП – цифровий сигнальний процесор; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

КСЧ – керований синтезатор частоти; ОЧДБ – оптична чутлива частина оптоелектронного датчика биття. Структура вимірювального каналу 1 і 2 повністю аналогічна.

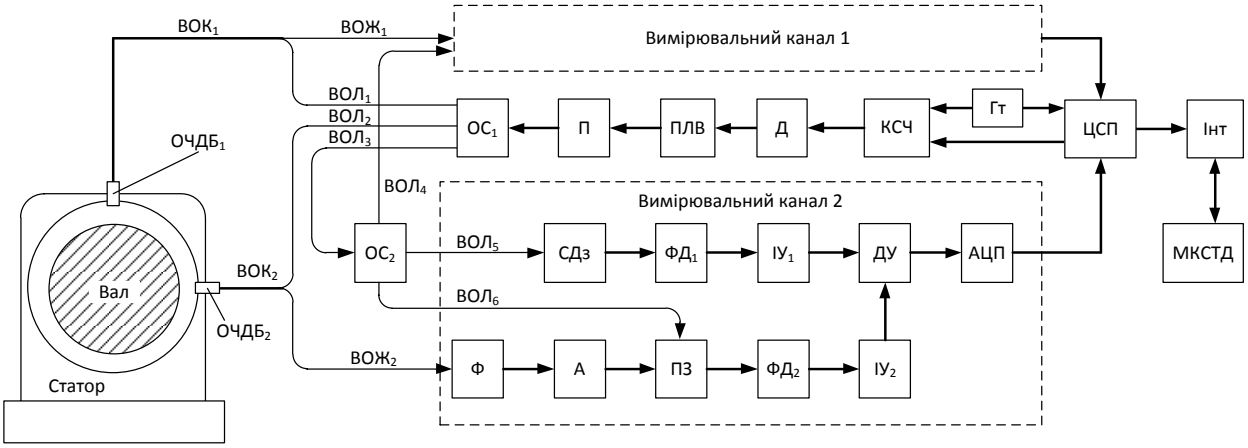

Рис. 7 Блок-схема оптоволоконної системи діагностування відносного радіального биття бічних циліндричних поверхонь валів ротора ПГ

В запропонованій структурі, завдяки вузькості спектральної характеристики вертикально-випромінюючих лазерів (VCSEL), забезпечується можливість когерентного складання оптичних сигналів від двох джерел, одне з яких можна вважати приймачем, а друге – відповідно, передавачем.

Сигнал на виході ФД системи залежить лише від різниці фаз коливань зондуючого та прийнятого сигналу

$$U(t) \simeq U_0 + U_m \cos(\varphi_x). \qquad (1)$$

Зміна різниці фаз φ_x прямопропорційна амплітуді відносного радіального биття циліндричної поверхні валу відносно нерухомої випромінюючої/приймаючої поверхні ОЧДБ.

Для діагностування абсолютного биття циліндричних поверхонь валів ротора запропоновано використання лазерного далекоміру фазового типу, що розміщується на поверхні, яка не залежить від вібрацій елементів ПГ.

На рис. 8 приведено схему системи діагностування абсолютного биття, складовими елементами якої є: 1,2 - лазерні напівпровідникові випромінювачі, 3 - генератор модулюючої напруги, 4 - гетеродин, 5 - генератор, що перелаштовується, 6 - гетеродин, що перелаштовується, 7,8 - світловоди, 9 - калібрована світловолоконна лінія, 10,11 - фотоприймачі, 12 - комутатор, 13,14 - змішувачі, 15 - перетворювач фазовий зсув–код, 16 - блок управління, збору та обробки даних, 17 - відліковий пристрій, 18,19 - дзеркала, 20 - об'єктив, 21 - контрольований об'єкт.

Для реалізації завадостійкої системи діагностування ступеню стиснення осердя статора ПГ запропоновано використання волоконних Бреггівських решіток. Це дозволяє використовувати систему в зоні підвищеної вибухонебезпечності (наприклад, в водневому середовищі) та в зоні впливу потужних магнітних завад. В даному випадку в одному волокні може бути інтегрована необхідна кількість Бреггівських решіток, кожна з яких працює на власній довжині хвилі. При цьому, замість точкового сенсора, маємо розподілену систему реєстрації. Використання довжини хвилі світла, як інформаційного параметру, робить сенсор нечутливим до

довготривалих дрейфів параметрів джерела живлення і приймача випромінювання, а також випадкових загасань оптичної потужності у волокні.

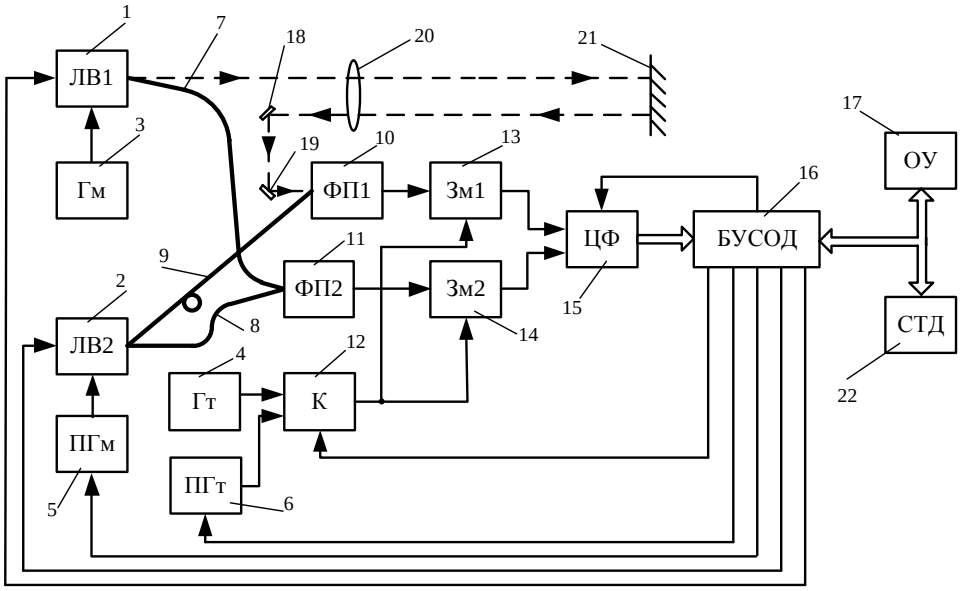

Рис. 8 Блок-схема оптоволоконної системи діагностування абсолютного радіального биття циліндричних поверхонь валів ротора ПГ

Дослідження структур оптоволоконних систем діагностування дозволило встановити, що їх **перевагами є** завадостійкість до впливу магнітних полів всередині потужних генераторів, значна дистанційність вимірювання (до сотень метрів), висока точність та швидкість процесу вимірювання (за рахунок використання оптичних елементів з високою швидкодією та роздільною здатністю), низька вартість матеріалів для виготовлення волокна, можливість контролю значної кількості фізичних параметрів, а також легкість в обслуговуванні. Визначено, що **недоліками є** складність і висока вартість технології виготовлення первинних вимірювальних перетворювачів для ОВ, а також висока вартість спеціального технологічного і метрологічного обладнання.

Третій розділ присвячено розробці методів оброблення інформаційних сигналів, алгоритмів та програмного забезпечення комп'ютеризованих систем діагностування механічних параметрів ПГ. Для забезпечення високої надійності та якості роботи систем діагностування методи, алгоритми та програмне забезпечення повинні легко адаптуватись та інтегруватись до існуючих систем технічного діагностування ПГ. Також необхідно забезпечити можливість модернізації вже існуючих компонентів систем діагностування механічних параметрів ПГ.

Запропоновано узагальнену структурну схему програмної частини (рис.9) комп’ютеризованої системи діагностування механічних параметрів ПГ, використання якої дозволяє реалізувати функції вимірювання та оброблення сигналів для отримання контрольно-діагностичної інформації під час визначення механічних параметрів ПГ. Програмна частина системи складається з двох основних частин: програмного забезпечення (ПЗ) ІВК і ПЗ СТД (модуль збирання, оброблення та аналізу даних).

У свою чергу первинний модуль збирання та оброблення даних складається з наступних частин: модуля ПЗ перетворювача ємність-код (ПЄК) і керування його роботою, модуля конфігурації системи ІВС, модуля первинного оброблення сигналу та модуля обміну даними між апаратно-програмними засобами

ІВК та СТД системи діагностування механічних параметрів ПГ. Модуль конфігурації забезпечує зв'язок МК з СТД для отримання сигналів керування за допомогою інтерфейсу зв'язку. ПЗ СТД складається з наступних основних частин: модуля вводу та виводу інформації, інтерфейсу користувача, модуля керування роботою ПМЗ та обміну даними з системою МК, модуля автоматичного контролю механічного параметру, модуля математичного оброблення даних, модуля організації зберігання даних.

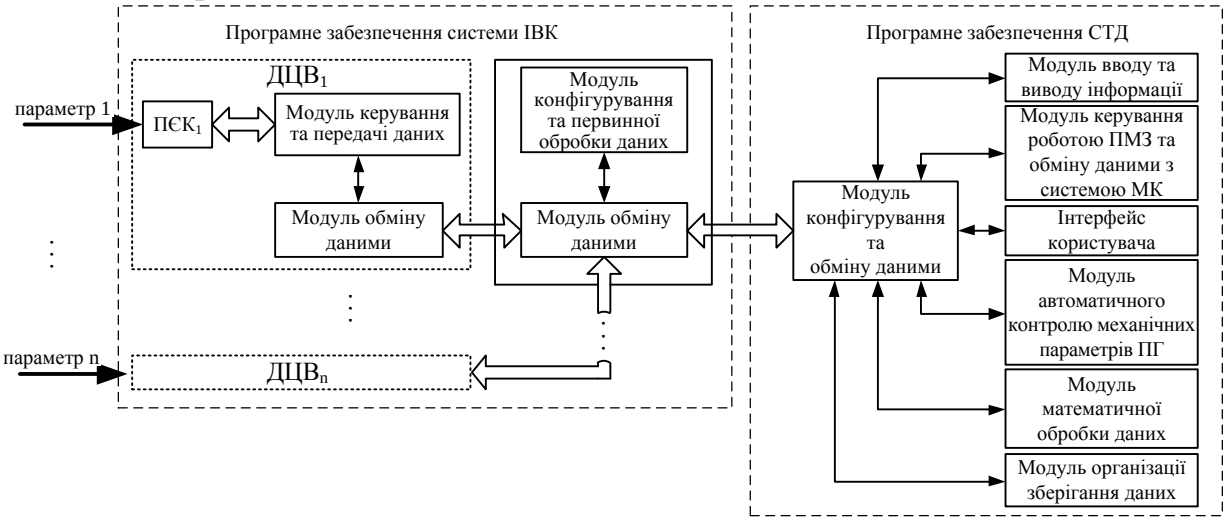

Рис. 9 Узагальнена структурна схема програмної частини комп’ютеризованої системи діагностування механічних параметрів з ємнісними сенсорами: ПЄК – перетворювач-ємність код; ДЦВ – вимірювальний перетворювач з цифровим виходом

Модуль математичної обробки призначений для проведення операцій визначення величини механічного параметру. Наступна обробка отриманих даних відбувається у модулі автоматичного контролю значення та аналізу стану зазначеного параметру. Далі отримана інформація передається в модуль організації зберігання даних для ведення бази даних на основі історії вимірювань. В даному випадку з'являється можливість створення баз знань з діагностичним ознаками, які залежать від значень механічних параметрів та відповідають певному стану електроенергетичного обладнання.

Модуль керування роботою ПМЗ та обміну даними з системою ІВС має аналогічні функції модуля системи МК. Відмінністю цього модуля є наявність транспортного компонента, призначеного для сполучення програмного забезпечення із стандартними інтерфейсами зв’язку ЕОМ. Зв'язок системи ІВС і СТД здійснюється через оптоволоконну лінію за допомогою розробленого енергозберігаючого протоколу зв'язку, який входить до модуля вводу та виводу інформації, реалізованого в оптоелектронному перетворювачі. Використовуючи розроблений модуль, можна реалізувати розгалужену систему збору даних з первинних модулів. Також модуль вводу та виводу інформації призначений для організації обміну між модулями програмного забезпечення СТД.

Для підвищення достовірності та точності отримання результатів вимірювання, перетворення та обробки контрольно-діагностичної інформації оптоелектронними комп’ютеризованими системами діагностування механічних параметрів ПГ було:

– створено математичні моделі та алгоритми забезпечення компонентів призначених для утворення, збору, обробки й отримання контрольно-діагностичної інформації в оптоелектронних комп'ютеризованих системах діагностування механічних дефектів потужних генераторів, що підвищило достовірність їх діагностування;

– удосконалено метод визначення параметрів обвідної полюсів ротора гідрогенератора на основі застосування методу найменших квадратів до даних, отриманих за допомогою встановлених на розточенні осердя статора сенсорів комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору, що дало змогу зменшити у 2-3 рази вплив розкиду радіальних розмірів полюсів ротора на результат визначення параметрів таких дефектів гідрогенератора, як ексцентриситет і перекіс ротора, елліпсність розточення осердя;

– розроблено метод апроксимації функцій перетворення оптоелектронних вимірювачів механічних параметрів цифровими методами, що дозволило підвищити точність оцінок даних вимірювань механічних параметрів основних вузлів ПГ при мінімальному числі точок контролю отриманих експериментальних даних;

– створено новий метод корекції похибки, обумовленої перекосом електродів змінного конденсатора для напівдиференціального ємнісного сенсора вимірювача зусиль в стяжних призмах осердя статора ТГ, що дало можливість підвищити достовірність діагностування та контролю тиску спресованості осердя статора.

Для забезпечення автоматизації процесу визначення типу ексцентриситету ротора потужного ГГ, його величини та кута направлення запропоновано модель зміни розподілу повітряного зазору $d_{VZ}(\theta_n)$ між полюсами ротора та розточенням осердя статора в залежності від кутового положення ротора θ відносно точки розташування сенсора

$$d_{VZ}(\theta_n) = d_X(\theta_n)\left(1 + f_{mse}(\theta) + f_{mde}(\theta_n) + f_{mp}(\theta_n)\right) + \Delta, \qquad (2)$$

де $d_X(\theta_n)$ – виміряне значення повітряного зазору; $f_{mse}(\theta) = e_S \cos(\theta)$ – функція, яка обумовлена значенням статичного ексцентриситету; $f_{mde}(\theta_n) = e_{de} \cos(\theta_n - \omega_{me} t_n)$ – функція, яка обумовлена значенням динамічного ексцентриситету; ω_{me} – модуляційна частота зміни траєкторії центру симетрії руху ротора; e – значення ексцентриситету; Δ – товщина сенсора, що знаходиться в повітряному зазорі.

У разі наявності статичного ексцентриситету з урахуванням (2) маємо

$$d_{VZes} = R_{st} - R_{rot} + \sqrt{R_{rot}^2 - (e_{se} \sin\alpha_{se})^2}, \qquad (3)$$

де R_{rot} – номінальний розрахунковий або середній радіус обвідної полюсів ротора; R_{st} – номінальний розрахунковий або середній радіус розточення статора; α_{de} – кут ексцентриситету.

Для динамічного ексцентриситету отримаємо

$$d_{VZde}(t) = R_{st} - \sqrt{\left[(R_{rot} + e_{de}) \cdot \sin\alpha_{de}\right]^2 + \left[(R_{rot} - e_{de}) \cdot \sin\alpha_{de}\right]^2}\ . \qquad (4)$$

Для змішаного ексцентриситету отримаємо

$$d_{VZme}(t) = R_{st} - \sqrt{R_{rot}{}^2 - \left(e_{me} \cdot d_{VZ}(\theta_n) \cdot \sin(\omega_{me} t + \alpha_{me})\right)^2} - \\ -e_{me} \cdot d_{VZ}(t, \theta) \cdot \cos(\omega_{me} t + \alpha_{me}) \quad (5)$$

Кут ексцентриситету випадків описаних виразами (3)-(4) визначається, як

$$\alpha(\theta_n) = \operatorname{arctg} \frac{d_{XV}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}{d_{XG}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}. \quad (6)$$

Застосування запропонованих моделей для оброблення отриманих інформаційних сигналів з сенсорів повітряного зазору в системах діагностування ПГ є доцільним при проектуванні та реалізації програмно-математичного забезпечення цих систем, а також надає можливість в подальшому вивчати характер виникнення ексцентриситету, зміни його типу в залежності від режиму роботи машини.

Для визначення геометричних параметрів форми обвідної полюсів ротора, спотворення яких, в багатьох випадках призводить до аварійних ситуацій. Розроблено математичну модель з використанням методу найменших квадратів та моделей на основі канонічних рівнянь кола та еліпса. Запропонований метод на відміну від існуючих, має переваги в швидкості розрахунків при визначені обвідної форми ротора. Він є не залежним від значення нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора, що в свою чергу призводять до появи несиметричного розташування точок визначення форми обвідної полюсів ротора, а також наявності пропущених та/або нульових результатів вимірювань повітряного зазору. Для підвищення точності визначення параметрів обвідної полюсів ротора за наявності дисперсії значень повітряного зазору запропоновано метод на основі використання теорії статистичного аналізу кругових спостережень та методів диференціальної геометрії.

Запропоновано використання методу оцінки пікової довжини хвилі вихідного сигналу сенсорів з решітками Брегга, який дозволяє підвищити завадостійкість системи діагностування ступеню стиснення, за рахунок зменшення дії вібрації та шумів на оптичну систему. Метод базується на використанні методу найменших квадратів із апроксимуючою Гаусовою функцією отриманого сигналу $u(x_i)$ з ПЗС лінійки. В результаті чисельної оцінки було визначено, що використання методу дозволяє зменшити похибку визначення оцінки координати x_i в 2-3 рази.

Запропоновано метод лінеаризації характеристик вимірювальних перетворювачів систем контролю та діагностики параметрів механічних дефектів ПГ, що базується на використанні функції апроксимації, в основу яких покладений метод найменших квадратів. Це дозволило мінімізувати похибки викликані нелінійністю характеристик первинного вимірювального перетворювача (сенсора) та впливу робочого середовища ПГ на ІВК.

Для контролю стану пресування осердя статора потужного турбогенератора розроблено метод корекції похибки від перекосу рухомого робочого електрода напівдиференціального ємнісного сенсора зусиль в стяжних призмах, що викликана згинанням пружного елемента під час експлуатації. Метод базується на розділенні електрода робочого сенсора по радіусу на два концентричних електрода у визначеному співвідношенні, що дає змогу створити два вимірювальних конден-

сатори, вимірювання співвідношення ємностей яких здійснюється з використанням розробленого спеціалізованого алгоритму. Створений метод дозволяє зменшити похибку від перекосу приблизно в сто разів.

У дисертаційній роботі також запропоновано та розроблено блок-схему апаратно-програмного забезпечення вторинного вимірювального перетворювача ІВК системи діагностування ПГ (рис.10) на базі інтегральних мікросхем CDC та алгоритм його функціонування.

Використання результатів досліджень дозволило реалізувати апаратно-програмного забезпечення систем діагностування механічних параметрів ПГ, автоматизувати процес вимірювання контрольно-діагностичних параметрів та забезпечити необхідний рівень ефективності контролю та діагностики зазначених машин.

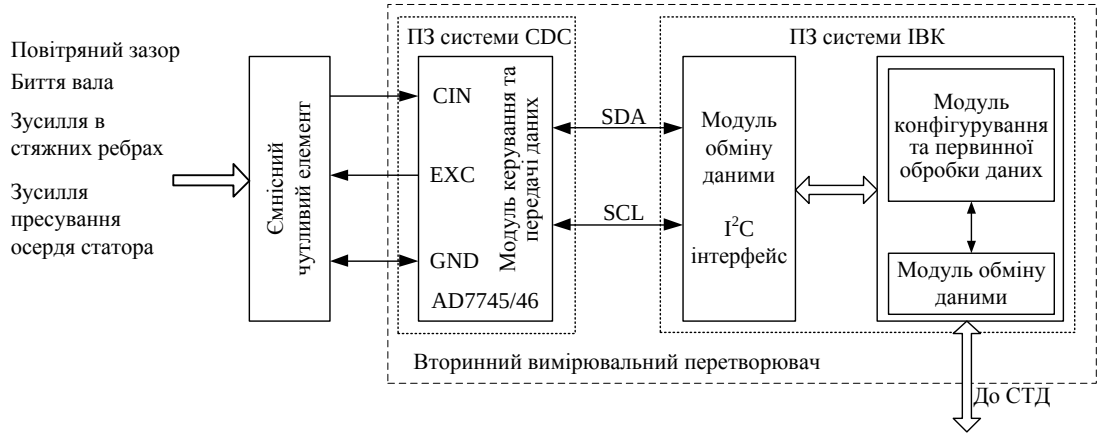

Рис. 10 Блок-схема апаратно-програмного забезпечення вторинного вимірювального перетворювача ІВК системи діагностування ПГ

У четвертому розділі наведено результати досліджень з вирішення питань встановлення можливостей застосування розроблених систем діагностування механічних параметрів ПГ, які визначаються технічними характеристиками ПВП (сенсорів) ІВК та допоміжних механічних елементів в конструкціях сенсорів (наприклад: для систем діагностування зусилля пресування осердя статора ТГ при його складанні застосовується спеціальний пружний силоспприймаючий елемент). Для визначення таких можливостей в дисертаційній роботі аналітично визначено функції перетворення сенсорів, оцінено вплив технологічних похибок виготовлення сенсорів та дефектів їхнього встановлення на машині, аналітично розраховані функціональні залежності для спеціальних пружних силоспприймаючих чутливих елементів.

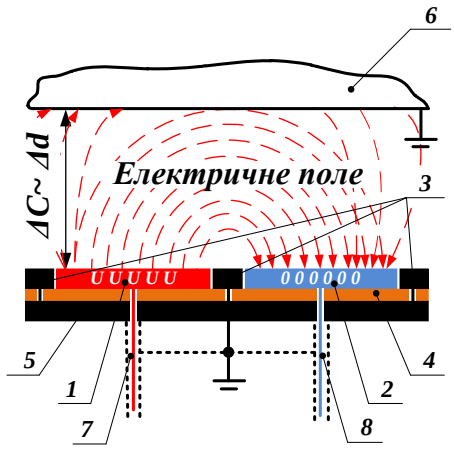

Рис. 11 Схема ємнісного сенсора з компланарними електродами для вимірювання відстані до металевої заземленої поверхні

Для використання в складі гібридних вимірювачів ПМД запропоновано структуру та принцип функціонування ПВП (сенсора) із компланарними електродами (рис. 11), застосування якого дозволяє усунути недоліки ВВП існуючих аналогів, яким притаманна складність та використання спеціального триаксіального кабе-

лю.

Сенсор складається з високопотенціального електрода 1, низько потенціального електрода 2 та додаткового заземленого електрода 3. Електроди 1, 2 та 3 розміщені в одній площині та ізольовані один від одного та від корпусу електричної машини і корпусу ВВП.

Під час вимірювання від генератора з ВВП на електрод 1 подається змінна напруга, при цьому змінний струм залежить від електричної ємності між електродами 1 і 2. Електрична ємність сенсора між електродом 1 і електродом 2 визначається його геометричними розмірами і відстанню d_X між спільною площиною електродів 1 і 2 та поверхнею 6. Зміна відстані між поверхнею сенсору та заземленою поверхнею конструктивного елементу, вузол якого контролюється на Δd, викликає зміну ΔC електричної ємності C_X між електродами 1 і 2. У цьому разі функціональна залежність C_X від зміщення матиме вигляд $C_X=K\cdot f(d_X)$, де K – коефіцієнт пропорційності. Значення ємності C_X, що визначається при використанні запропонованого компланарного ємнісного сенсора є близько прямопропорційним зміні d_X, завдяки чому збільшується чутливість і точність вимірювання механічних параметрів.

Розширення діапазону вимірювання в запропонованій структурі забезпечується за розміщенням частини додаткового електрода 3 поміж високопотенціальним 1 та низькопотенціальним 2 електродами. Окрім того введення додаткового електрода між високопотенціальним та низькопотенціальним електродами, з забезпеченням мінімальних зазорів між електродами, дозволяє зменшити вплив крайових ефектів на результат вимірювання, що, у свою чергу, дозволяє збільшити точність.

Для ПВП ІВК системи діагностування повітряного зазору в капсульних ГГ СГК538/160–70М (рис.3), досліджена функція перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору з двома робочими компланарними паралельними електродами. Проведені дослідження дозволили встановити, ємність сенсора, в якому низькопотенціальний електрод 2 має довжину L_2 (в напрямку, перпендикулярному площині рис. 11), визначиться, як

$$C_{12} = L_2 \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \cdot \ln\left(\operatorname{th}\frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th}\frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2 \Bigg/ 4\operatorname{th}\frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th}\frac{\pi s}{4d}, \qquad (7)$$

де $\varepsilon_0 = 8{,}8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; $\varepsilon_r = 1{,}00056$ – діелектрична проникність повітря; b – ширина електродів 1 та 2; s – відстань між електродами 1 і 2; d – відстань між площиною електродів 1 і 2 та поверхнею 6.

На рис. 12, крива 1 ілюструє графік розрахункової залежності $C_X=f(d_X)$ для сенсора, який розроблено для використання на капсульному ГГ типу СГК 538/160-70М з урахуванням конструктивних особливостей зазначених машин (розміри сенсора b = 12 мм, s = 2 мм та L_2 =180 мм). На рис.12, крива 2 ілюструє експериментально отриману залежність $C_X=f(d_X)$.

Проведено дослідження впливу деяких технологічних похибок ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі на точність вимірювання. Отримано аналітичні залежності для визначення похибки від поздовжнього переко-

су (відхилення від паралельності загальної площини електродів сенсора і твірною циліндричної поверхні розточення осердя статора) при встановленні на розточенні осердя ємнісного сенсора. На рис. 13 приведено отриману залежність похибки від величини зазору $\delta_{П}=f(d)$ в гідрогенераторі для діапазону вимірювання від 2 до 10 мм (при перекосі $\alpha \cong \mathrm{tg}\alpha=0{,}001$). Через велику довжину сенсора, похибка, зумовлена перекосом в цьому напрямку, є досить значною.

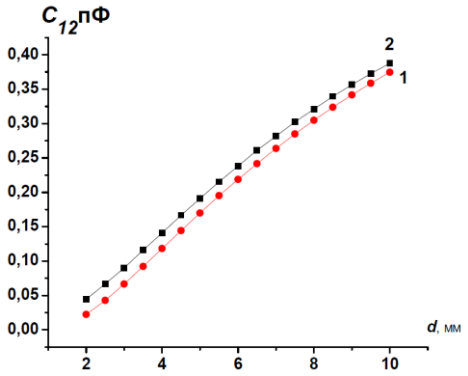

Рис. 12 Залежність $C_X=f(d_X)$

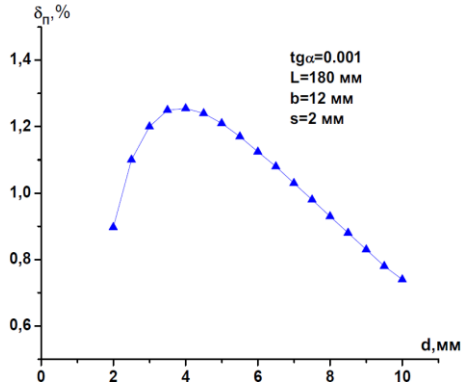

Рис. 13 Залежність $\delta_{П}=f(d)$

Була встановлена залежність для визначення похибки δ_d вимірювання повітряного зазору розробленим сенсором, яка зумовлена кривизною поверхні розточення осердя статора. Ця похибка є адитивною та визначається, як

$$\delta_d = R_{\mathrm{P}}\left[1-\cos\left(\arcsin l\cdot\left(2R_{\mathrm{P}}\right)^{-1}\right)\right], \qquad (8)$$

де R_{P} – радіус розточення осердя статора; l – ширина сенсора.

Якщо сенсор шириною l=30 мм встановити на розточенні осердя статора гідрогенератора СГК 538/160-70М, то похибка від кривизни розточення осердя складе $\delta_d = 0{,}041822$ мм.

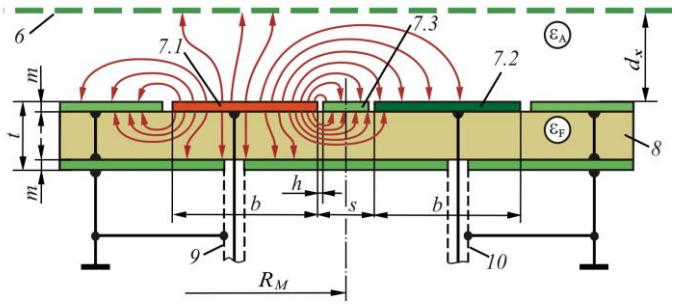

Рис. 14 Схема сенсору системи контролю тиску пресування

Для ПВП ІВК системи діагностування та контролю зусилля пресування осердя статора ТГ визначені функції перетворення багатоелементних секторних компланарних ємнісних сенсорів, за допомогою яких вимірюється хід тарілчастих пружин в силових акумуляторах системи стабілізації тиску пресування (рис.14). У цьому разі функція зміни інформативної складової ємності $C_{7.1,7.2}$ (з урахуванням того, що довжина сумарної середньої лінії між електродами 7.1 і 7.2 складає $L_{7.1,7.2}=NR_{\mathrm{M}}\alpha$) визначиться як

$$C_{7.1,7.2\mathrm{A}} = \varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{A}}\frac{\alpha}{\pi}NR_{\mathrm{M}}\cdot\ln\frac{\left(\mathrm{th}\dfrac{\pi s}{4d_X}+\mathrm{th}\dfrac{\pi(s+2b)}{4d_X}\right)^2}{4\mathrm{th}\dfrac{\pi(s+2b)}{4d_X}\,\mathrm{th}\dfrac{\pi s}{4d_X}}, \qquad (9)$$

де N – кількість елементарних ємнісних сенсорів; α – кутовий розмір елементарного сенсора; R_M – радіус середньої лінії розміщення електродів 7.2, 7.2 і 7.3.

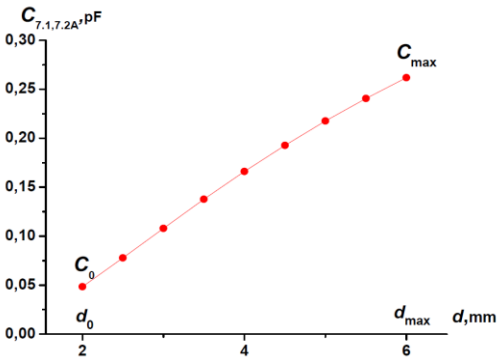

Рис. 15 Функція перетворення сенсору

На рис. 15 показано графік отриманої функції перетворення за виразом (9).

Застосуванням секторних концентричних компланарних ємнісних сенсорів ходу тарілчастих пружин в засобах стабілізації тиску пресування, дозволило розробити новий метод контролю зусиль в стяжних призмах осердя статора потужного генератора, що дає можливість більш достовірного контролю тиску пресування в осерді.

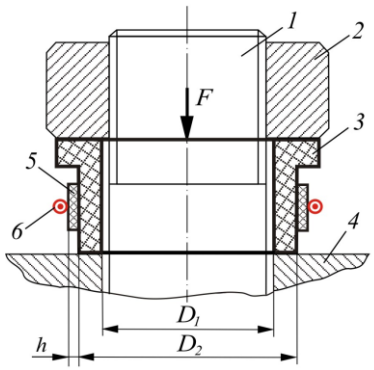

Рис. 16 Схема сенсору системи контролю тиску пресування

Розроблено метод контролю тиску пресування осердя статора з застосуванням оптичних комірок Брегга (БР). Конструктивна схема розробленого сенсора приведена на рис.16. У цьому випадку ПЧЕ встановлюється на призмі 1 ТГ і стискується між стяжною гайкою 2 і натискною плитою 4 ТГ. При цьому на ПЧЕ 3 з легким натягом монтується на кільці 5 товщиною h, виготовлене з фібергласу. На кільці 5 спеціальним клеєм і за спеціальною технологією наклеєне скловолокно 6 зі сформованими в ньому основною БР (яка вимірює поздовжню деформацію волокна 6) та термокомпенсаційною БР. Період Λ в обох БР однаковий. Механічна напруга ε, прикладена вподовж оптичного волокна 6, розтягне його серцевину і змінить період Λ основного БР. Функцію перетворення сенсорів на основі комірок Брегга визначиться як зміна $\Delta\Lambda$ величини Λ в залежності від конструктивних параметрів сенсора

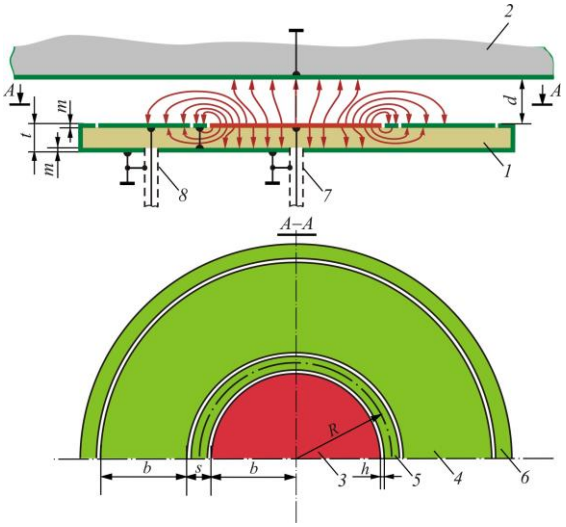

Рис. 17 Схема сенсору з концентричними електродами

$$\Delta\Lambda = \frac{\Delta A}{N} = \frac{8\nu_F\left(D_2 + 2h\right)}{N\left(D_2^2 - D_1^2\right)} \cdot \frac{F}{E_F}, \qquad (10)$$

де N – кількість періодів ВБР.

Визначено функцію перетворення ємнісного сенсора відстані до заземленої поверхні з концентричними компланарними електродами (рис.17), який може бути застосований ІВК вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату. Робоча ємність сенсора C_{34P} з урахуванням того, що довжина середньої лінії між електродами 3 і 4 складає $L_{34}=2\pi R=2\pi(b+s/2)$, складе

$$C_{34\text{P}} = 2\varepsilon_0\varepsilon_r\left(b+\frac{s}{2}\right)\ln\frac{\left(\text{th}\dfrac{\pi s}{4d}+\text{th}\dfrac{\pi(s+2b)}{4d}\right)^2}{4\text{th}\dfrac{\pi(s+2b)}{4d}\,\text{th}\dfrac{\pi s}{4d}}. \qquad (11)$$

Для систем контролю тиску пресування осердя статора в процесі його складання розроблені спеціалізовані вимірювальні комірки (рис.18), що складаються з мембрани із жорстким центром *2*, характеристика якої лінійна при малих прогинах та ємнісного сенсору *1* (рис. 18), який призначений для вимірювання мікропереміщень W_X жорсткого центру мембрани під дією питомого тиску пресування. Графік аналітично отриманої залежності $C_X=f(W_X)$ приведено на рис. 19.

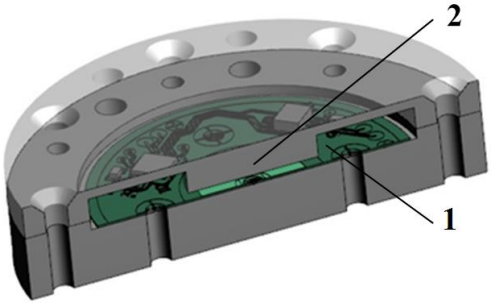

Рис. 18 Конструктивна схема вимірювальної комірки

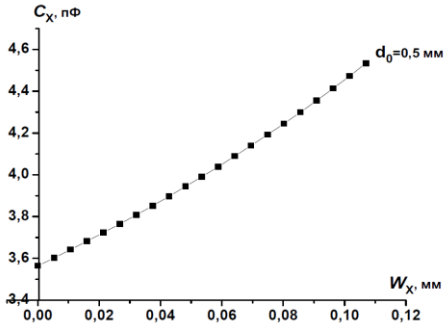

Рис. 19 Залежність $C_X=f(W_X)$

П'ятий розділ присвячено розробці завадостійких ВВП механічних параметрів ПГ, в яких окрім того забезпечується завадостійкість ліній передавання інформаційних сигналів та ліній живлення в ІВК.

Розроблено блок-схему завадостійкого та компактного ВВП з ємнісними сенсорами, які утворені компланарними електродами. В ВВП застосовано інтегральні мікросхеми AD7745/ AD7746, які інтегровані в конструкцію сенсорів (рис.20). На рис. 21 представлено узагальнену блок-схему зазначеного ВВП, за допомогою якого здійснюється вимірювання інформативної ємності сенсора з використанням трьох затискної потенційно-струмової схеми підключення, що дозволяє уникнути впливу взаємних паразитних ємностей та витоків.

Розроблені принципові електричні схеми ВВП (на базі мікросхем AD7745/ AD7746) для вимірювання механічних параметрів різного типу в ПГ, в яких використовується або напівдиференціальний, або диференціальний режими вимірювання та зразкова міра ємності. Такі ВВП можуть бути об'єднуватись в багатоканальні системи.

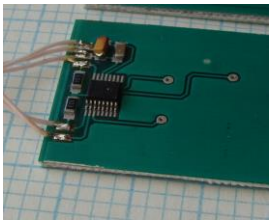

Рис 20 Приклад інтеграції ВВП в конструкцію ємнісного сенсора

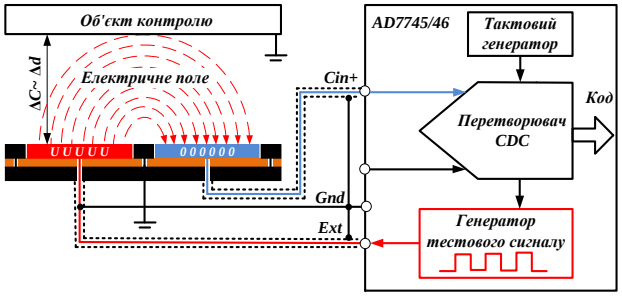

Рис 21 Блок-схема ВВП ІВК

Під час вимірювання параметрів швидкозмінних процесів (наприклад, повітряного зазору між розточенням осердя статора та кожним полюсом ротора в потужному ГГ) використання ВВП на основі інтегральних мікросхем AD7745/ AD7746 є практично неможливим через їхню низьку швидкодію. Проблема забезпечення необхідної швидкодії може бути вирішена використанням компенсаційно-мостового вимірювача з аналоговим або дискретним (цифровим) виходом. На рис. 22 наведено блок-схему а компенсаційно-вимірювального ВВП, складовими елементами якого є: Сх – ємнісний сенсор; C_0 – зразковий конденсатор; 1 – заземлена металева поверхня; 2 – комутатор; ДЖ – джерело живлення; ОУ – операційний підсилювач; ФД – фазочутливий детектор; Інт – інтегратор; ТГ – тактовий генератор імпульсів.

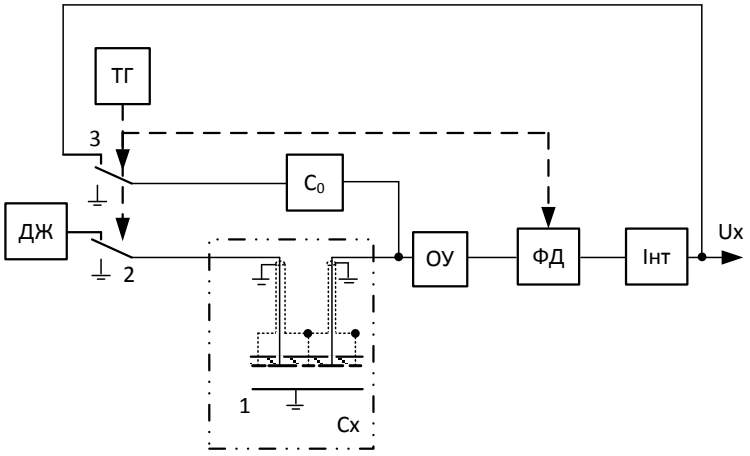

Рис. 22 Блок-схема компенсаційно-вимірювального ВВП

Схема працює в такий спосіб. Імпульси з виходу генератора ТГ безперервно, з частотою в 30–70 кГц, керують роботою комутаторів 2 і 3. При цьому комутатори синхронно перемикаються з одного положення в інше таким чином, що на їхніх входах формується змінна напруга з прямокутною формою сигналу типу «меандр».

Система автоматичного зрівноважування, утворена послідовно включеним підсилювачем ОУ, фазочутливим детектором ФД та інтегратором Інт, зводить сигнал на вході підсилювача ОУ до нуля. В цьому випадку падіння напруги на зразковому конденсаторі C_0 дорівнює напрузі на виході комутатора 3, а струми через зразковий конденсатор C_0 і сенсор C_x рівні між собою.

Напруга U_X на виході ємнісного вимірювача буде становити

$$U_X = U_{DG} \frac{C_0}{C_X}, \qquad (12)$$

де U_{DG} – напруга на виході ДЖ; C_0 – ємність зразкового конденсатора ; C_X – робоча ємність сенсора.

Вперше для вирішення складного завдання забезпечення завадостійкості та стабільності запропоновано та розроблено структурні схеми живлення ВВП та принципи їхнього функціонування, які умовно можна розділити на наступні:

а) з автономним живленням:

– за допомогою енергії батарейного живлення, розташованого безпосередньо біля ПВП та або ВВП ІВК;

– за допомогою енергії із ДЖ, реалізованих за технологією "Energy Harvesting" та розташованого безпосередньо біля ПВП та або ВВП ІВК;

б) з живленням через волоконно-оптичну лінію (ВОЛ):

– за допомогою енергії, переданої через енергетичний ВОЛ, де може бути використано:

1) одномодовий світловод;

2) багатомодовий світловод;

3) оптичний джгут;

– за допомогою енергії, яка передається через інформаційно-енергетичний ВОЛ, реалізований на основі технологій "Wavelength-Division Multiplexing" (багатомодовий світловод).

Зазначено, що застосування технології живлення вимірювальних перетворювачів ІВК з використанням автономних джерел живлення на базі технології "Energy Harvesting" та технології живлення через оптоволоконні лінії з використанням фотовольтаїчних елементів що дозволяє: зменшити вплив потужних магнітних полів на лінії живлення; забезпечити живлення вимірювачів та їхніх електронних компонентів на необхідному рівні без застосування додаткових перетворювачів та електронних елементів.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що у зв'язку з різною природою електричних і оптичних сигнали виникає потреба в розробці спеціальних узгоджувальних перетворювачів цифрових електричних інформаційних сигналів в цифрові оптичні сигнали та у зворотному напрямку для ІВК. Для реалізації узгоджувальних оптоелектронних перетворювачів було удосконалено метод енергозберігаючого кодування вимірювальної інформації та створено пристрій, що його реалізує. Пристрій було застосовано в гібридних вимірювачах механічних параметрів ПГ що дозволило реалізувати простий протокол обміну даними між компонентами систем.

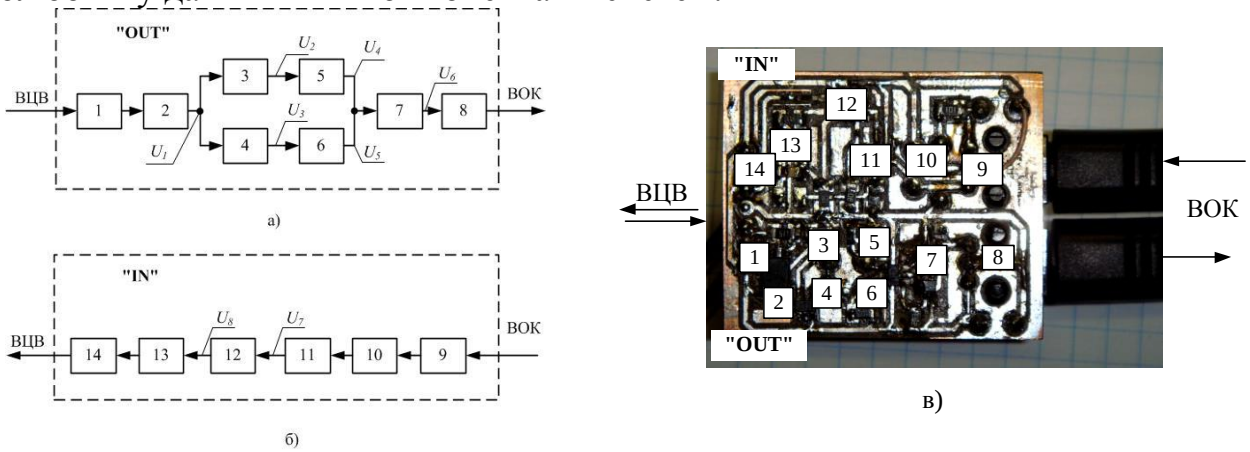

Рис 23 Оптоелектронний узгоджувальний перетворювач ІВК

Конструкція пристрою складається з двох частин: "OUT" (рис. 23, *а*), що містить блоки 1-8, та "IN" (рис. 23, *б*) до складу, якого входять блоки 9-14. Частина "IN" призначена для перетворення коду NRZ в оптичний код для передачі по ВОК, а частина "OUT" – для зворотного перетворення оптичнчного сигналу із ВОК в код типу NRZ. На блок-схемі ОЕП (рис. 23) показано: 1, 14 – гальванічні розв'язки та відповідні інтерфейси; 2,5,6,11 – буфери на логічних елементах; 3, 4 – диференціальні ланки; 7 – логічний елемент "АБО"; 8 – волоконно-оптичний передавач; 9 – волоконно-оптичний приймач; 10 – смуговий фільтр; 12 – перетворювач; 13 – аналізатор.

Використання пристрою с складі ІВК та алгоритму обміну даними дало змогу знизити потужність живлення засобів отримання первинної інформації, що знаходяться в зоні дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування, приблизно в 10 разів. Розроблено експериментальний зразок ІВК з оптоелектронним перетворювачем для системи діагностування зусиль стягування в стяжних призмах ПГ, загальний вид якого показано на рис. 23, на якому: 1.1 – первинний перетворювач з ємнісним сенсором та спеціальним пружним трубчастим елементом; 1.2 – вторинний вимірювальний перетворювач ємність/код; 2 – мікроконтролер; 3 – перетворювач код/світло (світло/код); 4 – джерело живлення; 5 – волоконно-оптична лінія зв’язку; 6 – апаратно-програмні засоби вимірювальної інформації.

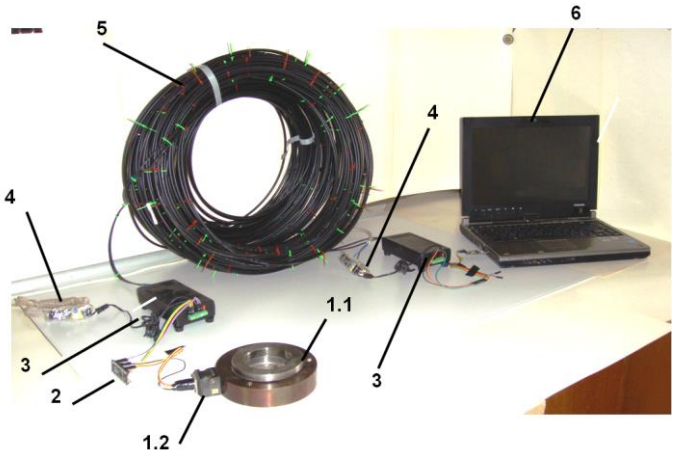

Рис. 22 Фотографія макету гібридної системи діагностування зусиль стяжних призмах ПГ

Проведена розробка та дослідження принципів функціонування та структури компонентів ІВК оптоволоконних систем діагностування механічних параметрів ПГ, на основі розробленої моделі ортогонального дискретного фазового детектора та синтезатора частоти опорних сигналів системи. Це надало змогу оцінити похибку, яка обумовлена некратністю періоду вимірювального сигналу до інтервалу дискретизації, а також похибку через відхилення окремих інтервалів дискретизації на випадкову величину від їх розрахункових значень. Запропоновано компенсацію похибки через некратність за рахунок введення поправочного коефіцієнта, значення якого обернено пропорційно величині відхилення. У свою чергу, похибка, обумовлена величиною випадкового відхилення інтервалу дискретизації від розрахункового значення, не може бути компенсована, і її значення в одиницях довжини в гіршому випадку становить 0,3 мм (при частоті модуляції лазерного випромінювання 25МГц).

Шостий розділ присвячено експериментальним дослідженням розроблених та впроваджених компонентів ІВК систем діагностування механічних параметрів ПГ. Головною метою цих досліджень є перевірка прийнятих теоретичних положень, які застосовані при створенні компонентів ІВК. Значна увага при проведенні цієї частини досліджень приділялася визначенню технічних характеристик компонентів ІВК, можливості їх використання в умовах впливу сильних електромагнітних полів та значних робочих температур об'єктів діагностування.

Для проведення експериментальних досліджень вимірювача повітряного зазору в потужних ГГ було створено макет вимірювача і стенд для його перевірки (рис. 23). Було експериментально перевірено новий ємнісний сенсор зазору, а також методи, алгоритми та програмне забезпечення вимірювача.

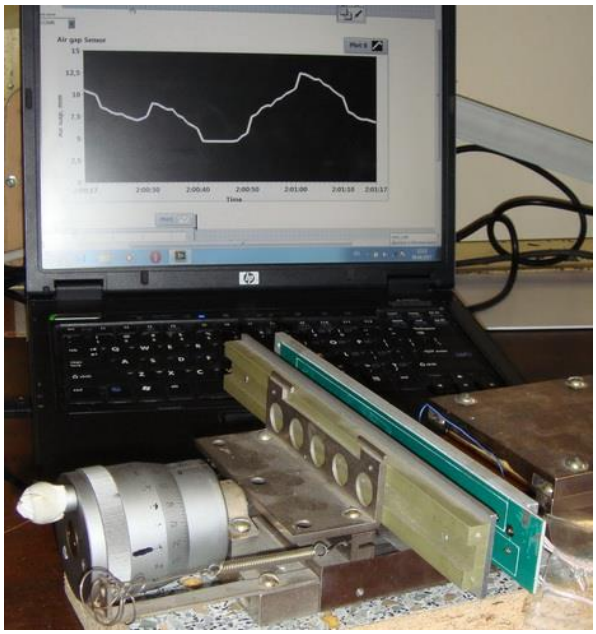

Рис. 23 Фотографія макету системи діагностування повітряного зазору

Розроблений вимірювач зазору в порівнянні з зарубіжними аналогами відрізняється схемною простотою і при однакових метрологічних характеристиках суттєво (у 3...5 разів) дешевший. Результати проведених досліджень дозволяють створювати сенсори для вимірювання зазору в межах від 6 мм до 50 мм для різних типів гідрогенераторів. При цьому вторинний перетворювач для всіх сенсорів є універсальним.

На рис. 12 показано графік експериментально отриманої функції перетворення вимірювача зазору в гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М, в якому застосовано ємнісний сенсор з компланарними електродами.

Для можливості практичного застосування отриманої залежності з метою її лінеаризації було використано методи апроксимації, засновані на регресивному аналізі експериментально отриманих даних. Внаслідок аналізу 20 експериментальних точок проведена оцінка, в результаті якої було отримано, що найбільше значення відхилення коефіцієнта детермінації від одиниці має місце у випадку використання поліноміальної моделі другого порядку, як функціональної залежності, а найменше значення забезпечує використання поліномів 3-го, 4-го порядку зі значенням коефіцієнта детермінації, близьким до одиниці.

Було досліджено вплив зміни температури від -40 до + 80^{0}С на характеристики ємнісного сенсора зазору (рис.24) під час підняття температури ($C_{12П} = f(T)$,крива 2) та під час її зниження ($C_{123} = f(T)$, крива 1). Лінія 3 на рис. 24 відповідає ємності сесора при температурі 20^{0}С.

На рис. 25 показано графік відносної похибки зміни ємності під час підняття температури ($\delta_{12П} = \left(C_{12П} - C_H\right) / C_H \cdot 100\%$, крива 2) та графік такої ж похибки під час зниження температури ($\delta_{123} = \left(C_{123} - C_H\right) / C_H \cdot 100\%$, крива 1).

Під час дослідження впливу зміни магнітної індукції B_λ зовнішнього магнітного поля на ємнісний вимірювач зазору було встановлено, що індукція величиною до 0,63 Т викликає зміну ємності сенсора (на 0,0006pF рис. 26) і, відповідно, не призводить до значної похибки у вимірюванні повітряного зазору.

Для перевірки результатів теоретичних досліджень було створено макетний зразок комп'ютеризованої системи контролю зусиль пресування осердя статора ПГ типу ТГВ-200 та ТГВ-300, при їх експлуатації та в процесі складання. Це надало змогу експериментально дослідити ємнісні сенсори з інтегрованим ВВП, які призначені для ІВК системи. Проведені дослідження підтверджують правильність застосування розрахункових моделей для сенсорів при визначенні їх функції перетворення, а також можливість їх використання в сукупності з ВВП в се-

редовищі об'єкту діагностування. Система діагностування була випробувана при складанні осердя статора турбогенератора типу ТГВ-250-2ПТ3.

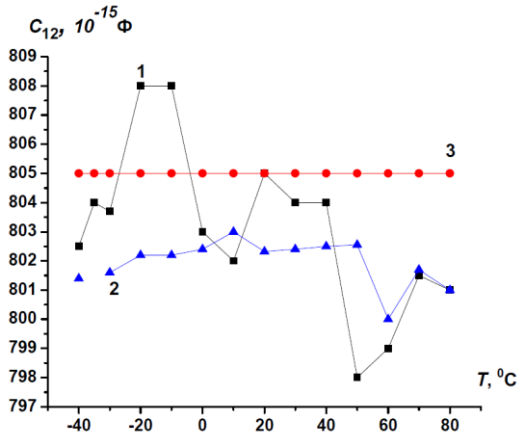

Рис. 24 Графіки залежностей $C_{12П} = f(T)$ і $C_{123} = f(T)$

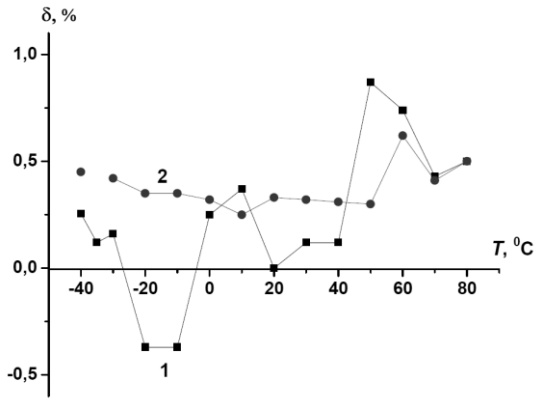

Рис. 25 Графіки залежностей $\delta_{12П} = f(T)$ і $\delta_{123} = f(T)$

Розроблено та випробувано експериментальний зразок ємнісного сенсора з концентричними електродами для ІВК системи діагностування радіального биття циліндричних поверхонь валів. Експериментально отримана функція перетворення вимірювача приведена на рис. 27, крива 1 та крива 2 отримана розрахункова залежність. Метрологічні характеристики отриманого ІВК знаходяться на рівні характеристик кращих світових аналогів, але при цьому сам ІВК для системи діагностування ПГ є значно простіший і суттєво дешевший (у 2...4 рази) за існуючі аналоги.

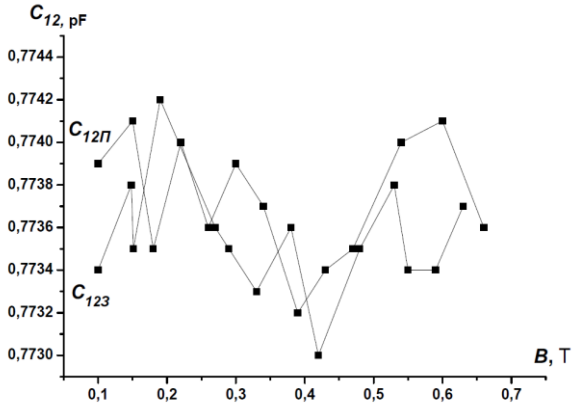

Рис. 26 Графіки залежностей $C_{12П} = f(B)$ і $C_{123} = f(B)$

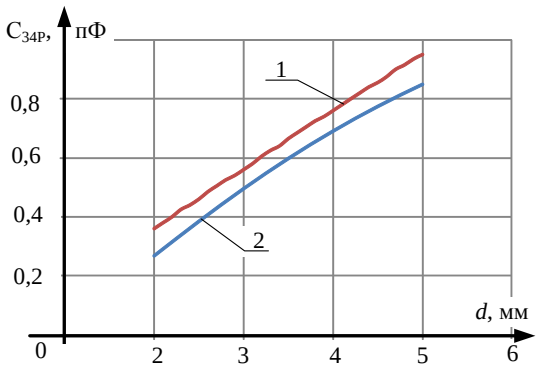

Рис. 27 Графіки залежностей $C_{12П} = f(T)$ і $C_{123} = f(T)$

Проведене випробування ВВП на основі конвертора CDC для ІВК систем діагностування ПГ на вплив зміни температури та дії електромагнітного поля промислової частоти показало, що поле з магнітною індукцією до 0,6 Т та зміна температури в діапазоні -30 +80 С практично не вносить похибки у вимірювання.

Розроблено, досліджено та випробувано макетний зразок комп'ютеризованої оптоволоконної системи контролю та діагностики параметрів МД ПГ із фазовим ВВП в ІВК. Це дозволило дослідити експериментальний зразок цифрового фазового ортогонального детектора та малогабаритного синтезатора частоти**.** Проведені експериментальні дослідження цифрового фазового ортогонального детектора дозволили встановити, що СКВ випадкової похибки вимірювання

амплітуд вібрацій становить 0,012 мм, розрізнювальна здатність дорівнює 0,01 мм, частотний діапазон складає від 15 до 15000 Гц. Для малогабаритного синтезатора частоти визначено, що середнє значення похибки δ_M встановлення частоти для макетного зразка складає не більше 1%, при цьому для імітаційної моделі складало не більше 0,3%. Використання розробленого фільтра дозволяє зменшити значення похибки δ_M для макетного зразка до 0,4%.

Для перевірки результатів досліджень компонентів систем діагностування механічних параметрів (биття вала, повітряного зазору та інших), створення, налагодження програмного забезпечення та проведення лабораторних випробувань було використано випробувально-демонстраційний стенд, фотографія якого приведена на рис. 28. До складу стенду входять: 1 – макет гідрогенератора; 2 – вал макету гідрогенератора; 3 – ємнісний сенсор зазору; 4 – сенсор мітки вала; 5 – система контролю механічних параметрів.

Отримані результати експериментальних досліджень підтверджують висновки теоретичних досліджень, правильність застосованих розрахункових моделей для сенсорів, функціональну роботоздатність створених компонентів ІВК систем діагностування механічних параметрів ПГ.

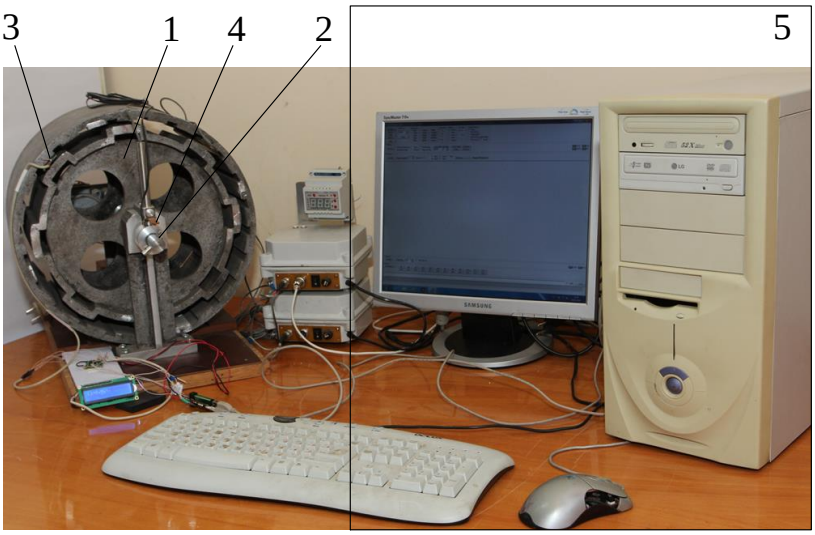

Рис. 28. Загальний вигляд випробувально-демонстраційного стенда

Результати лабораторних випробувань макетних зразків компонентів ІВК діагностичних систем будуть використані при проектуванні нових та модернізації існуючих ПГ типу ТГВ, зокрема, макет гібридного волоконно-оптичного комп'ютеризованого вимірювача зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного генератора.

Компоненти оптоелектронної системи діагностування тиску пресування осердя статора потужного ТГ використані на ДП "Завод "Електроважмаш" (м. Харків.) при складанні осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТ3.

У додатках наведено перелік основних публікацій за тематикою дисертації та відомості про апробацію; копії документів, що підтверджують впровадження та використання результатів дисертаційної роботи; протокол випробувань вимірювача зусиль пресування; методи обробки даних та визначення характеристик компонентів інформаційно-вимірювальних систем.

ВИСНОВКИ

Отримані в дисертаційній роботі результати в сукупності присвячені вирішенню важливої науково-прикладної проблеми розвитку теоретичних основ та практичної реалізації оптоелектронних систем діагностування ПГ шляхом створення нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання контрольно-діагностичних параметрів обладнання, які мають покращені технічні характеристики, малі розміри і є завадостійкими до впливу потужних магнітних полів об'єктів діагностування. В результаті забезпечується підвищення достовірності оцінювання технічного стану ПГ.

В процесі вирішення цієї проблеми були отримані наступні наукові та практичні результати:

1. На основі огляду та аналізу методів та засобів діагностування параметрів механічних дефектів ПГ визначено, що оптимальним шляхом удосконалення систем діагностування є застосування в їх структурі компонентів, реалізованих на базі ємнісних та оптичних технологій.

2. Вперше розроблено структуру апаратно-програмних засобів, які об’єднують переваги ємнісних, оптоелектронних та мікроелектронних технологій, що дозволило удосконалити теоретичні засади побудови систем діагностування механічних параметрів ПГ, до складу яких входять комп'ютеризовані ІВК. Елементи ІВК мають малі розміри, є завадостійкими до впливу потужних магнітних полів об'єктів діагностування, а також забезпечують їхнього використання на ПГ різних типів завдяки варіації первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів). Все це дає змогу підвищити достовірність оцінювання технічного стану ПГ.

3. Проведені теоретичні дослідження дозволили розробити оптоелектронні системи діагностування механічних дефектів ПГ та компоненти їх ІВК з більш високими технічними характеристиками, що дозволяє покращити якість контролю і діагностики.

4. Удосконалено метод визначення параметрів обвідної полюсів ротора гідрогенератора на основі застосування методу найменших квадратів з використанням даних, отриманих за допомогою встановлених на розточенні осердя статора сенсорів комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору, що дало змогу зменшити у 2-3 рази вплив розкиду радіальних розмірів полюсів ротора на похибку визначення параметрів таких дефектів гідрогенератора, як ексцентриситет та перекіс ротора, елліпсність розточення осердя.

5. Запропоновано метод лінеаризації характеристик вимірювальних перетворювачів ІВК систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ, що базується на використанні функції апроксимації цифровими методами з використанням методу найменших квадратів. Це дозволило підвищити точність вимірювань на 20-30% за рахунок мінімізації похибки, викликаною нелінійністю характеристик первинного вимірювального перетворювача (сенсора) та мінімізації впливу робочого середовища ПГ на ІВК.

6. Розроблено новий метод контролю тиску спресованості осердя статора генератора шляхом застосуванням секторних концентричних компланарних єм-

нісних сенсорів ходу тарілчастих пружин в засобах стабілізації тиску пресування осердя, який дозволив підвищити точність контролю тиску в 3-5 раз. Вперше аналітично та експериментально визначено функції перетворення сенсорів.

7. Вперше запропоновано метод корекції похибки, обумовленої перекосом електродів змінного робочого конденсатора в напівдиференціальному ємнісному сенсорі вимірювача зусиль в стяжних призмах осердя статора ТГ, що дало можливість підвищити достовірність діагностування та контролю тиску спресованості осердя статора. Створений метод дозволяє зменшити похибку від перекосу приблизно в сто разів.

8. Вперше запропоновано метод та розроблені компоненти для систем діагностування стану спресованості осердя статора ПГ в процесі його складання, що дозволило підвищити достовірність визначення місцезнаходження дефектів осердя, які зумовлені недоліками технології виготовлення.

9. Запропоновано та досліджено нові блок-схеми оптоелектронних систем діагностування відносного та абсолютного радіального биття циліндричних поверхонь валів ротора ПГ, які забезпечують підвищення якості контролю та діагностики машини.

10. Вперше запропоновано застосування в системах діагностування ПГ ємнісних сенсорів повітряного зазору з компланарним-паралельними електродами та перетворювачами ємність-код, розміщеними рядом з сенсором, що дозволило забезпечити підвищення метрологічних характеристик вимірювачів в 2-3 рази за рахунок мінімізації впливу паразитних електричних ємностей з'єднувальних провідників між сенсором і вторинним перетворювачем, паразитних ємностей між робочим електродом сенсора та заземленими елементами його конструкції та елементами конструкції гідрогенератора.

11. Вперше були аналітично визначені функції перетворення первинних вимірювальних перетворювачів (ємнісних та оптичних) для систем діагностування параметрів повітряного зазору, зусилля пресування при експлуатації та складанні осердя статора, відносного та абсолютного радіального биття циліндричних поверхонь валів ротора ПГ, що дозволило встановити межі застосування розроблених систем.

12. Вперше запропоновано та розроблено структурні схеми живлення вимірювальних перетворювачів ІВК, з використанням автономних джерел живлення на базі технології "Energy Harvesting" та живленням через оптоволоконні лінії з використанням фотовольтаїчних елементів, що дозволяє зменшити вплив потужних магнітних полів на лінії живлення і в результаті підвищити точність вимірювання.

13. Дістав подальшого розвитку метод енергозберігаючого кодування вимірювальної інформації для гібридних ІВК систем діагностування ПГ, що дозволило реалізувати простий протокол комунікації між компонентами систем. Це дало змогу знизити потужність живлення засобів отримання первинної інформації, що знаходяться в зоні дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування, приблизно в 10 разів,. Розроблено експериментальний зразок пристрою, який реалізує метод.

14. Розроблено структурні схеми, виготовлено та експериментально перевірено експериментальні зразки ІВК оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ (повітряного зазору, зусилля пресування при експлуатації та складанні осердя статора, відносного та абсолютного радіального биття циліндричних поверхонь валів ротора), що дозволяє підвищити надійність та безпечність роботи нових та вже існуючих потужних генераторів ТЕЦ, ГЕС, АГЕС та АЕС.

Одержані результати експериментальних досліджень ряду зразків підтвердили основні технічні характеристики компонентів систем діагностування ПГ.

15. Отримані в роботі теоретичні та практичні результати у вигляді математичних моделей, методів оброблення інформаційних сигналів, алгоритмів, програмного забезпечення та компонентів ІВК системи діагностування використано при створенні макетного зразка гібридного волоконно-оптичного комп'ютеризованого вимірювача зусиль у стяжних призмах осердя статора ПГ та системи діагностування зусиль пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТ3 на підприємстві ДП "Завод "Електроважмаш" (м. Харків, Україна); під час оброблення експериментальних даних в системі діагностування запірної апаратури трубопроводів водопостачання ТЕЦ в ТОВ НВП "Техприлад" (м. Київ); у процесі створення системи вимірювання параметрів вібрацій поверхонь елементів конструкцій будівель промислових об'єктів в ТОВ «Альмагруп» (м. Кременчук, Україна).

Результати роботи рекомендовано для подальшого впровадження на ДП «Електроважмаш» (м. Харків) під час розробок та випробувань нових та модернізації існуючих ПГ ТЕС, ГЕС, ГАЕС та АЕС.

Подальше використання наукових та практичних результатів дисертаційної роботи можливе при розробленні систем технічного діагностування електротехнічного обладнання енергопідприємств для забезпечення його експлуатаційної надійності та подовження ресурсу експлуатації. Серед об’єктів потенційного впровадження – електротехнічне обладнання 103 енергоблоків теплових електростанцій України від 150 до 800 МВт загальною потужністю 28,7 млн.кВт, а також ГЕС, ГАЕС та АЕС.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фазовый лазерный измеритель параметров вибраций с расширенным частотным диапазоном / И. А. Брагинец, Е. А. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко, А. Д. Ниженский. *Технічна електродинаміка.* 2013. № 1. С. 82-86. ***Scopus***

2. Зайцев Е. А. Анализ погрешности частотно-фазовых измерительных систем с учетом характеристик перемножающих устройств. *Технічна електродинаміка.* 2013. № 6. С. 82-87. ***Scopus***

3. Зайцев Е. А. Анализ погрешности лазерной частотно-фазовой измерительной системы обусловленной шумом гетеродинного фотоприемника. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2013. № 36. С. 127-132.

4. Зайцев Е. А. Исследование погрешности установки частоты синтезато-

ров частотно-фазовых систем с использованием LABVIEW. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 84-88. ***Scopus***

5. Повышение помехоустойчивости фазовых лазерных дальномерных систем / И. А. Брагинец, Є. О. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко, А. Д. Ниженский. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 3. С. 91-96. ***Scopus***

6. Зайцев Є. О., Лісогор М. В. Застосування метода Берга для аналізу вібросигналів отриманих за допомогою лазерних сенсорів. *Электроника и связь: научно-технический журнал*. 2014. Т. 19, № 6(83). С. 66-72.

7. Зайцев Е. А. Цифровая регистрация сигналов лазерных дальномеров на промежуточной частоте. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2014. № 3. С. 48-52.

8. Анализ фазовой системы автоматической коррекции частоты в лазерных дальномерах / И. А. Брагинец, Е. А. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко, В. Є. Сидорчук. *Технічна електродинаміка*. 2015. №1. С. 91-94. ***Scopus***

9. Применение компенсационного метода измерения фазового сдвига в лазерных дальномерах / И. А. Брагинец, Е. А. Зайцев, А. Г. Кононенко, Ю. А. Масюренко *Технічна електродинаміка*. 2015. №3. С. 75-80. ***Scopus***

10. Зайцев Е. А. Анализ погрешности дискретизации лазерных дальномеров на основе дискретного преобразования Гильберта. *Технічна електродинаміка*. 2015. №4. С. 89-94. ***Scopus***

11. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромпляс Б. А Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2016. №. 43. С. 134-137.

12. Зайцев Є. О., Левицький А. С., Кромпляс Б. А. Експериментально-теоретичні дослідження ємнісного сенсору повітряного зазору для гідрогенераторів методами регресійного аналізу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. № 2. С.34-40.

13. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромпляс Б. А Похибки ємнісного вимірювача зазору в гідрогенераторі. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2016. №. 44. С. 50-55.

14. Зайцев Е. А., Сидорчук В. Е., Шпилька А. Н. Использование спектрального анализа методом Берга при построении программно-математического обеспечения оптических систем вибродиагностики. *Приборы и методы измерений*. 2016. Т. 7, № 2. С. 186-194. ***Web of Science***

15. Левицький А. С., Зайцев Є. О. Гібридні волоконно-оптичні вимірювачі контрольно-діагностичних параметрів гідрогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2016. № 3-4. С. 32-33.

16. Зайцев Е. А., Левицкий А. С., Сидорчук В. Е. Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов. *Приборы и методы измерений*. 2017. Т.8, №2. С. 122-130. ***Web of Science***

17. Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів / Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромпляс Б.А.,

Сидорчук В.Є. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2017. №.24(100). С.151–161.

18. Зайцев Є. О., Левицький А. С. Способи живлення гібридних волоконно-оптичних вимірювачів контрольно-діагностичних параметрів гідрогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2017. №1-2. С. 14-19.

19. Левицький А. С., Кобзарь К. О., Зайцев Є. О. Волоконно-оптичні вимірювачі зусиль в стяжних призмах турбогенераторів на основі решіток Брегга. *Гідроенергетика України*. 2017. №3-4. С. 22-25.

20. Новик А. И., Левицкий А. С., Зайцев Е. А. Емкостный датчик усилия стягивания с компенсацией погрешности от перекоса электродов. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. №. 48. С. 126-132.

21. Перетворювач інформаційних сигналів для гібридних оптоелектронних вимірювачів переміщень / Є. О. Зайцев, А. С. Левицький, І. М. Жукинский, Б. А. Кромпляс. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. № 4. С.31-37.

22. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Смирнова А. М. Пружний елемент перетворювача зусиль в стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. №. 49. С. 32-39.

23. Левицкий А. С., Новик А. И., Зайцев Е. А. Цифровой емкостной измеритель усилий в стяжных шпильках сердечника статора генератора на основе конвертора AD7745/46. *Гідроенергетика України*. 2018. №1-2. С. 66-69.

24. Левицкий А. С., Зайцев Е. А., Кобзарь К. А. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. *Приборы и методы измерений*. 2018. Т.9, №2. С. 121-129. ***Web of Science***

25. Зайцев Є. О., Левицький А. С. Аналітичне визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. №. 50. С. 62-70.

26. Зайцев Є. О. Програмно-математичне забезпечення систем ідентифікації ексцентриситету ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору. *Гідроенергетика України*. 2018. №3-4. С. 50-56.

27. Research of a Capacitive Distance Sensor to Grounded Surface / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, A. I. Novik, V. O. Bereznychenko, A. M. Smyrnova. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol.78(2), №1-8. P.173-180. ***Scopus***

28. Дослідження впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6 / Є. О. Зайцев, А. С. Левицький, Б. А. Кромпляс, М. В. Панчик. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2019. № 52. С. 80-86.

29. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Березниченко В. О. Особливості вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату. *Гідроенергетика України*. 2019. № 1-2. С. 39-44.

30. Брагинец І. О., Зайцев Є. О., Жукінський І. М., Кононенко О. Г., Масюренко Ю. О. Лазерний далекомір: пат. 91534 Україна: МПК G01M, G01C 3/08. № u 201400566; заявл. 21.01.2014; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13..

31. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромпляс Б. А Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах: пат. 115924 Україна : МПК G01B 7/14, G01D 5/24. № a 2016 03404; заявл. 01.04.2016; публ. 10.01.2018, Бюл. № 1.

32. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромпляс Б. А Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в генераторах: пат. 117841 Україна: МПК G01B 7/14, G01D 5/24. № a2016 04728; заявл. 28.04.2016; публ. 10.10.2018, Бюл. № 19

33. Левицький А. С., Новік А. І., Зайцев Є. О. Ємнісний перетворювач зусиль в стяжних призмах осердя статора турбогенератора: пат. 119101 Україна: G01B7/08, G01L1/06. № a2017 09154; заявл. 15.09.2017; публ. 25.04.2019, Бюл. № 8.

34. Застосування методу найменших квадратів для виділення періодичних компонент діагностичної інформації / Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є., Сидорчук І.В. Шпилька А.М. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*: Зб. тез доп. XV міжнар. наук.-техн. конф., м. Хмельницьк, 10-14 вересня 2015 р., РВЦ ХНУ, 2015. С.32-34.

35. Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є.Обробка результатів вимірювання лазерних далекомірів на основі статистичного аналізу даних. *Інформаційно-комп'ютерні технології 2016*: Матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф., м. Житомир, 22–23 квітня 2016 р., ЖДТУ, 2016. С.171–172.

36. Зайцев Є. О. Вплив нерівномірності дискретизації на метрологічні характеристики ортогональних фазових детекторів оптичних моніторингових систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах:* Зб. тез доп. XVI міжнар. наук.-техн. конф., м. Хмельницьк, 10-14 червня 2016 р., РВЦ ХНУ, 2017. С. 134.

37. Levytskyi A.S., Kromplyas B.A., Sydorchuk V.E. Die Wahl der funktionalen Abhängigkeit von kapazitiven Sensor des Luftspaltes auf der Basis von experimentellen Daten. *Informatics. Culture. Technology: Control systems in industry:* Proceedings of the IV Ukrainian-German conference, Odessa, Juni – 2 Juli 2016 y., P.94–96.

38. Зайцев Є.О. Комп'ютеризована система контролю механічних параметрів електрообладнання. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016):* Зб. тез доп. XIII міжнар. конф., м. Вінниця, 3-6 жовтня 2016 р., ВНТУ, 2016. С.116-118.

39. Зайцев Є.О. Використання статистичного аналізу кутових вимірювань при обробці результатів спостережень в системах моніторингу повітряного зазору в гідрогенераторах. *"Актуальні задачі сучасних технологій"*: Тези доповідей V міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 17-18 листопада 2016 р., ТНТУ, 2016. С.201-202.

40. Зайцев Е.А., Левицкий А.С., Сидорчук В.Е. Применение ЛЧМ-

модуляции в волоконно-оптических системах мониторинга воздушного зазора гидрогенераторов. "*Приборостроение-2016*" : Сб. материалов докладов 9-й междунар. научно-техн. конф. г. Минск, 23–25 ноября 2016 р., БНТУ, 2016. С. 58-59.

41. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромпляс Б.А Вимірювальні перетворювачі для систем технічної діагностики електрообладнання на основі гібридних волоконно-оптичних сенсорів. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІІРТК-2017:* Зб. тез доп. IX міжнар. науково – практичної конф., м. Київ, 16-17 травня 2017 р., НАУ, 2017. С. 97–100.

42. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenerator. *First Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON):* Proceedings of the International conference, May 29 – June 2 2017 y., Kiev, 2017. P. 390 – 394. ***IEEE Xplore, Scopus***

43. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S. Determination of response characteristic of capacitive coplanar air gap sensor. *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017)*: Proceedings of the International symposium, Kiev, August 29 – June 30 2017 y., 2017. P. 85-88. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075034. ***IEEE Xplore, Scopus***

44. Зайцев Е.А., Левицький А.С., Сидорчук В.Е. Гибридные волоконно-оптические измерители физических параметров для систем технической диагностики электрооборудования. *Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов*: Тезисы доклада 6-й междунар. научно-техн. конф., г. Могилев, 19-20 сентября 2017 г., 2017. С. 447-452.

45. Зайцев Е.А., Сидорчук В.Е. Оптоэлектронный датчик измерения биения вала турбо- и гидрогенераторов. *"Приборостроение-2017"* : Сборник материалов докладов 10-й міжнар. научно-технической конф., г. Минск, 01–03 ноября 2017 г., БНТУ,2017. С.366-368.

46. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system. *modern electrical and energy system (MEES-17):* Proceedings of the International conference, Kremenchuk, 15 – 17 November 2017 y., 2017. P.288-291. ***IEEE Xplore, Scopus***

47. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Система контролю нерівномірності пресування осердя статора турбогенераторів з використанням мережі гібридних ємнісних сенсорів. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2018):* Зб. тез доп. XVI міжнар. науково-практичної конф., м. Дніпро, 21-23 листопада 2018 р., ПП "Ліра ЛТД", 2018. С.74–75.

48. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO):* Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference, Kiev, 16 – 18 April 2019 y., 2019 , P.644-647. ***IEEE Xplore, Scopus***

49. Зайцев Є.О. Метод визначення ексцентриситету ротора гідрогенератора у циліндричній системі координат. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси(ІІРТК-2019)*: Зб. тез доп. X міжнар. науково–практичної

конф., м. Київ, 21-22 травня 2019 р., Україна: НАУ, 2019. С.85 – 87.

50. Зайцев Є.О. Реалізація гібридних волоконно-оптичних вимірювачів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*: Зб. тез доп. XIX міжнар. наук.-технічної конф., м. Одеса, 14-17 червня 2019 р., ФОП Бондаренко, 2019. С.28-29.

51. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Panchyk M., Bereznychenko V. Study Influence Industrial Frequency Magnetic Field On Capacitive Pressing Sensor for Large Turbogenerator Core Clamping System. *Electrical And Computer Engineering (UKRCON-2019):* Proceedings of the II International Conference, 2 – 6 Jule 2019 y., 2019 Lviv, Ukraine. P. 566–569. ***IEEE Xplore, Scopus***

АНОТАЦІЇ

Зайцев Є.О. Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливої науково-прикладної проблеми створення теоретичних основ побудови та практичної реалізації оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів, до складу яких входять комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні канали, що забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану генераторів, мають малі розміри і є завадостійкими до дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування.

В роботі отримала подальший розвиток теорія побудови інформаційно-вимірювальних систем та компонентів систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів. Вдосконалено методи отримання та оброблення контрольно-діагностичної інформації в оптоелектронних комп’ютеризованих системах діагностування механічних параметрів потужних генераторів, що надало можливість покращити технічні характеристики їхніх інформаційно-вимірювальних каналів.

Визначені функції перетворення первинних вимірювальних перетворювачів (ємнісних та оптичних) для систем діагностування параметрів повітряного зазору, зусилля пресування осердя статора, відносного та абсолютного радіального биття циліндричних поверхонь валів ПГ, що дозволило встановити межі застосування розроблених систем.

Основні наукові положення дисертаційної роботи підтверджено експериментальними дослідженнями та впровадженням розроблених на основі теоретичних результатів систем діагностування механічних параметрів ПГ та компонентів їх інформаційно-вимірювальних каналів на ряді підприємств та організацій, в наукових дослідженнях та навчальному процесі.

Ключові слова: *потужний генератор, механічний дефект, оброблення інформаційних даних, комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні канали, сенсори, системи діагностування.*

Zaitsev I.O. The development of theory and practical implementation of optoelectronic systems for diagnosing the mechanical parameters of powerful turbo- and hydro-generators. – Manuscript.

The thesis on receipt of scientific degree of doctor of engineering sciences on the specialty 05.13.05 – computer system and components. - Institute of electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and applied problem of creation of theoretical bases of construction and practical realization of optoelectronic systems for diagnosing the mechanical parameters of powerful turbo- and hydro generators, which include computerized information-measuring channels, providing increase of reliability of estimation of technical evaluation. they are small in size and are obstructive to the effects of tight magnetic fields of the objects being diagnosed.

The work was further developed theory of construction of information-measuring systems and components of systems of diagnostics of mechanical parameters of powerful turbo- and hydro generators. Methods for obtaining and processing control and diagnostic information in optoelectronic computerized systems for diagnosing the mechanical parameters of powerful generators have been improved, which has made it possible to improve the technical characteristics of their information and measurement channels.

The functions of conversion of primary measuring transducers (capacitive and optical) for the systems of diagnosing the air gap parameters, the force of pressing of the stator core, the relative and absolute radial beating of cylindrical surfaces of the shafts of GH were determined, which allowed to establish the limits of application of the developed systems.

The basic scientific provisions of the dissertation are confirmed by experimental researches and implementation of systems of diagnostics of mechanical parameters of powerful generators and components of their information-measuring channels, developed on the basis of theoretical results, in a number of enterprises and organizations, in scientific researches and educational process.

Keywords: *powerful generator, mechanical defect, processing of information data, computerized information-measuring channels, sensors, diagnosis systems.*