

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Зайцев Євген Олександрович

УДК 681.518.5:621.31

ДИСЕРТАЦІЯ

**Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем
діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Є.О. Зайцев

Науковий консультант Левицький Анатолій Станіславович, доктор технічних
наук, старший науковий співробітник

АНОТАЦІЯ

Зайцев Є.О. Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 "Комп'ютерні системи та компоненти". – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2019.

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

Вирішення науково-прикладної проблеми здійснене за рахунок підвищення ефективності систем діагностування, шляхом вдосконалення методів отримання та оброблення контрольно-діагностичної інформації в оптоелектронних комп'ютеризованих системах діагностування механічних параметрів потужних генераторів, подальшим розвитком теорії побудови систем діагностування та їх компонентів, вибором раціональної структури ІВК та їх компонентів, а також розробкою нових та удосконаленням існуючих первинних та вторинних вимірювальних перетворювачів ІВК.

В роботі вирішено такі основні завдання: проведено аналітичні дослідження методів та засобів діагностування параметрів механічних дефектів ПГ; вдосконалено ІВК систем діагностування механічних параметрів ПГ шляхом удосконалення існуючих та створення нових вимірювальних компонентів на базі ємнісних та оптичних технологій та методів; вдосконалено теоретичні 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; виконано розробку компонентів систем діагностування стану спресованості осердя статора ПГ, які дозволяють підвищити точність, розрізнявальну здатність вимірювання та більш достовірно визначати місцезнаходження дефекту в осерді при його експлуатації та виготовленні; здійснено вдосконалення систем вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів шляхом розробки та дослідження нових первинних перетворювачів (сенсорів); проведено розроблення та впровадження гібридних оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ, які забезпечують підвищення якості контролю та діагностики машини; виконано розробку 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; розроблено та досліджено компоненти ІВК оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ.

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.

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

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

Для вирішення поставлених завдань в дисертації 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.

В результаті вирішення сукупності задач як в теоретичному, так і в практичному плані отримані такі основні результати:

- 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, еліпсність 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

можливість 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;

– 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 виготовленні, стендових випробуваннях та в умовах експлуатації енергетичних об'єктів;

– впроваджено на підприємстві ДП "Завод "Електроважмаш" (м. Харків) моделі, методи та компоненти оптоелектронної системи діагностування зусиль пресування осердя статора для підвищення ефективності контролю тиску пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ, завдяки реалізації автоматичного контролю технологічного процесу пресування осердя статора, а також в вигляді комплекту технічної документації та макетного зразка гібридного волоконно-оптичного комп'ютеризованого вимірювача зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного генератора, що дало змогу

підвищити достовірність контролю зусилля пресування потужних турбогенераторів типу ТГВ;

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

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

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".

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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 синтезаторов 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. *Електроніка 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., Левицький 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. Зайцев Є. О., Левицький А. С., Кромпляс Б. А., Сидорчук В. Є. Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору

гідрогенераторів. *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. Жукинський, 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 / Іє. О. Zaitsev, A. S. Levytskyi, A. I. Novik, V. O. Bereznichenko, 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. Кромплас, 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. Брагінець 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., Кромплас Б. А. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах: пат. 115924 Україна : МПК G01B 7/14, G01D 5/24. № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016; публ. 10.01.2018, Бюл. № 1.

32. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромплас Б. А. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в генераторах: пат. 117841 Україна: МПК G01B 7/14, G01D 5/24. № а2016 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. № а2017 09154; заявл. 15.09.2017; публ. 25.04.2019, Бюл. № 8.

Праці апробаційного характеру

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 (ІРТК-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., Berezhnychenko 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**

ANNOTATION

Zaitsev I.O. The development of theory and practical implementation of optoelectronic systems for diagnosing the mechanical parameters of powerful turbo- and hydro-generators. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

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, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the important scientific and applied problem of creation of theoretical bases of construction and practical realization of optoelectronic systems of diagnostics of mechanical parameters of powerful turbo- and hydro generators, which include computerized information-measuring channels (IMC), which provide the improvement of reliability are small in size and are noisy against the powerful magnetic fields of the objects being diagnosed.

The solution of the scientific-applied problem is made by increasing the efficiency of systems of diagnosing the mechanical parameters of powerful turbo- and hydro generators by improving the methods of obtaining and processing control-diagnostic information in optoelectronic computerized systems for diagnosing the mechanical parameters of powerful generators, and further development components of their systems, choosing the rational structure of IMC and their components, as well as developing and improving them the existing primary and secondary measuring converters of IMC.

This was made possible by use of modern systems of technical diagnostics on the basis of information-measuring systems with computerized meters of control and diagnostic parameters allows to increase the efficiency of operation of generators by switching from carrying out planned-preventive repairs to repairs on the actual technical condition. This transition also increases the life of the machine while ensuring the smooth and reliable operation of the machine.

The prerequisite for the creation of computerized measuring and control parameters in the systems of technical monitoring and control of turbogenerators is the intensive development and miniaturization of systems for collecting, pre-processing of information-measuring electrical signals, transmission and storage of data, opportunities for the use of specialized software-mathematical processing, as well as the implementation of primary sensors, adapted to the operating conditions and design features of the zones and control of mechanical defect parameters.

The following main tasks are solved in the work: analytical researches of methods and means of diagnostics of parameters of mechanical defects of PG are carried out; improved IC systems for diagnosing mechanical PG parameters by improving existing and creating new measurement components for capacitive and optical technologies and methods; advanced theoretical principles of construction of optoelectronic systems for diagnosing the mechanical parameters of the main PG nodes, which include computerized IMC, which combine the advantages of microelectronic and optoelectronic technologies, provide the necessary level of immunity to the action of powerful magnetic fields of the object; the components of the systems of diagnostics of compression state of the PG stator core are developed, which allow to improve the accuracy, resolution of measurement and to more accurately determine the location of the defect in the core during its operation and manufacture; perfection of systems for measuring radial beating of cylindrical shaft surfaces by development and research of new primary transducers (sensors); the development and implementation of hybrid optoelectronic systems for diagnosing mechanical parameters of PG, which provide improved quality control and diagnostics of the machine; development of methods of processing experimental data obtained during measurement of control and diagnostic parameters in PG; development of methods for constructing power systems for capacitive sensors with digital output, based on the use of autonomous power sources based on "Energy Harvesting" technology and power supply through optical fiber lines using photovoltaic cells; ICM components of systems of diagnostics of mechanical parameters of PG are developed and investigated.

The scientific novelty of the obtained results is that for the first time an important scientific and technical problem of creation of theoretical bases for the construction and implementation of optoelectronic systems for diagnosing mechanical parameters of PG, which includes computerized ICM, was solved and solved.

The object of the research is the process of determining the control-diagnostic parameters in powerful electric power equipment.

The subject of the research is methods, models, systems and methods of diagnosing mechanical parameters of ICM.

Methods were used to solve the problems in the thesis is the numerical simulation using a personal computer, methods of IVS theory, theory of objects and systems diagnostics, probability theory, methods of statistical processing of diagnostic signals, theoretical and experimental methods in the field of capacitive and optical meters of physical quantities, as well as optoelectronic means of communication. The theoretical part of the work is based on analytical and numerical methods of research using the provisions of mathematical analysis, the theory of functions of a complex variable using conformal reflections, the theory of elliptic functions, the theoretical basis of optics, electrical engineering and information-measuring systems.

As a result of solving the set of problems in both theoretical and practical terms, the following main results were obtained:

- further development of mathematical models and algorithms for providing components intended for the formation, collection, processing and receipt of control and diagnostic information in optoelectronic computerized systems for diagnosing mechanical defects of PG, which makes it possible to improve the accuracy of their diagnosis;

- at the first time was proposed method of approximation of functions of transformation of optoelectronic meters of mechanical parameters by digital methods was proposed, which allowed to increase the accuracy of estimations of the

data of measurements of mechanical parameters of the main PG units with a minimum number of control points of the obtained experimental data;

- the method of determining the parameters of the rotor pole of the rotor of the hydrogenerator was further developed based on the application of the least squares method to the data obtained using the sensors installed on the core of the stator of the computerized air gap control system, which made it possible to reduce the effect of radial size variation by 2-3 times. the poles of the rotor on the result of determining the parameters of such defects of the hydrogenerator, such as eccentricity and skew of the rotor, ellipticity of boring of the heart;

- at the first time was proposed method of error correction due to the misalignment of the electrodes of the variable capacitor for the semi-differential capacitive sensor of the force meter in the clamping prisms of the heart of the TG stator, which made it possible to increase the accuracy of diagnosis and control of the compressor core pressure;

- at the first time was developed a method of controlling the compression pressure of the generator stator core with the use of sector concentric planar capacitive motion sensors of the plate springs in the means of stabilizing the compression pressure, which made it possible to increase the reliability of their control;

- at the first time was suggested application in the systems of diagnostics of powerful hydrogenerators of capacitive air gap sensors with coplanar-parallel electrodes, which provides an increase of metrological characteristics of primary information converters by minimizing the influence of parasitic electrical capacities of connecting conductors between the primary sensor (transducer) and the elements of its design, the parasitic capacitance between the working electrode of the sensor and the elements of the design the generator;

- at the first time was developed a hardware and software structure that combines the benefits of microelectronic and optoelectronic technologies, which has made it possible to create interference-suppressing powerful magnetic fields by computerized IVC optoelectronic systems for diagnosing the mechanical parameters of the main GHG nodes;

- further developed methods of energy-saving coding of measurement information for hybrid GHG diagnosis systems, which allowed to implement a simple communication protocol between components of control systems and diagnostics of powerful generators using fiber and to reduce the power supply of the primary source information objects of diagnosis;

- developed schematic diagrams, manufactured and experimentally tested experimental samples of measuring channels of optoelectronic systems for diagnosing the parameters of mechanical defects of the main nodes (air gap, pressing force, radial beating of the cylindrical surface of the generator shaft), which improves the reliability and safety , HPP, NPP and NPP;

- experimental samples of computerized capacitive meters for air gap control systems of SGK538 / 160-70M capsule hydrogenerators, control of the force in the clamping prisms of the stator core of a powerful generator and efforts of pressing the stator core and their laboratory testing were developed and produced;

- structural diagrams of measuring transducers with autonomous power sources based on "Energy Harvesting" technology and through fiber-optic lines using photovoltaic elements have been developed, which allow to reduce the influence of powerful magnetic fields on the result of determination of control and diagnostic parameters of mechanical defects and can be used in control systems and diagnosis of powerful generators;

- an experimental sample of an electronic-optical converter was developed, which provides communication between capacitive sensors with digital output and a system for collecting and processing control and diagnostic information of systems for diagnosing the parameters of mechanical defects of powerful generators and conducting its laboratory tests;

- methods and algorithms for diagnosing the mechanical parameters of the main units of the powerful generators during their production, bench tests and conditions of operation of power objects have been developed;

- at the state enterprise Plant "Electrotyazhmash " (Kharkiv) models, methods and components of the optoelectronic system for diagnosing stator core pressing

efforts to improve the pressure control of the stator compression of the TGV-250-2PT3 turbine generator due to the automatic control of the stator core pressing process, as well as a complete set of technical documentation and layout model - optical computerized force meter in the clamping prisms of the stator core of a powerful generator, which made it possible to increase the accuracy control of the compression force of powerful turbogenerators type TGV;

- at LLC Techprylad NPP (Kyiv) methods and algorithms of experimental data processing are introduced to improve the technical and metrological characteristics of the systems of diagnostics of shut-off equipment of water supply pipelines of the TPP, by reducing the influence of random signals on the measurement result;

- at Almagroup LLC (Kremenchug) methods and algorithms for measuring the parameters of the beating of surfaces of structural elements are introduced to improve the technical and metrological characteristics of contactless systems of survey and study of the condition of buildings and structures, including objects of the energy complex of Ukraine.

The novelty of the obtained technical solutions is protected by the patents of Ukraine No. 91534 dated 10.07.2014 "Laser rangefinder", No. 115924 dated 10.01.2018 "Capacitive sensor for measuring the air gap in the generators", No. 117841 dated 10.10.2018 "Capacitive sensor for measuring the air gap between the stator and rotor in generators "and No. 119101 from 04/25/2019" Capacitive force converter in the clamping prisms of the turbine generator stator core ".

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП	29
 РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМИ РОЗВ'ЯЗКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ПОТУЖНИХ ГЕНЕРАТОРІВ (ПГ)	 42
1.1 Особливості діагностування та контролю параметрів механічних дефектів ПГ	43
1.2 Особливості розвитку дефектів ПГ та їх класифікація	45
1.3 Аналіз методів та засобів діагностування механічних параметрів ПГ	48
1.3.1 Методи та засоби діагностування параметрів радіального биття циліндричної поверхні вала ПГ	48
1.3.2 Методи та засоби діагностування параметрів повітряного зазору потужних ГГ	51
1.3.3 Методи та засоби діагностування параметрів зусилля пресування активної сталі осердя статора ПГ	53
1.4 Сучасний стан розвитку та практичне застосування систем діагностування механічних параметрів ПГ	57
1.5 Завдання системи діагностування механічних параметрів ПГ	67
1.6 Вимоги до характеристик систем діагностування механічних параметрів ПГ та їх інформаційно-вимірювальних каналів	68
1.7 Науково-технічна проблема створення оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ	70
Висновки до розділу 1	73

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ

МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ..... 74

2.1 Аналіз і обґрунтування методів побудови комп'ютеризованих оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ	75
2.2 Особливості побудови комп'ютеризованих оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ	82
2.3 Принципи функціонування та структура комп'ютеризованих оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ	82
2.4 Гібридні системи діагностування механічних параметрів ПГ	87
2.4.1 Повітряного зазору ПГ	87
2.4.2 Ступеню стиснення активного заліза статора ПГ	89
2.4.3 Биття циліндричних поверхонь валів ПГ	93
2.5 Оптиковолоконні системи діагностування механічних параметрів ПГ	94
2.5.1 Повітряного зазору ПГ	94
2.5.2 Биття циліндричних поверхонь валів ПГ	99
2.5.3 Ступеню стиснення активного заліза статора ПГ	107
Висновки до розділу 2	113

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ, АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ

ПАРАМЕТРІВ ПГ..... 115

3.1 Розробка та дослідження структури програмно-математичного забезпечення системи.....	115
3.2 Математична модель ідентифікації ексцентриситету ротора потужного ПГ	118
3.3 Методи визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора ПГ за даними сенсорів повітряного зазору	129

3.4 Метод визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора ПГ за даними сенсорів повітряного зазору у циліндричній системі координат.....	141
3.5 Метод обробки вихідних даних волоконно-оптичних сенсорів з решітками Брегга	147
3.6 Метод компенсації перекосу електродів ємнісних сенсорів системи стабілізації тиску пресування осердя статора	151
3.7 Апроксимація функції перетворення гібридних вимірювачів механічних параметрів цифровими методами.....	159
3.8 Програмно-алгоритмічне забезпечення вторинних вимірювальних перетворювачів на базі мікросхем CDC.....	165
Висновки до розділу 3	173

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА КОМПОНЕНТІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ.....174

4.1 Структура та функціонування первинного вимірювального перетворювача гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ	174
4.2 Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору з двома робочими компланарними паралельними електродми	177
4.3 Аналітичне визначення похибок ємнісного сенсора повітряного зазору з двома робочими компланарними паралельними електродми	182
4.3.1 Похибка від перекосу площини електродів сенсора відносно твірної циліндричної поверхні розточення осердя статора	182
4.3.2 Похибка, зумовлена кривизною поверхні розточення осердя статора.....	187
4.4 Визначення функцій перетворення ємнісних сенсорів системи стабілізації тиску пресування осердя статора	189
4.4.1 Багатоелементний компланарний ємнісний сенсор з однаковою кутовою електродів	190

4.4.2 Багатоелементний компланарний ємнісний сенсор з різною кутовою шириною електродів.....	195
4.5 Визначення функцій перетворення сенсорів на основі комірок Брега для систем контролю та стабілізації тиску пресування осердя статора	198
4.6 Визначення функцій перетворення ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами	200
4.7 Визначення функцій перетворення спеціальної вимірювальної комірки системи контролю тиску пресування осердя статора	204
Висновки до розділу 4	208

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ..... 209

5.1 Особливості реалізації вторинних вимірювальних перетворювачів для гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ	209
5.2 Розробка та дослідження мікроелектронних вимірювальних перетворювачів систем діагностування параметрів МД	211
5.3 Розробка та дослідження системи живлення гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ	228
5.3.1 З автономним живленням	229
5.3.2 З живленням через волоконно-оптичні лінії	233
5.4 Розробка та дослідження оптоелектронних перетворювачів інформаційних сигналів гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ	238
5.5 Розробка та дослідження принципів функціонування та структури компонентів інформаційно-вимірювальних каналів оптоволоконних систем діагностування механічних параметрів ПГ	246
Висновки до розділу 5	257

РОЗДІЛ 6 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ	
ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ	258
6.1 Комп'ютеризована система діагностування повітряного зазору гідрогенераторів типу СГК 538/160-70М з компланарним ємнісним сенсором	258
6.1.1 Параметри та технічна характеристика комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору.....	259
6.1.2 Компоненти макетного зразка комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором	262
6.2 Основні компоненти макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю зусиль пресування в ТГ типу ТГВ-200 та ТГВ-300, при експлуатації та в процесі складання.....	278
6.2.1 Багатoeлементний секторальний ємнісний сенсор	279
6.2.2. Ємнісний сенсор з концентричними компланарними електродами.....	281
6.2.3 Дослідження впливу магнітних завад на вторинний вимірювальний перетворювач напівдиференціального сенсора зусиль ...	282
6.3 Компоненти макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю биття циліндричних поверхонь валів ПГ	284
6.4 Макетний зразок оптоволоконної системи діагностування МД ПГ	288
6.4.1 Цифровий фазовий ортогональний детектор	288
6.4.2 Малогабаритний синтезатор частоти	293
6.5 Випробувально-демонстраційний стенд	297
6.6 Висновки до розділу	298
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	299
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	303

ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	345
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	352
ДОДАТОК В ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ ВИМІРЮВАЧА ЗУСИЛЬ ПРЕСУВАННЯ	362
ДОДАТОК Г ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ ТА КОМПОНЕНТІВ ІНФОРМА- ЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ.....	367
ДОДАТОК Д ВИЗНАЧЕННЯ АПРОКСИМУЮЧОГО ПОЛІНОМУ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИМІРЮВАЧА ДЛЯ ВРАХУВАННЯ ДІЇ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ПОТУЖНИХ ГЕНЕРАТОРІВ	383
ДОДАТОК Е ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДАНИХ	405
ДОДАТОК Ж МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	412

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач

ПЄК – перетворювач ємність-код

ВОК – волоконно-оптичний кабель

ВОЛ – волоконно-оптична лінія

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку

ВОСПІ – волоконно-оптична система передачі інформації

ГАЕС – гідроакумулювальна електростанція

ГВОВ – гібридні волоконно-оптичні вимірювачі

ГЕОВ – гібридні електронно-оптичні вимірювачі

ГЕС – гідроелектростанція

ЕОВ – електронно-оптичні вимірювачі

ІВК - інформаційно-вимірювальний канал

ІЕВОК – інформаційно-енергетичні волоконно-оптичні кабелі

ЛД – лазерний діод

МД – механічні дефекти

МКСТД – мікроконтролер та система технічної діагностики

ОЕП – оптоелектронний перетворювач

ОМ – оптичний мультиплексор/демультиплексор

ПВП – первинний вимірювальний перетворювач

ПГ – потужні генератори

ПК – персональний комп'ютер

ПКК – перетворювач код-код

ПКС – перетворювач код-світло

ПКССК – перетворювач код-світло/світло- код

ПЛІ - напівпровідниковий лазерний випромінювач

ПСК – перетворювач світло-код

ЧМ – частотна модуляція

O_R – траєкторія руху точки (годограф)

$|O_S O_W|$ – вектор напрямлення зміщення вісі центру обертання ротора

α_{de} – значення динамічного ексцентриситету

α_{me} – кут змішаного ексцентриситету

δ_{me} – значення змішаного ексцентриситету

θ – кутове положення ротора

d_{AG} - відстань між умовною лінією полюсів ротора та поверхнею розточки осердя статора гідрогенератора

l_p – відстань між центрами полюсів ротора;

t - проміжок часу за який отримується контрольно-діагностична інформація

t_D – детермінованим періодом опитування одного сенсора

ω_p – кутова швидкість обертання ротора;

$\sigma_{d_{\text{в}}}^2$ – дисперсія величини повітряного зазору за цілу кількість обертів ротора відносно точки кріплення сенсору;

$m_{d_{\text{в}}}$ – математичне очікування величини повітряного зазору за цілу кількість обертів ротора відносно точки кріплення сенсору

ξ – складова повітряного зазору, обумовлена розкидом геометричних параметрів полюсів ротора

Δ – товщина діелектричної пластини, на якій сформовані електроди ємнісного сенсора повітряного зазору

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, до складу яких входять ефективні методи і засоби виявлення дефектів ПГ.

Застосування таких систем дозволяє підвищити ефективність експлуатації обладнання, збільшити ресурс його експлуатації, 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 прийняття правильних рішень з їх ліквідації, а також переходу від планових ремонтів до ремонтів за фактичним станом машини. Все це забезпечить високий коефіцієнт готовності обладнання до експлуатації та надасть можливість подовжити ресурс експлуатації існуючого генеруючого обладнання ТЕС, ГЕС, АГЕС та АЕС враховуючи його фактичний технічний стан.

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 яких від норми 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. Тому вдосконалення одного з цих компонентів сприяє підвищенню ефективності роботи взагалі всієї системи діагностування електрообладнання. Компоненти, які використовуються при вимірюванні, перетворенні та аналізі контрольно-діагностичних параметрів повинні враховувати складний характер досліджуваного об'єкта, забезпечувати достовірність результатів діагностики, достовірність класифікації дефектів та необхідну заводо захищеність, а первинні джерела інформації (сенсори) відповідати певним, досить жостким 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. Глебов, Г.М. Федоренко, Б.Г. Марченко, М.В. Мислович, В.Ю. Кучерук, З.Т. Назарчук, М.Г. Шульженко, А.С. Левицький, Ю.В. Зозулін, Е.Й. Гуревич, О.С. Голоднова, В.В. Кузьмін, В.І. Мілих, Г.В. Рос-тик, М. 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 ПГ.

Розв'язання цієї проблеми спрямоване на створення та практичне застосування оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ, до складу яких входять комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні канали, з забезпеченням використання можливостей сучасних технологій опрацювання контрольно-діагностичної інформації, функціонування систем у важкодоступних місцях машин за умов дії потужних магнітних полів, багатofункціональності (адаптації) призначення за рахунок зміни первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) підсистем, а також реалізації простих за конструкцію інформаційно-вимірювальних і каналів.

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 (відповідальний 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 (відповідальний 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 метрологічних характеристик компонентів ІВК 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 потужних турбо- та гідрогенераторів;

- удосконалення ІВК шляхом створення нових первинних вимірювальних компонентів для систем діагностування механічних параметрів потужних гідрогенераторів 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, розрізнявальну 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 потужних генераторів, 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 перекис ротора, еліпсність розточення осердя;

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

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".

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблено структурні схеми, виготовлено та експериментально перевірено макетні та 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 виготовленні, 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-250-2ПТЗ, 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.).

Документи, що підтверджують впровадження, наведено у Додатку Б.

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] – розроблення моделі 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 концентричними 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». ІРТК. (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" КТПР – 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.

Структура та обсяг дисертації.

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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМИ РОЗВ'ЯЗКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ПОТУЖНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Забезпечення безперебійної та надійної роботи потужних турбо- та гідрогенераторів (ПГ) не можливе без своєчасного виявлення дефектів, що можуть виникати при його експлуатації. Значна кількість дефектів, що виникають в потужних генераторах, можуть бути виявлені під час контролю параметрів механічних дефектів, відхилення яких від норми супроводжується зміною фізичних процесів в вузлах генератора і характеризує його технічний стан. Зміна механічного параметру свідчить про виникнення взаємних зміщень конструктивних елементів вузла, що контролюється.

Застосування сучасних систем технічного діагностування на основі інформаційно-вимірювальних каналів(ІВК) дозволяє підвищити надійність та економічність експлуатації генераторів за рахунок переходу від проведення планово-попереджувальних ремонтів до ремонтів за фактичним технічним станом. Такий перехід, окрім того, дозволяє збільшити ресурс експлуатації з одночасним забезпеченням безперебійної та надійної роботи машини.

Передумовою для систем діагностування ПГ, які містять комп'ютеризовані ІВК є інтенсивний розвиток та мініатюризація систем збору, попередньої обробки, передачі і зберігання контрольно-діагностичних даних, а також реалізації первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів), адаптованих до умов експлуатації і конструктивних особливостей зони контролю параметрів механічних дефектів.

Тому даний розділ присвячений аналізу методів та засобів, сучасному стану розвитку та практичного застосування систем діагностування найбільш типових параметрів механічних дефектів основних вузлів ПГ, який дозволить визначити перспективні напрямки подальшого розвитку систем діагностики ПГ.

1.1 Особливості діагностування та контролю параметрів механічних дефектів потужних генераторів

Головною особливістю ПГ серед інших типів енергетичних електромашин є складність конструктивного виконання їх найважливіших деталей і вузлів, які в процесі роботи, особливо в перехідних режимах, де мають місце аномальні й аварійні перевантаження, зазнають високого ступеню механічних навантажень. З часом останні призводять до накопичення втомних напружень в елементах конструкції і, як наслідок, приводять до їх руйнації. Також потрібно зазначити, що динамічність перехідних режимів експлуатації, особливо потужних гідрогенераторів, призводить до високої швидкості розвитку можливих дефектів [7, 8, 175, 186, 218, 227, 277, 278, 236, 237, 242].

Огляд та аналіз факторів, відомих у світовій практиці, що спричинили аварії ПГ, показують, що аварійний стан виникає не миттєво, а має досить тривалу передісторію. Все це ускладнює вирішення задачі із забезпечення надійності, безпечності та ефективності експлуатації ПГ [7, 8, 171, 175, 186, 218, 227, 277, 236, 237, 239, 241, 242]. Тому одним із головних завдань технічного діагностування є оснащення енергетичних електромашин та енергосистем в цілому засобами ефективною та достовірною оцінки діагностичних ознак, що можуть характеризувати технічний стан машини. Для виявлення та оцінки динаміки зміни діагностичних ознак можна використати огляди й контрольні перевірки в процесі режимних і планових зупинок агрегатів [197], але у цьому разі час призначеного ресурсу залежить від часу експлуатації найбільш придатних до зносу конструктивних елементів ПГ. До недоліків планового діагностування та обслуговування варто віднести зношеність вузлів і внесення додаткових дефектів при обслуговуванні агрегату (перекіс осей, зміна величини повітряного зазору і т.д.), а також відсутність інформації про характер зміни параметрів машини під час її роботи. Таким чином, періодичне діагностування знижує імовірність аварії, але не гарантує виявлення дефектів, що раптово з'являються в міжремонтний період [270].

Все це, а також світові тенденції із прийняттям міжнародних стандартів ISO [63, 326-328] останніх десятиліть в галузі експлуатації будь-якого технологічного обладнання обумовили поступовий перехід від планового обслуговування до обслуговування за фактичним технічним станом. У відповідності до [326-328] проведення контролю, моніторингу та діагностування обладнання в ході робочих і вторинних процесів, до яких відносять вібрацію, температуру, електромагнітні взаємодії без демонтажу обладнання, є обов'язковою складовою ефективності експлуатації машин і устаткування[270]. Основною перевагою діагностування за фактичним технічним станом є можливість підвищення ефективності експлуатації обладнання, збільшення його ресурсу, зменшення часу й вартості обслуговування та ремонтів, зниження ризиків виникнення аварій і відмов обладнання [193].

У той же час, застосування методів діагностування за функціональним станом вимагає створення досконалих діагностичних систем, що тісно пов'язане з покращенням процесу експлуатації енергетичного обладнання. У цьому разі виникає необхідність додаткової комп'ютеризації компонентів систем діагностування із застосуванням мікропроцесорів в первинних та вторинних вимірювальних перетворювачах, розробку математичних методів опрацювання даних, створення спеціалізованого програмно-алгоритмічного забезпечення. Застосування комп'ютеризованих ІВК в системах діагностування ПГ у свою чергу дозволить зменшити кількість планових оглядів та в подальшому перейти від планових ремонтів до ремонтів за фактичним станом обладнання, що визначається безпосередньо в процесі його експлуатації.

Тому створення та розвиток систем діагностування за функціональним станом ПГ є науково-прикладною проблемою, вирішення якої дозволяє знизити кількість аварійних відключень і максимально уникнути аварій з важкими наслідками, підвищити економічну ефективність генерації електроенергії, а також забезпечити контроль в реальному часі із визначенням дійсного технічного стану потужного турбогенератора, як механічної системи в цілому.

1.2 Особливості розвитку дефектів ПГ та їх класифікація

З моменту початку виробництва і до моменту остаточного виведення з експлуатації в елементах конструкції ПГ протікає цілий ряд фізико-хімічних, термічних і механічних процесів, що з плином часу призводять до початку розвитку дефектів в обертових та не обертових елементах конструкції машини. На рис. 1.1 приведено основні фізичні процеси, які викликають появу та розвиток дефектів в ПГ[125]. У цьому разі під дефектом у відповідності до [71, 195] розуміється "кожна окрема невідповідність продукції встановленим вимогам".

Джерелами інформації про дефекти є ознаки дефектів, які виявляють за допомогою спостережень, випробувань і оглядів. У цьому разі, діагностичною ознакою відповідно до [63] називається «ознака (параметр) об'єкта діагностування, що використовується у встановленому порядку для визначення технічного стану об'єкта». У більш вузькому розумінні ознакою дефекту машини або апарата прийнято вважати відхилення від нормованого значення контрольованого параметра в об'єкті, який працює в заданому режимі.

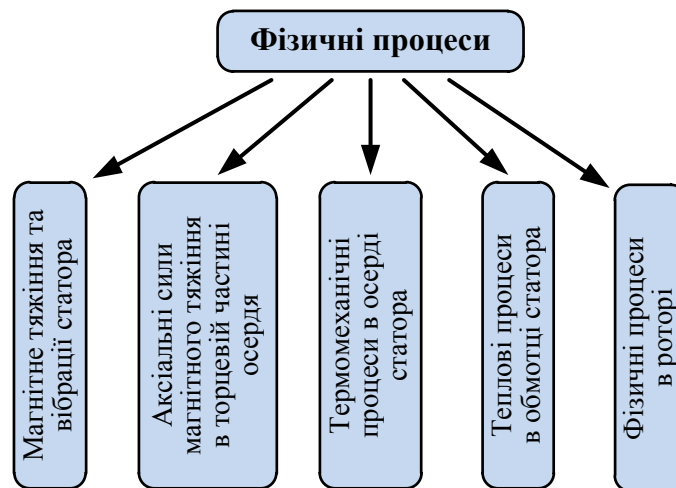


Рис. 1.1 Класифікація фізичних процесів, що призводять до розвитку дефектів в ПГ

Розуміння перебігу зазначених процесів дозволяє створювати конструкторсько-технологічні вимоги щодо запобігання дефектів ще на стадії проектування ПГ, а якщо це повністю зробити не вдається, то створити методи їх

раннього виявлення системами технічної діагностування за характерними діагностичними ознаками. Також, при цьому слід враховувати, що діагностичні ознаки потужних генераторів не мають чіткої, однозначної прив'язки до певних дефектів, що ускладнює їхню ідентифікацію.

Для правильної ідентифікації діагностичних ознак дефектів необхідно враховувати умови режиму роботи машини (електричні параметри), тип машини, та умови її складання і запуску в експлуатацію, накопичувати та аналізувати великий обсяг діагностичної інформації, уточнювати та коректувати встановлені при проектуванні значення параметрів, які характеризують граничні стани, і здійснювати поточний контроль. Для вирішення поставленого завдання, окрім алгоритмів розпізнавання дефектів і несправностей вузлів і деталей ПГ, обов'язковою частиною будь-якої діагностичної системи повинні бути також вимірювальні перетворювачі відповідної фізичної величини в значення контрольно-діагностичного параметру. При цьому контролюється відхилення поточних значень контрольно-діагностичних параметрів машини від їх нормованих або розрахункових значень, що найчастіше супроводжується зміною фізичних процесів у вузлах ПГ і, в свою чергу, є характеристикою функціонального стану машини.

Фізичні процеси, приведені на рис 1.1, викликають деформації та вібрації, які без застосування систем контролю та діагностування призводять до виходу машини із ладу. Так, наприклад: магнітне тяжіння, що обумовлене магнітною взаємодією між ротором та статором, приводить до магнітних вібрацій, які в свою чергу викликають зміну в механічних характеристиках елементів статора (порушення пружної підвіски статора, зміна властивостей лакового покриття сегментів активного заліза статора, тощо). Термомеханічні процеси ПГ призводять до деформацій (зміна пружного стиснення активного заліза статора, деформація обмотки статора, стяжних призм, корпусу, тощо) та низькочастотних вібрацій. Фізичні процеси в роторі головним чином характеризуються вібраціями, що обумовлені магнітним тяжінням і обертаючим моментом, механічними та термомеханічними деформаціями[125]. Значна кількість фізичних процесів ПГ

характеризується вібраціями та деформаціями конструктивних елементів машини. Зазначені деформації елементів відносяться до механічних дефектів ПГ. Механічні дефекти в потужних генераторах, як правило, визначають за допомогою використання вібраційних методів. У табл. 1.1 наведена оцінка ефективності вимірювання параметрів вібрації для виявлення механічних дефектів потужних ПГ, їх локалізації та прогнозування розвитку в часі [7, 8, 138, 150, 182, 188, 246].

Таблиця 1.1

Оцінка ефективності виявлення дефектів за допомогою вібраційних методів

Дефекти	Можливість виявлення дефекту за допомогою вимірювання вібрацій, %	Можливість визначення місця дефекту, %	Можливість прогнозування часу розвитку дефекту, %
Розбалансування	100	75	75
Неспіввісність вала	90	90	65
Нестабільність вісі	100	75	75
Дефекти напрямних підшипників	75	75	50
Нерівномірність повітряного зазору	80	80	50
Дефекти ущільнень	80	30	25
Незакріплені частини ротора	70	50	50
Ушкодження редуктора	80	80	30
Кавітація в турбіні	50	100	20
Несиметрія турбіни	80	80	30
Відхилення форми ротора	80	80	60
Структурні резонанси	60	30	20
Ослаблення опорних болтів	70	60	30
Порушення у водопідведенні	30	20	20
Тріщини в роторі	50	50	20
Забруднення лопаток турбіни	30	25	25
Дефекти опорних підшипників	70	60	40
Крутильні резонанси	65	45	40
Гідравлічні пульсації	70	50	30

Як видно з табл. 1.1, проведення контролю лише за вібраційними параметрами дозволяє виявити далеко не всі можливі дефекти різних вузлів машини, не дає 100% ефективності, і яка коливається в межах (залежно від типу дефекту) від 20 до 80%. Також потрібно зазначити, що вібросенсиори не завжди дозволяють виявити місця виникнення дефекту, що наприклад, має місце при дослідженні стану спресованості осердя статора турбогенератора. Вібраційні методи є не чутливими до процесів розвитку тріщин, в наслідок зниження з часом витривалості роторної сталі. При цьому вихідні мікротріщини зароджуються під поверхневим шаром металу при надмірних навантаженнях. Тому для підвищення ймовірності виявлення дефекту системами технічного діагностування їх необхідно оснащувати цілою гаммою спеціалізованих додаткових ІВК для систем діагностування параметрів найбільш важливих механічних вузлів ПГ, а саме: повітряного зазору між статором і ротором, ступеня спресованості осердя, радіального биття циліндричної поверхні вала та іншими.

1.3 Аналіз методів та засобів діагностування механічних параметрів ПГ

1.3.1 Методи та засоби діагностування параметрів радіального биття циліндричної поверхні вала ПГ

Для отримання інформації про стан гідроагрегату широко використовуються встановлені безпосередньо на корпус машини системи вібродіагностики, які вимірюють параметри вібрації [263]. Але вібрація корпусу, обумовлена кривизною поверхні, траєкторією руху центру (годограф) або ексцентриситетом вала, значно гаситься або спотворюється масляною плівкою в підп'ятниках і підшипниках ковзання гідрогенераторів [224]. У свою чергу величина биття вала є одним з параметрів, що характеризують стан потужних генераторів; характер і величина биття для кожного типу генератора залежать від його конструктивних, технологічних особливостей та умов його експлуатації і не повинна

перевищувати норм, встановлених технічними умовами [329-331]. Биття вала гідроагрегату виникає із-за: спотворення форм ротора і статора; перекосом і спотворенням лінії вала; не перпендикулярністю опорного диска підп'ятника і вала генератора; зміщенням сегментів підп'ятника і підшипників щодо нормального положення; мікронерівностями опорного диска підп'ятника і шийок валів в напрямних підшипників; механічними дисбалансами ротора генератора і робочого колеса турбіни; гідравлічним дисбалансом робочого колеса [20, 46, 164].

Тому, виникає необхідність в безпосередньому контролі биття вала за допомогою безконтактних методів вимірювання вібрації. Ці методи засновані на зондуванні об'єкта звуковими, електромагнітними або світловими хвилями [56]. Для автоматичного вимірювання радіального биття застосовують переважно струмовихрові [13, 149, 164, 392], індукційні [20, 149, 164], ємнісні [143, 149, 164] та оптичні [60, 75, 76, 141, 149, 164, 301] сенсори, як зазначено в [150] два останніх мають найбільшу завадостійкість до електромагнітних завад, але оптичні вимірювачі мають найбільшу точність вимірювання. При цьому ємнісні сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню, у тому числі при масовому і серійному виробництві, нескладні у виготовленні, налагодженні і настроюванні [160], нечутливість до впливу потужних магнітних полів та діапазон їх робочих температур визначається лише стійкістю матеріалів, що застосовуються.

В таблиці 1.2 наведено характеристики найбільш розповсюджених сенсорів виробництва фірм Bently Nevada (США) та VibroSystem (Канада).

Як видно з таблиці 1.2, точність вимірювання як струмовихрових, так і ємнісних сенсорів, особливо при великих діапазонах вимірювання недостатня.

В оптичних вимірювачах в основному застосовується тріангуляційний та амплітудний метод вимірювання, яким притаманні недоліки. Так, недоліками тріангуляційного методу є флуктуації ширини та просторової позиції відбитого зондувального променя [206] при його позиціонуванні на CCD-лінійці («charge-coupled device») сенсора. Флуктуація виникає внаслідок наявності вібрацій в місцях кріплення оптичного сенсора та турбулентності робочого

Таблиця 1.2

Сенсори радіального биття не оптичного типів

Фірма	Модель	Принцип дії	Діапазон, мм	Похибка, %	Вихідний сигнал	Довжина кабелю, м	Необхідність калібрування	Чутливість до намагнічення вала
Bently Nevada (США)	3300XL 8 mm Probe	Струмовихровий	0,25 ÷ 2,3	± 2,5	0 ÷ 24 В	5 ÷ 9	Так	Так
	3300XL 11 mm Probe		0,5 ÷ 4,6	- 4 ÷ + 6	0 ÷ 20 В	8	Так	Так
Vibro-Systm (Канада)	PCS-302	Ємнісний	0,3 ÷ 2,3	± 1,25 F.S.R	4 ÷ 20mA	300	Ні	Ні
	PCS-202SB		0,3 ÷ 2,3	±1 (30%) ±3 (70%) ± 6 (100%)	4 ÷ 20mA	6	Ні	Ні
	PCS-200 ESB		0,3 ÷ 4,3	± 1 (30%) ± 3 (70%) ± 6 (100%)	4 ÷ 20mA	6	Ні	Ні
	PCS-200 ESB		0,3 ÷ 6,3	± 1 30%) ± 3 70%) ± 8 (100%)	4 ÷ 20mA	6	Ні	Ні
	PCS-304		0,5 ÷ 4,5	± 2,5 F.S.R	4 ÷ 20mA	300	Ні	Ні
	PES-103	Струмовихровий	0 ÷ 3	± 5	5 ÷ 20mA; 1 ÷ 10 В	300 100	Так	Так
	PES-106		0 ÷ 6	± 5	4 ÷ 20mA; 1 ÷ 10 В	300 100	Так	Так
	PES-302		0 ÷ 2	± 5	10 ÷ 20 mA; 1 ÷ 10 В	300 100	Так	Так
	PES-302		0 ÷ 52	± 5	6,67 ÷ 20 mA; 1 ÷ 10 В	30	Так	Так

середовища між сенсором і циліндричною поверхнею вала, викликані перемішуванням теплих та холодних газових мас системою охолодження [228], наявністю молекулярного пилу різного хімічного складу (продуктів деградації лаку шихтованого заліза та обмотки, скловолокна, іржі тощо) [272, 187], місцевої зміни вологості, тиску робочого середовища між сенсором та валом [258], що призводить до появи просторово-неоднорідної структури показника заломлення та розсіювання когерентного лазерного випромінювання. Враховуючи складні умови експлуатації сенсорів та конструктивні особливості місць вимірювання діагностичних параметрів в генераторах, пропонується для передачі і прийому

оптичного випромінювання використовувати волоконно-оптичні лінії [60, 75, 141]. При цьому у разі застосування амплітудного методу з оптичною частиною з оптоволоконних ліній [60, 75] вагомими є похибки, що викликані короткочасною нестабільністю амплітуди оптичного випромінювання та нестабільністю в часі параметрів електронних елементів[230].

Перераховані проблеми в значній мірі визначають необхідність розробки нових типів мікропроцесорних засобів вимірювання радіального биття циліндричної поверхні вала потужних генераторів для систем технічної діагностики потужного енергетичного обладнання.

1.3.2 Методи та засоби діагностування параметрів повітряного зазору потужних ГГ

Як відомо параметри повітряного зазору в гідрогенераторах контролюються в статичному режимі в процесі монтажу на ГЕС [164], або на зупиненій машині під час проведення капітальних ремонтів [195]. У цьому разі методи та засоби вимірювання повітряного зазору, що застосовуються в потужних генераторах, можна умовно розділити на дві групи:

- методи, що забезпечують вимірювання повітряного зазору в динамічному режимі (під час роботи, випробувань тощо);
- методи, що забезпечують вимірювання повітряного зазору в статичному режимі (під час планового обслуговування).

Практично всі методи вимірювання параметрів повітряного зазору, що використовуються на машині в процесі роботи, можуть застосовуватися для проведення випробувань та діагностики під час планового обслуговування.

При цьому вибір методу для вимірювання повітряного зазору насамперед визначається конструкцією машини, її розмірами, умовами експлуатації, необхідною точністю, надійністю, ціною тощо [150].

Аналітичний огляд існуючих систем діагностування та публікацій [7, 14, 147, 150, 203, 210, 212, 254, 260, 290, 292, 297, 343, 356, 362, 370] показав, що на

даний час в системах діагностування, використовуються два типи вимірювальних перетворювачів: оптичні і ємнісні. Перевагами перетворювачів є їх безконтактність та можливість функціонування за екстремальних магнітних полів. В табл. 1.3 наведено методи на основі, яких реалізовано вимірювачі повітряного зазору для розповсюджених систем діагностування ПГ.

Таблиця 1.3

Засоби вимірювання повітряного зазору в ПГ

Метод	Сенсор (серійний)	Фірма
Ємнісний [289]	VM 3.2, VM 3.1, VM5.0, VM 6.0	VibroSystM
Ємнісний [282]	4000 Series Air Gap Sensor	Bently Nevada
Ємнісний [147]	AGS	Mikrotrend
Ємнісний [147, 290]	LS 120-121 Transducers	Vibro-Meter SA
Оптичний триангуляційний [7, 147]	opto NCDT	Mikrotrend

Кожний із приведених в табл. 1.3 сенсорів має свої переваги і недоліки. Системи з оптичними вимірювачами є складнішими і дорожчими, однак мають вищу точність вимірювання, що надає можливість додатково виявляти в електричних машинах дефекти, вплив яких на форму та величину зазору є другого порядку малості. Системи із ємнісними вимірювачами мають меншу точність, але при цьому дуже чутливі і низькоінерційні, можуть відрізнятися за формою, розміром і дизайном та більш дешеві. Окрім того, кожний із наведених вище типів вимірювачів повітряного зазору призначений для використання лише на певних типах гідрогенераторів і в системах технічної діагностики певної фірми.

Також, на сьогодні залишається актуальною задача розробки засобів контролю повітряного зазору між статором та ротором на працюючій машині[226]. Контроль в динаміці дозволяє отримати достовірніші і повніші дані про відхилення величини повітряного зазору від номінального значення. У цьому разі додатково контролюється форма повітряного зазору, зміщення та биття окремих полюсів ротора, деформація ободу ротора, зміщення ободу ротора, годограф траєкторії руху центру ротора та інші механічні параметри

лише за результатами вимірювання повітряного зазору[164].

Таким чином, розроблення методів та засобів вимірювання повітряного зазору та створення математичних моделей, які можуть бути використані в системах технічної діагностики електрообладнання для виявлення параметрів дефектів (ексцентриситету ротора, зміни форми обвідної ротору тощо) є актуальною задачею, яка становить науковий і практичний інтерес.

Реалізація методів та засобів ефективного контролю повітряного зазору для систем технічної діагностики гідрогенераторів є досить актуальною та перспективною задачею, вирішення якої дозволяє підвищити надійність роботи гідрогенераторів, значно скоротити час простоїв, пов'язаних з незапланованим ремонтом, а також надає можливість переходу від запланованих ремонтів до ремонтів згідно з фактичним станом генератора, що в свою чергу забезпечить Україні незалежність від потреби застосування зарубіжних систем технічної діагностики електроенергетичного обладнання.

1.3.3 Методи та засоби діагностування параметрів зусилля пресування активної сталі осердя статора

На основі аналізу та огляду науково-технічних джерел та патентної інформації [1, 2, 7, 8, 12, 15, 17, 21, 31, 47, 48, 49, 50, 122, 181, 199, 217, 243, 283, 293, 307, 320, 323] було систематизовано основні методи, які застосовуються, або можуть бути застосовані для автоматичного контролю тиску пресування(табл. 1.4). На рис.1.2 наведено узагальнена систематизація існуючих методів діагностування параметрів зусилля пресування активної сталі осердя статора. Серед всіх представлених методів (рис.1.2) оптимального методу оцінки ступеню спресованості осердя статора ПГ на сьогодні не існує. Кожен метод призначений для застосування при певних умовах – планових оглядах чи в робочих режимах ПГ. Так чи інакше всі методи контролю мають свої переваги і недоліки, які наведено в табл. 1.4

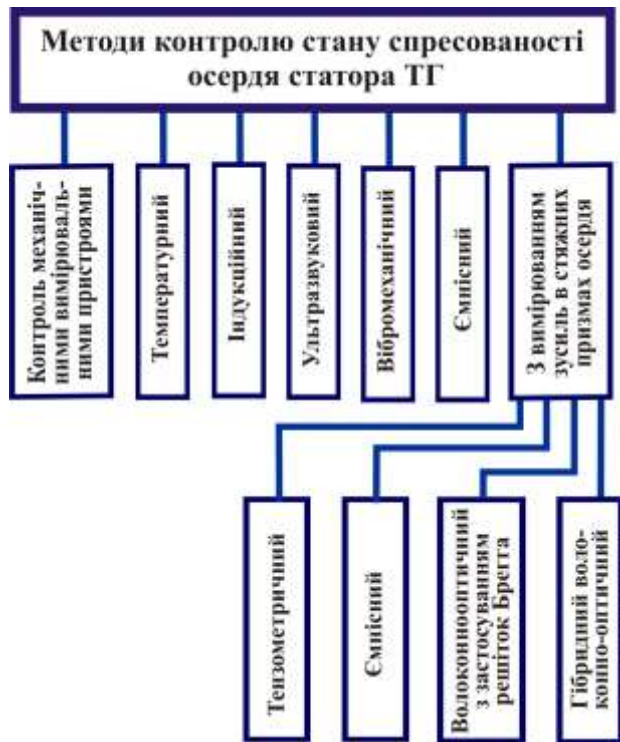


Рис. 1.2 Систематизація існуючих методів контролю стану спресованості осердя статора потужних генераторів

Таблиця 1.4

Методи та засоби контролю зусилля пресування осердя статора

Метод	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Можливість застосування для контролю	
				Планового	За фактичним станом
Безпосередні методи контролю					
Контроль механічним і вимірювальними пристроями	Вимірюванням товщини пакета	Простота	Результати вимірювання значно залежать від кваліфікації та навиків персоналу,	+	—
	Ендоскопічний	Простота, не потребує виймання ротора	Результати вимірювання значно залежить від навиків персоналу	+	—
	Введення щупів між листами пакетів активного заліза	Простота	Результати вимірювання значно залежить від ступеня натискання на ніж; пошкодження лакофарбового покриття поверхні шихтованого заліза	+	—

Продовж. табл. 1.4

Електромагнітний контроль	залежність значення магнітної проникності за трьома взаємоперпендикулярними осями від тиску пресування в пакетах	—	складність і трудомісткість реалізації	+	—
Температурний контроль	залежність постійної часу нагрівання (охолодження) від тиску пресування в пакетах	—	велика складність і трудомісткість реалізації	+	—
Ультразвуковий контроль	Залежність швидкості поширення звукових коливань уперек шихтованих пакетів від зусилля стиснення	—	Результати вимірювання значно стану активної сталі – цілісності ізоляції, геометричних параметрів крайніх листів (товщини пакета, співвідношення площ зубця і вентиляційних розпірок, наявності шліців у зубцях крайніх пакетів), стану лакофарбового покриття поверхні та її дефектів, які істотно відрізняються для осердя статора кожного ТГ, який діагностується	+	—
Ємнісний	залежність зміни електричної ємності сенсора при зміні відстані між електродами, яка залежить від зусилля стиснення	простота виготовлення сенсорів	за малих величин тиску даний ємнісний сенсор має недостатню чутливість	+	-

Продовж. табл. 1.4

Вібромеханічний контроль	імпульсне збудження коливань з застосуванням ударного молотка	реєстрація нерівномірності частотних властивостей в межах одного осердя, їх зміни з плином часу або після певного періоду експлуатації, чи після проведення ремонту	ненадійна відтворюваність та нелінійний характер залежності декремента від тиску пресування	+	—
Методи на основі вимірювання зусиль в стяжних призмах осердя					
Вимірювання зусиль тензорезисторами, які наклеюються на шийки призми	полягає в зміні активного опору тензорезистора під дією механічної напруги призми	простота вторинних вимірювань, перетворювачів, наявність широкої номенклатури тензорезисторів в промисловості	результат залежить від повзучості, впливу температури навколишнього середовища, магнітного поля і гістерезису тензорезистора	+	+
Вимірювання з використанням пружних силосприймачих елементів, що встановлюються під стяжні гайки осердя з ємнісними сенсорами	залежність зміни електричної ємності сенсора при зміні відстані між електродами, під дією механічної напруги	простота виготовлення сенсорів; нечутливість до впливу магнітних полів	велика складність і трудомісткість	+	+

Продовж. табл. 1.4

Вимірювання з використанням пружних силосприймаючих елементів, що встановлюються під стяжні гайки осердя з тензорезистивними сенсорами	залежність зміни опору тензоре-зистора під дією механічної напруги	простота вторинних вимірювальних перетворювачів, наявність широкої номенклатури тензорезисторів в промисловості	велика складність і трудомісткість, результат залежить від повзучості, впливу температури навколишнього середовища, магнітного поля	+	+

Виходячи із недоліків та переваг методів, наведених в таблиці 1.4, стає очевидним, що на даний час існуючі методи та засоби контролю тиску пресування в осерді статора ТГ і вимірювання зусиль в стяжних призмах, виходячи з різних причин, не відповідають сучасним вимогам, і дослідження зі створення таких вимірювачів є актуальними.

1.4 Сучасний стан розвитку та практичне застосування систем діагностування механічних параметрів ПГ

Одна з перших універсальних систем контролю стану гідроагрегату з додатковими сенсорами є система VIMOS (Vibration Monitoring System), що була розроблена в 90-х роках минулого століття шведською компанією ABB (ASEA-Brown Boveri Ltd.) для ГЕС Швеції[311]. Система поряд з сенсорами вібрацій містить безконтактні сенсори переміщення напрямних підшипників по осях X і Y, сенсори переміщення під'ятників, а також сенсори контролю повітряного зазору між статором і ротором [148]. Для вирішення комплексного питання з автоматизації процесів керування та діагностики гідрогенераторів з можливістю оперативного захисту, прогнозування та контролю робочих процесів компанія Emerson Electric (США) пропонує Smart систему CSI 6500 Machinery Health™ Monitor [360]. Система має можливість налаштування апаратно-програмної частини під конкретний тип гідрогенератора. Початкова вартість базової версії комплексу складає 200 тис. дол. [350].

Найбільш універсальним комплексом безперервного контролю на сьогодні система моніторингу стану вузлів генераторів ZOOM (Zero Outage On-line Monitor), розроблена компанією VibroSystM Inc. (Канада). Компанія VibroSystM є світовим лідером у сфері розробок і виробництва унікальних технологій (включаючи широкий набір спеціальних сенсорів) для діагностики і моніторингу великих обертових електричних машин.

В [164, 291] описана система Air gap monitoring system AGT-525 компанії MC-monitoring SA (Швейцарія), яка призначена для вимірювання повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора. Принцип роботи системи заснований на використанні ємнісного сенсора AGS-525. Ця система використовується на ГЕС "Iron Gate" Hydroelectric Power Station, яка знаходиться між Румунією та Сербією. Також з використанням ємнісних сенсорів побудована система Iris Power AGTracIITM Continuous On-Line Air Gap Monitoring for Hydro Generators, що розроблена компанією Iris Power LP (Канада) [303].

Найбільш універсальним комплексом для безперервного контролю на сьогоднішній день є система моніторингу стану вузлів гідрогенератора ZOOM (Zero Outage On-line Monitor), розроблена компанією VibroSystM Inc. (Канада) [351]. Комплекс компанії використовується на багатьох ГЕС десятків країн світу [148], так наприклад комплекс застосовується компанією Electronorte (Бразилія) [365].

Достатня інформативність контролю за допомогою розглянутих систем, особливо для контролю форми розточення статора, досягається завдяки великій кількості сенсорів [384, 385]. Так, при використанні системи AGMS (VibroSystM, Канада) для визначення стану повітряного зазору ГГ з ротором діаметром до 7,5 м рекомендується застосувати чотири сенсори; від 7,5 до 12 м – вісім; понад 12 м – дванадцять або шістнадцять [164, 287, 288, 292]. Крім того, враховується довжина статора. За довжини статора до 1,8 м сенсори встановлюються в одній площині з однієї сторони статора, при більшій довжині – з двох сторін, у двох паралельних площинах, що паралельні осі ротора [292]. Крім цього, за довжини статора до 1,8 м сенсори встановлюються в одній площині з одного боку статора,

а при більшій довжині – з двох сторін, в двох паралельних площинах, перпендикулярних вісі ротора [292]. Також надлишкова кількість сенсорів в системах контролю використовується для перевірки розрахунків та усунення неоднозначностей, що виникають при оцінці форми та її просторових параметрів для ротора або статора.

Останнім часом набуло поширення використання оптоволоконних технологій при реалізації ІВК системи контролю та діагностування. У цьому разі поєднання мікроелектронних та оптоелектронних технологій надає можливість створити завадостійкі до дії потужних магнітних полів комп'ютеризовані ІВК оптоелектронних для систем діагностування. Переваги ІВК з оптоволоконном приведені в Додатку Г.

При цьому системи діагностування з ІВК, що поєднують переваги традиційних сенсорів та оптичного волокна слід є гібридними, а системи, що використовують у якості сенсорів оптичні чутливі елементи – оптоволоконними.

В [77] описана гібридна вимірювальна система параметрів електромереж узагальнена схема, якої приведена на рис. 1.3. На рис.1.3 прийняті наступні умовні позначення: 1 – первинний чутливий елемент волоконно-оптичної системи передачі інформації (ВОСПІ); 2 – вторинний вимірювальний перетворювач з цифровим виходом; 3 – перетворювач код-світло; 4 – перетворювач світло-код (фотоприймач ВОСПІ); 5 – система технічної діагностики, призначена для реєстрації та обробки результатів вимірювання; 6 – перетворювач DC/DC; 7 – фотовольтаїчний перетворювач; 8 – лазерний випромінювач та джерело живлення лазерного випромінювача (драйвер); 9 – кероване джерело струму; 10 – волоконно-оптична система передачі інформації; 11 – волоконно-оптична система передачі енергії живлення; 12 – волоконно-оптична лінія для передачі контрольної-діагностичної інформації; 13 – волоконно-оптична лінія передачі живлення в 9.

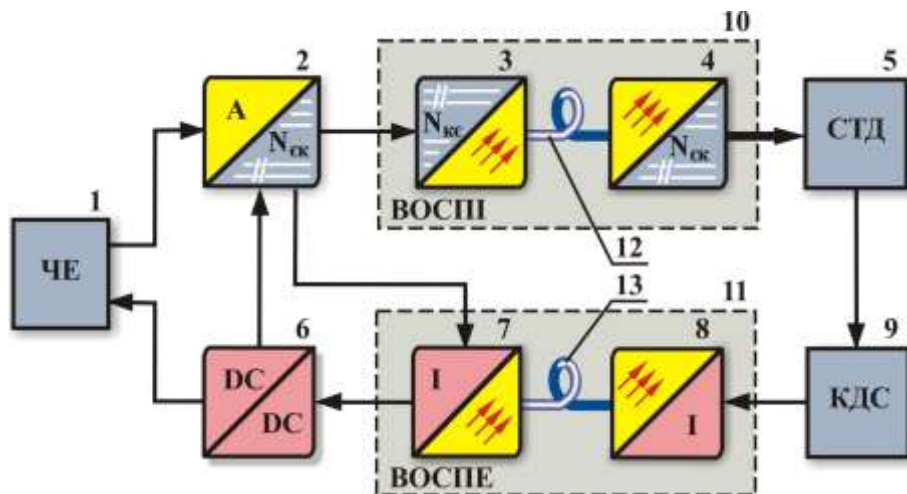


Рис. 1.3 Узагальнена схема гібридної оптичелектронної вимірювальної системи із первинними чутливими елементами

Пристрій працює наступним чином. Випромінювання від потужного напівпровідникового лазера 8 по волоконно-оптичній лінії 13, реалізованій на основі стандартного багатомодового оптичного волокна, передається на фотовольтаїчний елемент 7 і перетворювач напруги 6, які є джерелами живлення вимірювача 1, що включає в себе первинний перетворювач (сенсор) і аналого-цифрового перетворювача сигналу 2. В основі алгоритму отримання інформаційного сигналу лежить принцип широтно-імпульсного кодування інформації. У цьому разі, чутливий елемент сенсора використовується для формування часоформуючих елементів генераторів (наприклад, мультівібраторів). Отриманий таким чином інформаційний сигнал з виходу вимірювача 2, за допомогою волоконної системи передачі інформації 10, надходить на систему реєстрації та обробки даних 5. Система 5 призначена, також для керування джерелом струму потужного напівпровідникового лазера 8[77, 135, 231]. Аналогічно наведеному вище, у [77] описано систему, в якій використовується енергія, передана через окремий ВОЛ для живлення низькопотужних систем, сенсорів та невеликих виконуючих пристроїв. В даній системі для передавання оптичної енергії і інформаційних сигналів використовують різні ВОЛ. У даному разі, для перетворення оптичної енергії в електричну використано перетворювач, розроблений на основі використання фотовольтаїчного елемента з гетероструктурою AlGaAs/GaAs, який в діапазоні

790÷830 нм здійснює перетворення оптичного випромінювання в електричну енергію. Як зазначено в [85, 107, 135, 231], ефективність фотовольтаїчних перетворювачів на сьогодні складає до 45 % при щільності потужності 42 W/cm^2 та до 50.2 % для монохроматичного світла при щільності потужності $G=6.5 \text{ W/cm}^2$ [107], що є основою для створення джерел живлення ГВОВ з вихідною напругою 3÷5 В і потужністю до 30 мВт [77].

Використовуючи фотовольтаїчний елемент з гетероструктурою AlGaAs/GaAs у 2000 році в NTT Photonics Laboratories (Японія) забезпечили отримання електричної потужності 2 Вт при напрузі 5 В [107]. Як оптичне джерело, що перетворює електричну енергію в оптичну, використовувався AlGaAs/GaAs лазерний діод з довжиною хвилі 808 нм. Для передачі оптичного випромінювання використано багатомодове оптоволокно довжиною 200 м та діаметром серцевини 200 мкм. Для перетворення оптичної потужності в електричну застосовано шість р-і-n фотодіодів, як фотовольтаїчних перетворювачів на основі структур GaAs. Це дозволило отримати ККД системи живлення на рівні 31%. В [107] описано оптичну систему живлення, застосування якої дозволяє отримати на виході торця як мінімум 1000 мВт. Фірма RLH Industries (США) розробила систему передачі електроживлення з двома багатомодовими ВОЛ діаметром 62,5 мкм. Система має вихідну електричну потужність до 600 мВт [107]. У [107] описано пристрій, заснований на використанні переваг хвильового оптичного мультиплексування WDM (Wave division multiplexing) [85, 107, 135, 231] над іншими структурами при передавачі вимірювальної інформації та живлення (див. Додаток Г).

Гібридні ІВК застосовуються в системах діагностування стану електрообладнання для:

1. Вимірювання параметрів електромереж [77, 222, 135, 230, 231].
2. Аналізу зміни зовнішнього магнітного поля синхронних генераторів для визначення дефектів, що можуть виникнути в потужних генераторах компанії NGIE Brasil Energia [349]. Система містить вимірювальні перетворювачі послідовно з'єднані оптичним волокном. Це дозволяє використовувати лише пару оптичних волокон, прокладених по трубопроводу від першого

вимірювального модуля до останнього. У цьому разі забезпечується простота монтажу та економія матеріалів, але знижується надійність системи (збій одного вимірювального модуля та/або оптичної лінії призводить до виходу з ладу всієї системи). На рис. 1.4 наведено блок-схему вимірювальної системи.

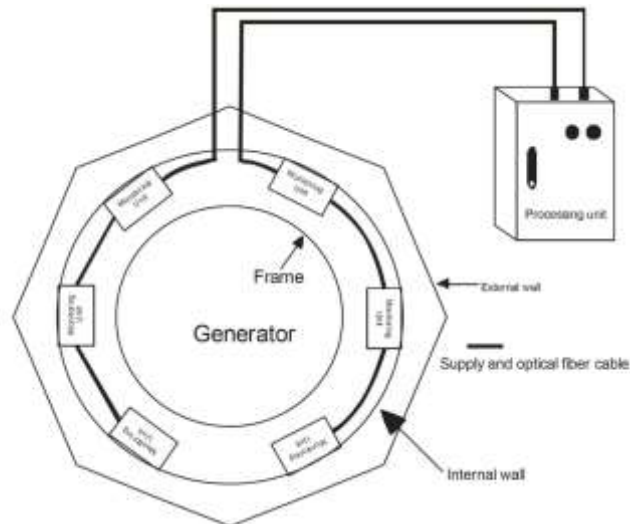


Рис. 1.4 Блок-схема системи моніторингу зовнішнього магнітного поля синхронних генераторів

3. Контролю вібраційного стану лопатей вітрогенератора потужністю 1.5 MW та моніторинг їх стану системою технічної діагностики. Систему контролю та її основні складові частини було реалізовано в процесі виконання гранту 0325400С, наданого в рамках проекту Optowind, що фінансується Міністерством економіки та енергетики Німеччини [363]. В даній системі базова станція гібридної системи вимірювання розміщена в центрі лопатей вітроагрегата та підключена до сенсорного блоку всередині кожної лопатки ротора за допомогою міцного волоконно-оптичного кабелю довжиною 30 м. Для передачі енергії та інформаційних даних в кожному модулі системи використовується чотири багатомодових волокна з градуїтованим індексом та з діаметром серцевини 62,5 мкм. Блоки сенсорів розроблені з використанням модульності, що дозволяє оптимізувати та адаптувати кількість сенсорів і їх типів, в залежності від задачі контролю параметрів вітроагрегата, що вирішується (наприклад, акселерометри, гіроскопи або п'єзосенсори). Отже, систему можна легко адаптувати для вимірювання всіх необхідних параметрів, які можуть бути корисними для точного моніторингу стану лопатей ротора. На рис. 1.5 наведено блок-схему вимірювальної системи.

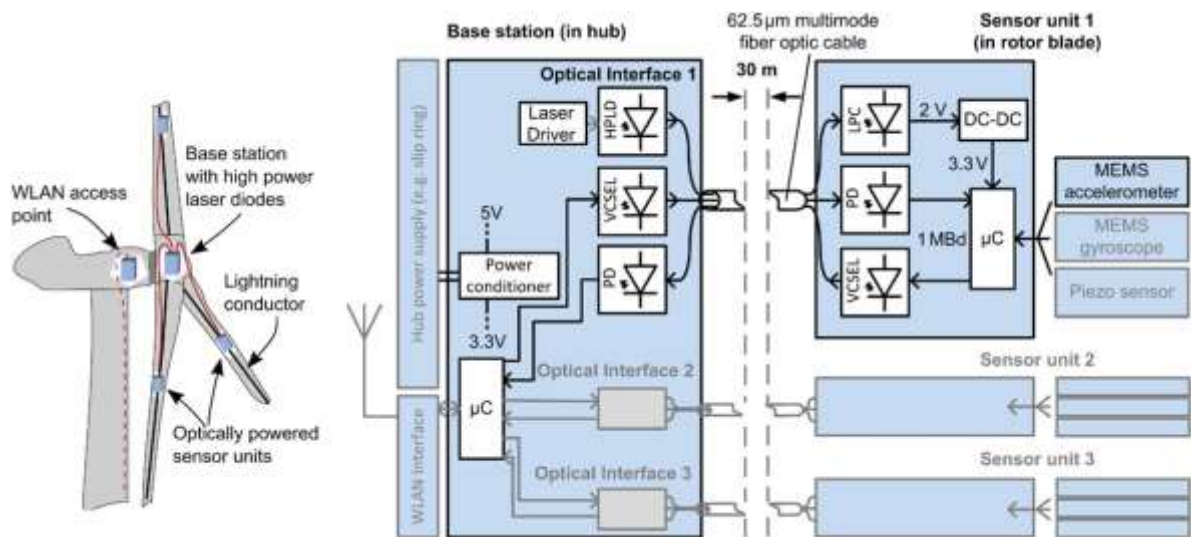


Рис. 1.5 Блок-схема системи контролю вібраційного стану лопатей вітрогенератора

Оптоволоконні ІВК побудовані із використанням в їх структурі значної кількості оптичних сенсорів фізичних величин [178, 305], серед яких особливе місце посідають сенсори, побудовані з використанням як оптичного чутливого елементу – волоконних брегівських решіток (ВБР) [269, 315, 366], також даний принцип використовується в вимірювачах на основі резонаторів Фабрі-Перо або торцевих волоконно-оптичних інтерферометрів Фабрі-Перо [315], інтерферометрах Саньяка [168], інтерферометр Маха-Цандера [336], та інших. Також в оптоволоконних ІВК модуляція оптичного випромінювання може здійснюється механічними чутливими елементами, коли досліджуваний об'єкт розміщений між торцями передавального і приймального оптичного волокна.

Проведений аналіз показав, що оптоволоконні ІВК набули найбільшого поширення при реалізації систем:

1. Систем контролю, моніторингу та діагностики високовольтного обладнання на основі [376, 361]:

- вимірювання та моніторинг рівня напруги в високовольтних джерелах [387];
- вимірювання вібрації в місцях дії сильних електричних полів [315, 398];
- моніторинг температури всередині високовольтних трансформаторів [310];
- вимірювання контрольно-діагностичних параметрів лопаток

вітрогенератора з метою виявлення механічних пошкоджень [325];

- контроль стану обмоток генераторів [338];

- вимірювання та контроль температури потоку охолоджувального повітря генератора, якщо оптичні сенсори розміщені в технологічних отворах охолодження статора, а також вимірювання та контроль магнітного поля поблизу торцевих обмоток [348];

- контроль та вимірювання теплового поля, вібрації кінцевих обмоток та механічного стану (деформації) статора потужних генераторів (рис. 1.6) [312, 336, 398].



Рис. 1.6 Оптиковолоконна система контролю вібрації кінцевих обмоток та механічного стану (деформації) статору

2. Системи контролю стану гідрогенераторів, яка розроблена Бразильською гідроенергетичною компанією Electronorte разом із бразильським центром "досліджень і розробок у системах телекомунікацій Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicacoes створена на основі волоконно-оптичних сенсорів.

У системі з використанням оптиковолоконних сенсорів, заснованих на решітках Брегга, контролюються:

- на роторі – деформація ободу та температура полюсів;
- на статорі – температура обмотки, вібрація осердя та часткові розряди;
- для підшипників – температура та вібрація корпусу, биття вала [366].

3. Оптична система вимірювання місцевих температур стрижнів обмотки статора на основі бреггівських комірок (рис. 1.7). Система сенсорів використовується для безпосереднього вимірювання температури на поверхні стрижнів, а також корпусної ізоляції. Отримана інформація призначена для використання у проектуванні нових машин для уточнення основних теплових параметрів, а саме, питомих втрат в обмотці і теплових опорів [269].



Рис. 1.7 Система вимірювання місцевих температур стрижнів на основі бреггівських комірок для турбогенератора потужністю 225 МВт

4. Систем контролю параметрів АЕС, а саме:

– система контролю та моніторингу ТВЕЛ (Тепловидільний елемент), елементів конструкції корпусу реактора, трубопроводів та деяких інших конструкцій ядерних енергетичних установок при їх конструюванні та експлуатації [11].

– в шляхових контролерах регулювально-запірної арматури трубопроводів АЕС з оптоелектронними сигналізаторами кута повороту вала [180]

5. Системах контролю тиску [18, 75, 136, 305], рівня, вібрацій та відносних переміщень [19, 39, 75, 275, 279].

6. В автоматизованих системах технічного зору з ендоскопічним оглядом конструктивних елементів ПГ [209], особливо з проведення автоматизації вимірювання механічних параметрів електрообладнання на основі комп'ютерної обробки оптичного потоку при використанні спеціалізованого програмного забезпечення [98].

Застосування оптоволоконних ІВК в системах діагностування ПГ дозволяє реалізувати проведення детальних досліджень конструктивних елементів потужних машин для забезпечення необхідної надійності експлуатації ПГ та безпеки обслуговуючого персоналу.

Проведено аналіз існуючих систем діагностування та ІВК, що входять до їх складу показав, що існуючі на даний час засоби не призначені, або потребують значної адаптації для діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ (зміни параметрів повітряного зазору, форми ротора та статора, пружного стиснення активного заліза статора, стяжних призм та тощо). Перспективним напрямком є поєднання мікроелектронних та оптоелектронних технологій надає можливість створити завадостійкі до дії потужних магнітних полів комп'ютеризовані ІВК з оптоелектронними елементами в їх структурі для систем діагностування.

Тому розробка і впровадження в практику ефективних ІВК для систем діагностування ПГ є важливим і перспективним напрямком підвищення надійності їх експлуатації та якості електроенергії, що виробляється.

1.5 Завдання системи діагностування механічних параметрів ПГ

Головним завданням систем контролю та діагностування ПГ є виявлення пошкоджень на ранній стадії їх появи, а також прогнозування їхнього розвитку. Для вирішення поставленого завдання системи контролю та діагностування повинні забезпечувати вирішення наступних задач:

- створення передумов для істотного зниження технологічних порушень і запобігання великих аварій;
- забезпечення всієї вертикалі керування достовірною інформацією про технічний стан устаткування в масштабі реального часу;
- одержання та обробку масиву діагностичної інформації про стан устаткування, необхідного і достатнього для організації ремонтно-експлуатаційного обслуговування обладнання, підтримання технічного стану та керування ресурсом устаткування;
- одержання економічного ефекту за рахунок:
 - а) скорочення інвестиційних витрат на необґрунтоване відновлення устаткування і його комплексне обстеження;
 - б) скорочення чисельності персоналу, як результат впровадження автоматизованих методів діагностування;
 - в) зниження витрат на проведення ремонтів;
 - г) зменшення витрат на страхування обладнання, оскільки страхові компанії встановлюють різні страхові відсотки залежно від наявності або відсутності систем контролю та діагностики обладнання;
 - д) скорочення випадків недопостачання електроенергії з вини обладнання, яке відмовило;
 - е) скорочення випадків штрафних санкцій з боку споживача за заподіяний збиток, у тому числі екологічний, через вихід з ладу обладнання.

Вирішення наведених задач зазвичай відбувається в декілька етапів в процесі створення та впровадження системи технічної діагностування генераторів. На першому етапі розроблюється система з використанням добре відомих і відпрацьованих методів визначення стану вузлів і елементів

електромашини. На наступних етапах, у міру відпрацьовування та перевірки в експлуатації інших методів визначення стану генератора, до системи діагностики першої черги можуть приєднуватися відповідні сенсори та прилади. При цьому майбутні розробки і дослідження необхідно сконцентрувати на вирішенні наступних основних науково-дослідних завдань: збиранню і всебічному аналізу інформації про нормальні та екстремальні експлуатаційні параметри та режими, несправності генератора і допоміжного устаткування; створенню нових сенсорів для виявлення діагностичних ознак, у тому числі для виявлення ступеня ушкодження деталей і матеріалів (зношувань, деформацій, тріщин, стану ізоляції, ступеня корозії та ін.), а також для виявлення непрямих діагностичних ознак (вібрації, шумів, динамічних навантажень, продуктів піролізу, запилення, продуктів зношування в охолоджувальному газі та ін.); розробці методів підвищення вірогідності інформації, яка видається системами контролю та діагностики; розробці методів вбудованого автоматизованого діагностування самих систем.

1.6 Вимоги до характеристик систем діагностування механічних параметрів ПГ та їх інформаційно-вимірювальних каналів

Методи та засоби, які застосовуються для реалізації систем діагностування механічних параметрів ПГ та їх ІВК повинні враховувати складний характер досліджуваного об'єкта, а їх первинні джерела інформації (сенсори) – відповідати певним, досить жорстким вимогам, які враховують не тільки особливості конструкції ПГ, а й особливості їх роботи. Тобто при виборі характеристик системи діагностування та її компонентів необхідно забезпечувати компроміс між вимогами, що враховують складний характер об'єкта дослідження та їх вартістю, а саме:

- *точністю (похибка)* вимірювача, яка характеризується близькістю результату вимірювання до істинного значення вимірюваної фізичної величини;
- *роздільною здатністю*, яка характеризується розмірами обсягу вимірювальної інформації, за якою перетворювач може визначити інтегральне

значення вимірюваної величини з заданою точністю (у першому наближенні просторова роздільна здатність визначається розмірами чутливого елемента перетворювача, причому визначальне значення має розмір чутливого елемента у напрямку максимального градієнта вимірюваної величини);

– *швидкодію*, яка характеризується максимальним значенням частоти зміни вимірюваної величини, для якої динамічні похибки не є надмірними;

– *завадостійкість*, яка характеризується здатністю виконувати свої функції з оптимальною якістю в умовах впливу внутрішніх та зовнішніх завад, що мають місце в ТГ та ГГ;

– *надійність*, яка характеризується властивістю зберігати у встановлених межах часу значення всіх параметрів, які характеризують його здатність виконувати функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування;

– *вартість*, яка характеризується величиною затрат на розробку, виготовлення та експлуатацію протягом терміну експлуатації.

Вимоги до метрологічних характеристик ІВК системи діагностування ПГ визначаються РД 34.11.321-96, технічною документацією на обладнання та характером використання контрольно-діагностичної інформації.

Вимоги до первинних вимірювальних перетворювачів ІВК систем діагностування ПГ, які встановлюються усередині машини, де вони мають працювати в умовах постійного впливу робочого середовища машини визначаються: рівнем електромагнітних полів; діапазоном температур; відсотком вмісту озону та вологи; діапазоном вібрацій.

Так, аналізу існуючих електромагнітних завад присвячена робота [207], пристрій активної компенсації магнітного поля і принцип його роботи описані в [245], специфіка роботи компенсатора напруги мережних перешкод розглянута в [281]. Для визначення правильності обраних мір захисту від ЕМО слід здійснювати випробування ІВС у відповідності із діючими стандартами [52, 67, 68, 70, 72] та врахуванням можливої дії робочого середовища на вимірювач, його складові елементи, ІВС та лінії зв'язку.

1.7 Науково-технічна проблема створення оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних генераторів

Як показано в попередніх розділах, в сучасних умовах експлуатації об'єктів енергетики України є актуальним забезпечення їх безперервної діагностики, в тому числі особливо найважливіших деталей і вузлів, які впливають на ефективність використання енергетичної машини та якості електроенергії, що генерується. 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. Глебов, Г.М. Федоренко, Б.Г. Марченко, М.В. Мислович, В.Ю. Кучерук, З.Т. Назарчук, М.Г. Шульженко, А.С. Левицький, Ю.В. Зозулін, Е.Й. Гуревич, О.С. Голоднова, В.В. Кузьмін, В.І. Мілих, Г.В. Ростик, М. Bissonnette, J. Lin, P. Talas, P. Toom, J. Rassmussen, V. Howard та інші.

Проте до теперішнього часу залишаються недостатньо розробленими теоретичні та методологічні основи проектування і практичної реалізації оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ та їх ІВК. Адже, ключовим у розвитку засад побудови є необхідність успішного вирішення завдання балансування між системними вимогами, що враховують складний характер об'єкта дослідження та інтегральною вартістю всіх компонентів системи діагностування по відношенню до вартості нового ПГ.

Необхідно, також зазначити, що вирішення завдання підвищення надійності функціонування і визначення дійсного технічного стану ПГ, як механічної системи в цілому, аналізу причин виникнення та розвитку дефектів неможливо без застосування сучасних систем технічної діагностики на основі комп'ютеризованих ІВК зі спеціалізованим програмно-математичним забезпеченням [101, 103, 104, 155, 216], засобами попередньої обробки інформаційно-вимірювальних електричних сигналів та первинних сенсорів [156-158, 162], адаптованих до умов експлуатації і конструктивних особливостей зони контролю параметрів механічних дефектів [157, 7, 8].

Чудовою геометричною ілюстрацією балансування між вимогами є

багатогранник компромісів, у якому кожна із вимог є гранню, а вага вимоги – довжина грані. На рис. 1.8 у вигляді тетраедра (трикутної піраміди) показано умовний баланс вимог за системними вимогами до ІВК систем діагностування, який допомагає проілюструвати наявні обмеження, а також є засобом для пошуку компромісних рішень при реалізації ІВК систем діагностування. Для досягнення рівноваги та підтримання балансу при модифікації сторін багатокутника необхідно враховувати системні вимоги до вимірювача в залежності від типу механічного дефекту. У свою чергу – це обумовлює необхідність розробки різних типів ІВК.

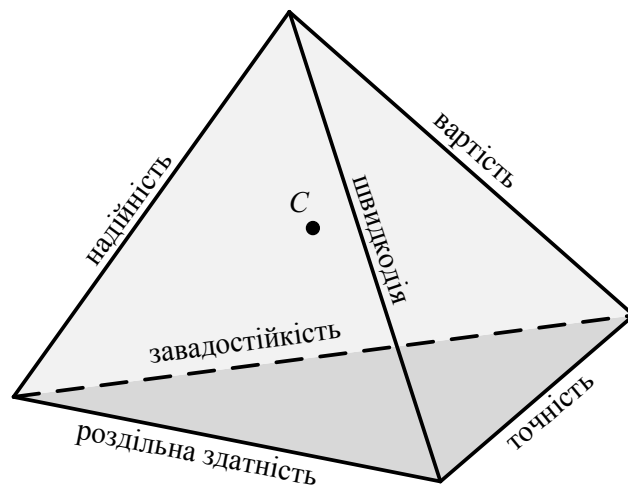


Рис. 1.8 Піраміда компромісів системних вимог

Отже, необхідність забезпечення компромісу між системними вимогами до ІВК систем діагностування при їх реалізації для ефективного контролю механічних параметрів основних вузлів ПГ є досить актуальною та перспективною задачею, вирішення якої дозволяє вирішити проблему підвищення надійності роботи гідрогенераторів, значно скоротити час простоїв, пов'язаних з незапланованим ремонтом, а також надасть можливість переходу від запланованих ремонтів до ремонтів згідно з фактичним станом генератора, що в свою чергу забезпечить Україні незалежність від потреби застосування зарубіжних систем технічної діагностики електроенергетичного обладнання.

Вище викладене дає змогу 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 ІВК, що мають малі розміри, є завадостійкими до дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування та забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану генераторів.

Вирішення цієї проблеми дозволяє обґрунтувати і запропонувати для практичного використання на ПГ нові типи комп'ютеризованих ІВК із волоконо-оптичними елементами у їх структурі для систем діагностування ПГ, які реалізують можливості сучасних технологій контролю та вимірювань в автоматизованому режимі, функціонування у важкодоступних місцях та в умовах робочого середовища потужних ТГ та ГГ (дії високих магнітних полів, електромагнітних завад, підвищеної вологості, температури, тощо), адаптацію до вимірюваного параметрів МД за рахунок зміни геометрії та типу чутливого елемента, а також створення спеціалізованого програмно-математичного забезпечення, призначеного для отримання оптимальних значень контрольно-діагностичних параметрів, які використовуються для функціонального діагностування турбогенераторів і є предметом розгляду, якому присвячені наступні розділи дисертаційної роботи.

Висновки до розділу 1

1. За результатами аналізу особливостей розвитку дефектів ПГ показано, що значна кількість фізичних процесів ПГ характеризується вібраціями та деформаціями конструктивних елементів машини, що можуть бути визначені при діагностуванні параметрів механічного стану основних вузлів ПГ.

2. Аналіз сучасних існуючих систем показав, що вони або морально застаріли, або не в повній мірі задовольняють сучасним вимогам, або для використання вимагають значну адаптацію до технічних характеристик ПГ, що експлуатуються та виготовляються в Україні. Це визначає необхідність реалізації систем діагностування механічних параметрів ПГ до складу яких входять

спеціалізовані комп'ютеризовані ІВК, що мають малі розміри та вартість, є завадостійкими до дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування та забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану генераторів, за рахунок використання в їх структурі поєднання мікроелектронних та оптоелектронних технологій та вдосконаленням математичних моделей й алгоритмів опрацювання контрольно-діагностичної інформації як в статичному та і в динамічному режимі роботи ПГ для проведення їх діагностування по фактичному технічному стану.

3. Основними факторами, що ускладнюють використання існуючих систем діагностування механічних параметрів ПГ є необхідність забезпечення високого рівня завадостійкості при забезпеченні достатньої точності, роздільної здатності отримання значень контрольно-діагностичних параметрів та вартості системи діагностування.

4. Визначено основні вимоги до характеристик систем діагностування механічних параметрів ПГ до складу яких входять комп'ютеризовані ІВК.

Посилання: [1, 2, 7, 8, 11-21, 31, 39, 46-50, 52, 56, 60, 63, 67, 68, 70-72, 75-77, 85, 98, 101-104, 107, 122, 125, 135, 136, 138, 141, 143, 147- 150, 155-160, 162, 164, 168, 171, 175, 178, 180-182, 186-188, 193, 195, 197, 199, 203, 206, 207, 209, 210, 212, 216-218, 222, 224, 226-228, 230, 231, 236, 237, 239, 241-243, 245, 246, 254, 258, 260, 263, 269, 270, 272, 275, 277-279, 281-283, 287-293, 297, 301, 303, 305, 307, 310-312, 315, 320, 323, 325-331, 336, 338, 343, 348-351, 356, 360-363, 365, 366, 370, 376, 384, 385, 387, 392, 398]

див. список використаних джерел стор. 303–344.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ

Вирішення складної науково-прикладної проблеми, якою є оцінка стану і працездатності ПГ, обумовлює необхідність у вирішенні завдання розробки оптимальних за структурою, завадостійких та точних систем діагностування механічних параметрів потужних генераторів.

Вирішення поставленого завдання за умов використання традиційних структур на сьогодні є безперспективним і може бути вирішено завдяки застосуванню оптоелектронних технологій в структурі систем діагностування механічних параметрів ПГ. Це надає можливість покращити метрологічні характеристики як інформаційно-вимірювальних каналів так і оптоелектронної системи діагностування механічних параметрів, що дозволяє забезпечити підвищення достовірності оцінювання технічного стану генераторів. Адже у більшості випадків контроль параметрів механічних параметрів необхідно здійснювати в досить жорстких умовах внутрішнього робочого середовища об'єкту діагностування, якому властиві наявність потужних магнітних полів, високої температури, підвищеної вологості, озону, перехресних наведень між комунікаційними лініями, а також вібрації в широкому діапазоні частот.

Отже, задачею даного розділу є розробка оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ до складу яких входять комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні канали, що забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану і є завадостійкими до дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування.

2.1 Аналіз і обґрунтування методів побудови комп'ютеризованих оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Задача створення завадостійких та точних систем діагностування механічних параметрів ПГ може бути вирішена використанням в їх структурі оптико-електронних елементів (Наприклад: оптоволокно, фотоприймачі, лазери, оптичні розгалужувачі, оптичні комірки та інші). Інформаційно-вимірювальні канали систем діагностування з оптоелектронними елементами в своїй структурі [36, 129, 142, 184, 190, 198, 200, 280] становлять окремий клас інформаційно-вимірювальні каналів [230], що мають набір особливих властивостей (Додатку Г), яким не володіють інформаційно-вимірювальні канали систем діагностування інших типів. [107, 108, 230].

Отже, *інформаційно-вимірювальний канал системи діагностування з оптоелектронними елементами* – це самостійний інформаційно-вимірювальний канали, або ж його функціонально закінчена одиниця, що містить у своїй структурі сукупність оптичних, мікроелектронних, механічних, обчислювальних та інших елементів і вузлів або будь-яку їх комбінацію, , що насамперед зумовлено об'єктом вимірювання, економічними чинниками та специфікою вимірювальної задачі, яка вирішується та призначених для перетворення механічної енергії в цифровий інформаційний сигнал, його обробки та формування контрольно-діагностичних параметрів.

Враховуючи вище наведене, системи діагностування з оптоелектронними елементами, умовно, за типом чутливого елементу [198, 294], можна розділити на два типи: гібридні системи діагностування з волоконно-оптичні або гібридні електронно-оптичні інформаційно-вимірювальними каналами (далі гібридні системи діагностування) [96, 153, 154] та оптоволоконні системи діагностування механічних параметрів ПГ.

В гібридних системах діагностування фіксація механічних параметрів основних вузлів застосовуються спеціальні перетворювачів механічної енергії (переміщення, тиск, вібрація, тощо) в електричну. Слід зазначити, що на сьогодні

існує різноманітність первинних чутливих елементів (ПЧЕ), що можуть бути використані для фіксації механічних параметрів, але, враховуючи особливості робочого середовища ТГ та ГГ, вони не всі можуть бути використані. Так наприклад, досить поширені п'єзоелектричні ПЧЕ для перетворення механічних величин в електричний сигнал, мають ряд недоліків (невисока чутливість, непридатність для вимірювання статичних величин, високий вхідний опір вимірювального кола, відносно невисокий рівень вихідного сигналу, що потребує проміжних підсилювачів, висока чутливість до електричних та магнітних полів, малий діапазон значень, що підлягають вимірюванню, тощо.) [265-267]. Це ускладнює їх використання для вимірювання механічних дефектів безпосередньо в місці їх виникнення в ТГ та ГГ. Тому основні типи ПЧЕ, що можуть бути використані у побудові гібридних вимірювачів параметрів механічних дефектів в потужних генераторах показані на рис. 2.1.

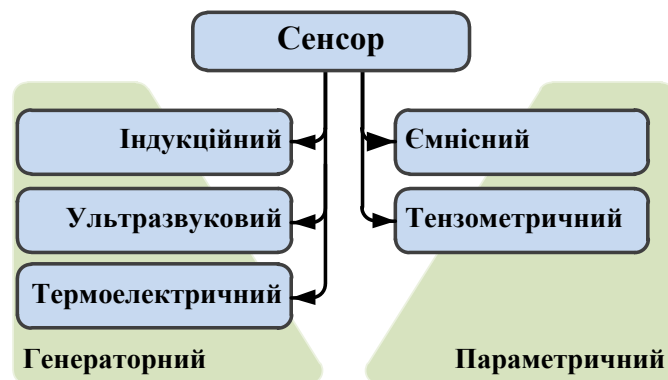


Рис. 2.1 Класифікація первинних вимірювальних перетворювачів для гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Аналіз закордонних та вітчизняних вимірювачів параметрів електроенергетичного обладнання (див. Розділ 1) показує, що найбільшого використання набули ПЧЕ, які базуються на ємнісному та оптичному методі вимірювання [147, 290, 299, 309, 343, 356]. Останнє пов'язане з суттєвими перевагами ємнісних та оптичних ПЧЕ над іншими типами ПЧЕ (див. Додаток Г). Також, необхідно зазначити, що незважаючи на те, що існує велике

різноманіття електронних вимірювальних пристроїв із первинними вимірювальними перетворювачами (сенсорами) різних механічних контрольно-діагностичних величин в електричні сигнали, що задовольняють дуже широкий діапазон вимірювання, в той самий час, їх використання обмежене або навіть є неможливим. Останнє пов'язане насамперед з тим, що контроль стану обладнання електростанцій здійснюється в умовах високих напруг, електромагнітних завад, широкого діапазону температур, вібрацій, агресивних середовищ, і часто в таких місцях, доступ до яких обмежений.

Тому особливістю сучасних систем діагностування є необхідність використання значної кількості екранованих кабелів як ліній зв'язку від первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) до засобів обробки. Недоліком такої реалізації є низька завадостійкість вимірювачів, що обумовлена взаємними перехресними електромагнітними зв'язками та зовнішніми наведеннями. Низька завадостійкість, своєю чергу, призводить до зниження достовірності роботи системи технічної діагностики в цілому. Реалізація завадостійких електронних вимірювальних пристроїв вимагає застосування спеціалізованих екранованих кабелів, складних апаратно-програмних способів та алгоритмів реалізації завадостійких вимірювальних каналів, що занадто ускладнює та здорожчує створення вимірювачів механічних параметрів ПГ [317].

Отже, використання ємнісних ПЧЕ в реальних умовах робочого середовища ускладнено рядом проблем, що перешкоджають отриманню високої точності вимірювання параметрів механічних дефектів потужних генераторів. Основними проблемами є:

- чутливість з'єднувальних ліній первинного вимірювального перетворювача та ПЧЕ до впливу зовнішніх електромагнітних полів, зумовлена тим, що вихідні сигнали сенсорів знаходяться у мілівольтовому діапазоні, а завада, як засвідчили результати проведених експериментальних досліджень, може досягати значення до 200мВ на 1 см ліній за її ширини 0,2 мм, а також дії індукції магнітного поля 0,67 Т;

- власні електромагнітні поля з'єднувальних ліній, в яких виникають перехресні електромагнітні зв'язки (перехресні завади), що знижують завадостійкість вимірювачів та достовірність роботи системи технічної діагностики в цілому;

- необхідність застосування значної кількості спеціалізованих коаксіальних кабелів із одинарним екраном, а в багатьох випадках – триаксіальних кабелів із подвійним екраном для передачі електричних сигналів від сенсорів до їх первинних вимірювальних перетворювачів [364].

Окрім того, більшість механічних параметрів змінюються в часі, зазвичай, повільно, тобто основна потужність інформаційного сигналу вимірювача із ємнісним ПЧЕ концентрується в низькочастотній смузі [132]. У цьому разі основною перешкодою отримання високої точності вимірювання інформаційних сигналів в низькочастотній смузі є флікер-шум, спектральна щільність якого обернено пропорційна частоті сигналу. Як відомо із [273, 274, 276], флікер-шум не підлягає зменшенню шляхом усереднення. Причинами наявності флікер-шуму в вимірювачах є неоднорідності в провідниках та лініях, генерація і рекомбінація носіїв заряду в транзисторах, які містяться в мікроелектронних елементах і т.п. Одним із можливих варіантів зменшення впливу флікер-шуму на результат вимірювання контрольно-діагностичних параметрів є використання методів вимірювання ємності на змінному струмі або напрузі, наприклад: застосуванням сигма-дельта перетворювачів ємності в цифровий код, компенсаційно-мостових схем або синхронних вимірювальних перетворювачів з подальшим аналого-цифровим перетворенням змін вихідного інформативного параметра первинного вимірювального перетворювача, що відображає зміну вимірюваної величини.

Розглянуті проблеми, які виникають при реалізації гібридних систем діагностування, можуть бути вирішені за рахунок застосування в їх структурі волоконно-оптичних ліній [75, 154]. У цьому разі передача інформаційних даних та, за необхідності, передача оптичної енергії для живлення первинних та вторинних вимірювальних перетворювачів в ізольованій зоні здійснюється через

волоконно-оптичні лінії. Така реалізація вимірювального перетворювача дозволяє:

- підвищити стійкість систем управління та передачі контрольно-діагностичних даних до впливу зовнішніх електромагнітних полів;
- знизити рівень перехресних завад між лініями передачі інформаційних даних;
- знизити масу системи діагностики в цілому, за рахунок зменшення маси ліній зв'язку вимірювачів і системи технічної діагностики потужних генераторів (Наприклад: маса вимірювачів становить від 0,1 до 1500г, при цьому сумарна маса електричних кабелів, що з'єднують сенсори з їх вимірювальними перетворювачами та із системою реєстрації даних, становить понад 12% від загальної маси системи технічної діагностики [177]);
- використовуючи загальновідомі переваги волоконно-оптичних технологій і традиційних первинних сенсорів та відповідних їм вторинних вимірювальних перетворювачів, створювати високоточні і економічно вигідні системи контролю, моніторингу та діагностики не тільки потужних генераторів [349], а й інших різних цивільних та промислових об'єктів та механізмів [5, 6, 40, 74, 77].
- уникнути ефектів, пов'язаних із подвійним променезаломленням [317], що притаманні оптоволоконним чутливим елементам;
- уникнути труднощів, пов'язаних із компенсацією дії вібраційних прискорень в широкому діапазоні частот та віброударів на оптоволоконні первинні чутливі елементи.

Можливість використання оптоволоконних інформаційно-вимірювальних в системах діагностування визначається, перш за все, пожежо- та вибухобезпечним виконанням вимірювача і каналів передачі даних, що є особливо актуальним для турбогенераторів із водневим охолодженням, а також забезпеченням заданої необхідної надійності і стійкості до зовнішнього та внутрішнього середовища, можливістю інтеграції в діючу систему технічної діагностики енергетичного обладнання, швидкістю та завадостійкістю передачі інформації. Окрім того

оптоволоконні системи за своїм фізичним принципом дії є абсолютно інертними до дії потужних електромагнітних полів, можуть забезпечувати заданий рівень надійності і стійкості до зовнішніх і внутрішніх «антропогенним» антропогенних, техногенних і природних загроз, мають низький рівень габаритно-вагових характеристик чутливих елементів, повну відсутність електричних ланцюгів, забезпечують простоту інтеграції в сенсорну мережу, швидкість передачі даних, можливість апаратного і функціонального резервування. З урахуванням того, що світло має хвильову структуру [130], оптоволоконні вимірювачі прохідного та відбивного типів можуть використовувати різні методи модуляції оптичного потоку в процесі контролю. При цьому обробка інформації, що міститься в потоці оптичного випромінювання, супроводжуються перетворенням оптичної енергії в інформаційний електричний сигнал [256], параметри якого є відображенням зміни параметрів механічних дефектів в потужних генераторах. Зазначені властивості оптичного інформаційного сигналу використані в роботах [59, 79-81, 83, 88, 208, 213, 251], що проведені за безпосередньої участі автора для реалізації обробки сигналів оптоволоконних системах діагностування механічних параметрів ПГ.

Також незважаючи на сучасні досягнення у сфері автоматизації, комп'ютеризації та створення автоматизованих систем, як свідчить практика вимірювання механічних параметрів [7, 14, 20, 47, 164, 165, 179, 195, 211, 217, 218, 262, 318, 343] застосування інформаційно-вимірювальних каналів в системах технічної діагностики залишається або не повністю автоматичним або взагалі в більшості випадків використовується лише при планових оглядах в ручному режимі.

На рис. 2.2 показано можлива класифікація оптоелектронних систем діагностування (ОСД) в залежності від механічного параметру ПГ, фізичної величини, що контролюється, первинного вимірювального перетворювача (сенсору), а також чутливості до впливу магнітного поля об'єкту діагностування.

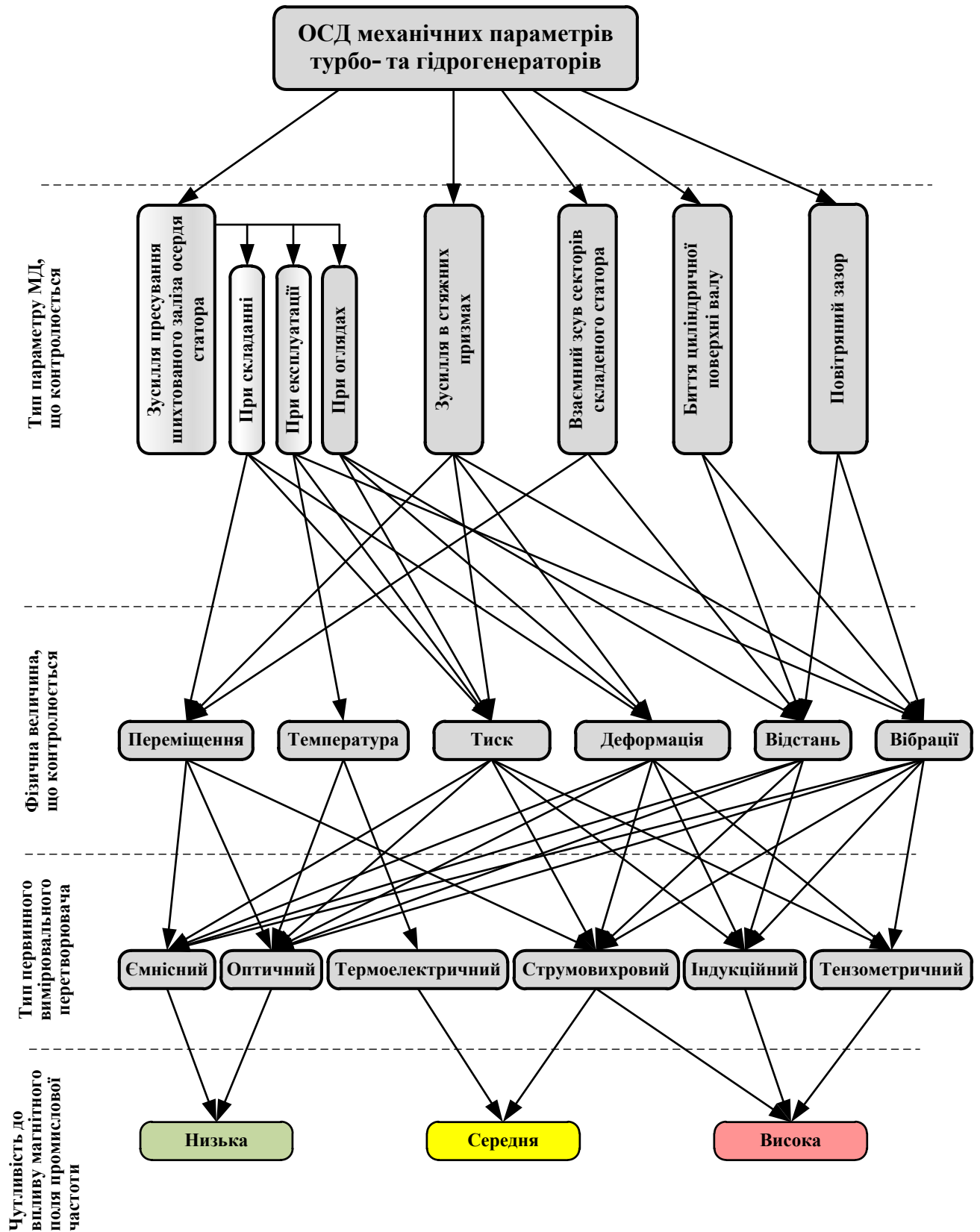


Рис. 2.2 Класифікація комп'ютеризованих оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ

2.2 Особливості побудови комп'ютеризованих оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Істотною особливістю, яку потрібно враховувати при реалізації компонентів інформаційно-вимірювальних каналів систем діагностування механічних параметрів основних вузлів ПГ призначених для вимірювання, перетворення та попередньої обробки є те, що до вимірювачів параметрів МД потужних генераторів, які працюють на електростанціях, висуваються досить високі вимоги згідно ДСТУ ІЕС 61000 «Електромагнітна сумісність» та НП 306.2.141-2008 «Загальні положення безпеки атомних станцій», у відповідності до яких вони повинні бути стійкими до впливу магнітного поля промислової частоти з напруженістю 30А/м з критерієм якості функціонування А [69, 194].

Іншою особливістю проведення технічної діагностики ПГ є необхідність використання гами спеціалізованих вимірювачів для реєстрації контрольно-діагностичних параметрів, які характеризують протікання робочих процесів в машині. Тому при створенні розподіленої інформаційно-вимірювальної системи діагностування необхідно враховувати можливість використання мережі інформаційно-вимірювальних каналів (Додаток Г).

2.3 Принципи функціонування та структура комп'ютеризованих оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Гібридна система, що описана в розділі 1.4, передбачає використання параметру шпаруватості ШІМ сигналу, як інформаційної складової, яка є пропорційною параметру, що вимірюється. У цьому разі чутливі первинні елементи використовуються як ланки, що формують параметри(шпаруватість) ШІМ сигналу. Основними недоліками такого способу вимірювання є недостатня точність та роздільна здатність, обмежена кількість каналів та, в багатьох випадках, нелінійність функції перетворення сенсора. Також необхідно відмітити, що описана схема та первинні чутливі елементи, що в ній

застосовуються, не призначені для вимірювання механічних параметрів потужних генераторів. Зазначеного недоліка позбавлені комп'ютеризовані оптоелектронні системи діагностування механічних параметрів ПГ, запропоновані та досліджені за безпосередньої участі автора в роботах [97, 117, 215, 393]. Зазначені системи передбачають виконання зазначених вимог у [69, 194], а також забезпечують необхідний рівень пожежо- та вибухобезпечного виконання вимірювача і його каналів передачі даних.

На рис. 2.3 представлено застосування гібридного волоконно-оптичного вимірювача (ГВОВ) механічних параметрів в структурі комп'ютеризованої системи технічної діагностики ПГ. Як зазначено в [215], конструктивно схема ІВС складається із двох основних частин – мережі ГВОВ механічних параметрів, розташованих в ізольованій зоні, та засобів технічної діагностики, що знаходяться в безпечній зоні. Під безпечною зоною розуміється безпечна відстань, на якій мінімізований вплив робочого середовища (електромагнітні поля, температура, тощо), що виникає в ізольованій зоні під час роботи потужних генераторів на засоби обробки контрольно-діагностичної інформації. У цьому разі робоче середовище, як відомо, є потужним джерелом магнітних випромінювань промислової частоти [64, 66], які пронизують весь внутрішній об'єм генератора та присутні в окремих точках машинного залу, а також в прилеглих приміщеннях [42]. Розглянутий варіант побудови системи ІВС із ГВОВ ПМД запропоновано автором для використання системах контролю стиснення заліза статора турбогенератора [112, 201], контролі повітряного зазору [101, 107, 215] та для вимірювання інших контрольно-діагностичних параметрів ПГ.

Особливістю функціонування оптоелектронних систем діагностування параметрів механічних дефектів ПГ є використання волоконно-оптичних ліній для передачі інформаційних сигналів в цифровому виді з високою швидкістю, або, за потреби – в аналоговому вигляді. У цьому разі модульований по току або напрузі вихідний сигнал від традиційних сенсорів перетворюється в цифровий оптичний сигнал, який потім передається з області з високим електромагнітним

для модулю керування роботою системи технічної діагностики (МКСТД). Далі цифровий код поступає в систему обробки інформаційних даних ПМЗ.

У випадку передачі сигналів з МКСТД до ГВОВ механічних параметрів система працює аналогічно. При цьому для уникнення зовнішніх впливів (електромагнітні поля, температура тощо), що мають місце в ізольованій зоні під час роботи енергетичного обладнання, засоби обробки інформаційних сигналів з первинних перетворювачів віднесені на безпечну відстань.

Така побудова вимірювальної системи дозволяє поєднати в собі переваги волоконно-оптичних та мікроелектронних технологій. У цьому разі основним елементом СКД ПГ (рис. 2.3), який визначає її метрологічні характеристики, є ГВОВ параметрів МД. ГВОВ механічних параметрів призначений для виконання функцій вимірювання, попередньої обробки інформації та передачі даних по запиту або в неперервному режимі до модуль керування (МК) роботою комунікаційна підсистема.

На рис. 2.4 показана узагальнена структура окремого ГВОВ, що є по суті інформаційно-вимірювальним каналом системи діагностування, запропонований автором в роботах [108, 112, 117, 393], і призначений для вимірювання параметрів ПМД. Структура на рис. 2.3 містить чутливий елемент, як первинний вимірювальний перетворювач (ПВП), мікроконтролерний вторинний вимірювальний перетворювач (ВВП) фізичної величини у цифровий код із відповідним програмно-математичним забезпеченням, оптичний інтерфейс з перетворювачем світло-код/код-світло (ПКССК) та джерело живлення (ДЖ).

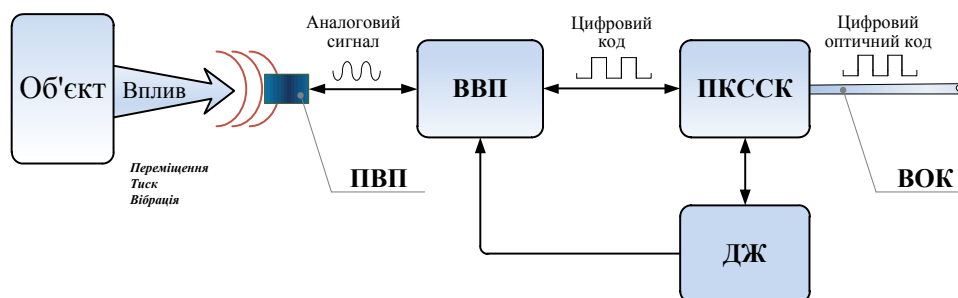


Рис. 2.4 Узагальнена структура ГВОВ ПМД

ГВОВ механічних параметрів працює наступним чином. ПВП (чутливий елемент) – перетворює величину d_X в значення ємності C_X . Далі значення ємності 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.

Далі комунікаційна підсистема МК забезпечує збір вимірювальної інформації (у формі цифрового коду), використовуючи ($K_1...K_m$) для вибору відповідної групи ВВП, та його перетворення у відповідний цифровий пакет (фрейм) у форматі передачі даних типу NRZ (NRZ "Non-Return to Zero" – без повернення до нуля, що є методом кодування інформації, згідно якого одиничні біти (логічна одиниця) кодуються позитивним значенням напруги або струму, а нульові (логічний нуль) – значенням, близьким до нуля, або негативним).

Крім 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 (ПК ССК), що є частиною комунікаційної системи ІВС із ГВОВ параметрів МД технічної діагностики потужних ГГ та ГГ. Способи використання ДЖ для забезпечення живлення ГВОВ ПМД детально розглядаються в наступних розділах.

За умови використання в якості перинних чутливих елементів оптоволоконних сенсорів, маємо другий тип системи - оптоволоконну систему діагностування механічних параметрів ПГ. Ця система на відміну від гібридної в якості ПВП та ВВП використовує відповідно волоконно-оптичний сенсор та оптико-електронну систему. У цьому разі загальна функціональна схема оптоволоконну систему діагностування ПГ є аналогічною гібридній системі діагностування, наведеній на рис. 2.3. Метод опрацювання сигналів оптоволоконних систем діагностування ПГ приведено в Додатку Ж

Отже, розглянута в цьому підрозділі узагальнена структура комп'ютеризованої оптоелектронної системи діагностування механічних параметрів ПГ є комбінацією переваг волоконно-оптичних і мікроелектронних технологій. Поєднання технологій дозволяє реалізувати досить прості за

конструкцією і технологією виготовлення вимірювачі із ємнісними або оптичними сенсорами, які мають дуже широкий діапазон вимірювання і, водночас, високу розрізняльну здатність. Це дозволяє досить просто адаптувати їх до вимірювання необхідного в кожному конкретному випадку механічного параметру, що вимагає досягнення компромісу в виборі необхідної швидкодії, діапазону значень вимірюваної величини, вартості і розрізняльної 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.

2.4 Гібридні системи діагностування механічних параметрів ПГ

2.4.1 Повітряного зазору ПГ

Повітряний зазор між ротором і статором є одним з найважливіших параметрів потужного ПГ, в якому механічна енергія обертання перетворюється в електричну енергію, а його величина є порівняно невеликою в порівнянні з діаметром розточення статора. У таких умовах особливо складно домогтися стабільної величини та рівномірності повітряного зазору при експлуатації. Під час роботи машини відхилення зазору від номінальних величин виникає внаслідок спотворення форми ротора та осердя статора. Все це викликає актуальну необхідність автоматизованих систем діагностування повітряного зазору як в процесі експлуатації, так і під час оглядів та ремонтів.

Для вирішення завдання контролю повітряного зазору капсульних ПГ СГК538/160–70М, а також в подальшому визначення його нерівномірності та аналізу причин, що викликали появу нерівномірності, автором в була запропонована блок-схема систем технічної діагностики на основі комп'ютеризованих систем технічної діагностики, що містять спеціалізоване програмно-математичне забезпечення [84, 101, 235]. Як ПВП, в схемі

використано оригінальний ємнісний сенсор, адаптований до умов експлуатації та конструктивних особливостей зони контролю повітряного зазору капсульного ГГ СГК538/160–70М [157, 158].

Можливим варіантом побудови гібридної системи технічної діагностики повітряного зазору [235] є блок-схема, приведена на рис. 2.5. На схемі показано фрагмент повітряного зазору ГГ із встановленим ГЕОВ сенсором на осерді статора 3 та узагальнену блок-схему апаратно-програмного забезпечення ЕОВ повітряного зазору ГГ. На схемі прийняті наступні позначення: 1 – ротор; 2 – полюс ротора; 3 – осердя статора; 4 – волоконно-оптичний канал передачі інформації; 5 – оптоволоконний джгут волоконно-оптичного каналу передачі живлення; ПВП1, ПВП2 – ємнісні сенсори вимірювачів 1 та 2 відповідно до рис.1; ВВП1, ВВП2 – вторинний перетворювач ємність цифровий код; МК1, МК2 – мікроконтролери; Інт – інтерфейс; ОЕП – оптоелектронний перетворювач інформаційних сигналів; СК – система керування; БЖМ – блок живлення ГЕОВ в ізолюваній 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.

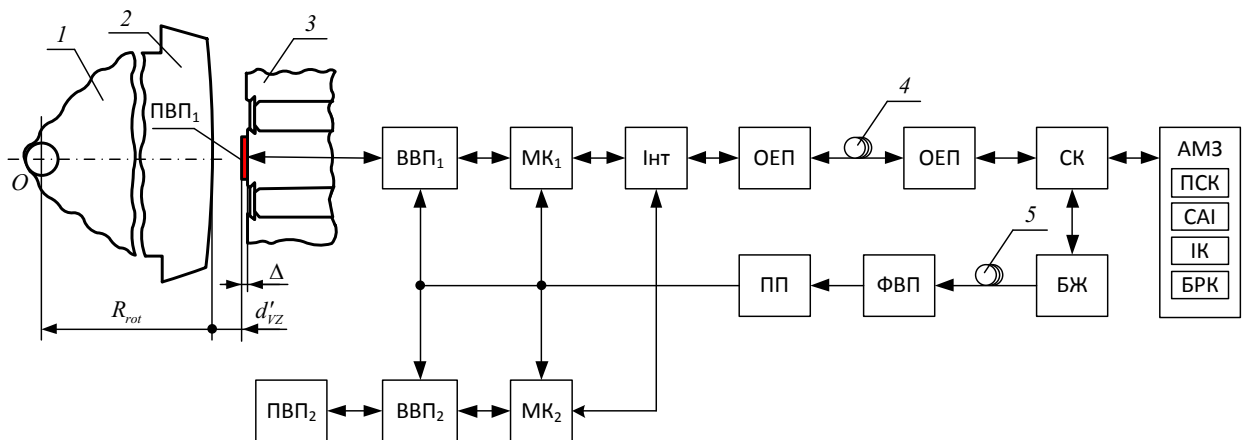


Рис. 2.5 Блок-схема систем діагностування повітряного зазору в капсульних ГГ СГК538/160–70М.

За використання запропонованого сенсора електричної ємності C_x сенсора між поверхнею електродів сенсора і поверхнею кожного з полюсів ротора залежить від відстань dx , який встановлено на розточенні осердя статора. На рис. 2.6 наведена схема встановлення сенсорів на гідрогенераторі, де показано: 1 – ємнісний сенсор; 2 – зубець осердя статора; 3 – полюс ротора.

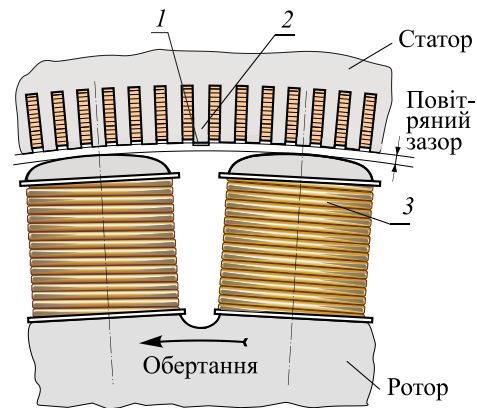


Рис. 2.6 Схема розташування сенсора на розточенні статора

Відповідно до інструкції по експлуатації та ремонту гідрогенераторів асиметрія повітряного зазору визначається відхиленням значень зазорів у діаметрально протилежних точках як напівсума значень цих зазорів [232]. У цьому разі ємнісні сенсори (рис. 2.7), поз.2, як правило, розташовані на розточенні осердя групами в площинах, перпендикулярних осі обертання ротора [324]. Мінімальна кількість сенсорів, що встановлюється – по два в одній площині, розташовані під кутом 90° один відносно одного; а засоби обробки віднесені на достатню відстань, яка убезпечує їх від істотного впливу зовнішніх факторів (електромагнітних полів, температури та ін.) (рис. 2.7).

2.4.2 Ступеню стиснення активного заліза статора ПГ

Для ефективного способу контролю стиснення шихтованого осердя можуть в запропоновано схему розміщення компонентів гібридної системи діагностування зусиль стягування осердя ТГ типу. У цьому разі використання в якості ПВП спеціалізованих вимірювачів ємнісного типу [105], забезпечується необхідні метрологічні характеристики, щодо ступеню контролю стиснення осердя статора ТГ.

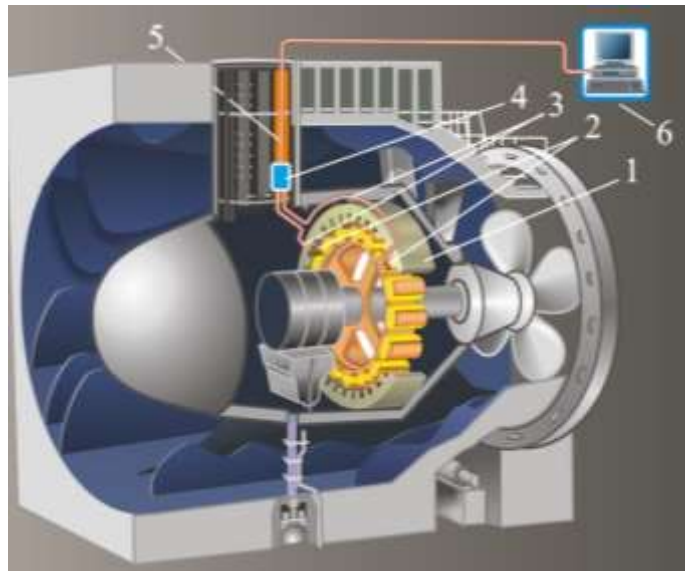


Рис. 2.7 Гібридна система діагностування повітряного зазору:
 1 - осердя статора гідрогенератора; 2 - ПВП ємнісного типу з інтегрованим ВВП;
 3 - інформаційний з'єднувальний кабель; 4 - оптоелектронний перетворювач інформаційних сигналів; 5 - оптичний з'єднувальний кабель між ВВП і засобами обробки системи технічної діагностики; 6 - засоби обробки системи контролю та технічної діагностики

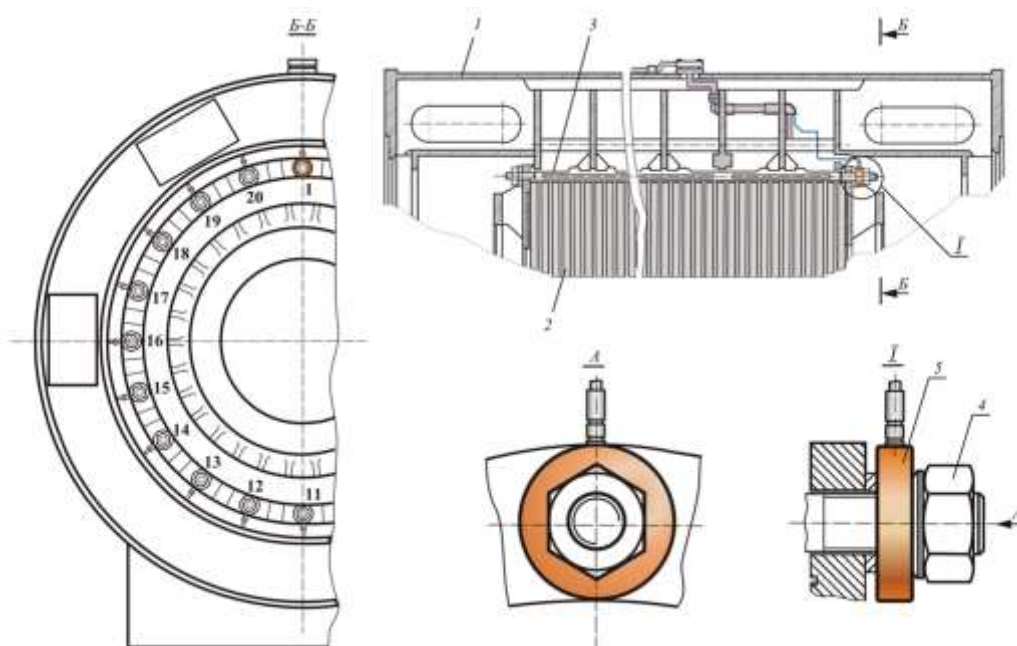


Рис. 2.8 Схема розміщення ПВП комп'ютеризованої системи контролю зусилля стягування осердя статора ТГ

Схема розміщення компонентів системи приведена на рис.2.8, де: 1 - статор генератора, 2 - осердя ТГ, 3 - стяжна призма, 4 - пресувальна гайка, 5 - ємнісний сенсор ступеня пресування осердя ТГ. З урахуванням схеми розміщення ПВП комп'ютеризованої системи контролю зусилля стягування осердя статора ТГ автором в роботі [102] була запропонована схема системи технічної діагностики та контролю ступеня спресованості осердя статора, яка представлена на рис. 2.9. На блок-схемі (рис. 2.9) прийняті наступні умовні позначення: 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 керування та програмно-математичного забезпечення; БДВЦ – блок ємнісних датчиків з цифровим виходом; СМ – система моніторингу.

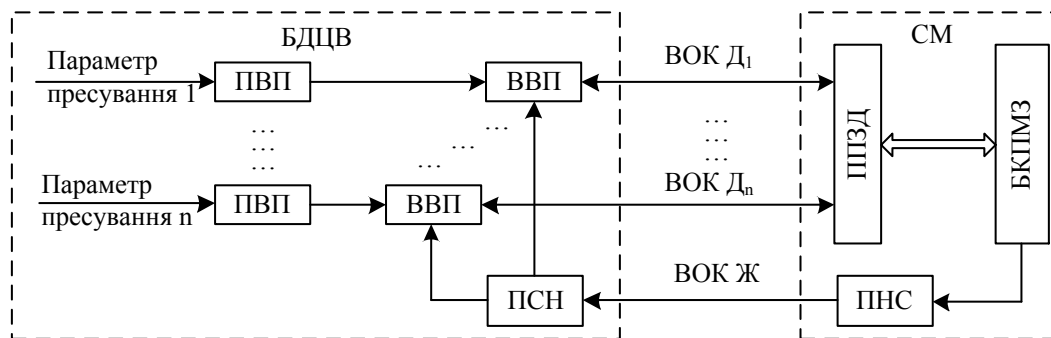


Рис. 2.9 Блок-схема системи технічної діагностики та контролю зусилля пресування осердя статора ТГ

Для забезпечення компактності побудови системи контролю використовується спеціалізовані ємнісні сенсори [337] у сукупності з поширеними мікросхемами перетворювачами ємність-код (CDC) та ВОК для передачі даних та живлення мікроелектронних елементів сенсора. Сенсори контролю зусилля стягування осердя статора ТГ розміщуються під кожною гайкою з двох сторін стяжної призми осердя ТГ рівномірно по колу [128], що дає можливість отримати повну картину стану спресованості по торцю осердя статора ТГ [164].

Конструктивно система контролю зусилля стягування осердя статора ТГ складається з двох основних частин – ємнісного датчика з цифровим виходом

(ДЦВ) в якості первинного перетворювача та безпосередньо СМ в якості блоку вторинної обробки отриманої від первинних перетворювачів інформації. На первинний блок обробки інформації покладені функції перетворення значення ємності від зусилля пресування в цифровий код з подальшою передачею цифрового коду в пристрій перетворення та збирання інформації (ППЗД). Для вторинної обробки сигналу використовується СМ, яка складається з пристрою перетворення та збирання даних (ППЗД), блоку керування та програмно-математичного забезпечення (БКПМЗ). СМ призначена для управління перетворювачами ємність-код типу CDC при передачі інформації від ДЦВ до ППЗД з метою її подальшої обробки на основі спеціалізованого програмно-математичного забезпечення БКПМЗ, а також керування перетворювачем напруга-світло (ПНС). ПНС призначений для передачі оптичного живлення через ВОК Ж та його перетворенням в напругу за допомогою ПСН. Для передачі даних керування роботою ДЦВ та вимірювальної інформації від ДЦВ в БКПМЗ в ГВОВ використовується волоконно-оптичний канал.

З огляду на те, що зміна тиску є процесом, який повільно змінюється з часом, то для роботи в автоматичному режимі на одну машину можна встановлювати систему акумуляторів з сенсорами, один комутатор, один вторинний вимірювальний перетворювач і один процесор для обробки результатів вимірювання ємностей.

З метою періодичного контролю для всіх машин одного типу можна використати переносне електронне обладнання, яке буде також складатися з комутатора, вторинного вимірювального перетворювача і, звичайно, комп'ютера.

Запропонована гібридна система діагностування призначена для контролю зусилля пресування осердя статора потужних турбогенераторів. Отримані з ГВОВ сенсорів сигнали з урахуванням функції перетворення можуть бути використані при формуванні контрольно-діагностичних параметрів в системах технічної діагностики ТГ, а також для прийняття рішень про додаткові підтяжки ненавантажених і розвантаження найбільш навантажених статорних призм для зниження інтенсивності їх руйнування.

2.4.3 Биття циліндричних поверхонь валів ПГ

Схема розташування ГЕОВ сенсорів, у відповідності до [330, 331] приведена на рис.2.10. У цьому разі блок-схема системи діагностування биття валу, за структурою аналогічна описаній в попередньому розділі (рис. 2.5).

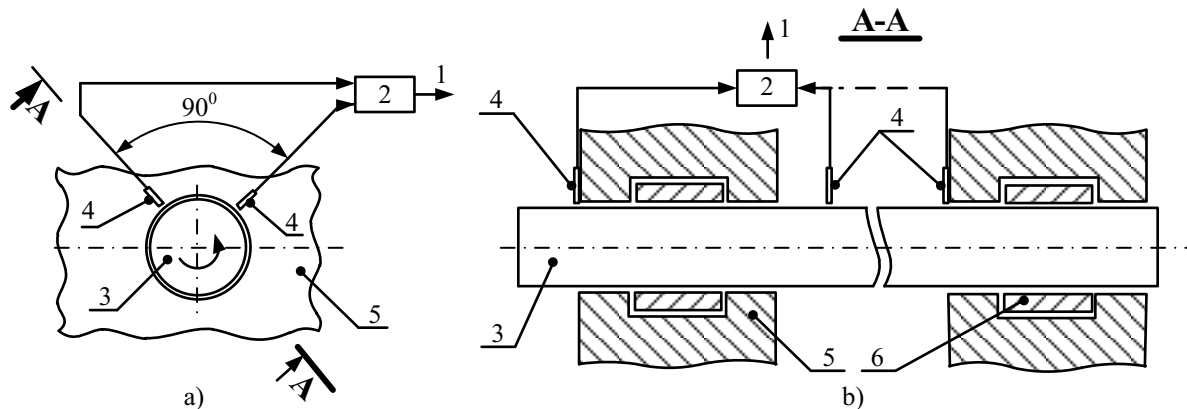


Рис. 2.10 Схема розміщення компонентів системи діагностування параметрів биття валу ПГ

При використанні схеми (рис.2.10) інформаційні сигнали, отримані від ГЕОВ 4, обробляються в електронних блоках 2 попередньої обробки. Інформація з електронних блоків попередньої обробки 2 передається в засоби моніторингу та технічної діагностики 1 потужних генераторів. При цьому два датчика 4 розташовані під кутом 90^0 один до одного в одній площині по парно як з боку приводу так і з боку збудника в разі турбогенератором і в не менше трьох точок (в районі кришки, над підп'ятником і під ним) в разі гідрогенератора. Ортогональне розміщення сенсорів 4 по осях на нерухомих частинах корпусу 5 підшипника 6 безпосередньо над поверхнею вала 3 покращує діагностичні можливості, оскільки при наявності відповідних програмно-математичних засобів моніторингу, дозволяють наприклад, візуально спостерігати орбіту руху вала в радіальній площині, дисбаланс ротора або кутовий ексцентриситету, а також проводити аналіз технічного стану машини за гармонійним складом отриманого вібраційного сигналу на основі способів описаних автором в роботах [79, 87, 92, 94, 119, 120].

2.5 Оптиковолоконні системи діагностування механічних параметрів ПГ

2.5.1 Повітряного зазору ПГ

Для реалізації ефективної системи діагностування повітряного зазору між ротором та статором, особливо під час експлуатації машини, автором в [89] запропоновано спосіб контролю із використанням ОВ відбивного типу та ЛЧМ-модуляцією оптичного потоку. Розроблена блок-схема, яка реалізує зазначену систему оптичного контролю, представлена на рис. 2.11. На блок-схемі 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 – оптиковолокно; ОА – оптичний адаптер; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина; ОВЛ – оптиковолоконна лінія; ОС – оптичний сенсор.

Принцип роботи запропонованої системи контролю та технічної діагностики повітряного зазору між ротором та статором (рис. 3.4) базується на використанні лінійної зміни частоти модуляції (ЛЧМ-модуляції) лазерного зонduючого випромінювання. У цьому випадку значення частоти модуляції зонduючого сигналу змінюється у відповідності із лінійно-ступінчастим законом протягом тривалості циклу вимірювання (рис.3.5, б). Інформаційним параметром системи є різниця частоти між зонduючим і прийнятим випромінюванням, різниця виникає через швидкість поширення оптичного сигналу, тобто в цьому випадку має місце тимчасова затримка, яка вимірюється як різниця миттєвих значень частот зонduючого та прийнятого сигналів.

Для формування зонduючого сигналу за заданим законом використовується малогабаритний синтезатор частоти МСЧ, побудований на інтегральній мікросхемі AD98951 [82]. Миттєве значення вихідної напруги МСЧ задаються через керуючі коди за допомогою ЦСП [82]. Модуляційна напруга з одного з

виходу МСЧ подається на лазерний випромінювач (ЛВ) з виходу якого лазерний потік надходить на оптичну лінію затримки (ОЛЗ), яка формує деяке значення затримки зонduючого випромінювання для формування початкового диференційного f_0 значення частоти між зонduючим і прийнятими сигналами. Для цього з виходу ОЛЗ частина оптичного випромінювання через напівпрозоре дзеркало (НД) надходить на керовану ЦСП комірку Керра (КК1), яка призначена для калібрування вимірювального каналу із фотоприймачем ФП1. З виходу КК1 оптичне випромінювання потрапляє на фотоприймач ФП1 та на один із входів змішувача СМ1. На другий вхід змішувача СМ1 надходить сигнал із МСЧ. На виході СМ1 формується електричний сигнал, що містить значення частоти f_0 . Далі сигнал із виходу СМ1 подається на АЦП1, з виходу якого цифрові дані надходять в ЦСП для обчислення частоти f_0 .

Інша частина оптичного випромінювання з виходу НД подається через оптичну лінзу (Л1) та оптичний розгалужувач (ОР) у оптоволокно OB1 та OB2. Оптоволокна OB1 та OB2 на виході оптичної системи закріплені за допомогою оптичного адаптера ОА. За допомогою оптоволоконних ліній ОВЛ1 та ОВЛ2 оптичне випромінювання із заданою частотою модуляції подається до точок вимірювання повітряного зазору. В точках вимірювання ОВЛ1 та ОВЛ2 закріплюються за допомогою ОА.

Відбите оптичне випромінювання від елементів ротора через ОВЛ1 та ОВЛ2 надходить на вимірювальний канал через ОА. Далі виходу ОА оптичне випромінювання в вимірювальному каналі через приймальні лінзи відповідно Л2 та Л3 подається через комірки Керра КК2 та КК3 на відповідні фотоприймачі ФП2 та ФП3. З виходу фотоприймача інформаційний сигнал у вигляді напруги надходить на змішувачі СМ2 та СМ3 відповідно. Часова діаграма відповідної форми напруги на виході ФП2 приведена на рис. 2.12, в, на виході СМ3 діаграма буде відповідна.

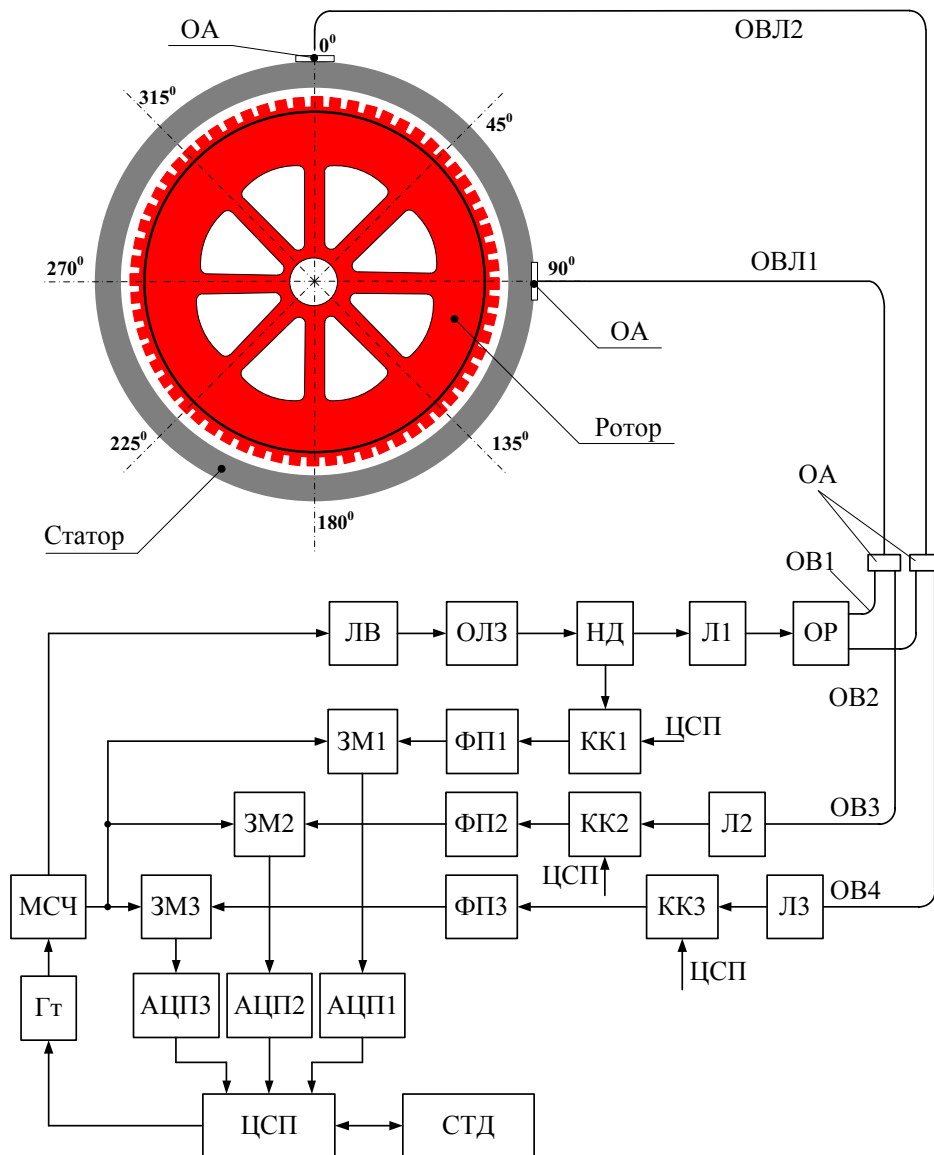


Рис. 2.11 Блок-схема оптоволоконної системи контролю та технічної діагностики повітряного зазору

Напруги на виходах ЗМ2 і ЗМ3 в результаті перемножування вхідних сигналів та сигналу з МСЧ, відповідають різниці частот між сигналами і прямо пропорційні відстаням від оптичних сенсорів до полюсів ротора або міжполюсного простору (рис. 2.12, а).

Сигнал із виходу ЗМ2 подається на вхід АЦП2 з виходу якого цифрові дані надходять в ЦСП для обчислення частоти f_1 , відповідно із виходу ЗМ3 подається на вхід АЦП3 з виходу якого цифрові дані надходять в ЦСП для обчислення частоти f_2 . Відмінність каналів для вимірювання вертикального та

горизонтального значення про повітряний зазор, полягає в розміщені під кутом 90° до першого оптичних сенсорів на статорі потужного генератора, та працює аналогічним чином вже до розглянутого. Інформаційні данні із ЦСП надходять в систему контролю та діагностики для подальшого опрацювання.

Для перевірки принципу роботи запропонованої структурної схеми та її принципу роботи була розроблена модель в середовищі графічного програмування NI LabView [244]. Імітаційна модель лазерної системи моніторингу повітряного зазору виконана за допомогою спеціальних модулів, що входять до складу LabView, з використанням найпростіших арифметичних операцій. У розробці моделей не враховувалось доплерівське зміщення частоти, що обумовлене обертовим рухом ротора.

Для дослідження роботи системи на основі розробленого алгоритму функціонування було розроблено модуль, що імітує появу полюсів ротора і міжполюсного простору над оптичним сенсором. Сигнал, який формується розробленим модулем, приведено на рис.2.12, а. На рис. 2.12 показано часові діаграми сигналів системи контролю та діагностики повітряного зазору в декартовій системі координат. Часова діаграма зміни частоти сигналу зондування зображена на рис. 2.12, б. Часова діаграма зміни частоти прийнятого сигналу показана на рис. 2.12, в. На рис. 2.12, д наведені результати роботи програмно-математичних засобів статистичного аналізу інформаційних даних прийнятих сигналів. Для аналізу отриманих інформаційних сигналів застосовувалося ковзне перетворення на основі швидкого перетворення Фур'є з розміщенням отриманих спектрограм в режимі «водоспад».

Отримані "піки" спектральних складових "1" відповідають значенню відстані до полюсів, а "2" відповідають міжполюсному простору. В розглянутому випадку значення "піків" частоти отриманих спектральних складових мають пряму залежність від заданого в моделі повітряного зазору до полюса і до "дна" міжполюсного простору.

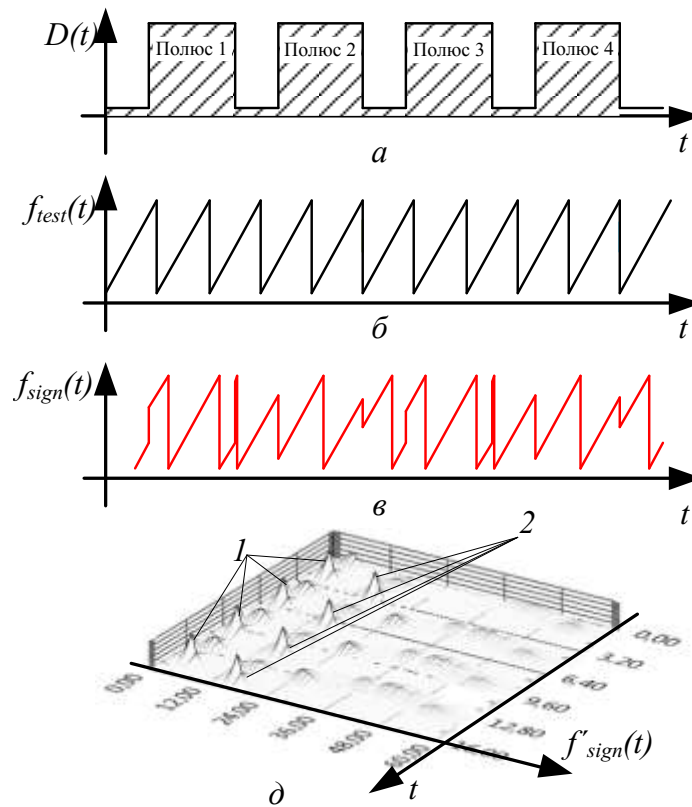


Рис. 2.12 Часові діаграми

Також перевірка запропонованого принципу дії була проведена з використанням графоаналітичних залежностей. Отримані графічні залежності показані на рис. 2.13. На рис. 2.13, а наведено графічне зображення форми вихідного сигналу, що імітує появу полюсів та міжполюсного простору в процесі проходження (переміщення) поверхні ротора над сенсором. Графічне зображення тестового та отриманого сигналу показане на рис. 2.13, б. Різниця сигналів (рис. 2.13, б) представлена на рис. 2.13, в. Для усунення неінформативних частотних параметрів отриманого сигналу (рис. 2.13, в) необхідно провести аналіз отриманого сигналу з урахуванням центральної та максимальної частоти, за наступних умов:

$$\begin{aligned}
 \text{Якщо } U_1 > U_{f_{centr}}, \text{ то } U_{CW} &= |U_{f_{\max}} - U_1| \\
 \text{Якщо } U_2 > U_{f_{centr}}, \text{ то } U_{CW} &= |U_{f_{\max}} - U_2| \\
 \text{Якщо } U_3, \text{ то } U_{CW} &= U_3 \\
 \text{Якщо } U_4, \text{ то } U_{CW} &= U_4
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

На рис. 2.13, г, показано отриманий сигнал розрахований із урахуванням умов (2.1).

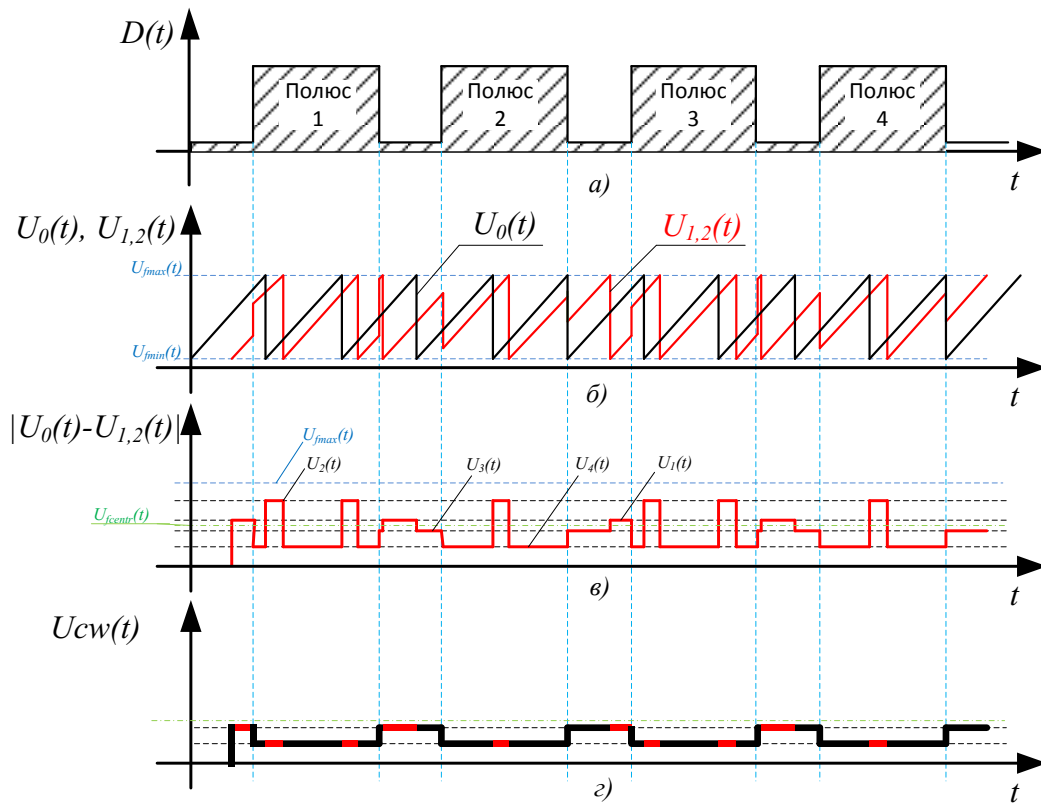


Рис. 2.13 Часові діаграми графоаналітичних залежностей

В результаті проведених досліджень розробленої імітаційної моделі та аналітичного методу була підтверджена працездатність запропонованої структури і принципів роботи оптоволоконної системи контролю та технічної діагностики повітряного зазору потужних генераторів.

2.5.2 Биття циліндричних поверхонь валів ПГ

Оптоелектронні системи діагностування биття бічних циліндричних поверхонь валів ротора в декількох контрольних перетинах вздовж вала потужного генератора, що описані в розділі 1 мають недоліки. Недоліками триангуляційного методу є вплив турбулентності середовища між датчиком і поверхнею вала на просторове положення відбитого випромінювання,

позиціонується на CCD лінійці датчика. У разі застосування амплітудного методу вагомою є похибка, викликана короткочасної нестабільністю амплітуди прийнятого оптичного випромінювання.

Таких недоліків позбавлені ОВ вимірювачі, принцип роботи, яких базується на використанні фазового методу. Суть методу полягає у вимірюванні різниці фазового зсуву між прийнятим і зондувальним сигналами. В цьому випадку биття поверхні, що досліджується, призводить до фазової модуляції високочастотної обвідної прийнятого оптичного сигналу. З огляду на важкодоступність і складні умови експлуатації сенсорів, автором запропоновано в [27, 86] використання оптоволоконних вимірювачів.

Блок-схема оптоволоконної системи діагностування биття бічних циліндричних поверхонь валів ротора приведена на рис.2.14. На схемі прийняті наступні позначення: ВОК1, ВОК2 - волоконно-оптичні кабелі; ВОЛ1 ... ВОЛ6 - волоконно-оптичні лінії; ВОЖ1, ВОЖ2 - волоконно-оптичні джгути; ОС1, ОС2 - оптичні сплітери (розгалужувачі); П - поляризатор; СДз - система дзеркал; Ф - оптичний фільтр; А - аналізатор; ПЛВ - напівпровідниковий лазерний випромінювач; ФД1, ФД2 - фотодетектори (ріп фотодіоди); ІУ1, ІУ2 - виборчі підсилювачі; МСЧ - 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.

В запропонованій структурі, завдяки вузькості спектральної характеристики вертикально-випромінюючих лазерів (VCSEL) [342], забезпечується можливість когерентного складання оптичних сигналів від двох джерел, одне з яких можна вважати приймачем, а друге – відповідно, передавачем.

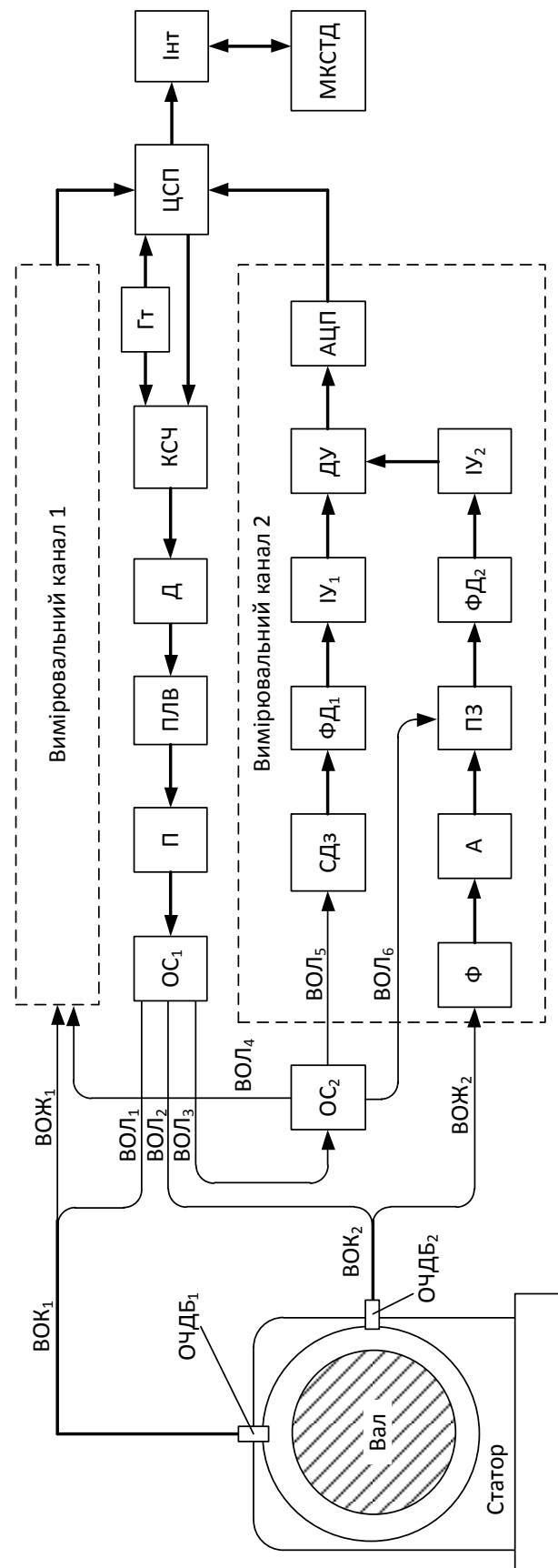


Рис. 2.14. Блок-схема оптоволоконної системи контролю та діагностування биття бічних циліндричних поверхонь валів ротора

У цьому разі, з'являється можливість реалізації гетеродинного або гомодинного прийому, що дозволяє перенести спектр інформаційного сигналу в область більш низьких проміжних частот із збереженням значення інформаційної складової про фазовий зсув та забезпечити ефективну обробку і виділення сигналів, а також зміну в широкій зоні частот моделюючої частоти оптичним лазерним випромінювачем. Останнє досягається використанням керованих синтезаторів частоти [82] в якості генераторів сигналів.

Окрім цього, відповідним вибором потужності гетеродина, вдається подавити більшу частину шумів оптоелектронного тракту перетворення сигналу, крім дробового шуму фотоприймача. Останнє дозволяє забезпечити максимальне відношення сигнал-шум на виході фотодетектора. Сигнал фотодетектора у цьому випадку залежить лише від різниці фаз коливань зонduючого та прийнятого сигналу [57], та може бути описаний наступним виразом

$$U(t) \approx U_0 + U_m \cos(\varphi_x) \quad (2.2)$$

В процесі обчислення фазового зсуву за формулою (2.2) неважко показати, що обчислення за малих амплітуд биття (вібропереміщень) здійснюються на краях чвертей повного фазового зсуву, де малі значення вібропереміщень призводять до більших значень відносної похибки обчислення фазового зсуву. Тому для отримання результату вимірювання пропонується у вимірювальний ланцюг вносити додатковий фазовий зсув за допомогою спеціально підібраних за довжиною оптоволокон ВОЛЗ ... ВОЛ6, що дозволить здійснювати обчислення в оптимальній області $\varphi_{com} = 45^\circ$. В цьому випадку нескладно показати, що вираз (2.2) на виході ДУ (рис. 2.2) матиме наступний вигляд

$$U(t) \approx \cos(\varphi_x + \varphi_{com}) \quad (2.3)$$

Отримані дані в контрольних точках системи діагностування використовуються при балансуванні вала, мінімізації динамічного дисбалансу обумовленого технологічними похибками при виготовленні і складанні, усуненні ушкоджень, виявленні осьових деформацій вала, які виникають в ході

експлуатації, наприклад, за умови зношеності підшипників. Для фільтрації спектральних складових вібраційних процесів від сигналів биття доцільно застосувати один із методів розглянутий в [87, 94, 114, 115, 118, 119] результати практичного застосування приведені в Додатку Є.

Для діагностування абсолютного радіального значення биття циліндричної поверхні, яка є, по суті, дифузійно-відбиваючим об'єктом, доцільним є використання лазерного далекоміру [140] фазового типу, запропонованого автором в роботі [251]. У цьому разі точність вимірювання вібрацій залежить від фазових спотворень, що вносяться приймально-передавальною системою, вимірювальним та опорним каналами, що містять електронні вузли, які через нестабільність і неідентичність фазових характеристик, викликаних застосуванням аналогових ланок, призводять до похибки в роботі фазообертача, який використовується для визначення інформаційної складової сигналу – фазового зсуву. Останнє може призводити до появи похибки вимірювання вібрацій, яка може складати десятки долі міліметра.

Для усунення зазначеного недоліку в [29, 213] було запропоновано використання волоконно-оптичних лінії для реалізації точного перелаштування оптичного фазообертача. Останнє дозволило підвищити точність визначення фазового зсуву, а значить, забезпечити підвищення завадостійкості вимірювання значення радіального биття циліндричної поверхні системою контролю та технічної діагностики потужних генераторів.

Розглянемо більш детально запропоновану структуру вимірювача для системи контролю та технічної діагностики ПГ та принцип її роботи.

На рис. 2.15 показана схема запропонованого лазерного далекоміра, складовими якого є такі компоненти: лазерні напівпровідникові випромінювачі 1 і 2, генератор 3 модулюючої напруги, гетеродин 4, генератор 5, що перелаштовується, гетеродин 6, що перелаштовується, світловоди 7 і 8, калібрована світловолоконна лінія 9, фотоприймачі 10 і 11, комутатор 12, змішувачі 13 і 14, перетворювач фазовий зсув–код 15, блок управління, збору та обробки даних 16, відліковий пристрій 17, дзеркала 18 і 19, об'єктив 20, контрольований об'єкт 21.

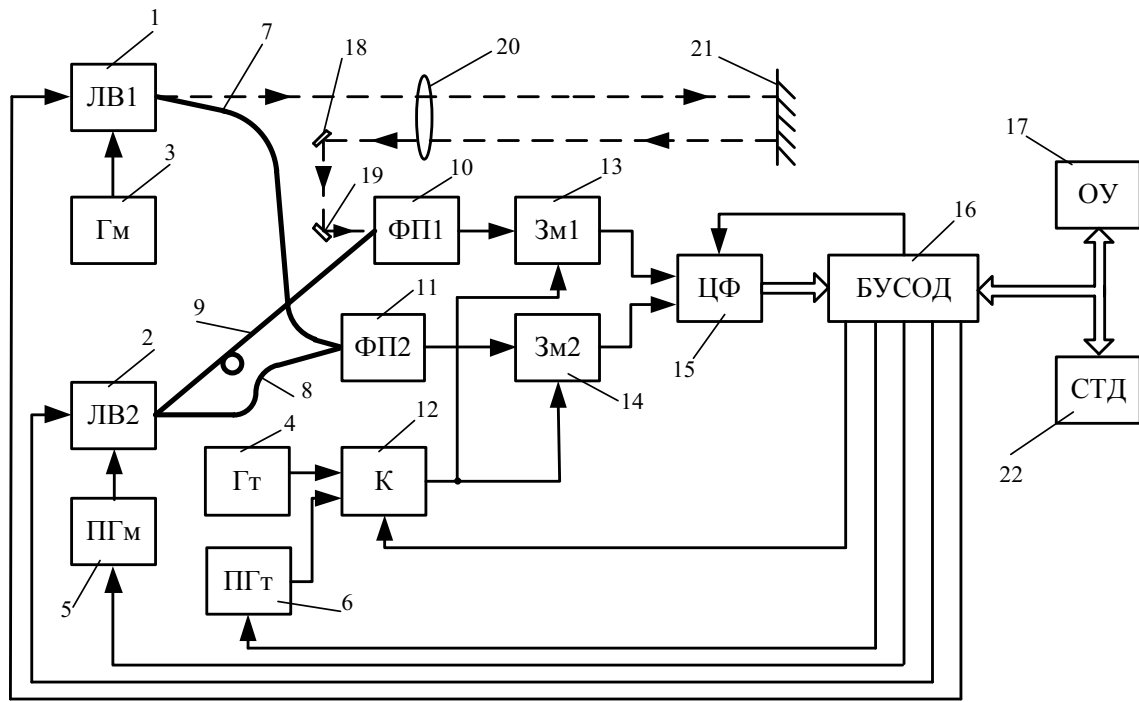


Рис. 2.15 Волоконно-оптична система контролю биття бічної циліндричної поверхні валу генератора

Принцип роботи далекоміра полягає в наступному. Спочатку вимірюється відстань до об'єкта контролю. У цьому випадку модульований світловий потік заданої частоти f_{m1} спрямовується на об'єкт, що контролюється, і визначається фазовий зсув між світловим потоком, що випромінюється та світловим потоком, що приймається. У цьому випадку фазовий зсув прийнятого сигналу щодо опорної напруги в межах фазового циклу визначається з виразу:

$$\phi_X = 2\pi \frac{2L_X}{\lambda} = 2\pi \frac{2L_X f_{m1}}{c}, \quad (2.4)$$

де L_X – вимірювана відстань; λ – довжина хвилі модулюючої напруги лазерного випромінювання; f_{m1} – частота модулюючої напруги; c – швидкість світла.

Використання каліброваної оптоволоконної лінії вносить додатковий фазовий зсув, який дорівнює

$$\phi_{\phi O} = 2\pi \cdot \frac{2L_0 \cdot f_{m2}}{c}, \quad (2.5)$$

де L_0 – довжина оптичного шляху, який проходить світлове випромінювання через калібровану світловолоконну лінію; f_{m2} – частота модуляції, що перелаштовується.

Потім на вхід тієї ж приймальної системи направляється модульоване випромінювання через калібровану світловолоконну лінію. Змінюючи частоту модуляції f_{m2} у виразі (2.5), досягаємо рівності $\varphi_{00} = \varphi_X$. Тоді значення вимірюваної відстані можна визначити за формулою

$$L_X = \frac{L_0 f_{m2}}{f_{m1}} \quad (2.6)$$

Оскільки значення частоти f_{m2} при її перелаштуванні може бути виставлене з високою точністю, наприклад, за допомогою цифрового синтезатора частоти, то застосування зазначеного фазообертувача дозволяє істотно зменшити вплив похибки фазометра на результат вимірювання відстані. При цьому, як і в прототипі, фазові спотворення, що виникають у приймально-передавальних оптичних системах та електронних каналах далекоміра взаємно виключаються і не роблять впливу на точність вимірювання відстані.

Згідно принципу функціонування, робота далекоміра здійснюється в два такти. У першому такті електричний сигнал частоти модулювання надходить від генератора 3 на вхід лазерного випромінювача 1. Сфокусований модульований світловий потік від випромінювача 1 за допомогою дзеркал 18 і 19 через центр об'єктиву 20 скеровується на об'єкт 21, що контролюється. Одночасно світловий потік від випромінювача 1 по світловоду 7 направляється на вхід фотоприймача 11 і використовується, як опорний. Відбитий світловий потік знову проходить через об'єктив 20, фокусується ним і потрапляє на вхід фотоприймача 10. Вимірювання різниці фаз зонduючого і прийнятого світлових потоків здійснюється на проміжній частоті, отриманій в результаті гетеродинування. З цією метою електричні сигнали з виходів фотоприймачів 10 і 11 надходять на перші входи змішувачів, відповідно 13 і 14. На інші входи змішувачів, 13 і 14, через комутатор 12 подається вихідний сигнал гетеродина 4. Вихідні напруги

змішувачів 13 і 14 надходять, відповідно, на першій і другий входи перетворювача 16. В останньому здійснюється перетворення φ_x в числовий еквівалент, який представлено у вигляді коду $N_1 = k\varphi_x$, де k – коефіцієнт пропорційності. Далі N_1 передається в блок 16 і запам'ятовується в оперативній пам'яті.

У другому такті роботи далекоміра відключається випромінювач 1 і включається випромінювач 2, на вхід якого надходить вихідна напруга генератора 5. Управління почерговою роботою випромінювачів 1 і 2 здійснюється шляхом включення або відключення їх напруги живлення, що подається командними сигналами, які надходять від блоку 16.

Світловий потік від випромінювача 2 по каліброваній світловолоконній лінії 9 направляється на вхід фотоприймача 10 вимірювального каналу далекоміра. Це ж випромінювання по світловоду 8 направляється на вхід фотоприймача 11 опорного каналу. Довжина L_0 каліброваної світловолоконної лінії 9 вибирається кратною довжині хвилі напруги модулювання лазерного випромінювання, яке спрямовується на контрольований об'єкт 21. Далі, як це описано вище, визначається фазовий зсув між вихідними електричними сигналами фотоприймачів 10 і 11. У цьому випадку на другі входи змішувачів 13 і 14 через комутатор 12, переведений сигналом блоку 16 в інше положення, подається напруга з виходу гетеродина 6. Частоти генератора 5 і гетеродина 6 змінюються синхронно таким чином, щоб проміжна частота була така ж, як і при вимірюванні відстані до об'єкта контролю.

Спочатку частота генератора 5 встановлюється рівною $f_{m2n} = f_{m2max} / 2$, де f_{m2max} – максимальне значення частоти перебудови моделюючої напруги. Значення f_{m2max} визначається фазовим зсувом, рівним 2π , який встановлюється за допомогою застосованого фазообертувача. Тоді, у відповідності з (2.6), $f_{m2max} = c/L_0$, а $f_{m2n} = c/2L_0$. Перше вимірювання в цьому такті роботи приладу здійснюється за допомогою перетворювача 15 шляхом перетворення фазового зсуву $\phi_{\phi O}$ в цифровий еквівалент, представлений у вигляді коду $N_2 = k\phi_{\phi O}$. У блоці 16 оцінюється різниця $\Delta N = N_1 - N_2$, знак якої визначає напрямок зміни

(зменшення або збільшення) частоти модуляції f_{m2} . Після цього за сигналами блоку 16 здійснюється перебудова частоти генератора 5 і гетеродина 6 до моменту, коли $\Delta N = 0$. При цьому фіксується поточне значення f_{m2} блоком 16 обчислюється значення $L_x = L_0 f_{m2} / f_{m1}$, яке в одиницях довжини висвічується на цифровому табло відлікового пристрою 17. У формулі для L_x , наведеній вище, значення L_0 і f_{m1} відомі з високою точністю, а похибка в оцінці частоти f_{m2} визначається таким чином. Генератор 5 і гетеродин 6 можуть бути виконані як синтезатори частоти на основі мікросхеми AD9851 [82]. Якщо в якості генератора опорної частоти для цієї мікросхеми застосувати термостатований кварцовий генератор, то похибка встановлення частоти f_{m2} синтезатора складає $\delta_{f_{m2}} = 10^{-6}$. При частоті модуляції $f_{m1} = 50$ МГц довжину L_0 можна вибрати рівній 9 м. Тоді похибка вимірювання відстані до 100 м при використанні запропонованого фазообертувача складає $\Delta L_x = L_0 \delta_{f_{m2}} \approx 0,01$ мм.

Таким чином, у запропонованому далекомірі завдяки новим елементам і зв'язкам в порівнянні з прототипом на порядок, і більше, підвищується точність вимірювання відстані. Крім цього, можливість вибору відносно низької частоти модуляції світлового випромінювання (25 - 50 МГц), що направляється на об'єкт контролю, дозволяє зменшити інтенсивність дробових шумів фотоприймача і тим самим зменшити випадкову похибку вимірювання відстані, обумовлену їх впливом.

На метод компенсацій було отримано патенти України [29].

2.5.3 Ступеню стиснення активного заліза статора ПГ

В роботі [161] запропоновано використання волоконно-оптичного вимірювача із комірками Брегга для використання в системах діагностування стяжних зусиль в призмах ТГ. У цьому разі волоконно-оптичні комірки Брегга, які, як і тензорезистори, наклеюються на спеціальні пружні елементи (рис. 2.16), що встановлюються під гайки [306, 380]. Незважаючи на те, що технологія виготовлення таких волоконно-оптичних датчиків в даний час є досить складною

і дорогою, вимагає застосування спеціального технологічного і метрологічного обладнання, ці вимірювачі мають велику перспективу в застосуванні, особливо з огляду на те, що крім завадостійкості при роботі в потужних електромагнітних полях і значну дистанційованість вимірювання (сотні метрів), вони дають можливість сформувати в одному оптоволоконне велика кількість первинних перетворювачів (сенсорів), інформаційні дані із яких можуть отримуватися одночасно в системі контролю та технічної діагностики ПГ. При цьому Бреґівські решітки(БР) забезпечують значне зменшення кількості ліній зв'язку. Зазвичай кількість первинних перетворювачів БР обмежена роздільною здатністю системи спектральної обробки прийнятого оптичного випромінювання і максимально допустимої та/або максимальної й мінімальної розрахункової деформації БР.

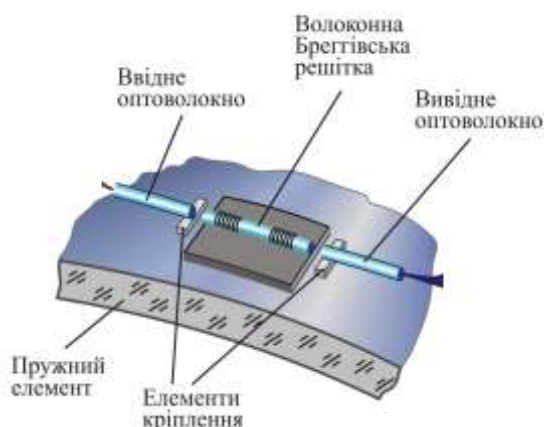


Рис. 2.16 Варіант кріплення Бреґівської комірки до пружного силосприймаючого елемента

На рис. 2.17 приведено поперечний вид розрізу частини осердя статора 1, на якому відображено один з стяжних болтів 5, на різьбову кінцеву частину якого накручується гайка 8, яка при прикручуванні натискає на конічну шайбу (тарілчасту) 9. При затягуванні гайки 8 пружина 9 затискається між гайкою 8 і плитою 10. При цьому пружина 9 деформується і параметри її деформації вимірюється системою контролю та діагностики зусилля пресування осердя статора генератора 13, яка містить в якості первинного перетворювача застосовується волоконно-оптична решітка БР 11, сформована в оптичному волокні 12.

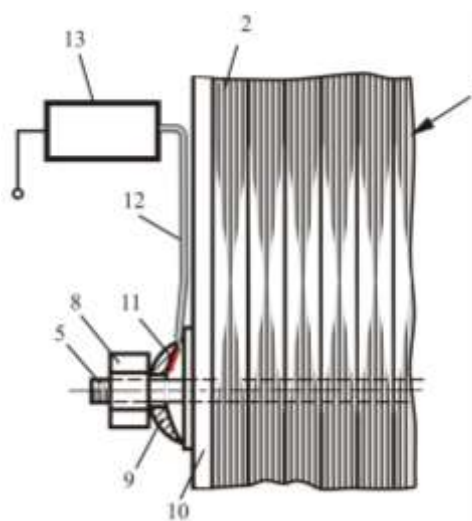


Рис. 2.17 Кріплення компонентів системи діагностування зусилля пресування осердя статора генератора в лобовій частині

Система контролю та діагностики 13 забезпечує контроль процесу вимірювання і індикацію величини (деформації) напруги в пружині 9, а також калібрування (нижче буде більш детально описано вимірювальну систему 13 і процедуру вимірювання). Зауважимо, що сенсор БР 11 може бути змонтований на внутрішній поверхні пружини 9 (як показано на рис. 2.17), на зовнішній стороні пружини, а також одночасно на внутрішній і зовнішній стороні пружини 9 з метою підвищення точності вимірювання напруги в пружині 9.

Волоконна брегівська решітка (БР) – це ділянка оптичного волокна (ОВ), в серцевині якого сформовано багат шарове селектуюче дзеркало, в якому показник заломлення (ПЗ) періодично змінюється в поздовжньому напрямку (рис. 2.18). Іншими словами волоконна брегівська решітка (ВБР) – розподілений брегівський відбивач (різновид дифракційної решітки), сформований в серцевині оптичного волокна, здатний відображати довжини хвиль світла з дуже вузькою спектральної смугою з центром на довжині хвилі брегівської решітки і пропускати всі інші. Цей ефект досягається шляхом створення періодичної зміни показника заломлення в серцевині волокна (вже є в першому реченні абзацу).

Коефіцієнт відображення залежить від глибини модуляції ПЗ, а центральна довжина хвилі відображення визначається умовою Брегга [41, 352]

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.7)$$

де λ_{Bragg} – довжина хвилі брегівського резонансу, n_{eff} – ефективний ПЗ серцевини волокна для центральної довжини хвилі, Λ – період брегівської решітки.

Механічна напруга ε , прикладена вповдовж оптичного волокна, розтягне його серцевину і змінить період БР з Λ на Λ_1 (рис. 2.19). Таким чином, виникне зміщення брегівської довжини хвилі на значення, що пропорційне $\Delta\Lambda = |\Lambda - \Lambda_1|$. Система реєстрації перетворює зміну $\Delta\Lambda$ довжини хвилі в електричний сигнал.

У цьому разі зв'язок між зсувом довжини хвилі $\Delta\lambda$ параметрами зміни тиску ΔP та зміною температури ΔT , може бути заданий наступним виразом

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} &= \frac{\Delta(n_{eff}\Lambda)}{n_{eff}\Lambda} = \\ &= \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right] \Delta P + \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right] \Delta T \end{aligned} \quad (2.8)$$

Чутливий елемент БР сенсора не містить електронних компонентів і тому є повністю пасивною, що означає можливість використання її в зоні підвищеної вибухонебезпечності (наприклад, в водневому середовищі) та сильних електромагнітних завад. На одне волокно може бути встановлено безліч Бреґівських решіток, кожна з яких дає відгук на власній довжині хвилі. У цьому випадку замість точкового сенсора ми отримуємо розподілену систему реєстрації для ущільнення за довжиною хвилі. 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.

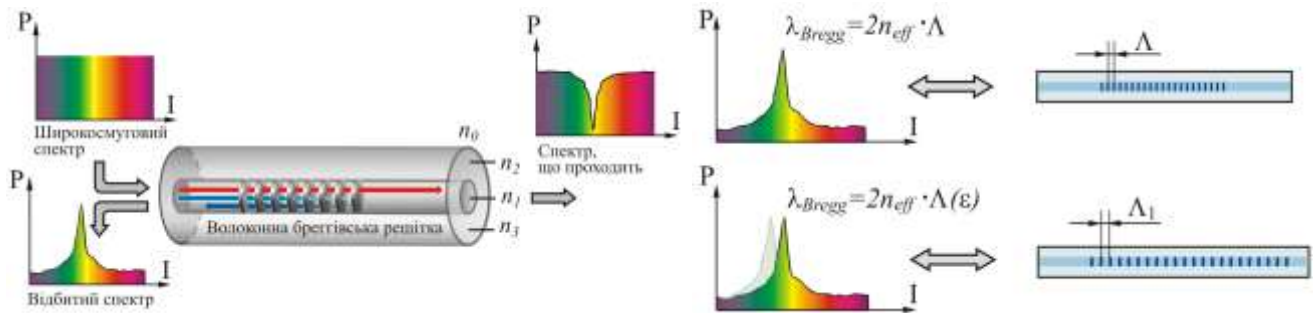


Рис. 2.18 Принцип дії БР

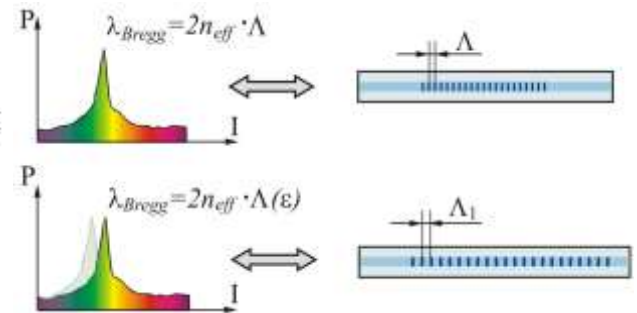


Рис. 2.19 Деформація БР при вимірюванні деформацій

На рис. 2.20 зображено структурну схему системи діагностування зусиль в стяжних призмах на турбогенераторі з використанням ВБР. Умовно в системі показано шість контрольованих призм. Основним елементом чутливого елементу системи є оптичний світловод 19, утворений оптичним волокном 20, яке оточене захисною оболонкою 21, з показником заломлення більшим, ніж показник заломлення волокна 20. Сенсор ВБР 22 утворюється в волокні 20 шляхом формування визначеної кількості секцій-перерізів 23 з періодом Λ , які мають більший показник заломлення ніж саме волокно 20, але менший ніж показник заломлення оболонки 21. В волокні 20 можна сформувати необхідну кількість сенсорів ВБР 22, кожен з яких встановлюється на тарілчасту пружину 24. Ці сенсори спеціально створюються таким чином, щоб вони мали різні відстані 25 між елементами ВБР і завдяки чому відбивали промені з різними довжинами хвилі.

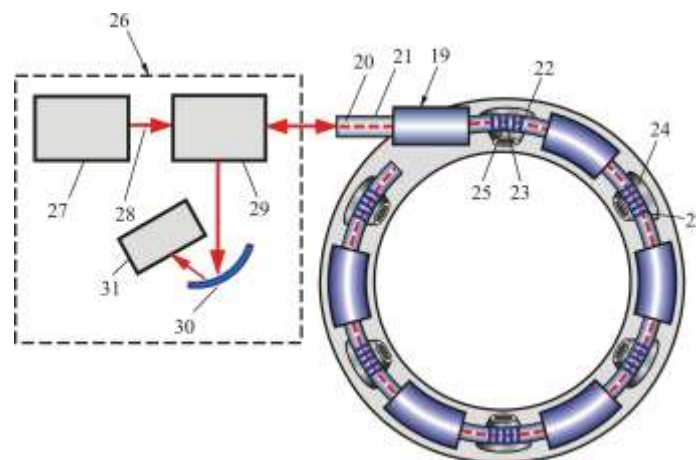


Рис. 2.20 Блок-схема системи контролю та діагностування зусилля пресування осердя статора генератора

До складу системи також входить пристрій 26, за допомогою якого генерується оптичний сигнал та виявляються відбиті сигнали від одного або декількох сенсорів ВБР. До складу пристрою 26 входить широкосмугове джерело світла 27, для генерації світлового пучка 28, який передається через оптичний відгалужувач 29 і поширюється вздовж оптичного волокна 20 до сенсора ВБР 22. Промінь, відбитий від сенсора ВБР 22, через відгалужувач 29, спрямовується до дисперсійного оптичного елементу 30, який розподіляє світловий промінь за різною довжиною хвилі на різні ділянки ПЗС фотоприймача 31, або до іншого оптичного матричного фотодетектора, наприклад, осцилографа Брегга. Застосування широкосмугового джерела 27 та дисперсійного елементу 30 дозволяє виявляти декілька відбитих променів з різною довжиною хвилі за допомогою пристрою 31. Використання останнього дозволяє реалізовувати в одному оптичному волокні декілька сенсорів ВБР.

Частина системи контролю та діагностики (рис. 2.20, поз. 13), що призначена для обробки отриманої вимірювальної інформації розміщується за межами внутрішнього простору генератора. Інша частина системи контролю та діагностики може бути встановлена всередині корпусу з забезпечення усунення впливу температури та вібрації на результат контролю ступеню стиснення активного заліза статора ПГ.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто особливості побудови і функціонування комп'ютеризованих систем з оптоволоконними вимірювачами для контролю та діагностики параметрів механічних дефектів потужних генераторів.

2. Визначено, що створення високоточних та завадостійких засобів отримання контрольно-діагностичної інформації для систем контролю та технічної діагностики механічних параметрів потужних генераторів неможливе без застосування принципово нових рішень, способів та методів побудови, що потребує використання в їх структурі оптоволоконних технологій.

3. Вперше запропоновано класифікацію основних типів системи контролю та діагностики параметрів механічних дефектів з ОВ для потужних генераторів в залежності від типу параметру МД, що контролюється, та типу оптичної системи. Це дозволяє вибирати шляхи реалізації оптимальних за конструкцією і технологією виготовлення компонентів систем контролю та діагностики, в залежності від механічного параметру, що контролюється.

4. Визначено, що *перевагами* оптоволоконних систем є їх завадостійкість до впливу магнітних полів об'єкту діагностування, значна дистанційність вимірювання (до сотень метрів), висока потенційна точність та швидкість вимірювання за рахунок використання оптичних елементів з високою швидкодією та роздільною здатністю, низька вартість сировини для виготовлення волокна, можливість контролю значної кількості фізичних параметрів, а також нескладність в обслуговуванні.

5. Визначено, що *недоліками* оптоволоконних систем є те, що технологія виготовлення первинних вимірювальних перетворювачів для ОВ та систем перетворення оптичної інформації з метою отримання контрольно-діагностичної інформації на даний час є досить складною і вартісною, а також вимагає застосування спеціального технологічного і метрологічного обладнання.

6. Розроблено нові методи і засоби для практичної реалізації компонентів систем контролю та технічної діагностики параметрів МД з застосуванням оптоволоконних технологій в їх структурі. Це дозволило забезпечити розв'язок науково-технічної задачі із забезпечення надійності та якості контролю повітряного зазору, биття циліндричних поверхонь валів, а також стиснення активного заліза статора потужних генераторів.

7. Визначено, що *перевагами* гібридних систем є їх завадостійкість до магнітних полів промислової частоти, електромагнітних полів, можливість використання традиційних сенсорів, що є стандартизованими, відносно низька вартість, а також легкість в обслуговуванні та налагодженні.

8. Визначено, що *недоліками* гібридних системи є обмежена точність та швидкодія, що зумовлена характеристиками традиційних сенсорів та відповідних

мікроконтролерних перетворювачів фізичної величини у цифровий код, але в багатьох практичних застосуваннях така точність та швидкодія є достатньою для отримання контрольно-діагностичних параметрів, які в повній мірі характеризують параметри механічних дефектів в потужних генераторах.

9. Застосування поєднання оптоволоконних та мікроелектронних технологій дозволило забезпечити працездатність систем контролю та технічної діагностики в умовах потужних електромагнітних полів та високих температур. Це дозволяє створювати досить прості за конструкцією і технологією виготовлення гібридні вимірювачі відносних переміщень, зусиль, відстані, тиску і інші, що використовуються як компоненти для систем контролю та діагностики потужних генераторів

10. Застосування ємнісних первинних перетворювачів (сенсорів) в якості первинних вимірювальних перетворювачів дозволяє реалізувати гібридні системи діагностування, які забезпечують необхідні метрологічні характеристики для вимірювання: зусилля в стяжних призмах ТГ, повітряного зазору між статором та ротором, радіального биття циліндричних поверхонь валів роторів ПГ, взаємного зсуву суміжних секторів складеного статора ГГ та ін.

Посилання: [5-7, 14, 20, 27, 36, 40, 42, 47, 59, 64, 69, 74, 75, 77, 79-84, 86-89, 92, 94, 96, 97, 101, 107, 108, 112, 117, 119, 120, 128, 129, 130, 132, 140, 147, 153, 154, 157, 158, 164, 165, 177, 179, 184, 190, 194, 195, 198, 200, 201, 208, 211, 213, 215, 217, 218, 230, 232, 235, 244, 251, 256, 262, 265-267, 273, 274, 276, 280, 290, 294, 299, 309, 317, 318, 324, 330, 331, 337, 342, 343, 349, 356, 364, 393]

див. список використаних джерел стор. 303–344.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ, АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ

В попередньому розділі були розроблені комп'ютеризовані оптоелектронні системи діагностування механічних параметрів ПГ. При цьому забезпечення високої надійності та якості роботи цих систем вирішення задачі з розробки ефективних методів, алгоритмів та програмно-математичного забезпечення, призначеного для отримання, перетворення та обробки контрольно-діагностичної інформації в інформаційно-вимірювальних каналах систем діагностування потужних генераторів.

Вирішення такої задачі пов'язано по-перше з необхідністю реалізації програмних засобів діагностування та обробки сигналів, що можуть бути легко адаптовані та інтегровані до вже існуючих систем технічного діагностування МД електричних машин. По-друге, з необхідністю врахування конструктивних особливостей вузла, його поведінки в часі, можливого варіанту розвитку дефекту та його виду, а також особливості впливу робочого середовища. По-третє з необхідністю забезпечення можливості модернізації та подальшої експлуатації вже існуючих компонентів систем діагностування.

3.1 Розробка та дослідження структури програмного забезпечення системи діагностування

Розроблені структури систем діагностування параметрів МД ПГ передбачають застосування комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних компонентів для отримання та попередньої обробки сигналів при визначенні механічних параметрів ПГ. Розглянуті системи містять програмно-математичні засоби, які є одними з основних компонентів системи, що використовується для

реалізації функції взаємодії з вимірювальними перетворювачами, реалізації керування інформаційними потоками в середині системи, реалізацію алгоритмів отримання та обробки інформаційних сигналів, отримання контрольно-діагностичних параметрів, формування інтерфейсу користувача, збереження отриманої інформації та вихідних результатів, тощо.

Враховуючи вище зазначене, на прикладі забезпечення системи діагностування повітряного зазору для гідрогенераторів типу СГК538/160–70М [215] розглянемо більш детально структуру програмно-математичного забезпечення (ПМЗ). Структурна схема програмної частини комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору (рис. 3.1). Схема складається з двох частин: програмного забезпечення (ПЗ) ІВК (первинний модуль збору та обробки даних) і ПЗ СТД (вторинний модуль збору, обробки та аналізу даних).

У свою чергу, первинний модуль збору та обробки даних складається з наступних частин: модуля ПЗ перетворювача ємність-код (ПЄК) і керування його роботою, модуля конфігурації системи МК, модуля первинної обробки сигналу та модулю обміну даними між апаратно-програмними засобами системи МК та СТД системи діагностування повітряного зазору (СКПЗ). Модуль керування роботою ПЄК забезпечує роботу перетворювача ємність-код "AD7745" відповідно до алгоритму функціонування [285, 286] та здійснює зчитування цифрових даних з ПЄК за алгоритмом, що приведений в наступних підрозділах даного розділу. Модуль керування є спільним для датчика з цифровим виходом (ДЦВ) та МК. Модуль обміну даними призначений для забезпечення організації обміну даними між апаратно-програмними засобами системи МК та СТД СКПЗ.

Модуль первинної обробки сигналу призначений для формування єдиного масиву даних з отриманих від ДЦВ даних з метою створення такого масиву, якого необхідно і достатньо для подальшого вирішення завдань обробки і аналізу про стан повітряного зазору та його значення. Модуль конфігурації забезпечує зв'язок МК з СТД СКПЗ для отримання сигналів керування за допомогою інтерфейсу зв'язку (конвертора USB-RS232). ПЗ СТД СКПЗ складається з

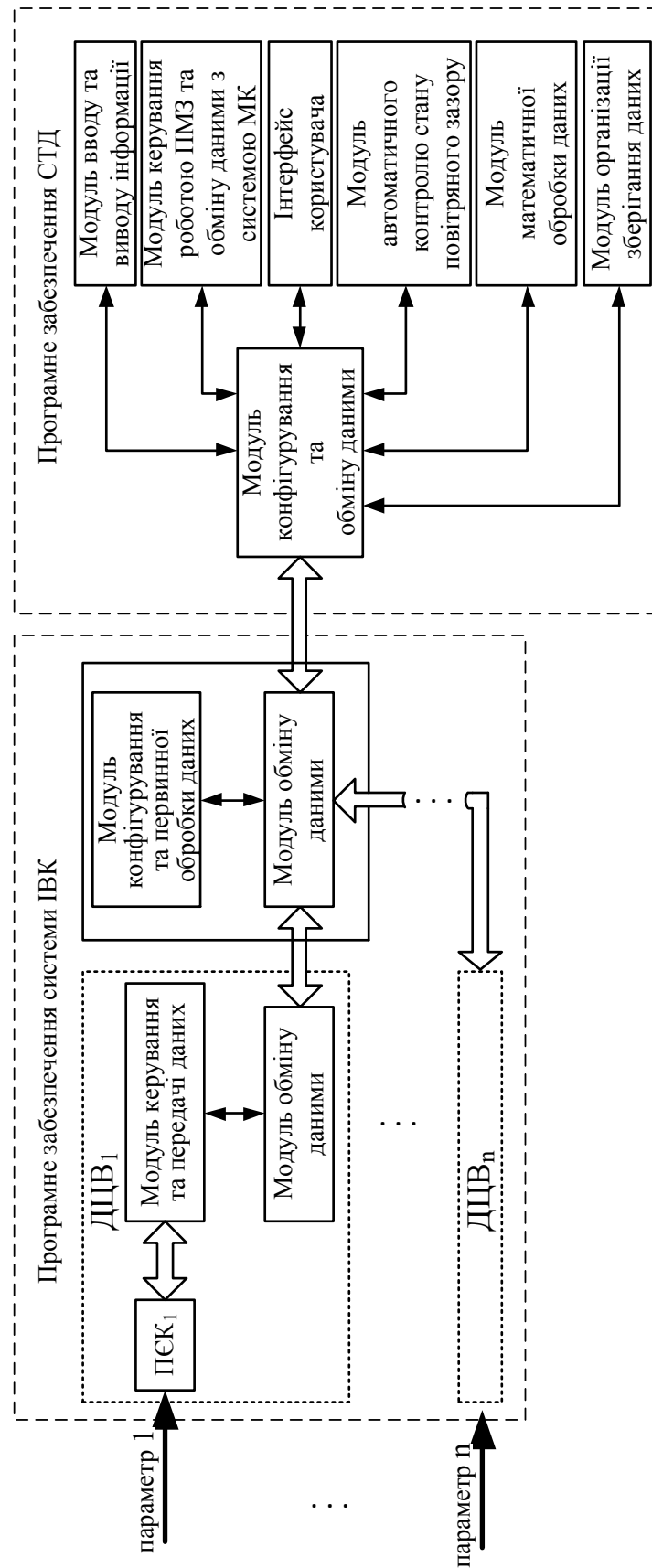


Рис. 3.1 Узагальнена структурна схема програмної частини комп'ютеризованої системи діагностування параметрів повітряного зазору: ПЄК – перетворювач-ємність код; ДЦВ – вимірювач з цифровим виходом.

наступних основних частин: модуля вводу та виводу інформації, інтерфейсу користувача, модуля керування роботою ПМЗ та обміну даними з системою МК, модуля автоматичного контролю стану повітряного зазору, модуля математичної обробки даних, модуля організації зберігання даних.

Модуль математичної обробки призначений для проведення операцій визначення величини повітряного зазору між ротором й полюсами статора та, для спостереження за параметрами його розділу. Наступна обробка отриманих даних відбувається у модулі автоматичного контролю значення й аналізу стану величини повітряного зазору. В свою чергу, 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 значення повітряного зазору та відповідають певному стану енергетичного обладнання.

Модуль керування роботою ПМЗ та обміну даними з системою МК має аналогічні функції модуля системи МК. Відмінністю цього модуля є наявність транспортного компонента, який призначений для сполучення програмного забезпечення із стандартними інтерфейсами зв'язку ЕОМ.

Зв'язок системи МК і СТД СКПЗ здійснюється за допомогою розробленого протоколу зв'язку, який входить до модуля вводу та виводу інформації. 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 СКПЗ.

3.2 Математична модель ідентифікації ексцентриситету ротора потужного гідрогенератора

Даний підрозділ присвячений вирішенню задачі автоматизації процесу визначення типу ексцентриситету ротора. Вирішення задачі пов'язано з необхідністю розробки математичних моделей зміни розподілу повітряного

зазору між полюсами ротора та розточенням осердя статора ГГ в залежності від типу ексцентриситету ротора [34, 101, 216, 256].

Для реалізації математичних моделей спочатку математично опишемо процеси, які є наслідком наявності ексцентриситету ротора. Для цього розглянемо математичну модель зміни повітряного зазору з урахуванням розміщення сенсорів зазору на розточенні осердя статора та типів ексцентриситету ротора. В такому випадку отримання первинної вимірювальної інформації від сенсорів про значення повітряного зазору для кожного із полюсів ротора відбувається через неперервний проміжок часу t , тобто вимірюється із детермінованим періодом опитування [84, 100]

$$t_D = f(\omega_{rot}, l_{rot}), \quad (3.1)$$

де ω_{rot} – швидкість обертання ротора; l_{rot} – відстань між центрами полюсів ротора.

Знаючи ω_{rot} та кількість полюсів ротора N , можна визначити мінімальне значення t_D

$$t_D = \frac{2N}{\omega_{rot}}.$$

З урахуванням (5.1) величину повітряного зазору d_{VZ} між умовною лінією полюсів ротора та поверхнею розточки осердя статора гідрогенератора, в ідеальному випадку (рис.5.2), визначається як

$$d_{VZ}(\theta_n) = d_X(\theta_n) + \Delta, \quad (3.2)$$

де $n = 1 \dots N$ – ціле число; $\theta_n = t_n n / \omega_{rot}$ – кут повороту ротора в системі координат VOG, за час t_n ; $d_X(\theta_n)$ – значення повітряного зазору в момент часу t_n .

На рис. 3.2 приведено схему визначення значення повітряного зазору.

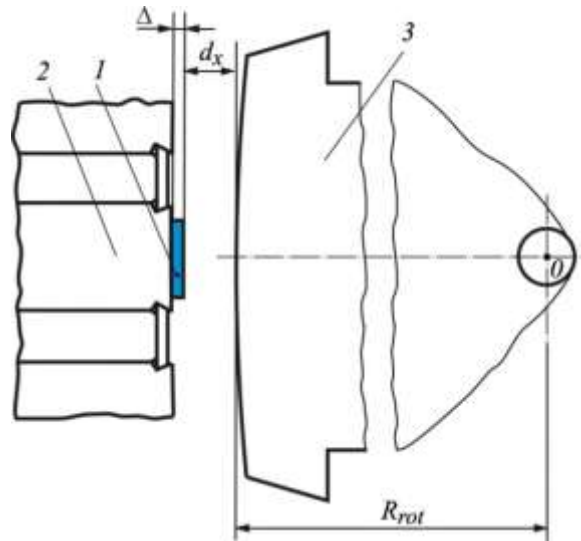


Рис. 3.2 Схему для визначення значення повітряного зазору:
 1 – сенсор, 2 – статор, 3 – полюс ротора, Δ – товщина сенсора,
 d_x – величина повітряного зазору, R_{rot} – радіус обвідної полюсів ротора

З іншої сторони, значення повітряного зазору може бути визначено відповідно до наступного виразу [318]

$$d_{VZ}(\theta_n) = R_{st}(\theta_n) - R_{rot}(\theta_n) \quad (3.3)$$

де R_{rot} – радіус обвідної полюсів ротора; R_{st} – радіус розточення статора.

Тоді похибка визначення $\delta_{VZ}(\theta_n)$ значення повітряного зазору відповідно до виразу (5.1), що виникає в наслідок дії ексцентриситету, визначається [318]

$$\delta_{VZ}(\theta_n) = \frac{d_{VZ}(\theta_n) - d_0}{d_0} \quad (3.4)$$

де $d_0 = R_{st} - R_{rot}$ – середнє або початкове значення повітряного зазору;

R_{rot} – номінальний розрахунковий або середній радіус обвідної полюсів ротора;

R_{st} – номінальний розрахунковий або середній радіус розточення статора.

Значення повітряного зазору між ротором і статором для кожного із положень ротора з кутовою координатою θ визначається за відповідними показниками сенсора 1 в вертикальному напрямку $d_{XV}(\theta)$ та показниками сенсора 2 в горизонтальному напрямку $d_{XG}(\theta)$ (рис. Г.1, див. Додаток Г).

За умови рівномірного розподілу повітряного зазору вираз (3.3) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} d_{VZ}(\theta) &= R_{st} - R_{rot} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{R_{rot} + d_{XV}(\theta) + \Delta}{\sin(\theta)}\right)^2 + \left(\frac{R_{rot} + d_{XG}(\theta) + \Delta}{\cos(\theta)}\right)^2} - R_{rot}(\theta), \end{aligned} \quad (3.5)$$

де Δ – товщина сенсора, що знаходиться в повітряному зазорі.

Вираз (3.5) може бути використаний при розрахунку значення повітряного зазору для певного кутового положення ротора θ_n . З урахуванням того, що в реальному випадку розбіжність геометричних параметрів ротора буде спотворювати рівномірність розподілу повітряного зазору між ротором та статором в ГГ [296, 333], вираз (3.5) запишеться як

$$d_{VZ}(\theta_n) = R_{st} - \sqrt{\left[(R_{rot} + e) \cdot f_m(\theta_n)\right]^2 + \left[(R_{rot} - e) \cdot f_m(\theta_n)\right]^2}, \quad (3.6)$$

де e – значення ексцентриситету; $f_m(\theta_n)$ – модуляційна функція, що відповідає за спотворення форми обвідної полюсів ротора.

В ідеальному випадку: $f_m = 0$, $d_{VZ}(\theta_n) = d_X(\theta_n) + \Delta$.

В реальних умовах модуляційна функція $f_m \neq 0$. У цьому разі $f_m(\theta_n)$ може бути визначена як

$$f_m(\theta_n) = f_{mse}(\theta) + f_{mde}(\theta_n) + f_{mp}(\theta_n), \quad (3.7)$$

де $f_{mse}(\theta) = e_s \cos(\theta)$ – 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; $f_{mp}(\theta_n)$ – модуляційна функція, яка обумовлена нерівномірністю геометричних параметрів полюсів ротора; ω_{me} – модуляційна частота зміни траєкторії центру симетрії руху ротора (рис.1.5).

Складова модуляційної функції $f_{mp}(\theta)$ яка викликана нерівномірністю геометричних параметрів полюсів ротора. Вона обумовлена тим, що окремі полюса ротора можуть бути встановлені не точно по висоті, зміщуються та нахилятися в процесі експлуатації через нерівномірні деформації. В реальному випадку функція $f_{mp}(\theta)$ має нормальний закон розподілу з щільністю [185]

$$f(d_{VZ}) = \frac{1}{\sigma_{d_{VZ}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(d_{VZ} - m_{d_{VZ}})^2}{2\sigma_{d_{VZ}}^2} \right], \quad (3.8)$$

де $\sigma_{d_{VZ}}^2$ – дисперсія величини повітряного зазору за цілу кількість обертів ротора відносно точки кріплення сенсору; $m_{d_{VZ}}$ – математичне очікування.

Для виразу (3.2) з урахуванням (3.7) отримаємо

$$d_{VZ}(\theta_n) = d_X(\theta_n) (1 + f_{mse}(\theta) + f_{mde}(\theta_n) + f_{mp}(\theta_n)) + \Delta. \quad (3.9)$$

З урахуванням (3.3), (3.1) та [195, 333] для випадку статичного ексцентриситету отримаємо, що зміна значення повітряного зазору в місці кріплення сенсора може бути описана, як

$$d_{VZes} = R_{st} - R_{rot} + \sqrt{R_{rot}^2 - (e_{se} \sin \alpha_{se})^2}, \quad (3.10)$$

При динамічному ексцентриситеті повітряний зазор є нерівномірним та змінюється з часом в залежності від кутового положення ротора θ . Тобто вісь симетрії ротора O_W змінює своє положення відносно вісі O_S статора, але вісь обертання ротора O_R і вісь O_S співпадають, а центр обертання O_R і центр мас O_W ротора не співпадають.

Величина динамічного ексцентриситету визначається вектором $|O_S O_W|$, який змінюється в залежності від кутового положення ротора θ і має напрямок, який характеризується кутом динамічного ексцентриситету α_{de} (рис. Г.3, див. Додаток Г) [378].

У цьому разі з урахуванням (3.3), (3.9) та [100, 333]:

– для випадку динамічного ексцентриситету

$$\begin{aligned} d_{VZde}(t) &= R_{st} - \sqrt{\left[(R_{rot} + e_{de}) \cdot f_{mde}(\theta, t) \right]^2 + \left[(R_{rot} - e_{de}) \cdot f_{mde}(\theta, t) \right]^2} = \\ &= R_{st} - \sqrt{\left[(R_{rot} + e_{de}) \cdot \sin \alpha_{de} \right]^2 + \left[(R_{rot} - e_{de}) \cdot \sin \alpha_{de} \right]^2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

– для випадку змішаного ексцентриситету

$$\begin{aligned} d_{VZme}(t) &= R_{st} - \sqrt{R_{rot}^2 - (e_{me} \cdot d_{VZ}(\theta_n) \cdot \sin(\omega_{me}t + \alpha_{me}))^2 -} \\ &- e_{me} \cdot d_{VZ}(t, \theta) \cdot \cos(\omega_{me}t + \alpha_{me}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Практичне використання рівнянь (3.11) та (3.12) при обробці результатів вимірювань зазору ускладнено, тому їх доцільно записати з урахуванням схеми розміщення сенсорів на розточенні осердя статора (рис.3.2). Для цього запишемо додаткову систему рівнянь скориставшись системою із [164]. Тоді, відповідно до векторної діаграми, представленої на рис. Г.4 (див. Додаток Г), можна скласти наступні чотири рівняння для випадку статичного ексцентриситету

$$\left[\begin{cases} d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \cdot \cos \alpha_{se} \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \cdot \sin \alpha_{se} \\ d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \cdot \cos \alpha_{se} \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \cdot \sin \alpha_{se} \end{cases} \right], \quad (3.13)$$

або

$$\left[\begin{cases} d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \cdot \cos \alpha_{se} \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \cdot \sin \alpha_{se} \\ d_{XV}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{se} \cdot \cos \alpha_{se} \\ d_{XG}(\theta) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{se} \cdot \sin \alpha_{se} \end{cases} \right]. \quad (3.14)$$

Вираз (3.10) із урахуванням виразу (3.5) та системи (3.13) або (3.14), запишеться як

$$\left\{ \begin{aligned} d_{VZ}(\theta) &= \sqrt{\left(\frac{R_{rot} + d_{XV}(\theta) + \Delta}{\sin(\theta)} \right)^2 + \left(\frac{R_{rot} + d_{XG}(\theta) + \Delta}{\cos(\theta)} \right)^2} - \\ &- R_{rot} + \sqrt{R_{rot}^2 - \left(\frac{d_{XG}(\theta) - d_{XV}(\theta)}{\cos \alpha_{se} - \sin \alpha_{se}} \sin \alpha_{se} \right)^2} \\ \alpha_{se} &= \arctg \frac{d_{XV}(\theta) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}{d_{XG}(\theta) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})} \end{aligned} \right. \quad (3.15)$$

Для випадку динамічного ексцентриситету e_{de} система рівнянь (3.14) з урахуванням того, що $|e_{de}|$ є постійною величиною, а кут динамічного ексцентриситету α_{se} є залежною величиною від θ , запишеться як

$$\left[\begin{cases} d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \cdot \cos \alpha_{de n} \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \cdot \sin \alpha_{de n} \\ d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \cdot \cos \alpha_{de n} \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \cdot \sin \alpha_{de n} \end{cases} \right], \quad (3.16)$$

або

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \cdot \cos \alpha_{de n} \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \cdot \sin \alpha_{de n} \\ d_{XV}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) - e_{de}(\theta_n) \cdot \cos \alpha_{de n} \\ d_{XG}(\theta_n) = (R_{st} - R_{rot}) + e_{de}(\theta_n) \cdot \sin \alpha_{de n} \end{array} \right., \quad (3.17)$$

Тоді вираз (3.11) із урахуванням виразу (3.5) та системи (3.16) або (3.17), запишеться як

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{VZde}(\theta_n) = R_{st} - \sqrt{\left[\left(R_{rot} + \frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos \alpha_{de n} - \sin \alpha_{de n}} \right) \cdot \sin \alpha_{de n} \right]^2 + \left[\left(R_{rot} - \frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos \alpha_{de n} - \sin \alpha_{de n}} \right) \cdot \sin \alpha_{de n} \right]^2}, \\ \alpha_{de}(\theta_n) = \operatorname{arctg} \frac{d_{XV}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}{d_{XG}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})} \end{array} \right., \quad (3.18)$$

У випадку змішаного циклічного/нециклічного ексцентриситету для виразу (3.12) будемо мати

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{VZme}(\theta_n) = R_{st} - d_{VZ}(\theta_n) \cdot \frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos \alpha_{me n} - \sin \alpha_{me n}} \times \\ \times \cos \left(\omega_{me} \theta_n \frac{n}{\omega_{rot}} + \alpha_{me} \right) - \\ - \sqrt{R_{rot}^2 - \left(\frac{d_{XG}(\theta_n) - d_{XV}(\theta_n)}{\cos \alpha_{me n} - \sin \alpha_{me n}} \cdot d_{VZ}(\theta_n) \times \right.} \\ \left. \times \sin \left(\omega_{me} \theta_n \frac{n}{\omega_{rot}} + \alpha_{me} \right) \right)^2} \\ \alpha_{me}(\theta_n) = \operatorname{arctg} \frac{d_{XV}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})}{d_{XG}(\theta_n) + \Delta - (R_{st} - R_{rot})} \end{array} \right. . \quad (3.19)$$

На рис. 3.3 – рис. 3.7 наведено результати моделювання зміни показів вимірювачів повітряного зазору за повний оберт ротора. Для моделювання використовувалося спеціально розроблене програмне забезпечення в середовищі графічного програмування LabView [73, 244], що може бути використане при реалізації програмного забезпечення систем технічної діагностики.

Моделювання виконувалося при врахуванні технічних характеристик гідрогенератора СГК 538/160-70М:

- діаметр розточення статора – 4930 мм;
- номінальне значення повітряного зазору d_{VZ} – 6 мм;
- максимальне робоче значення $d_{VZ\max}$ – 8 мм;
- мінімальне робоче значення $d_{VZ\min}$ – 4 мм;
- номінальна частота обертання d_{VZ} – 85,7 об/хв.;
- кількість полюсів ротора 70.

На рис. 3.3 показано вплив нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від їх номінального значення на результат вимірювання повітряного зазору d_{VZ} .

На рис. 3.4 показано вплив статичного ексцентриситету 1 мм ($\alpha_{se} = 180^0$) та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від їх номінального значення на результат вимірювання повітряного зазору d_{VZ} .

На рис. 3.5 показано вплив статичного ексцентриситету 1,5 мм ($\alpha_{se} = 180^0$) та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від їх номінального значення на результат вимірювання повітряного зазору d_{VZ} .

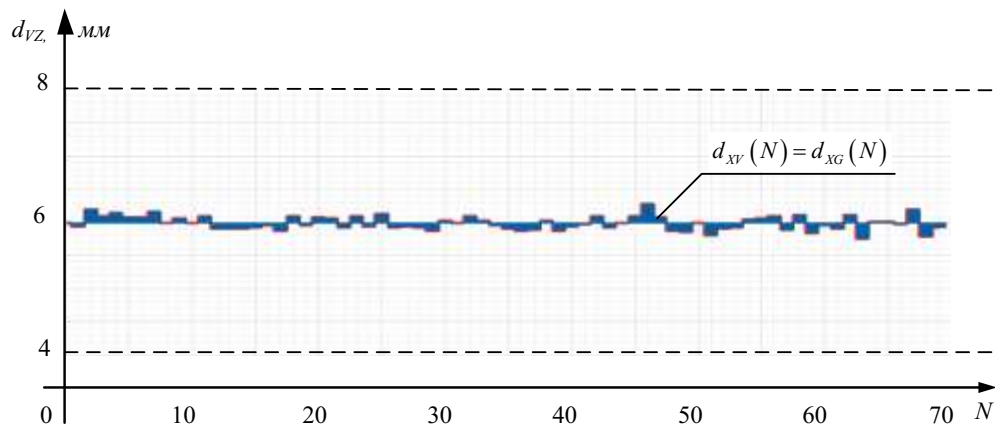


Рис. 3.3 Визначення d_{VZ} за нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10%

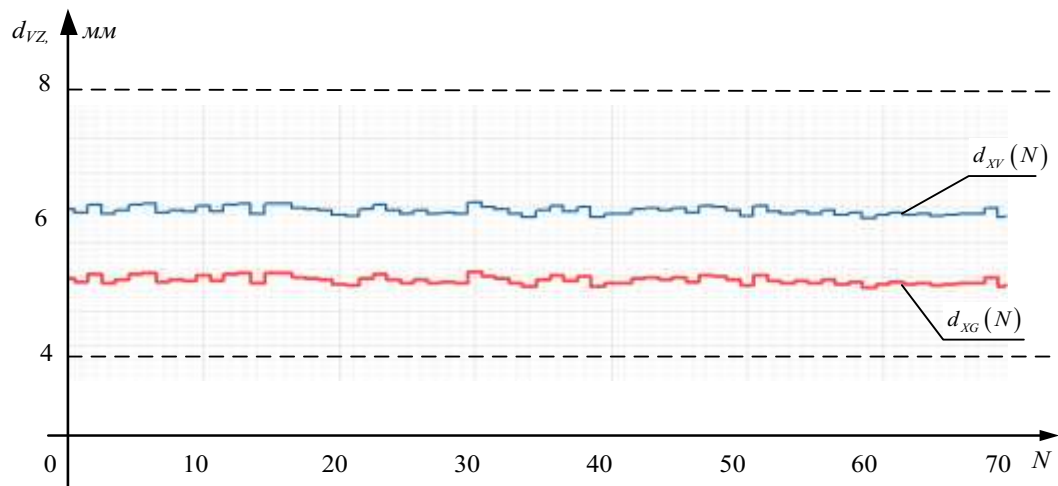


Рис. 3.4 Визначення d_{VZ} за наявності статичного ексцентриситету 1 мм та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10%

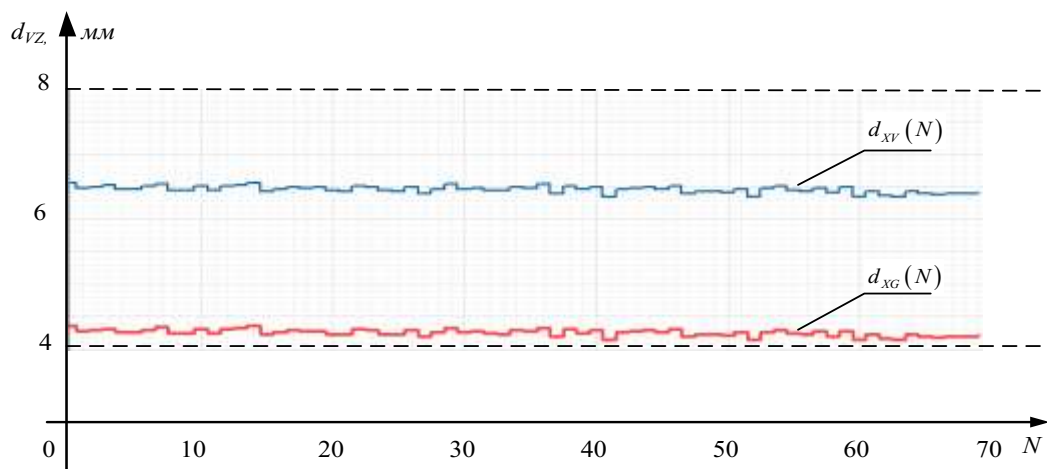


Рис. 3.5 Визначення d_{VZ} за наявності статичного ексцентриситету 1,5 мм та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10%

На рис. 3.6 показано вплив динамічного ексцентриситету 1,5 мм та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від номінального на результат вимірювання значення повітряного зазору d_{VZ} .

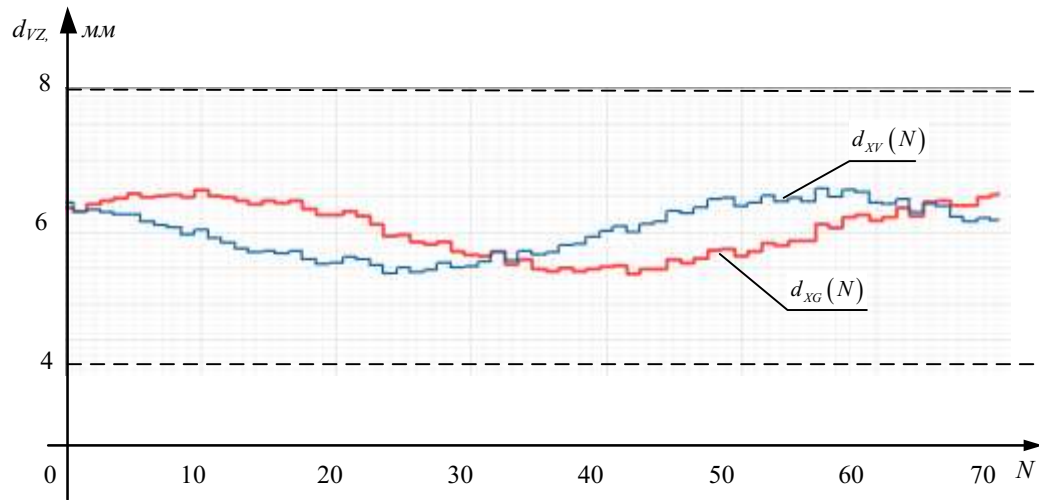


Рис. 3.6 Визначення d_{VZ} за наявності динамічного ексцентриситету 1,5 мм та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10%

На рис. 3.7 показано вплив змішаного ексцентриситету ($\alpha_{se} = 180^\circ$) та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10% від номінального на результат вимірювання значення повітряного зазору d_{VZ} .

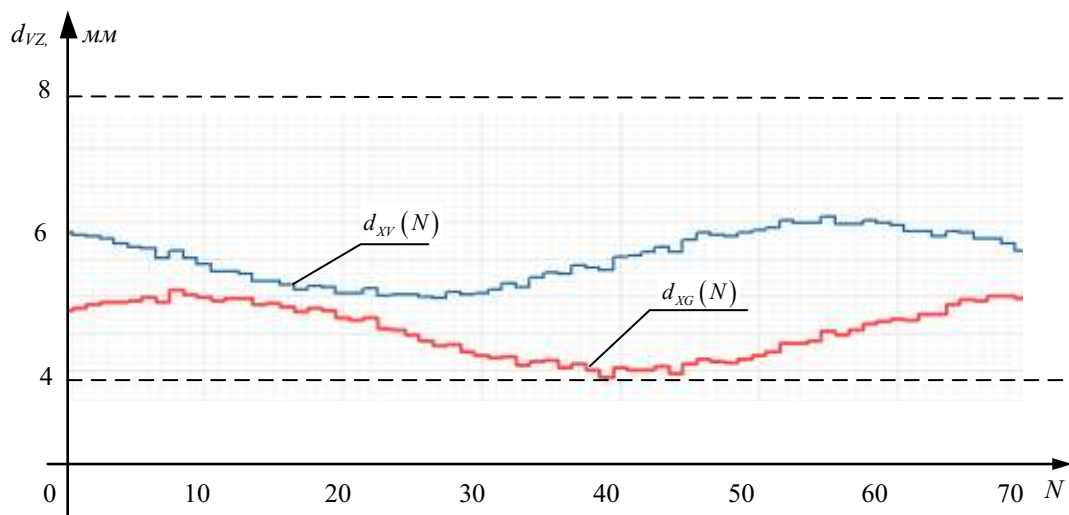


Рис. 3.7 Визначення d_{VZ} за наявності $\alpha_{se} = 180^\circ$ та нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора до 10%

Отже, розроблені математичні моделі нерівномірності розподілу повітряного зазору, викликаного наявністю ексцентриситетів ротора різних типів, можуть використовуватися при проектуванні та реалізації програмно-математичного забезпечення систем контролю повітряного зазору в гідрогенераторах.

3.3 Методи визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору

Своєчасна ідентифікація геометричних параметрів обвідної полюсів ротора (форми ротора) є досить актуальною задачею автоматизації процесу контролю технічного стану потужних ГГ. Насамперед, це пов'язано з тим, що зміна форми ротора призводить до виникнення низькочастотних електромагнітних сил, які: породжують низькочастотні вібрації статора та опорних конструкцій; призводять до появи биття валу; породжують підвищений нагрів та руйнацію підшипників, що з великою ймовірністю призводить до аварійних ситуацій [33, 134].

Тому даний підрозділ присвячений розробці методу визначення геометричних параметрів спотворення форми обвідної полюсів ротора. Для реалізації методу розглянемо математичну модель визначення спотворення форми обвідної ротора за даними, отриманими при контролі повітряного зазору в ГГ [101].

Розробка моделі була проведена з урахування наступних припущень:

- 1) всі дефекти, крім тих, що розглядаються у відповідній моделі, відсутні;
- 2) кутова відстань між середніми лініями всіх суміжних полюсів ротора однакова;
- 3) розточення осердя статора є ідеальним колом;
- 4) вимірювання повітряного зазору здійснюється всіма сенсорами одночасно на момент проходження під кожним із них середньої лінії відповідного полюса ротора;

5) сумарна нерівномірність повітряного зазору ГГ, що спричинена розкидом радіальних розмірів полюсів ротора, не перевищує 10 % від номінального значення повітряного зазору та відповідає прийнятим у [232, 324] нормам.

Як відомо з [191], при спотворенні форма обвідної може бути описана рядом Фур'є

$$d_{VZ\ i} = d_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (e_k \cos \theta_i + r_k \sin \theta_i) \quad (3.20)$$

де $d_{VZ\ i}$ – значення зазору в точці з кутовою координатою θ_i ; $k, i = 1, 2 \dots n$ (цілі числа), n – номер відліку; d_0 – середнє значення повітряного зазору за один оберт ротора; e_k, r_k – коефіцієнти, що визначають спотворення форми ротора.

На рис. 3.8 показано модель обвідної полюсів ротора ГГ типу СГК 538/160-70М за результатами розподілу значень повітряного зазору d_{VZ} .

Для оцінки параметрів, що характеризують форму ротора, припустимо, що вираз (3.20) відображає кореляційний зв'язок між d_{VZ} , $e_k \cos \theta_i$, $r_k \sin \theta_i$. У цьому випадку параметри, що входять до виразу (3.20), можна розглядати як коефіцієнти регресії і використовувати для їх обчислення метод найменших квадратів [3, 115].

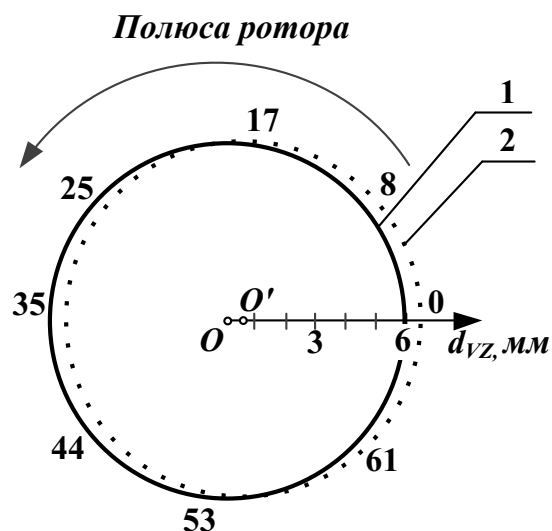


Рис. 3.8 Модель обвідної полюсів ротора ГГ типу СГК 538/160-70М за результатами розподілу значень повітряного зазору d_{VZ} : 1 – ідеальна форма обвідної; 2 – форма обвідної за наявності ексцентриситету з параметрами

$$e_{es} = 0,8 \text{ мм та } \alpha_{es} = 0$$

Для обчислення коефіцієнтів, за умови симетричного розташування точок відносно центру, в яких вимірюється повітряний зазор, будемо мати

$$d_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_{VZ\,n}; \quad e_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N d_{VZ\,n} \cos k\theta_n; \quad r_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N d_{VZ\,n} \sin k\theta_n,$$

де N – кількість точок з кутовою координатою θ_n , для яких відомо значення $d_{VZ\,n}$.

В цьому випадку відхиленням форми ободу ротора є ексцентриситет ротора (зміщення ободу ротора відносно осі обертання), а зміна форми – еліптичність ободу ротора [115]. У зв'язку з цим можна обмежитися обчисленням перших двох коефіцієнтів e_1, e_2 і r_1, r_2 . При цьому, у формулі (3.20) зберігаються лише перші три члени

$$d_{VZ\,n} = d_0 + \varepsilon_{1p} \cos(\theta_n + \alpha_1) + \varepsilon_{1p} \sin(2\theta_n + \alpha_1) \quad (3.21)$$

де $\varepsilon_{1p} = \sqrt{e_1^2 + r_1^2}$ – ексцентриситет обода ротора; $\alpha_1 = \arctan r_1/e_1$ – кут, який характеризує напрямок ексцентриситету; $\varepsilon_{2p} = \sqrt{e_2^2 + r_2^2}$ – еліптичність обода ротора; $\alpha_2 = \arctan r_2/e_2$ – кут, що характеризує напрямок осей еліпса.

Іншим способом описання форми ободу ротора, що не залежить від симетричності розташування точок, до отриманих даних з вимірювачів повітряного зазору є застосування ортогонального перетворення [358]. У цьому разі форма обвідної полюсів ротора визначається, як

$$R_{rot\,n} = R_{rot} + \sum_{n=1}^{2N} d_{VZ\,n} \sin(\theta_i) \operatorname{sgn}\left(1 + \operatorname{sgn}(-1)^n\right) - \sum_{n=1}^{2N} d_{VZ\,n} \sin(\theta_n) \operatorname{sgn}\left(1 - \operatorname{sgn}(-1)^n\right). \quad (3.22)$$

Знаходження коефіцієнтів, що входять до виразу (3.22), проводиться аналогічно попередньому випадку. На основі розрахованих коефіцієнтів будується апроксимуюча крива другого порядку, що описує форму обвідної полюсів ротора.

Координати центру $O'(X'_0, Y'_0)$ апроксимуючої кривої для обвідної визначаються з врахуванням значення ексцентриситету ε_{1p} , значення α_1 та значення початкових координат центру $O(X_0, Y_0)$ та за умови відсутності еліптичності обода $\varepsilon_{2p} \cong 0$. Форма обвідної може бути описана за допомогою рівняння кола

$$(X_n - X'_0)^2 + (Y_n - Y'_0)^2 = d_{VZ}^2. \quad (3.23)$$

Через те, що координати кожної точки, в яких вимірюється повітряний зазор, задовольняють умовам рівняння (3.23), можна скласти наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} (X_1 - X'_0)^2 + (Y_1 - Y'_0)^2 = d_{VZ}^2 \\ (X_2 - X'_0)^2 + (Y_2 - Y'_0)^2 = d_{VZ}^2 \\ (X_3 - X'_0)^2 + (Y_3 - Y'_0)^2 = d_{VZ}^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (X_1 - X'_0)^2 + (Y_1 - Y'_0)^2 = (X_2 - X'_0)^2 + (Y_2 - Y'_0)^2 \\ (X_2 - X'_0)^2 + (Y_2 - Y'_0)^2 = (X_3 - X'_0)^2 + (Y_3 - Y'_0)^2 \\ (X_3 - X'_0)^2 + (Y_3 - Y'_0)^2 = (X_1 - X'_0)^2 + (Y_1 - Y'_0)^2 \end{cases}, \quad (3.24)$$

де $d_{VZ0}(X_1, Y_1)$, $d_{VZN/3}(X_2, Y_2)$ та $d_{VZ2N/3}(X_3, Y_3)$ – будь-які три рівно віддалені точки із масиву отриманих даних за один повний оберт ротора.

Трете рівняння в системі (3.24) є надлишковим і дублює умови перших двох рівнянь при обчисленнях, тому система (3.24) може бути записана як

$$\begin{cases} (X_1 - X'_0)^2 + (Y_1 - Y'_0)^2 = (X_2 - X'_0)^2 + (Y_2 - Y'_0)^2 \\ (X_2 - X'_0)^2 + (Y_2 - Y'_0)^2 = (X_3 - X'_0)^2 + (Y_3 - Y'_0)^2 \end{cases} \quad (3.25)$$

Вирішення системи рівнянь (3.25) дозволяє розрахувати координати центру $O'(X'_0, Y'_0)$, як

$$\begin{cases} X'_0 = -\frac{1}{2} \frac{Y_1(X_2^2 + Y_2^2 - X_3^2 - Y_3^2) + Y_2(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2) + Y_3(X_1^2 + Y_1^2 - X_2^2 - Y_2^2)}{X_1(Y_2 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_2)} \\ Y'_0 = \frac{1}{2} \frac{X_1(X_2^2 + Y_2^2 - X_3^2 - Y_3^2) + X_2(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2) + X_3(X_1^2 + Y_1^2 - X_2^2 - Y_2^2)}{X_1(Y_2 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_2)} \end{cases} \quad (3.26)$$

З метою спрощення запису і забезпечення компактності введемо нові змінні

$$\begin{aligned} a_C &= X_2 - X_1; \quad b_C = Y_2 - Y_1; \quad c_C = X_3 - X_1; \quad d_C = Y_3 - Y_1; \\ e_C &= a_C(X_1 + X_2) + b_C(Y_1 + Y_2); \quad f_C = c_C(X_1 + X_3) + d_C(Y_1 + Y_3); \\ g_C &= 2(a_C(Y_3 - Y_2) - b_C(X_3 - X_2)). \end{aligned}$$

Тоді для виразу (3.26), за умови $g_C \neq 0$, отримаємо

$$\begin{cases} X'_0 = (d_C e_C - b_C f_C) / g_C, \\ Y'_0 = (a_C f_C - c_C e_C) / g_C \end{cases} \quad (3.27)$$

За умови $g_C = 0$ обчислення за формулою (3.27) не виконуються, оскільки одна з трьох точок або всі є хибними результатами вимірювання повітряного зазору.

За умови наявності еліптичності обода $\varepsilon_{2p} \neq 0$ форма обвідної описується за допомогою рівняння еліпса

$$\frac{(X_n - X'_0)^2}{a_e^2} + \frac{(Y_n - Y'_0)^2}{b_e^2} = 1, \quad (3.28)$$

де a_e – велика полу вісь еліпса; b_e – мала полу вісь еліпса.

На рис. 3.9 показано модель обвідної полюсів ротора ГГ типу СГК 538/160-70М отриману за результатами розподілу значень повітряного зазору d_{VZ} з еліптичним ободом, на якому крива 1 – ідеальна форма обвідної $e_{es} = 0$ та $\alpha_{es} = 0$, крива 2 – форма обвідної за наявності еліптичності з параметрами $e_{es} = 0,8$ мм та $\alpha_{es} = 0$.

Для знаходження координат центру $O(X_0, Y_0)$ приведемо рівняння еліпса (3.28) до його канонічного вигляду, для цього виділимо повні квадрати по змінним X_n та Y_n

$$\begin{aligned} a_e^2 b_e^2 - b_e^2 (X_n - X'_0)^2 - a_e^2 (Y_n - Y'_0)^2 &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow a_e^2 b_e^2 - b_e^2 (X_n^2 - 2X_n X'_0 + X_0'^2) - a_e^2 (Y_n^2 - 2Y_n Y'_0 + Y_0'^2) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow a_e^2 b_e^2 - b_e^2 X_n^2 + 2b_e^2 X_n X'_0 - b_e^2 X_0'^2 - a_e^2 Y_n^2 + 2a_e^2 Y_n Y'_0 - a_e^2 Y_0'^2 &= 0 \\ \Rightarrow a^2 b^2 - b^2 X_n^2 + 2b^2 X_n X'_0 - b^2 X_0'^2 - a^2 Y_n^2 + 2a^2 Y_n Y'_0 - a^2 Y_0'^2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

З метою спрощення запису і забезпечення загально прийнятого канонічного вигляду для кривих другого порядку виразу (3.29) введемо нові змінні

$$\begin{aligned} d_e &= -(2a_e X'_0 + b_e Y'_0) \\ e_e &= -(2c_e Y'_0 + b_e X'_0) \\ f_e &= a_e X_0'^2 + b_e X_0' Y_0' + c_e Y_0'^2 + 1 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Тоді вираз (3.29) з урахуванням (3.30) запишеться як

$$a_e(X_n - X'_0)^2 + b_e(X_n - X'_0)(Y_n - Y'_0) + c_e(Y_n - Y'_0) = f_e. \quad (3.31)$$

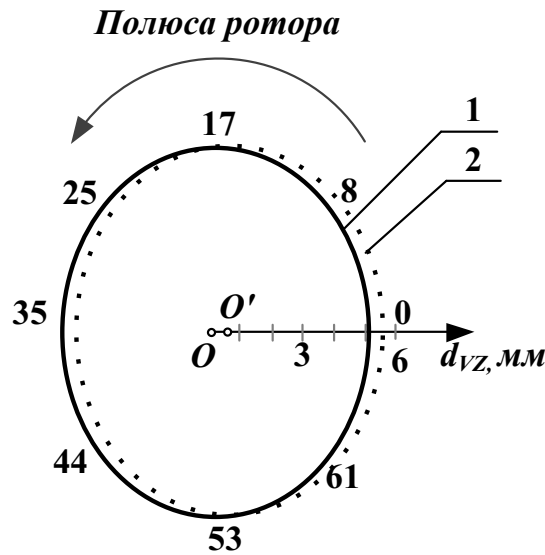


Рис. 3.9 Модель обвідної полюсів ротора за наявності еліптичності:
1 – ідеальна форма обвідної; 2 – форма обвідної за наявності ексцентриситету з параметрами $e_{es} = 0,8$ мм та $\alpha_{es} = 0$

Через те, що координати кожної точки, в яких вимірюється повітряний зазор, задовольняють умовам рівняння (3.31), можна скласти наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} a_e(X_1 - X'_0)^2 + b_e(X_1 - X'_0)(Y_1 - Y'_0) + c_e(Y_1 - Y'_0) - f_e = 0 \\ a_e(X_2 - X'_0)^2 + b_e(X_2 - X'_0)(Y_2 - Y'_0) + c_e(Y_2 - Y'_0) - f_e = 0 \\ a_e(X_3 - X'_0)^2 + b_e(X_3 - X'_0)(Y_3 - Y'_0) + c_e(Y_3 - Y'_0) - f_e = 0 \\ a_e(X_4 - X'_0)^2 + b_e(X_4 - X'_0)(Y_4 - Y'_0) + c_e(Y_4 - Y'_0) - f_e = 0 \\ a_e(X_5 - X'_0)^2 + b_e(X_5 - X'_0)(Y_5 - Y'_0) + c_e(Y_5 - Y'_0) - f_e = 0 \\ a_e(X_6 - X'_0)^2 + b_e(X_6 - X'_0)(Y_6 - Y'_0) + c_e(Y_6 - Y'_0) - f_e = 0 \end{cases}, \quad (3.32)$$

де $d_{VZ\ 0}(X_1, Y_1)$, $d_{VZ\ N/6}(X_2, Y_2)$, $d_{VZ\ 2N/6}(X_3, Y_3)$, $d_{VZ\ 3N/6}(X_4, Y_4)$, $d_{VZ\ 4N/6}(X_5, Y_5)$ та $d_{VZ\ 5N/6}(X_6, Y_6)$ – будь-які шість рівно віддалених точки із масиву отриманих даних за один повний оберт ротора.

Вирішення системи рівнянь (3.32) з урахуванням (3.30) дозволяє розрахувати координати центру $O'(X'_0, Y'_0)$, як

$$\begin{cases} X'_0 = \frac{2c_e d_e - e_e}{b_e - 4a_e c_e} \\ Y'_0 = \frac{2a_e c_e - d_e}{b_e - 4a_e c_e} \end{cases} \quad (3.33)$$

Визначивши координати центру за результатами вирішення систем рівнянь (3.27) або (3.14) та враховуючи початкові координати центру $O(X_0, Y_0)$ можуть бути визначені значення ексцентриситету ε та кута α , що його характеризує. Використовуючи знайдені значення, можливо будувати траєкторію (годограф) руху центру та визначити тип ексцентриситету.

Запропонований метод має переваги в швидкості розрахунків при визначенні обвідної форми ротора, але є залежним від значення нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора, що призводять до появи несиметричного розташування точок, а також від наявності пропущених та/або нульових значень повітряного зазору, отриманих від сенсорів зазору. Для мінімізації впливу зазначених факторів на знаходження просторових параметрів форми обвідної ротору та збільшення інформативності контролю є доцільним використання методу найменших квадратів для знаходження рівняння, що апроксимує отримані данні при їх представленні (полярній системі координат). Необхідність застосування методу найменших квадратів визначається перевіркою гіпотези про належність отриманих даних до даних, що відповідають початковому або обраному стану повітряного зазору. Така

перевірка може бути здійснена, наприклад за допомогою застосування критерію χ^2 Пірсона у відповідності із методиками, описаними у [23, 176, 249].

У випадку виявлення наявності нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора (модуляційної функції $f_{mp}(\theta_n) \neq 0$) та відсутності еліптичності обода $\varepsilon_{2p} \cong 0$ (рис. 3.8) задача пошуку центру вирішується шляхом використання методу найменших квадратів при використанні рівняння для кола (3.23), заданого в канонічній формі:

$$f(X_n, Y_n) = X_n^2 + Y_n^2 - 2X_nX_0 - 2Y_nY_0 + X_0^2 + Y_0^2 - d_{VZn}^2 = 0 \quad (3.34)$$

У цьому разі пошук координат центру $O'(X'_0, Y'_0)$ зводиться до пошуку значень, що мінімізують функціонал

$$\sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n)]^2 \rightarrow \min \quad (3.35)$$

Умова (3.35) має тільки один мінімум, який можна знайти вирішенням наступної системи диференціальних рівнянь для шуканих значень (X'_0, Y'_0, d_{VZ})

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \frac{\partial \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n)]^2}{\partial X'_0} = 0 = \\ \frac{\partial \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n)]^2}{\partial Y'_0} = 0 = \Rightarrow \\ \frac{\partial \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n)]^2}{\partial d_{VZn}} = 0 \end{cases} \\ & \Rightarrow \begin{cases} 2 \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n) \cdot \partial f(X_n, Y_n) / \partial X'_0] = 0 \\ 2 \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n) \cdot \partial f(X_n, Y_n) / \partial Y'_0] = 0 \Rightarrow \\ 2 \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n) \cdot \partial f(X_n, Y_n) / \partial d_{VZn}] = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \Rightarrow \begin{cases} \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n) \cdot (2X'_0 - 2X_n)] = 0 \\ \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n) \cdot (2Y'_0 - 2Y_n)] = 0 \\ \sum_{n=1}^N [f(X_n, Y_n) \cdot (2d_{VZn})] = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2 \left(\sum_{n=1}^N X'_0 \cdot f(X_n, Y_n) - \sum_{n=1}^N X_n \cdot f(X_n, Y_n) \right) = 0 \\ 2 \left(\sum_{n=1}^N Y'_0 \cdot f(X_n, Y_n) - \sum_{n=1}^N Y_n \cdot f(X_n, Y_n) \right) = 0 \\ 2 \sum_{n=1}^N d_{VZn} \cdot f(X_n, Y_n) = 0 \end{cases} \Rightarrow \\
& \Rightarrow \begin{cases} \sum_{n=1}^N X_n \cdot f(X_n, Y_n) = 0 \\ \sum_{n=1}^N Y_n \cdot f(X_n, Y_n) = 0 \\ \sum_{n=1}^N d_{VZn} \cdot f(X_n, Y_n) = 0 \end{cases} . \quad (3.36)
\end{aligned}$$

Із урахуванням (3.34) для (3.36) будемо мати

$$\begin{aligned}
& \begin{cases} \sum_{n=1}^N (X_n^3 + X_n Y_n^2 - 2X_n^2 X'_0 - 2X_n Y_n Y'_0 + X_n X_0'^2 + X_n Y_0'^2 - X_n d_{VZn}^2) = 0 \\ \sum_{n=1}^N (X_n^2 Y_n + Y_n^3 - 2X_n Y_n X'_0 - 2Y_n^2 Y'_0 + Y_n X_0'^2 + Y_n X_0'^2 + Y_n Y_0'^2 - Y_n d_{VZn}^2) = 0 \\ \sum_{n=1}^N (X_n^2 d_{VZn} + Y_n^2 d_{VZn} - 2X_n X'_0 d_{VZn} - 2Y_n Y'_0 d_{VZn} + X_0'^2 d_{VZn} + Y_0'^2 d_{VZn} - d_{VZn}^3) = 0 \end{cases} \Rightarrow \\
& \Rightarrow \begin{cases} \sum_{n=1}^N X_n^3 + \sum_{n=1}^N (X_n Y_n^2) - 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N X_n^2 - 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) + \\ \quad + (X_0'^2 + Y_0'^2) \cdot \sum_{n=1}^N X_n - \sum_{n=1}^N (X_n d_{VZn}^2) = 0 \\ \sum_{n=1}^N (X_n^2 Y_n) + \sum_{n=1}^N Y_n^3 - 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n^2 + \\ \quad + (X_0'^2 + Y_0'^2) \cdot \sum_{n=1}^N Y_n - \sum_{n=1}^N (Y_n d_{VZn}^2) = 0 \\ \sum_{n=1}^N (d_{VZn}) \cdot \left(\sum_{n=1}^N X_n^2 + \sum_{n=1}^N Y_n^2 - 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N X_n - 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n + \right. \\ \quad \left. + N \cdot (X_0'^2 + Y_0'^2) - \sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 \right) = 0 \end{cases} \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^N X_n^3 + \sum_{n=1}^N (X_n Y_n^2) - 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N X_n^2 - 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) + \\ \quad + (X_0'^2 + Y_0'^2) \cdot \sum_{n=1}^N X_n - \sum_{n=1}^N (X_n d_{VZn}^2) = 0 \\ \sum_{n=1}^N (X_n^2 Y_n) + \sum_{n=1}^N Y_n^3 - 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n^2 + \\ \quad + (X_0'^2 + Y_0'^2) \cdot \sum_{n=1}^N Y_n - \sum_{n=1}^N (Y_n d_{VZn}^2) = 0 \\ (X_0'^2 + Y_0'^2) = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 - \sum_{n=1}^N X_n^2 - \sum_{n=1}^N Y_n^2 + \right. \\ \quad \left. + 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N X_n + 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \right) \end{array} \right. \quad (3.37)$$

Використовуючи третє рівняння системи) (3.37) для пошуку невідомих та скориставшись тим, що вираз (3.34) задає кореляційний зв'язок між (X_n, Y_n, d_{VZ}) маємо наступну систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^N X_n^3 + \sum_{n=1}^N (X_n Y_n^2) - 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N X_n^2 - 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - \sum_{n=1}^N (X_n d_{VZn}^2) + \\ \quad + \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X_n \cdot \left(\sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 - \sum_{n=1}^N X_n^2 - \sum_{n=1}^N Y_n^2 + 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N X_n + 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \right) = 0 \\ \sum_{n=1}^N (X_n^2 Y_n) + \sum_{n=1}^N Y_n^3 - 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n^2 - \sum_{n=1}^N (Y_n d_{VZn}^2) + \\ \quad + \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \cdot \left(\sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 - \sum_{n=1}^N X_n^2 - \sum_{n=1}^N Y_n^2 + 2X'_0 \cdot \sum_{n=1}^N X_n + 2Y'_0 \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \right) = 0 \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} & \sum_{n=1}^N X_n^3 + \sum_{n=1}^N (X_n Y_n^2) - \sum_{n=1}^N (X_n d_{VZn}^2) + \\ & + \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X_n \cdot \left(\sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 - \sum_{n=1}^N X_n^2 - \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right) - \\ & - 2X'_0 \cdot \left(\sum_{n=1}^N X_n^2 - \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X_n \cdot \sum_{n=1}^N X_n \right) - \\ & - 2Y'_0 \cdot \left(\sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \cdot \sum_{n=1}^N X_n \right) = 0 \\ & \sum_{n=1}^N Y_n^3 + \sum_{n=1}^N (X_n^2 Y_n) - \sum_{n=1}^N (Y_n d_{VZn}^2) + \\ & + \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \cdot \left(\sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 - \sum_{n=1}^N X_n^2 - \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right) - \\ & - 2X'_0 \cdot \left(\sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X_n \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \right) - \\ & - 2Y'_0 \cdot \left(\sum_{n=1}^N Y_n^2 - \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \right) = 0. \end{aligned} \right. \quad (3.38)$$

З метою спрощення запису системи рівнянь (3.38) введемо нові змінні

$$\begin{aligned} a_{CSM1} &= \sum_{n=1}^N X_n^2 - \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X_n \cdot \sum_{n=1}^N X_n; & a_{CSM2} &= \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X_n \cdot \sum_{n=1}^N Y_n; \\ b_{CSM1} &= \sum_{n=1}^N (X_n Y_n) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \cdot \sum_{n=1}^N X_n; & b_{CSM2} &= \sum_{n=1}^N Y_n^2 - \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \cdot \sum_{n=1}^N Y_n; \\ c_{CSM1} &= \sum_{n=1}^N X_n^3 + \sum_{n=1}^N (X_n Y_n^2) - \sum_{n=1}^N (X_n d_{VZn}^2) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X_n \left(\sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 - \sum_{n=1}^N X_n^2 - \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right); \\ c_{CSM2} &= \sum_{n=1}^N Y_n^3 + \sum_{n=1}^N (X_n^2 Y_n) - \sum_{n=1}^N (Y_n d_{VZn}^2) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n \left(\sum_{n=1}^N d_{VZn}^2 - \sum_{n=1}^N X_n^2 - \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right), \end{aligned}$$

тоді

$$\begin{aligned} & \begin{cases} 2X'_0 \cdot a_{CSM1} + 2Y'_0 \cdot b_{CSM1} = c_{CSM1} \\ 2X'_0 \cdot a_{CSM2} + 2Y'_0 \cdot b_{CSM2} = c_{CSM2} \end{cases} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \begin{cases} X'_0 = \frac{b_{CSM1} \cdot c_{CSM2} - b_{CSM2} \cdot c_{CSM1}}{2(a_{CSM1} \cdot b_{CSM2} - a_{CSM2} \cdot b_{CSM1})} \\ Y'_0 = \frac{a_{CSM1} \cdot c_{CSM2} - a_{CSM2} \cdot c_{CSM1}}{2(a_{CSM1} \cdot b_{CSM2} - a_{CSM2} \cdot b_{CSM1})} \end{cases} \quad (3.39) \end{aligned}$$

Враховуючи початкові координати центру $O(X_0, Y_0)$ та $O'(X'_0, Y'_0)$, які отримані при вирішенні системи рівнянь (3.39) можуть бути використані для визначення значення ексцентриситету ε та кута α , що його характеризує та визначається його тип, а також можливо побудувати траєкторію(годограф) руху центру.

У випадку виявлення наявності нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора (модуляційної функції $f_{mp}(\theta_n) \neq 0$) та еліптичності обода $\varepsilon_{2p} \neq 0$ (рис. 3.9) задача пошуку центру вирішується шляхом використання методу найменших квадратів для моделі еліпса, заданого його канонічним рівнянням (3.29) аналогічно розглянутому випадку із рівнянням для кола, що описує форму ротора.

3.4 Метод визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора ГГ за даними сенсорів повітряного зазору у циліндричній системі координат

Даний розділ присвячений розробці альтернативного методу підвищення точності визначення параметрів обвідної полюсів ротора за наявності дисперсії значень повітряного зазору на основі використанням теорії статистичного аналізу кругових спостережень [16, 176] та методів диференціальної геометрії [93].

У цьому разі слід зауважити, що статистична обробка результатів, інтерпретованих в кутових спостереженнях, складніша за статистичну обробку результатів вимірювань лінійно розподілених результатів вимірювань, що містять випадкову складову. Застосування такої обробки потребує застосування сучасних швидкодіючих мікропроцесорів у складі вимірювальних перетворювачів, що ще в недалекому минулому робило їх реалізацію або неможливою, або економічно не виправданою. Наявні на сьогодні досягнення мікроелектроніки у вигляді 8-розрядних AVR мікроконтролерів фірми Atmel та 32-розрядних мікроконтролерів STM32 серії Cortex-M0 в сукупності із схемотехнічними рішеннями, а також при використанні сучасної

обчислювальної техніки дозволяють реалізувати у повному обсязі досить складні алгоритми обробки даних за результатами вимірювання повітряного зазору.

Також потрібно відмітити, що ефективність будь-яких методів обробки контрольно-діагностичних параметрів насамперед визначається чутливістю інформаційної складової сигналу на вході первинного вимірювального перетворювача к градієнту зміни значення нерівномірності повітряного зазору, а також її стійкістю до впливу дестабілізуючих факторів на результат визначення ексцентриситету ротора ГГ та його похідних.

Розглянемо особливості застосування статистичних методів теорії статистичного аналізу кругових спостережень за умов та припущень, наведених в попередньому розділі.

Як зазначено в [99, 101] неважко показати, що отримані дані про значення повітряного зазору d_{VZ} мають прив'язку до просторових та часових координат із прив'язкою до координат об'єкту контролю VOG (рис.1.2). Тому, для вирішення задачі обробки отриманих даних про повітряний зазор є актуальним застосування відомих з теорії статистичного аналізу кругових спостережень, методів і статистик [16, 95, 101]. Застосування методів статистичного аналізу кругових спостережень дозволяє отримати просту графічну інтерпретацію результатів вимірювання обвідної полюсів ротора та її параметрів для кожного оберту ротора з прив'язкою до просторових і часових координат (рис. 3.10, а), на відміну від класичного представлення в декартовій системі координат (рис. 3.10, б).

У цьому разі, вираз (3.3) з прив'язкою до часу і простору, в узагальненому вигляді відповідно до [229], запишеться як функція

$$f(d_{XV}, d_{XG}, t), \quad (3.40)$$

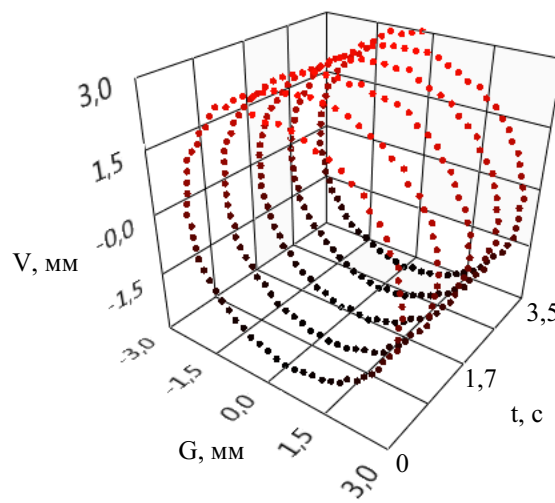
де d_{XV}, d_{XG} - вектора значень координат полюсів ротора з відповідними кутовими координатами, що належать вектору θ .

Використовуючи (3.40), визначимо зміну параметрів форми обвідної полюсів ротора у часі. Для визначення параметрів форми обвідної ротора для

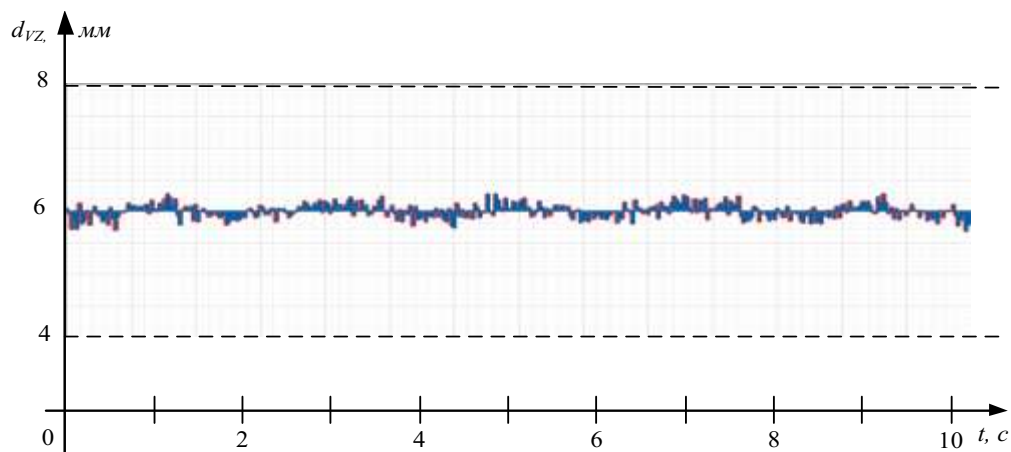
одного оберту ротора функціональна залежність (3.40) буде мати наступний вигляд

$$f(d_{XV}, d_{XG}), \quad (3.41)$$

Тоді, в дискретному вигляді координати результатів вимірювання повітряного зазору d_{VZ} відповідно до (3.3) та (3.41) в системі координат з прив'язкою до просторових координат генератора за один оберт ротора визначаються як



а



б

Рис. 3.10 Результати моделювання вимірювання повітряного зазору з урахуванням часу вимірювання: а – із представленням у полярній системі координат; б – із представленням в декартовій системі координат

$$\begin{cases} d_{XGn} = R_{rot} + d_{VZn} \cos \theta_n + \Delta + f_{mp}(\theta_n) \\ d_{XVn} = R_{rot} + d_{VZn} \sin \theta_n + \Delta + f_{mp}(\theta_n) \end{cases}, \quad (3.42)$$

Визначення відхиленням ободу форми ротора від головної осі (ексцентриситет ротора) проведемо в циліндричній системі координат. Для цього будемо вважати радіус в основі циліндра $R=1$, що не впливає на співвідношення кутів і одержувані кутові статистики. Прийняте спрощення є загальноприйнятим в теорії статистичного аналізу результатів кутових спостережень [101, 314] і значно спрощує аналітичні результати, отримані в результаті розрахунків. Слід зазначити, що в цьому випадку d_{VZn} інтерпретується як стовпчики кругової гістограми, тобто відповідають значенням вимірюваного параметра (рис. 3.11).

На рис. 3.11 показано результат моделювання впливу нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора на зміни повітряного зазору d_{VZ} в циліндричній системі координат при наявності нерівномірності геометричних параметрів 10 % та без статичного ексцентриситету.

На рис. 3.12 показано результат моделювання впливу нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора на зміни повітряного зазору d_{VZ} в циліндричній системі координат при наявності нерівномірності геометричних параметрів 10 % та статичного ексцентриситету 1 мм.

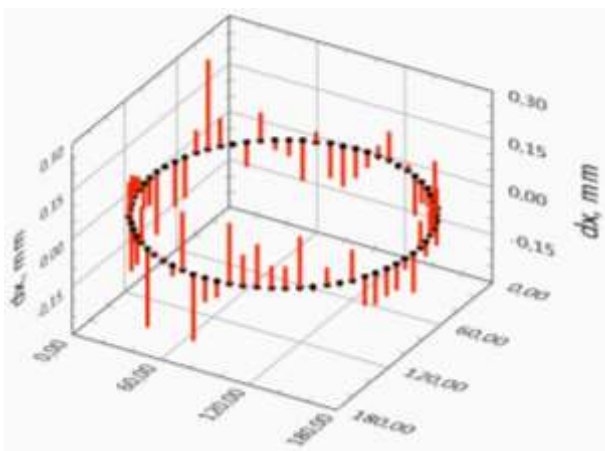


Рис. 3.11 Результат моделювання

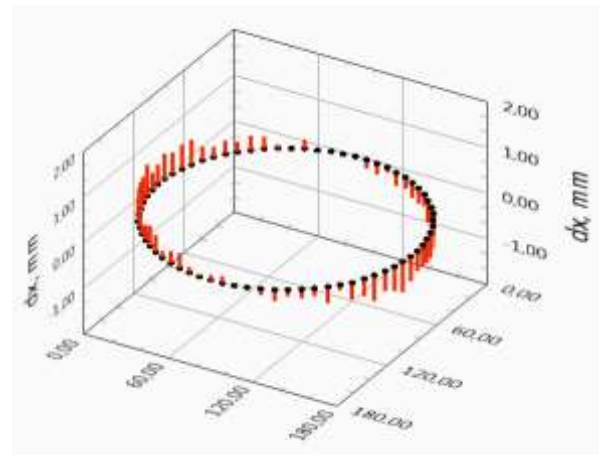


Рис. 3.12 Результат моделювання

Не важко показати, що положення площини, яка утворена вершинами стовпчиків d_{VZ_n} кругової гістограми, характеризують зміну положення площини в тривимірному просторі, а кути нахилу проекцій площини будуть характеризувати величину відхиленням ободу форми ротора відносно головної осі (ексцентриситет ротора).

Для визначення орієнтації в просторі площини, представленої хмарою точок з координатами $D(d_{XV}, d_{XG})$ [35], розмістимо отриману площину в циліндричній системі координат в тривимірній декартовій системі координат. У цьому разі, задача пошуку апроксимуючої площини $\mathbb{X}(d'_{XV}, d'_{XG})$, зводиться до пошуку мінімуму функціонала

$$Q = (D(d_{XV}, d_{XG}) - \mathbb{X}(d'_{XV}, d'_{XG}))^2 \rightarrow \min \quad (3.43)$$

або в дискретному вигляді

$$Q = \sum_n (D(d_{XVn}, d_{XGn}) - \mathbb{X}(d'_{XVn}, d'_{XGn}))^2 \rightarrow \min \quad (3.44)$$

У цьому випадку функція $\mathbb{X}(d'_{XVn}, d'_{XGn})$ описує поверхню першої квадратичної форми. Перша квадратична форма поверхні характеризує внутрішні метричні властивості поверхні і її розташування в просторі в околицях заданої хмари точок, які є результатами вимірювання повітряного зазору d_{VZ_n} . Утворена таким чином поверхня є не чутлива до випадкових відхилень вимірюваної величини (внутрішніх шумів вимірювального каналу, некритичних значень розкиду параметрів конструкційних елементів ротора й статора та тощо).

Вирішення завдання апроксимації проведемо з урахуванням [4, 26, 35, 252]. У цьому разі розрахуємо таку сітку $\{M_j\}^n$, яка б апроксимувала поверхню $\mathbb{X}(d'_{XVn}, d'_{XGn})$ та забезпечувала мінімізацію суми квадратів відхилень за

виразом (3.46). Останнє виконується шляхом пошуку коренів для системи рівнянь при виконанні умови $\partial \mathbb{X} / \partial c_j = 0$.

$$\mathbb{X}(d'_{XVn}, d'_{XGn}) = \sum_{n=1}^{N,k} (a1_{n,j} x_{rt n,j} + a2_{n,j} y_{rt n,j} + a3_{n,j} z_{rt n,j} + a4_{n,j}) \quad (3.45)$$

де $a1, a2, a3, a4$ – невідомі коефіцієнти регресії, які вибираються із умови виконання $a1^2 + a2^2 + a3^2 + a4^2 = 1$; k – кількість базисних функцій, яких повинно бути менше кількості заданих точок для того, щоб їх суперпозиція визначалася одним єдиним чином. В результаті рішення отриманої системи щодо коефіцієнтів $a1, a2, a3, a4$ будується апроксимуюча поверхня $\mathbb{X}(d'_{XVn}, d'_{XGn})$.

Для визначення зміщення центру обода ротора відносно центру статора знайдемо проекцію центру основи циліндра (площина XOY) на поверхню $\mathbb{X}_{n,j}$, в результаті отримаємо точку A (рис. 3.13).

Проведена нормаль AC з точки A в точку C на площині XOY буде утворювати відрізок BC , значення якого є зміщення центру обода ротора щодо центру осі статора. Координати точки $C(X_C, Y_C)$ – є координатами центру обвідної ротора $C(X_C, Y_C) = O(X'_0, Y'_0)$.

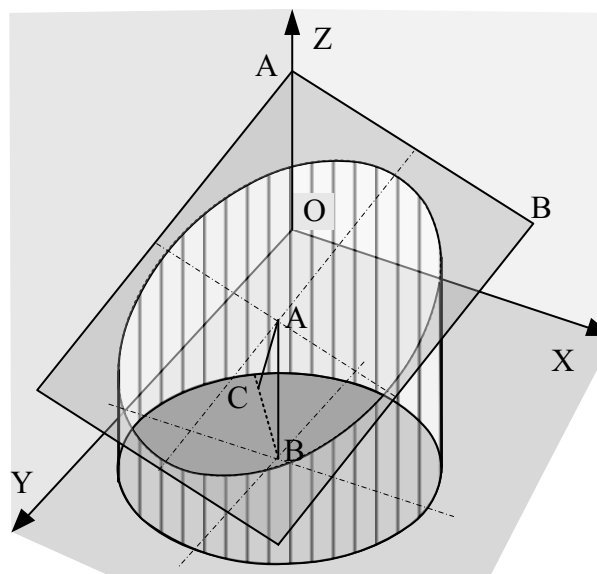


Рис. 3.13 Схема визначення зміщення параметрів обвідної полюсів ротора відносно геометричного центру статора

Враховуючи координати центру $C(X_C, Y_C)$ та початкові координати центру $O(X_0, Y_0)$ можливо визначити значення ексцентриситету ε та кута α , що його характеризує, тип ексцентриситету, а також побудувати траєкторію (годограф) руху центру та визначити враховуючи отримані данні за декілька обертів ротора.

Запропонований спосіб має переваги при визначенні обвідної форми ротора, що полягають в незалежності отриманих результатів від значення нерівномірності геометричних параметрів полюсів ротора, що призводять до появи не симетричного розташування точок, завад та шумів в інформаційно-вимірювальних каналах, а також наявності пропущених та/або нульових значень повітряного зазору при його контролі.

3.5 Метод обробки вихідних даних волоконно-оптичних сенсорів з решітками Брегга

Важливим завданням підвищення метрологічних характеристик волоконно-оптичних сенсорів з решітками Брегга є розробка спеціалізованого програмного забезпечення з обробки інформаційних даних та автоматизації пошуку координат спектральних піків, що призначене для використання в комп'ютеризованих оптоволоконних вимірювачах систем контролю та діагностики параметрів механічних дефектів потужних генераторів. Системи, що використовують БР в своїй структурі, докладно розглянуті в розділі 2, а їх основні компоненти в розділі 5. Тому завданням даного розділу є завдання із розробки метода обробки сигналів, отриманих із ПЗС фотоприймача 31 (рис. 2.20), в якості якого доцільно використовувати ПЗС лінійки з забезпечення оптимального співвідношення швидкодія/завадостійкість.

Вирішення цього завдання на даний час стало можливим, як і в минулому розділі, завдяки наявності сучасної потужної обчислювальної техніки, в тому числі цифрових сигнальних процесорів. Використання сучасних процесорів дозволяє знаходити компроміс між необхідністю підвищувати точність вимірювань, з одночасним забезпеченням необхідної швидкодії та

завадостійкості за рахунок вдосконалення не тільки оптичних і електронних вузлів, але і за рахунок застосування спеціальних методів математичної обробки отриманих інформаційних даних.

У цьому разі для чисельної оцінки координат спектральних складових вихідного сигналу із ПЗС матриці може бути використана методика описана в [34]. У відповідності до цієї методики у разі використання ПЗС матриці маємо вектор значень, де номер елементу є координатами пікселя ПЗС матриці, а значення елементів визначаються u_i рівнем освітленості, усередненим по площі пікселя. Для визначення координат x_m максимуму піку вибраної області піку, припустимо, що координата максимуму збігається з координатою центру маси фігури, утвореної стовпцями даної гістограми, тобто [34]

$$x_m = \frac{\sum_i x_i u_i}{\sum_i u_i}, \quad (3.46)$$

де x_i – координата, яка відповідає номеру i -ого стовпця гістограми, $i = 0 \dots n$, n – кількість стовпців гістограми (пікселів).

Визначення координати центру піку спектру за виразом (3.46) має недолік – досить високу чутливість до завад у вхідному сигналі, за рахунок підвищеної чутливості методу до шуму, що має місце на вході ПЗС лінійки.

Метод, запропонований та досліджений в роботах [9, 10, 113, 116], передбачає усунення вказаного недоліку. У цьому разі для "центру ваги" піку у відповідності із запропонованою методикою, пропонується скористатися статистичними характеристиками закону розподілу освітленості між пікселями, а також алгоритмом пошуку рівноваги квадратів площ $S_{ЛВ}$ лівої і $S_{ПР}$ правої половини освітленої ділянки.

В результаті чисельної оцінки похибки методу, було встановлено, що похибка оцінки координати x_i при використанні описаної вище методики становить $\delta x = 0,5 \dots 1\%$. без урахування дії завад. З урахуванням дії завади маємо $\delta x \approx 7\%$ за відношення сигнал/завада 30, що є типовим для ПЗС лінійок.

Методом покращення визначення координат спектральних піків є

використання методу найменших квадратів із апроксимуючою гаусовою функцією отриманого сигналу $u(x_i)$ з ПЗС лінійки перед застосуванням описаного вище методу визначення координат. У цьому разі для мінімізації похибки знаходження апроксимуючої функції $f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)$ скористаємося виразом (3.35) для мінімізації функціонала $Q = \sum_{i=1}^N (f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m) - u(x_i))^2$, тобто знайдемо таке значення $a_1, a_2, \dots, a_m$, при яких Q приймає мінімальне значення.

Для цього розв'яжемо наступну систему рівнянь:

$$\frac{\partial Q}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial Q}{\partial a_2} = 0, \dots, \frac{\partial Q}{\partial a_m} = 0., \quad (3.47)$$

За умови, що система рівнянь (3.47) є лінійною відносно $\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_m$, маємо наступну систему:

$$\begin{cases} a_{11}\delta k_a + a_{12}\delta x_m + a_{13}\delta\sigma = b_1, \\ a_{21}\delta k_a + a_{22}\delta x_m + a_{23}\delta\sigma = b_2, \\ a_{31}\delta k_a + a_{32}\delta x_m + a_{33}\delta\sigma = b_3, \end{cases} \quad (3.48)$$

Коефіцієнти рівнянь (3.48) розраховуються аналогічно випадку розрахунку коефіцієнтів систем рівнянь (3.36). У цьому разі маємо

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sum_{i=1}^N \varphi_i^2, & a_{12} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m}, & a_{13} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, \\ a_{21} &= \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m}, & a_{22} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \right)^2, & a_{23} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, \\ a_{31} &= \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, & a_{32} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, & a_{33} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} \right)^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= \sum_{i=1}^N u_i \varphi_i - k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i^2 = \sum_{i=1}^N u_i \varphi_i - k_{a0} a_{11} \\
b_2 &= \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} - k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} = \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} - k_{a0} a_{21} \\
b_3 &= \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} - k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} = \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} - k_{a0} a_{31}
\end{aligned} \tag{3.49}$$

де $\varphi(x, x_m, \sigma)$ - функція Гауса, яка визначається нормальний закон розподілу за виразом (3.8).

У цьому разі у якості σ може бути використана величина [34]:

$$\sigma = \frac{\Delta w_{1/2}}{2\sqrt{2 \ln 2}} \approx 0,425 \Delta w_{1/2}, \tag{3.50}$$

де $\Delta w_{1/2}$ - кількість пікселів, яка має амплітуду сигналу, яка приблизно дорівнює половині максимального значення $u_{\max}(x)$

Розрахувавши значення параметрів x_m та σ знайдемо, що апроксимуюча функція з урахуванням (3.8) для брегівського піка визначиться за наступним виразом

$$app(x) = k_a \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_m}{\sigma} \right)^2} \tag{3.51}$$

де $k_a = u_{\max}(x) \sigma \sqrt{2\pi}$ - амплітудний коефіцієнт.

В результаті чисельної оцінки було визначено, що використання (3.51) дозволяє зменшити похибку визначення оцінки координати x_i в 2-3 рази при збільшенні кількістю ітерацій в декілька разів. Тому використання апроксимації є доцільним тільки для відношень сигнал/завада, за яких неможливо забезпечити необхідну точність знаходження x_i координати спектрального брегівського піку. В інших випадках доцільно використання методики без застосування апроксимації.

3.6 Метод компенсації похибки від впливу перекосу електродів ємнісних сенсорів системи стабілізації тиску пресування осердя статора

В процесі експлуатації дослідних зразків силових акумуляторів з ємнісними сенсорами було виявлено появу специфічної похибки вимірювання, зумовленої тим, що кільцеві електроди вимірювального конденсатора сенсора, які в ідеальному випадку мають бути розміщені в паралельних площинах, в процесі навантаження пружного трубчатого елемента (див. Додаток Ж) є не зовсім паралельними один одному. Між площинами електродів з'являється деякий, відносно невеликий, кут перекосу α . Причини виникнення цього перекосу – технологічні похибки виготовлення елементів стягуючих конструктивних елементів (кінцевих частин призм з різбленням, торців гайок), попадання під гайки часток окалини, іншого сміття і тому подібне, а також можливі неточності юстирування в процесі монтажу електродів ємнісного сенсора.

У даному підрозділі описано метод компенсації похибки від перекосу електродів ємнісних сенсорів силових акумуляторів. Особливістю методу є застосування нової конструкції ємнісного сенсора зусилля, в якому значно зменшена похибка від перекосу електродів змінного вимірювального конденсатора в напівдиференціальному сенсорі за рахунок застосування конструктивних рішень та спеціального алгоритму коригування похибки від перекосу [145, 211]

Розглянемо більш детально конструкцію сенсора та математичне забезпечення алгоритму коригування похибки при вимірюванні інформаційної складової ємності.

Для зменшення похибки застосовано спосіб компенсації, описаний в [53-55], де показано, що якщо при круглих електродах змінного конденсатора один з цих електродів розділений на два – внутрішнє коло і концентричне кільце, що оточує його, і при цьому окремо вимірюється електрична ємність кожного з двох плоско-паралельних конденсаторів, що при цьому утворилися, то за результатами вимірювання можна визначити значення середнього зазору в

змінному зазорі, яке практично не залежить від перекосу, тобто від непаралельності площин електродів.

Оскільки в ПЧЕ центральна ділянка зайнята шпилькою (різьбовою частиною стяжної призми), то електроди конденсатора сенсора виготовлені у вигляді двох кілець, що лежать в паралельних площинах [163, 164]. Для використання згаданого способу боротьби з похибкою від перекосу один з кільцевих електродів необхідно розділити на дві частини – два концентричні кільця, що утворюють з протилежним (суцільним кільцем) два конденсатори – основний (ємністю C_1) і коректувальний (ємністю C_2). Покажемо, що в цьому випадку також можлива компенсація похибки від впливу перекосу електродів ємнісного сенсора і знайдемо умови для її мінімізації.

На рис. 3.14 показаний розріз перетворювача напівдиференціальним ємнісним сенсором зі змінним зазором [145, 164], на рис. 3.15 – схематично зображені електроди робочого (змінного) конденсатора сенсора.

Співвідношення між величиною зазору, поперечними розмірами електродів і кут перекосу показані в умовному масштабі. Насправді в реальних конструкціях кут складає долі або одиниці кутових градусів. Охоронні електроди не показані. Позначено: Γ – гайка; III – шпилька (різьбова частина стяжної призми); K – корпус машини; ПЕ – пружний елемент перетворювача; $E1$, $E2$ – секції верхнього електроду робочого конденсатора; $E3$ – його загальний електрод; $E4$, $E5$ – електроди зразкового конденсатора; d і d_0 – зазори в робочому та зразковому конденсаторі; α – кут перекосу (відхилення від паралельності площин електродів робочого конденсатора).

Площі кілець основного $E1$ і $E2$ коригувального електродів відповідно рівні

$$\begin{aligned} S_1 &= \pi(r_2^2 - r_1^2) \\ S_2 &= \pi(r_3^2 - r_2^2) \end{aligned} \quad (3.52)$$

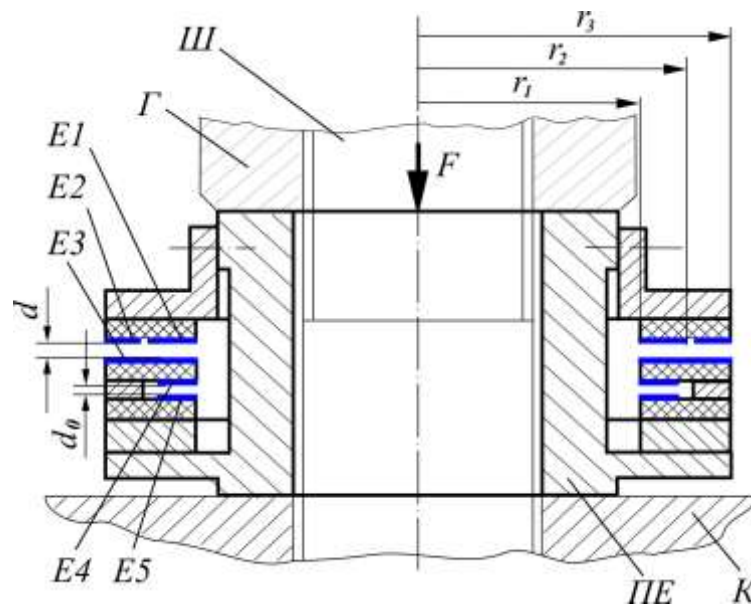


Рис. 3.14 Перетворювач "сила-мікропереміщення-код" з напівдиференціальним ємнісним сенсором

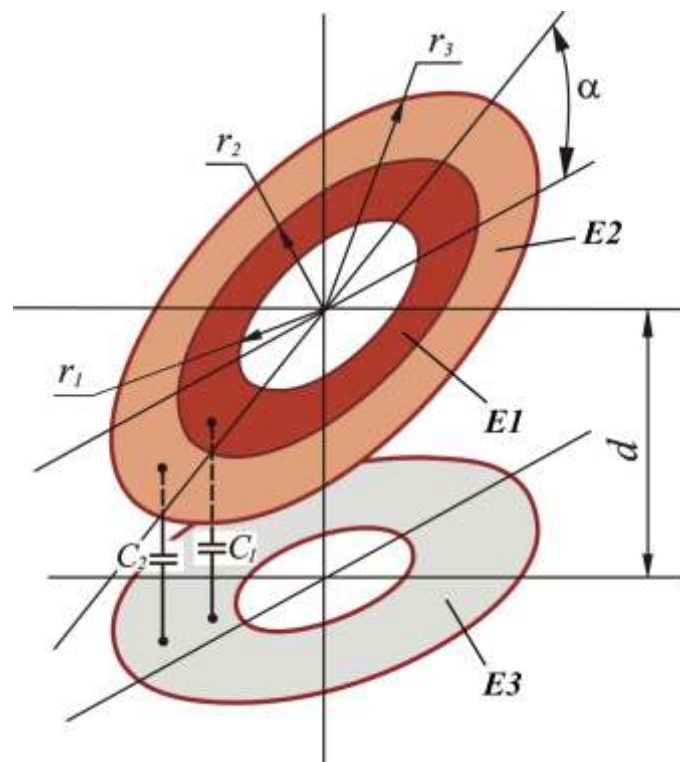


Рис. 3.15 Електроди робочого (змінного) конденсатора сенсора

У подальших викладеннях для компактності запису замінимо позначення радіусів r_1, r_2, r_3 відповідно на a, b, c

$$\begin{aligned} S_1 &= \pi(b_2^2 - a_1^2) \\ S_1 &= \pi(c_3^2 - b_2^2) \end{aligned} \quad (3.53)$$

За відсутності перекосу і за умови нехтування малим впливом крайових ефектів електричні ємності C_1 і C_2 визначаються як

$$C_1 = \frac{\varepsilon S_1}{d} = \frac{\varepsilon \pi(b^2 - a^2)}{d}; \quad C_2 = \frac{\varepsilon S_2}{d} = \frac{\varepsilon \pi(c^2 - b^2)}{d}, \quad (3.54)$$

тобто має місце строга зворотна пропорційність між величинами ємності та зазору.

При цьому для зразкового конденсатора

$$C_0 = \frac{\varepsilon S_0}{d_0}. \quad (3.55)$$

В якості інформативного параметра робочого конденсатора використовуватимемо різницю ємностей його основної C_1 і коригувальної C_2 секцій

$$C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon \pi}{d} (2b^2 - a^2 - c^2). \quad (3.56)$$

Використавши (3.54) та (3.55), отримаємо

$$\frac{C_0}{C_1 - C_2} = \frac{d}{d_0} \frac{S_0}{\pi(2b^2 - a^2 - c^2)}, \quad (3.57)$$

тобто, вирахувавши відношення ємностей C_0 і $C_1 - C_2$, легко отримати вимірювальну величину d , причому в коефіцієнт пропорційності входять тільки постійні геометричні розміри d_0 , S_0 , a , b , c .

При виникненні перекосу ($\alpha \neq 0$) вираз (3.56) ускладнюється, і з розкладом в ряд буде мати вигляд (показані тільки перші три члени ряду)

$$\begin{aligned} C_1 - C_2 &= \frac{\varepsilon\pi}{d} \frac{\sin\alpha}{\alpha} \left[(2b^2 - a^2 - c^2) + \frac{\sin^2\alpha}{4d^2} (2b^4 - a^4 - c^4) + \frac{\sin^4\alpha}{8d^4} (2b^6 - a^6 - c^6) + \dots \right] = \\ &= \frac{\varepsilon\pi}{d} \frac{\sin\alpha}{\alpha} [A + B + D + \dots]. \end{aligned} \quad (3.58)$$

Відмітимо, що вплив множника $\sin\alpha/\alpha$ у виразі (3.58) в подальшому можна не враховувати, оскільки в реальних конструкціях при відношенні величини зазору до зовнішнього діаметру більшого електроду 1:20 – 1:50 кут α не перевищує 3° , при цьому значення $\sin\alpha/\alpha$ відрізняється від одиниці не більше, ніж на $4 \cdot 10^{-4}$ [357].

Найбільшу частину похибки від перекосу вносить другий член многочлену в квадратних дужках. Визначимо умови, за яких цей член перетворюється в нуль

$$B = 2b^4 - a^4 - c^4 = 0. \quad (3.59)$$

Виразимо величини b , c через a та деякі коефіцієнти p і m

$$b = pa, \quad c = ma. \quad (3.60)$$

Зазвичай коефіцієнт m (відношення зовнішнього радіусу активного електроду робочого конденсатора до його внутрішнього радіусу) задається конструктивними міркуваннями, а коефіцієнтом p можна варіювати. Підставивши (3.60) в (3.59), отримаємо рівняння

$$2p^4 - 1 - m^4 = 0, \quad (3.61)$$

рішення якого

$$p = \sqrt[4]{(1+m^4)/2} \quad (3.62)$$

дає умову перетворення на нуль другого доданку у виразі (3.58). Для конкретної конструкції, наприклад $m=2$, маємо $p = \sqrt[4]{8,5} \approx 1,71$. При цьому коефіцієнт зменшення ефективної ємності робочого конденсатора (в порівнянні з випадком, коли електроди $E1$ і $E2$ об'єднані в один електрод) складе

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\sqrt{2(m^4 + 1)} - m^2 - 1}{m^2 - 1}, \quad (3.63)$$

і при $m=2$ ця величина складе 0,277, тобто трохи менше, ніж 30%.

Визначимо, яка при вибраній величині p буде похибка вимірювання від впливу третього члена розкладання D (впливом четвертого і подальших членів ряду знехтуємо у зв'язку з їх малою величиною).

$$D = \frac{\sin^4 \alpha}{8d_x^4} (2b^6 - a^6 - c^6) = \frac{\sin^4 \alpha \cdot a^6}{8d_x^4} (2p^6 - 1 - m^6). \quad (3.64)$$

Для оцінки впливу цього члена на похибку пристрою помножимо і розділимо вираз (3.58) на A (враховуючи, що $B=0$) і винесемо A за дужки:

$$C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon \pi \sin \alpha}{d} a^2 (2p^2 - m^2 - 1) \left[1 + \frac{a^4 \sin^4 \alpha}{8d^4} \cdot \frac{2p^6 - m^6 - 1}{2p^2 - m^2 - 1} \right] \quad (3.65)$$

Очевидно, що другий доданок в квадратних дужках виразу (3.65) є відносною похибкою δ_3 вимірювання різниці ємностей $C_1 - C_2$

$$\delta_3 = \frac{a^4 \sin^4 \alpha}{8d^4} \cdot \frac{2p^6 - m^6 - 1}{2p^2 - m^2 - 1}. \quad (3.66)$$

Оцінимо значення δ_3 . Якщо p задовольняє умову (3.62), а $m=2$, то з (3.66) маємо

$$\delta_3 = -2,34 \frac{a^4 \sin^4 \alpha}{d^4}. \quad (3.67)$$

Відмітимо, що кут α фізично не може перевищувати деяке критичне значення, оскільки інакше краї електродів конденсатора зіткнуться, і сенсор втратить працездатність. Таким чином, умовою нормальної роботи є $\alpha < \alpha_{\text{кр}}$. Введемо поняття "коефіцієнт перекосу" $k_{\text{п}}$:

$$k_{\text{п}} = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{кр}}}. \quad (3.68)$$

Торкання електродів настає при $k_{\text{п}}=1$. Для критичного кута перекосу отримуємо з урахуванням невеликої величини кутів перекосу [357] отримаємо

$$\sin \alpha_{\text{кр}} \approx \alpha_{\text{кр}} = \frac{d}{ma}. \quad (3.69)$$

Визначив з (3.69) величину a і підставивши її в (3.66), одержимо

$$|\delta_3| = 2,34 \left(\frac{k_{\text{п}}}{m} \right)^4 \quad (3.70)$$

Для $m=2$ маємо $|\delta_3| = 0,146 k_{\text{п}}^4$, і, якщо $k_{\text{п}} = 0,5$, то $|\delta_3| \approx 0,009$.

Оцінимо ефективність описаного способу компенсації. Порівняємо отримане значення похибки з її значенням в некомпенсованому сенсорі. Нехай в аналогічному по конструкції і розмірам сенсорі електроди $E1$ і $E2$ об'єднані в

один кільцевий електрод із зовнішнім діаметром $r_3 = c$ і внутрішнім $r_1 = a$. Інформативним параметром тут є ємність конденсатора $C = C_1 + C_2$. По аналогії з (3.52) – (3.54) маємо

$$C = \frac{\varepsilon\pi}{d} (c^2 - a^2). \quad (3.71)$$

За наявності перекосу вираз (3.71) з урахуванням (3.58) запишеться як

$$C = \frac{\varepsilon\pi}{d} \frac{\sin \alpha}{\alpha} (c^2 - a^2) \left[1 + \frac{\sin^2 \alpha}{4d^2} \left(\frac{c^4 - a^4}{c^2 - a^2} \right) + \frac{\sin^4 \alpha}{8d^4} \left(\frac{c^6 - a^6}{c^2 - a^2} \right) \right]. \quad (3.72)$$

Оскільки, як і раніше, $c = ma$, то

$$C = \frac{\varepsilon\pi}{d} \frac{\sin \alpha}{\alpha} (c^2 - a^2) \left[1 + \frac{a^2 \sin^2 \alpha}{4d^2} (m^2 - 1) + \frac{a^4 \sin^4 \alpha}{8d^4} (m^4 + m^2 + 1) \right]. \quad (3.73)$$

Сума другого і третього доданків многочлена в квадратних дужках (3.73) є відносною похибкою $\delta_{\text{нк}}$ некомпенсованого сенсора, тобто відхиленням його ємності від ідеального випадку, що описується виразом (3.71). Підставивши (3.69) в (3.71), отримуємо при $m = 2$ $\delta_{\text{нк}} = 1,25k_{\text{п}}^2 + 2,63k_{\text{п}}^4$.

Для порівняння в таблиці 3.1 приведені округлені значення похибок скомпенсованого $\delta_{\text{к}}$ і некомпенсованого $\delta_{\text{нк}}$ сенсорів для декількох значень коефіцієнта перекосу $k_{\text{п}}$, а також ефективність компенсації як відношення величин $\delta_{\text{нк}}$ і $\delta_{\text{к}}$.

Отримані результати можуть бути використані при розробці конструкцій-ємнісних датчиків мікропереміщень з кільцевими та покращенні метрологічних характеристик з секторальними електродами (див. розділ 4, рис. 4.11 та 4.16), за рахунок використання описаного методу компенсації.

Таблиця 3.1

Значення похибок вимірювання скомпенсованого δ_k і некомпенсованого δ_{HK} сенсорів

Коефіцієнт перекосу k_n	Похибка некомпенсованого сенсора $ \delta_{HK} \%$	Похибка скомпенсованого сенсора $ \delta_k \%$	Ефективність $ \delta_{HK}/\delta_k $
0,9	36	9,6	3,75
0,5	8,8	0,9	9,8
0,3	2,9	0,11	26,4
0,1	0,31	0,0015	209,3
0	0	0	—

На метод компенсації та пристрій, що його реалізує, було отримано патенти України [162].

3.7 Апроксимація функції перетворення вимірювачів механічних параметрів цифровими методами

Вибраний метод апроксимації повинен забезпечити максимальну точність обрахунків при мінімальному числі вузлів (експериментальних даних), бути досить простим для того, щоб технічна реалізація алгоритму обчислювальної обробки була економічною, забезпечувати можливість швидкої та економічної перевірки вимірювальних перетворювачів оптоелектронних систем діагностування потужних ГГ та ТГ.

Для вирішення такої задачі є оптимальним застосування цифрових методів. Перевагами застосування цифрових методів для визначення функції перетворення вимірювача є:

- простота схемотехнічного рішення в порівнянні з традиційними аналоговими способами, надзвичайна економічність (завдяки можливості

вносити корекції або зміни при необхідності програмно, а не проводити схему технічну корекцію перетворювального тракту)

- оперативність і точність (завдяки проведенню необхідних операцій за заздалегідь визначеними параметрами, наприклад: використовуючи таблиці, що суттєво скорочує час розрахунків),

- можливість використання для виготовлення чутливих елементів вимірювачів поширеної технології виготовлення друкованих плат – фотолітографії.

Визначення функції перетворення цифровими методами обробки вимірювальної інформації фактично зводиться до оптимальної апроксимації експериментально отриманої статичної функції перетворення вимірювача $f(x)$, як функції від зовнішнього впливу на чутливий ємнісний елемент при його початковому калібруванні. Основним впливом при оцінці механічних параметрів є їх відхилення від норми, що супроводжуються статичними та динамічними взаємними мікрозміщеннями двох конструктивних поверхонь машини. При розрахунку функції апроксимації $f(x)$ та її лінеаризації в залежності тільки від одного параметру, що контролюється, виникає похибка, обумовлена неврахуванням факторів, що викликані впливом на гібридний вимірювач робочого середовища об'єкту діагностування.

Тому для визначення функції перетворення гібридного вимірювача $f(x)$ скористаємося його залежністю від багатьох параметрів зовнішнього впливу, що однозначно визначають значення одновимірної величини ємності C на його виході. Такими факторами для гібридного вимірювача є:

- мікрозміщення d ;
- температура T ;
- вологість RH ;
- індукції магнітного поля B ,

що зафіксовані в момент часу t визначення значення величини C .

Отже, у цьому разі задача знаходження функції перетворення є задачею розрахунку функціональної залежності, у якій кожній одновимірній точці

(цифровій величині) C ставиться у відповідність m -факторів, що є незалежні між собою [22]. У цьому разі на виході гібридного перетворювача маємо одномірну цифрову величину C , що однозначно визначена гамільтоніаном m -го порядку від m -факторів, які є координатами входу функції перетворення гібридного вимірювача та можуть бути представлені у вигляді

$$C_j \approx f(x_i^j) \equiv C \begin{pmatrix} d_1, d_2, \dots, d_i \\ T_1, T_2, \dots, T_i \\ RH_1, RH_2, \dots, RH_i \\ B_1^j, B_2, \dots, B_i \\ t_1, t_2, \dots, t_i \end{pmatrix}, \quad (3.74)$$

де $d = (d_1 = d_H - d'_1, d_2 = d_H - d'_2, \dots, d_i = d_H - d'_n)$, d_H – початкове або номінальне значення відстані між поверхнею, на якій розташовано чутливий елемент вимірювального перетворювача та металевою поверхнею, взаємні мікрозміщення яких контролюються, d' – зафіксоване значення відстані між поверхнею на якій розташовано чутливий елемент вимірювального перетворювача та металевою поверхнею; $i \in \mathbb{N}$, $i = \overline{0, \dots, n}$ – кількість існуючих значень при визначенні m -го фактору; $j \in \mathbb{N}$, $j = \overline{1, \dots, m}$ – кількість векторів, які є координатами входу функції перетворення гібридного вимірювача.

Кожна із m координат входу, що входить до виразу (3.74), як зазначено вище, є окремою функціональною залежністю, що визначається при теоретично-експериментальних дослідженнях гібридних вимірювачів та їх чутливих сенсорів. У цьому разі, кожна із функціональних залежностей m -ї координати входу може бути представлена, як залежність одномірної вихідної величини від зміни n -ої одномірної вхідної величини (див. Розділ 4), так наприклад, в роботах [43, 45, 87, 94, 101, 103, 106, 115, 120, 337, 367] автором показано, що для вирішення задачі апроксимації експериментальних даних достатньо застосовувати константні, лінійні, або поліноміальні функцій 2-4 порядків.

Використання класичних інтерполяційних формул (Лагранжа і її різновидів) в разі апроксимації характеристики функції перетворення вимірювача $C_j \approx f(x_i^j)$ за виразом (3.74) практично неможливо, хоча б тому, що потрібна точна фіксація всіх змінних, крім однієї [131]. Відповідно до зазначеного розглянемо основні види апроксимації функції перетворення гібридних електронно-оптичних вимірювачів $C_j \approx f(x_i^j)$, що можуть бути застосовані до експериментально отриманих статистичних даних.

Для вирішення цієї задачі представимо функціональну залежність (3.74) у вигляді многочлена відносно сукупності векторів вхідних параметрів, що впливають на функцію перетворення гібридного вимірювача:

$$C \approx f(\vec{x}) \equiv (\vec{p}, \vec{x}) + \xi_0 \equiv \sum_{j=0}^m (p_j \cdot x_j) + \xi_0, \quad (3.75)$$

де ξ_0 – похибка апроксимації; $j \in \mathbb{N}$, $j = \overline{0, \dots, m}$ – визначається кількістю вхідних параметрів; $x \approx g(a_C)$ – значення впливу, що має місце при визначенні величини C та розраховане за допомогою одномірного апроксимуючого поліному для кожного із j -го вхідного параметра; p_j – довільний фіксований вектор вагових коефіцієнтів поліному, що враховують ступінь впливу кожного j -го вхідного параметра на функцію перетворення вимірювача C .

У випадку визначення функціональної залежності для гібридних ІВК одномірна вихідна величина C визначається із врахуванням зміни n -мірної вхідної величини, тобто одномірна цифрова величина C на виході гібридного вимірювача однозначно в n -мірному евклідовому просторі $\mathbb{R}^n$ визначається набором $j+1$ векторів $\vec{x}_j \in \mathbb{R}^n$.

У цьому разі, для вирішення задачі пошуку поліному для виразу (3.74), по аналогії із просторово-часовими процесами [170] необхідно проводити обчислення n -мірної поліноміальної регресії [220], для спрощення розрахунків, що дозволить підвищити швидкодію модулів обробки даних систем контролю

використовується теорія барицентричних координат [131, 139, 167, 214, 240, 347]. Визначення апроксимуючого поліному функції перетворення вимірювача для врахування дії робочого середовища потужних генераторів приведено в Додатку Д.

У цьому разі для знаходження апроксимуючого поліному функції перетворення вимірювача можна скласти систему рівнянь

$$\begin{cases} p_0 y_{i0} + p_1 y_{i1} + \dots + p_n y_{in} = 0 \\ p_0 + p_1 + \dots + p_n = 1 \end{cases} \quad (3.76)$$

Використовуючи розраховані коефіцієнти $p_0, p_1, \dots, p_n$ на основі виразу (3.76), визначаються координати точки C (див. Додаток Д). Знайдені таким чином базисні точки формують вузли апроксимуючого поліному для функціональної залежності (3.74) гібридного перетворювача.

Для пошуку складової $x \approx g(a_C)$ виразу (3.75) скористаємося МНК. При цьому основним завданням є отримання аналітичної залежності $C_{12}[n]$, яка апроксимує експериментально отриману залежність $x[n]$ кожного впливу на вимірювач окремо (див. Додаток Д) і мінімізує функціонал виду:

$$Q = \sum_{i=1}^n (C_{12}[n] - x[n])^2 \rightarrow \min \quad (3.77)$$

У цьому випадку функція $C_{12}[n]$ описує криву, яка повторює графік отриманої експериментальної послідовності $x[n]$. Одним з найбільш широко застосовуваних на практиці алгоритмів побудови функціональної залежності $C_{12}[n]$ є метод найменших квадратів [233]. В даному випадку для апроксимації виразу $C_{12}[n]$ використовується залежність наступного виду:

$$C_{12}[n] = b c_0[n] + b_1 c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] \quad (3.78)$$

де: $c_0[n], \dots, c_m[n]$ – довільні базисні функції; $b_0, \dots, b_m$ – невідомі коефіцієнти регресії; m – кількість базисних функцій. Кількість базисних функцій має бути меншою за кількість заданих точок апроксимації для того, щоб їх суперпозиція визначалася одним єдиним чином.

Для вирішення задачі лінійної апроксимації в загальному випадку знаходять умови мінімізації суми квадратів відхилень для формули (3.78) пошуком коренів системи рівнянь за умови $dQ/db_k = 0$, де $k = 1, \dots, m$. Після розрахунку відповідних похідних, з урахуванням рівняння (5.81), отримуємо систему рівнянь Гауса:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (b_0 c_0[n] + b_1 c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] - x[n]) c_0[n] = 0 \\ \sum_{i=1}^n (b_0 c_0[n] + b_1 c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] - x[n]) c_1[n] = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \sum_{i=1}^n (b_0 c_0[n] + b_1 c_1[n] + \dots + b_m c_m[n] - x[n]) c_m[n] = 0 \end{cases} \quad (3.79)$$

Для знаходження коефіцієнтів $b_0, \dots, b_m$ системи (3.82) скористаємося методом найменших квадратів. На основі знайдених коефіцієнтів $b_0, \dots, b_m$ для заданої моделі апроксимації будується крива $C_{12}[n]$ на основі експериментально отриманих даних при проведенні серій експериментів.

Використовуючи описаний метод використанням лінійної та поліноміальних моделей різних порядків автором, в роботах [106, 337] були отримані апроксимуючі криві, які можуть бути використані при лінеаризації калібрувальної характеристики ЕОВ параметрів МД, використовуючи для цього лише програмні засоби.

Окрім цього даний метод був використаний в попередніх підрозділах для вирішення задач визначення піків сигналів, отриманих із берегівських комірок, пошуку геометричних параметрів ротора, а також при виділенні з часового ряду періодичної складової вібраційного процесу в безконтактних сенсорах вібрацій

контролю та моніторингу елементів обертового обладнання, що відображено в наступних роботах, проведених за безпосередньої участі автора [87, 94, 95, 101, 103, 111, 115, 120, 128]. Результати практичного застосування описаного методу для оцінки вібраційних складових в [95, 120, 121] наведено в Додатку Є.

Отримані функції апроксимації можуть бути використані при лінеаризації калібрувальної характеристики вимірювачів систем контролю та діагностики параметрів механічних дефектів потужних генераторів перед їх використанням або під час проведення вимірювань контрольно-діагностичних параметрів.

3.8 Програмно-алгоритмічне забезпечення вторинних вимірювальних перетворювачів на базі мікросхем CDC

Одним із вузлів оптико-електронного вимірювача, що визначає алгоритм його функціонування, технічні та метрологічні характеристики, є перетворювач механічної енергії в цифровий інформаційний сигнал. В гібридних вимірювачах із ємнісними первинними вимірювачами механічних мікропереміщень, що виникають при взаємних зміщеннях конструктивних елементів ТГ та ГГ, в електричний сигнал є вторинний вимірювальний перетворювач ємність-код. Як, зазначалось в попередніх розділах, перетворювачі ємність-код можуть бути реалізовані різними способами, але найбільшого поширення набули мікросхеми AD7745 / AD7746 та AD7747 виробництва Analog Devices, Inc. (Norwood, MA, USA) та FDC1004 виробництва Texas Instruments, Inc. (Dallas, TX, USA), що побудовані на використанні сигма-дельта перетворювачів ємності в цифровий код (capacitance-to-digital converter, CDC) з високою роздільною здатністю. Такі перетворювачі забезпечують високу точність вимірювання ємності, мають зручний цифровий інтерфейс, малі розміри, а також при цьому мають відносно низьку вартість в порівнянні із готовими перетворювачами ємність код.

Мікросхеми AD7747 та FDC1004 призначені для роботи з несиметричними або диференціальними ємнісними сенсорами, і можуть бути використані у випадку, коли одна обкладка підключена до землі, такі сенсори в роботі не розглядаються. Для роботи з ємнісними датчиками компланарного типу (див.

розділ 4) призначені мікросхеми AD7745 та AD7746, які дозволяють вимірювати ємність по трьох затискній потенційно токовій схемі підключення, яка дозволяє забезпечити захист від впливу взаємних паразитних ємностей та витоків[189].

Перетворювачі AD7745 та AD7746 є аналогічними за характеристиками, але мають відмінність в кількості каналів для вимірювання ємності. Перевагами використання мікросхем AD7745/46 є наявність сигма-дельта АЦП з високою роздільною здатністю в 24 біта з максимальною частотою вибірок рівній 90 SPS, висока лінійність ($\pm 0,01\%$), висока точність ($\pm 4\text{фФ}$) із стандартним діапазоном вимірювання до 4пФ, можливість перебудови внутрішніх параметрів (постійних часу фільтрів, коефіцієнтів підсилення, режиму роботи АЦП та тощо), низьким енергоспоживанням струму до 0,7 мА для діапазону напруги живлення від 2,7 В до 5,25 В, а також використання простого двохпровідного інтерфейсу I²C-сумісний послідовний інтерфейс [285].

При використанні у якості перетворювача ємність код інтегральної мікросхеми AD7745/46 з'являється можливість розташування перетворювача у безпосередній близькості із сенсором, уникаючи таким чином виникнення паразитної ємності сполучних ліній та впливу зовнішніх полів на значення інформативної складової ємності, що дозволяє реалізувати компактні первинні вимірювачі із цифровим виходом. На рис. 3.16 представлено блок-схему апаратно-програмного забезпечення вторинного вимірювального перетворювача а основі інтегральної мікросхеми AD7745/46 інформаційно-вимірювальних каналів комп'ютеризованої системи діагностування потужних генераторів.

Функціонування вимірювача відбувається відповідно до алгоритму, що задається апаратно-програмними засобами (АМЗ) комп'ютеризованої системи контролю та технічної діагностики потужних генераторів, що містять: програмно-алгоритмічні засоби керування роботою (ПСК); система аналізу інформації (САІ); засоби реєстрації інформації (БРК); інтерфейс користувача (ІК).

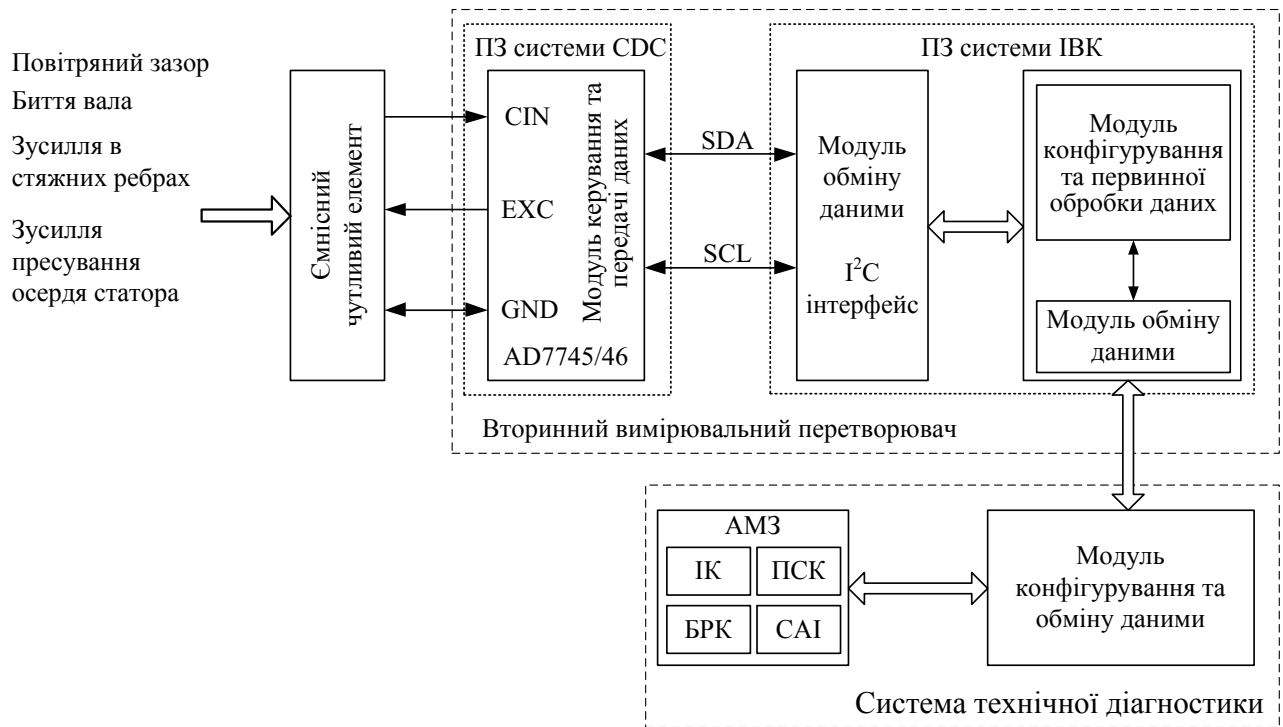


Рис. 3.16 Блок-схема апаратно-програмного забезпечення вторинного вимірювального перетворювача IBK системи діагностування ПГ

Узагальнена структура алгоритму функціонування вторинного вимірювача механічних дефектів потужних генераторів на базі інтегральної мікросхеми AD7745/46 приведена на рис. 3.17, на якому введені наступні позначення: МК – мікроконтролер вторинного вимірювального перетворювача; СТД – система технічної діагностики; МКОД – модуль конфігурування та обміну даними; UART – послідовний інтерфейс.

Алгоритм програмного забезпечення вимірювача включає в себе початкову ініціалізацію регістрів AD7745/46, керування роботою AD7745/46 та його калібрування в разі необхідності, отримання даних, їх попередню обробку та відправку до системи технічної діагностики (рис. 3.17 та рис. 3.18).

Схема алгоритму програмного забезпечення вимірювача приведена на рис. 3.17. Алгоритм керування процесами роботи інтегральної мікросхеми AD7745/46 приведено на рис. 3.18.

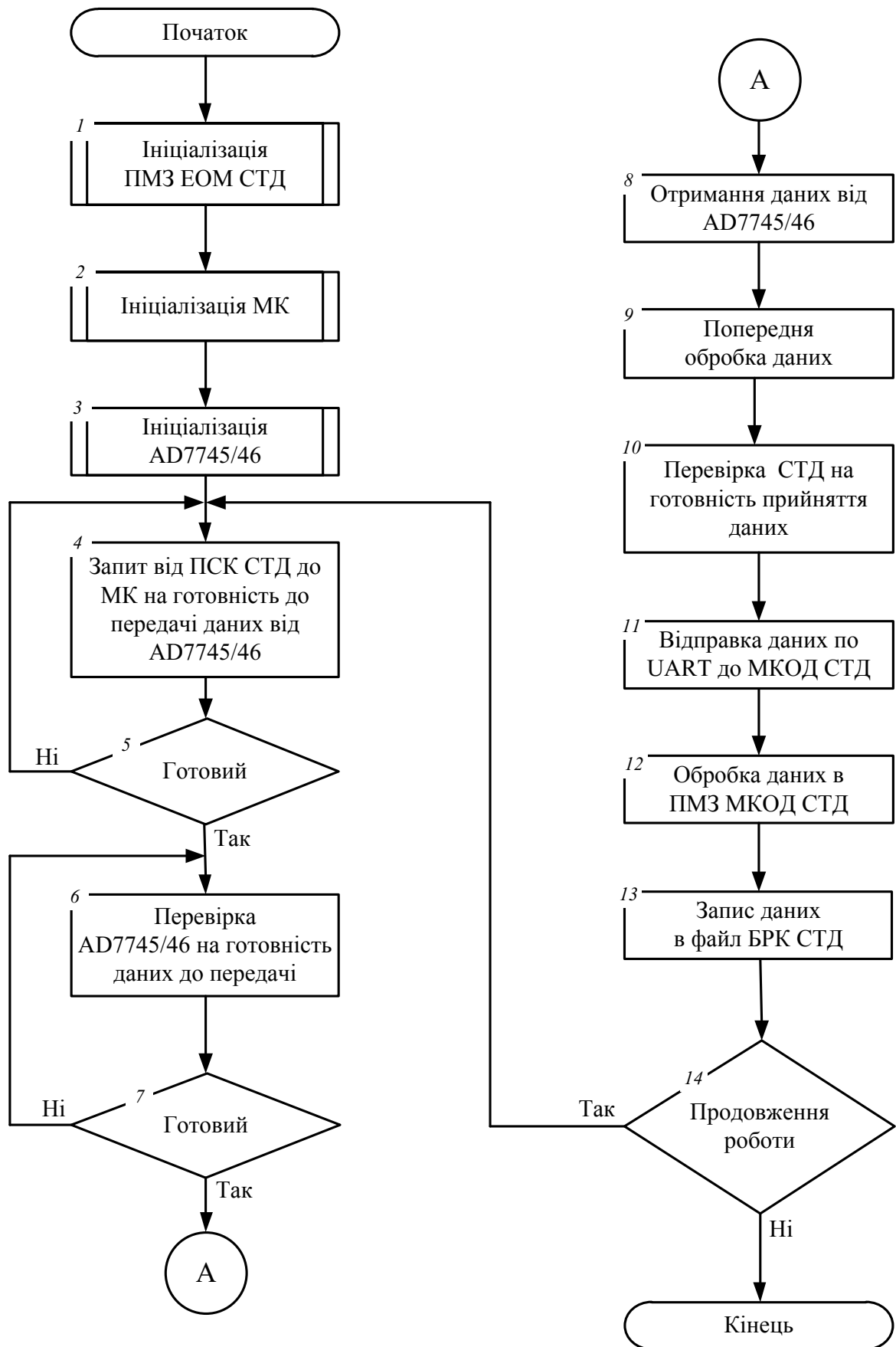


Рис. 3.17 (а) Схема алгоритму програмного забезпечення вимірювача

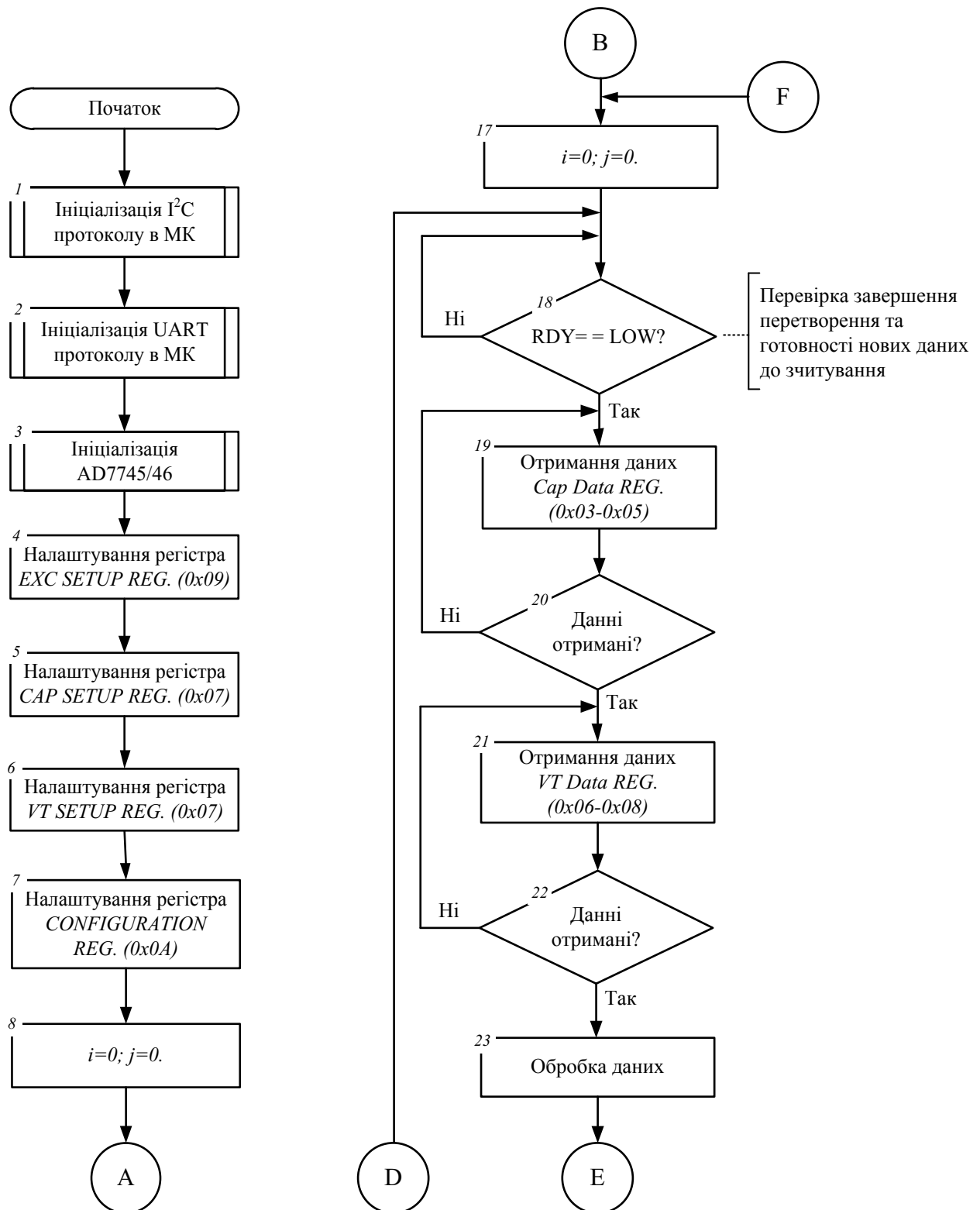


Рис. 3.17 (б) Схема алгоритму програмного забезпечення вимірювача

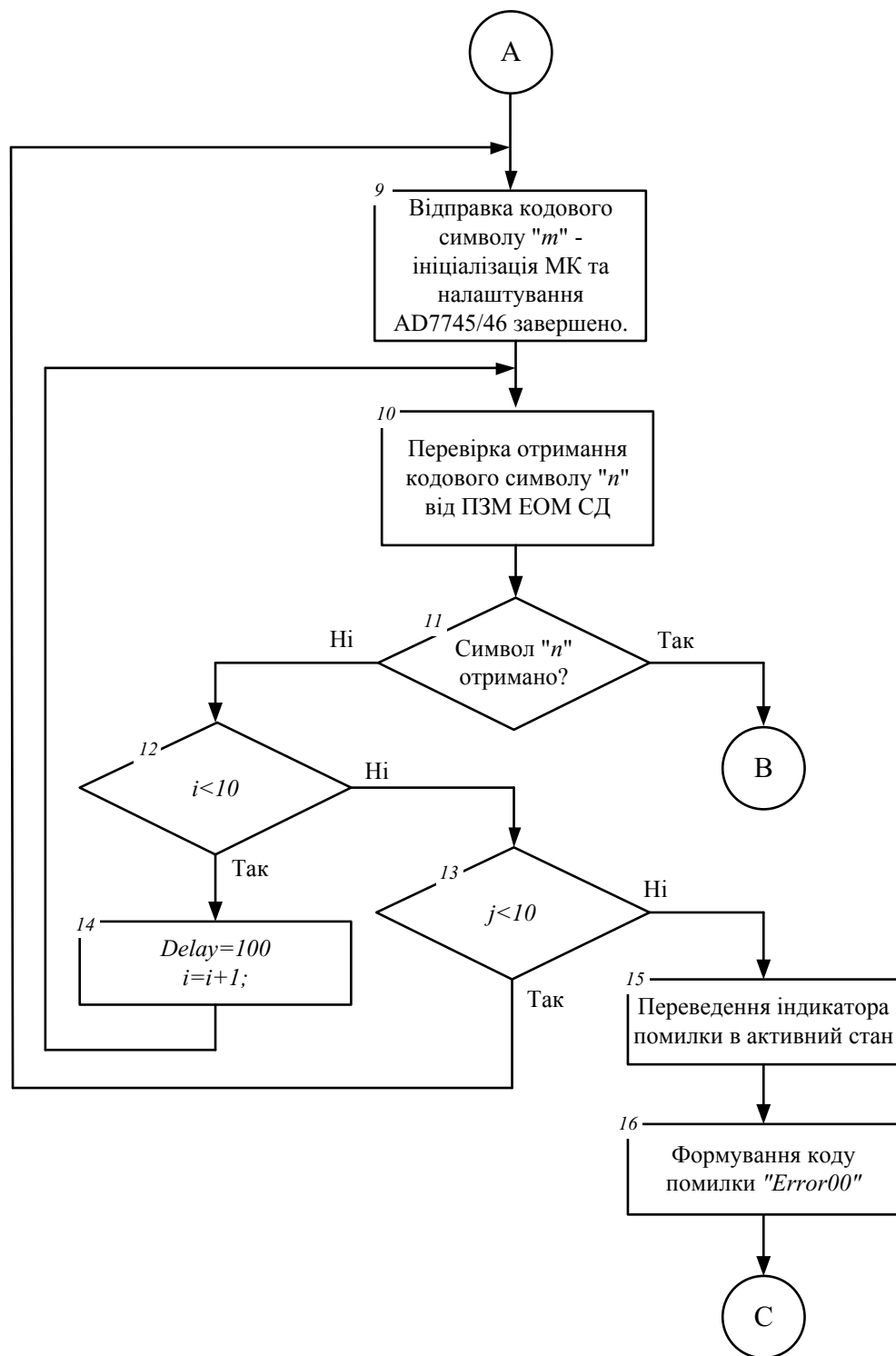


Рис. 3.17 (в) Схема алгоритму програмного забезпечення вимірювача

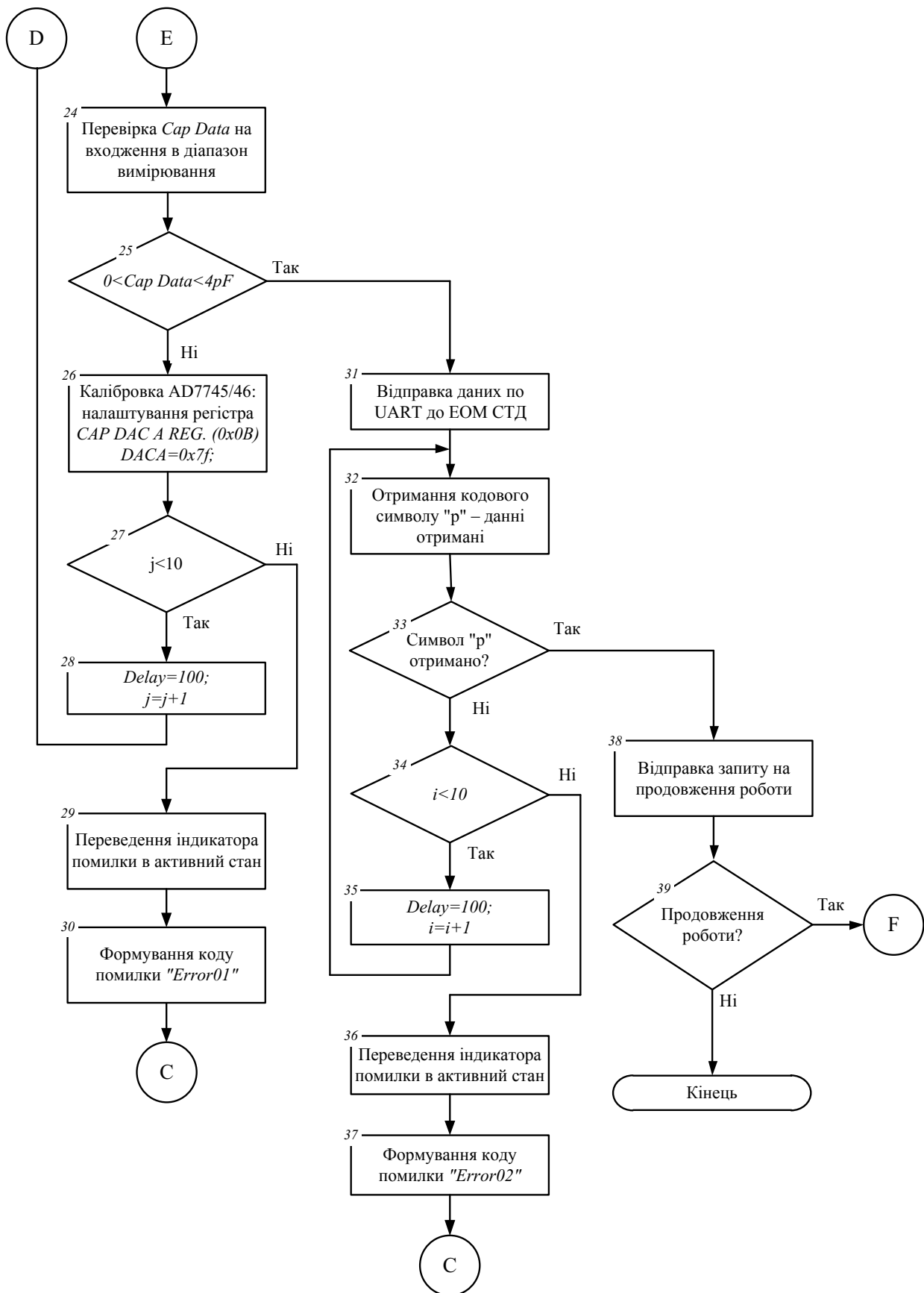
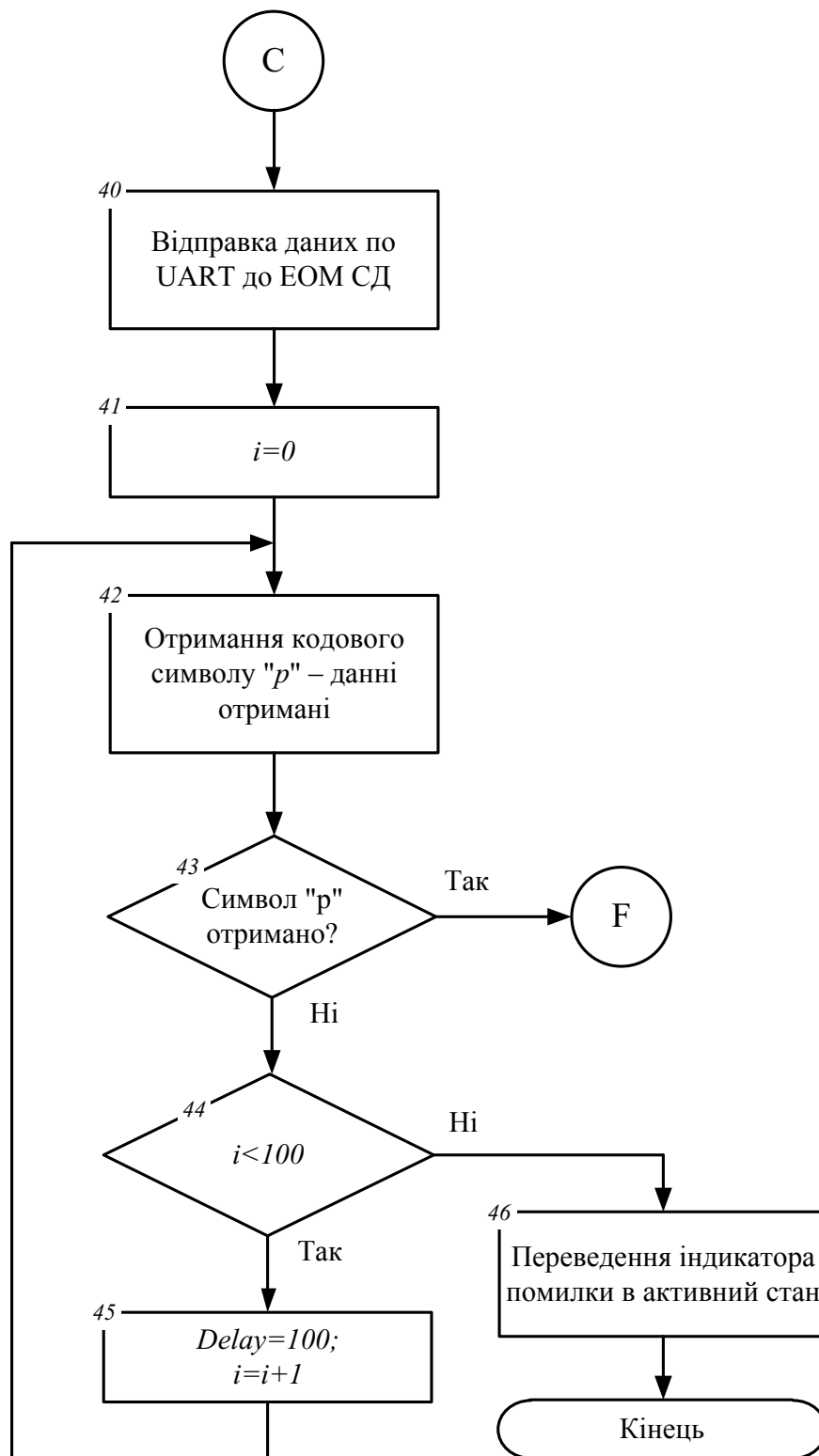


Рис. 3.17(г) Схема алгоритму програмного забезпечення вимірювача



Висновки до розділу 3

1. Отримано результати для аналітичного визначення параметрів обвідної полюсів ротора гідрогенератора та її просторових параметрів, ступеню ексцентриситету ротора та його параметрів.

2. Отримано методи аналітичного визначення параметрів форми обвідної полюсів ротора, що дозволяють підвищити ефективність визначення контрольно-діагностичних параметрів системами діагностування технічного стану гідрогенераторів.

3. Для функціонування вимірювачів на базі інтегральних мікросхем розроблено алгоритм, використання якого дозволить автоматизувати процес вимірювання контрольно-діагностичних параметрів, що у свою чергу дозволить забезпечити необхідний рівень ефективності контролю й діагностики механічних параметрів потужних генераторів.

4. Запропоновано метод корекції перекосу електродів напівдиференціального ємнісного сенсора зусиль, зумовлений згинанням пружного елемента під час вимірювання.

5. Запропоновано метод апроксимація функції перетворення гібридних вимірювачів механічних параметрів цифровими методами, використання якого дозволяє лінеаризувати функцію перетворення вимірювачів при дії на них факторів їх робочого середовища.

6. Отримані результати можуть бути використані при розробці програмно-математичного забезпечення в систем діагностування механічних параметрів ПГ.

Посилання: [3, 4, 9, 10, 16, 22, 23, 26, 32-35, 43, 45, 53-55, 73, 84, 87, 93, 94, 95, 99, 100, 101, 103, 106, 111, 113-116, 120, 121, 128, 131, 134, 139, 145, 162-164, 167, 170, 176, 185, 191, 195, 211, 214-216, 220, 229, 232, 233, 240, 244, 249, 252, 256, 285, 286, 296, 314, 318, 324, 333, 337, 347, 357, 358, 367, 378]

див. список використаних джерел стор. 303–344.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА КОМПОНЕНТІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ

В попередніх розділах було розроблено ряд інформаційно-вимірювальних каналів оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних генераторів. Запропоновані системи мають певні обмеження у застосуванні. Такі обмеження визначаються метрологічними характеристиками засобів утворення та первинної обробки вимірювальної інформації. Для визначення таких меж є необхідним вирішення задачі встановлення меж застосування засобів утворення до яких відносяться сенсори та їх допоміжні механічні елементи (спеціальні пружні механічні перетворювальні елементи), їх функцій перетворення, аналітичні залежності та характеристики, а також визначити похибки.

4.1 Структура та функціонування первинного вимірювального перетворювача гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Основним елементом комп'ютеризованих гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ, що визначає його початкові метрологічні характеристики є ПВП, який призначений для перетворення інформативних параметрів фізичних величин (механічних параметрів), в електричні інформаційні сигнали. У цьому разі зміна фізичного параметру від номінальних або розрахункових значень є інформаційним сигналом, який визначає функціональний стан об'єкту (наприклад: для конструктивного вузла – ступінь стиснення активного заліза осердя статора, як мікрозміщення) або характеристикою ходу процесу (наприклад: годограф валу, отриманий за зміною значень повітряного зазору), що відбувається в машині. У свою чергу,

параметри інформаційних сигналів використовуються для отримання контрольно-діагностичної інформації.

Як ПВП, перспективно та доцільно використовувати ємнісні сенсори, що найбільш широко використовуються як неоптичні [58, 164, 295, 300, 339, 391]. Вони можуть застосовуватися для вимірювання різного роду неелектричних величин [164], таких, як механічні параметри обладнання електричних машин: а саме, зміна геометричних розмірів, зміщення, мікрозміщення і вібрації заземлених поверхонь, повітряного зазору між статором та ротором, взаємного розташування конструктивних елементів машини, а також ступеню стиснення активного заліза осердя статора та ін. Суттєвими недоліками ємнісного сенсора, описаного в [166, 192], є складність схеми вторинного вимірювального перетворювача, до якого входить спеціальний трансформатор з обмоткою, виконаною екранованим кабелем, та за необхідності використання спеціального триаксіального кабеля з подвійним екрануванням.

Іншим розповсюдженим ємнісним сенсором є сенсор із компланарними електродами, описаний в роботах [322], основним недоліком якого є звужений діапазон вимірювання через малу відстань між високопотенціальним та низькопотенціальним електродами.

Ємнісний спосіб вимірювання мікропереміщень та відносної відстані, запропонований та досліджений в роботах [157, 158] є новим та передбачає усунення вказаних недоліків. На рис. 4.1 показана структурна схема запропонованого ємнісного первинного перетворювача.

При використанні ємнісного сенсора з компланарними електродами, як ПВП, вимірювання інформативної ємності здійснюється між двома компланарними електродами, один із яких є високопотенціальним електродом **1**, інший – низькопотенціальним електродом **2** та заземленою поверхнею конструктивного елементу **6** машини, що дозволяє усунути недоліки, пов'язані з використанням триаксіального кабелю та складної схеми вторинного вимірювального перетворювача. Розширення діапазону вимірювання в запропонованій структурі забезпечується за допомогою розміщення частини

додаткового електрода поміж високопотенціальним та низькопотенціальним електродами. Також 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 визначення механічних параметрів.

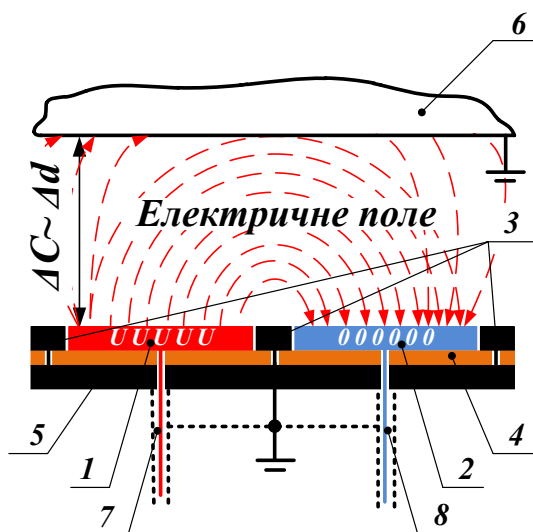


Рис. 4.1 Схема емнісного сенсора з компланарними електродами для вимірювання відстані до металевої заземленої поверхні:

1 – високопотенціальний електрод; 2 – низькопотенціальний електрод; 3 – додатковий заземлений електрод; 4 – діелектрична підкладка; 5 – екран; 6 – заземлена поверхня конструктивного елементу, вузол якої контролюється (об'єкт контролю); 7, 8 – екранований кабель.

Принцип вимірювання запропонованого емнісного сенсора (рис. 4.1) полягає в наступному. Електроди 1 та 2 ізолювані один від одного та від корпусу електричної машини і корпусу ВВП. 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

$$C_X = K \cdot f(d_X), \quad (4.1)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Розрахувавши обернену до (4.1) функціональну залежність, можна визначити величину d_X , як

$$d_X = K \cdot f(C_X) \quad (4.2)$$

Значення ємності C_X , що визначається при використанні запропонованого компланарного ємнісного сенсора є близько прямо-пропорційальним зміні d_X , завдяки чому збільшується чутливість і точність вимірювання механічних параметрів. Крім цього, використання сенсора дозволяє значно (в два-три рази) знизити апаратно-програмні витрати на математичну обробку нелінійної функції перетворення сенсора.

4.2 Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору з двома робочими компланарними паралельними електродами

Метою даного підрозділу є визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору з паралельними компланарними електродами, розрахованого для застосування в капсульному гідрогенераторі СГК 538/160-70М [84, 106, 152, 157, 158, 215, 394].

Конструктивна схема сенсора показана на рис. 4.2. Сенсор складається з таких основних частин: високопотенціального електрода 1 довжиною L_1 , низькопотенціального електрода 2 довжиною L_2 ; низькопотенціального

охоронного електрода 3; діелектричної підкладки 4; металевої підкладки 5, яка встановлюється на заземлену поверхню розточення осердя статора.

Електрична ємність C_{12} між електродами 1 і 2 буде змінюватись за умови зміщення заземленої поверхні полюса ротора 6. В початковому положенні поверхня 6 знаходиться від площини електродів 1 і 2 на відстані d_0 (номінального значення зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М).

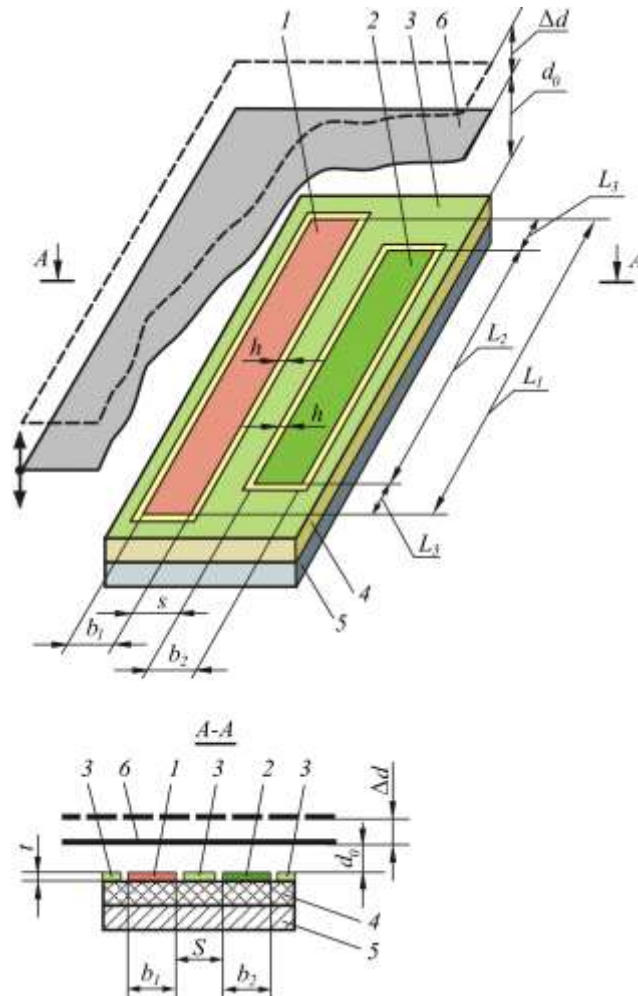


Рис. 4.2 Конструктивна схема ємнісного сенсора зазору з двома компланарними паралельними електродами

Якщо довжина L_1 електрода 1 вибрана з умови $L_1 = L_2 + 2L_3$, $L_3 \geq d_0$ (рис. 4.1), а проміжки h між електродами 1 і 2 та електродом 3 є нескінченно малими, то електричне поле між електродами 1 і 2 в кожному перетині, перпендикулярному їх довжині, буде двовимірним і матиме однакову форму. До того ж, на коротких сторонах електродів 1 і 2 буде зменшено вплив

крайових ефектів. Отримати проміжки h малого значення можна завдяки застосуванню методу фотолітографії для утворення електродів 1, 2 і 3 з тонкої металевої плівки.

Визначимо, як буде змінюватись ємність C_{12} зі зміною відстані $d = d_0 \pm \Delta d$, тобто $C_{12} = f(d)$. Для розрахунку ємності C_{12} застосуємо аналітичний метод визначення прямої напруженості поля в поєднанні з методом конформних відображень [51, 127, 316]. Метод розрахунку наведено в Додатку Ж. У цьому разі з урахуванням кінцевої ширини електродів 1 і 2 отримаємо

$$C_{L12} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b_2)}{4d} \right) \left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b_1)}{4d} \right)}{2 \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} \left(\operatorname{th} \frac{\pi(s+2b_2)}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b_1)}{4d} \right)}, \quad (4.3)$$

де $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; $\varepsilon_r = 1,00056$ – відносна діелектрична проникність повітря; b_1 – ширина електрода 1; b_2 – ширина електрода 2; s – відстань між електродами 1 і 2; d – відстань між площиною електродів 1 і 2 та поверхнею 6 (рис. 4.2).

Аналіз формули (4.3) показує, що коли:

- відстань d прямує до нуля ($d \rightarrow 0$), то $C_{L12|d=0} \rightarrow 0$;
- ширина b_1 і b_2 електродів 1 і 2 є нескінченно малою ($b_1 = b_2 = 0$), то $C_{L12|b_1=b_2=0} = 0$;
- ширина s охоронного заземленого електрода між електродами 1 і 2 є нескінченною великою ($s = \infty$), то $C_{L12|s=\infty} = 0$;
- ширина s охоронного заземленого електрода між електродами 1 і 2 є нескінченною малою ($s = 0$), то $C_{L12|s=0} = 0$;

- відстань d між площиною електродів 1 і 2 є нескінченною великою ($d = \infty$), то

$$C_{L12}|_{d \rightarrow \infty} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{(s+b_1)(s+b_2)}{s(s+b_1+b_2)}; \quad (4.4)$$

- загальна ширина сенсора постійна ($b_1 + b_2 + s = \text{const}$), однакової ширини електродів 1 і 2 ($b_1 = b_2 = b$) забезпечує оптимальне значення ємності C_{L12} , яке може бути визначене за формулою

$$C_{L12} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\text{th} \frac{\pi s}{4d} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \text{th} \frac{\pi s}{4d}}; \quad (4.5)$$

- ширина електродів 1 і 2 нескінченно великою ($b_1 = b_2 = \infty$), то

$$C_{L12}|_{b_1=b_2=\infty} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln(1 - e^{-\pi s/d}) \quad (4.6)$$

Графіки залежності $C_{L12} = f(d)$, розраховані за допомогою (4.5) для різних співвідношень b і s , відображені на рис. 4.3, де: 1 – $b = 9$ мм, $s = 8$ мм, $b/s = 1,25$; 2 – $b = 9,5$ мм, $s = 7$ мм, $b/s = 1,36$; 3 – $b = 10$ мм, $s = 6$ мм, $b/s = 1,67$; 4 – $b = 10,5$ мм, $s = 5$ мм, $b/s = 2,1$; 5 – $b = 11$ мм, $s = 4$ мм, $b/s = 2,75$; 6 – $b = 11,5$ мм, $s = 3$ мм, $b/s = 3,83$; 7 – $b = 12$ мм, $s = 2$ мм, $b/s = 6$; 8 – $b = 12,5$ мм, $s = 1$ мм, $b/s = 12,5$. Для сенсора зазору можуть бути використані характеристики зі співвідношенням $b/s = 3,83$ (рис.4.3, графік 6) або $b/s = 6$ (рис. 4.3, графік 7).

Конструктивні особливості зубців осердя статора гідрогенератора СГК 538/160-70М дають змогу розмістити на зубці сенсор повітряного зазору з розмірами (рис. 4.2): $b_1 = b_2 = b = 12$ мм, $s = 2$ мм, $L_1 = 200$ мм, $L_2 = 180$ мм. Розрахуємо значення ємності C_{12} такого сенсора в залежності від зміни зазору d .

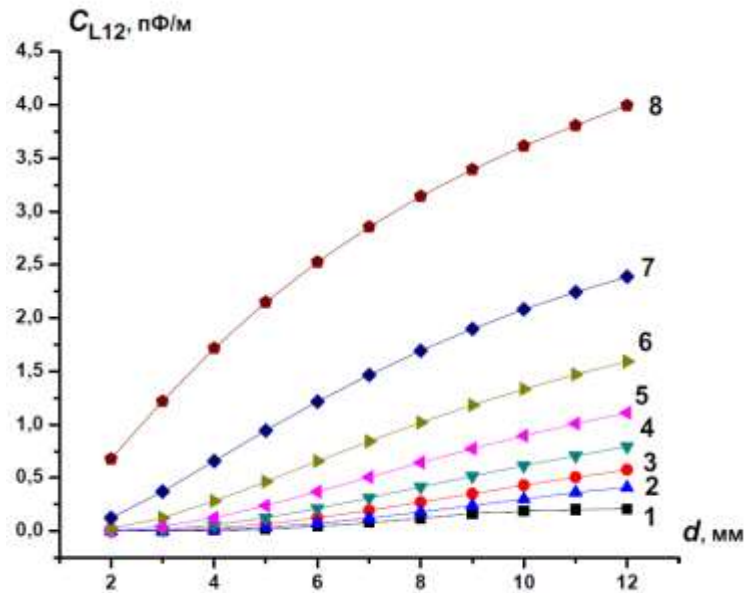


Рис. 4.3 Графіки залежності $C_{L12} = f(d)$ для різних співвідношень b і s

З урахуванням (4.5) ємність сенсора, в якому низькопотенціальний електрод 2 має довжину L_2 , визначиться за формулою

$$C_{12} = C_{L12}L_2 = L_2 \cdot \frac{\epsilon_0\epsilon}{\pi} \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}} \quad (4.7)$$

На рис. 4.4 наведено графіки залежності $C_{12} = f(d)$ для сенсора з розмірами $b = 12$ мм, $s = 2$ мм та $L_2 = 180$ мм: 1 – розрахований з використанням формули (4.7); 2 – отриманий експериментально. Різниця в графіках 1 і 2 зумовлена впливом паразитної ємності $C_{П12}$ між електродами 1 і 2 через діелектричну підкладку 4. Точно розрахувати $C_{П12}$ неможливо через неоднорідність прошарків підкладки. Похибка зумовлена нелінійністю, для отриманих залежностей, склала 1,5%.

На основі проведених розрахунків для виконання досліджень було розроблено та створено ємнісний сенсор повітряного зазору, дослідний зразок який показано на рис. 4.5.

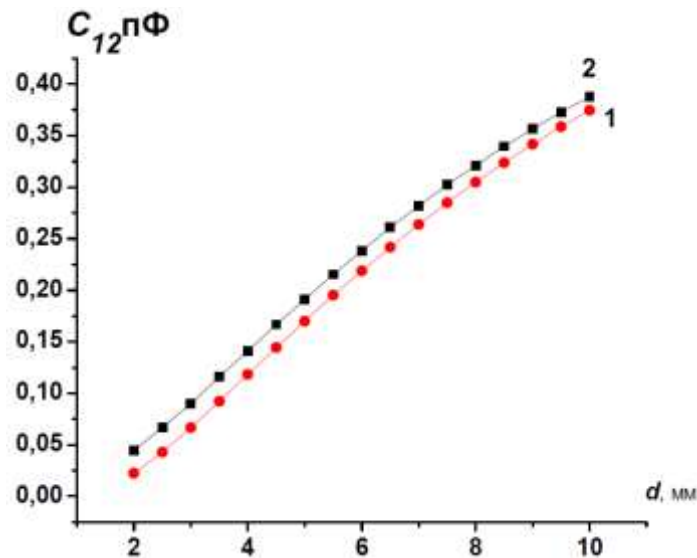


Рис. 4.4 Графіки залежності $C_{12} = f(d)$:

1 – розрахунковий; 2 - експериментальний



Рис. 4.5 Дослідний зразок ємнісного сенсора повітряного зазору

На спосіб вимірювання зазору та пристрій, що його реалізує, було отримано два патенти України [157, 158].

4.3 Аналітичне визначення похибок ємнісного сенсора повітряного зазору з двома робочими компланарними паралельними електродами

4.3.1 Похибка від перекосу площини електродів сенсора відносно твірної циліндричної поверхні розточення осердя статора

Похибка від перекосу виникне, якщо встановити сенсор з перекосом площини електродів сенсора відносно твірної циліндричної поверхні розточення осердя статора (наприклад, не забезпечити рівномірність клейового проміжку між сенсором та розточенням осердя), то як результат не буде забезпечена

паралельність площини електродів по відношенню до твірної полюса ротора, і між ними виникне кут α (рис. 4.6) [159, 396].

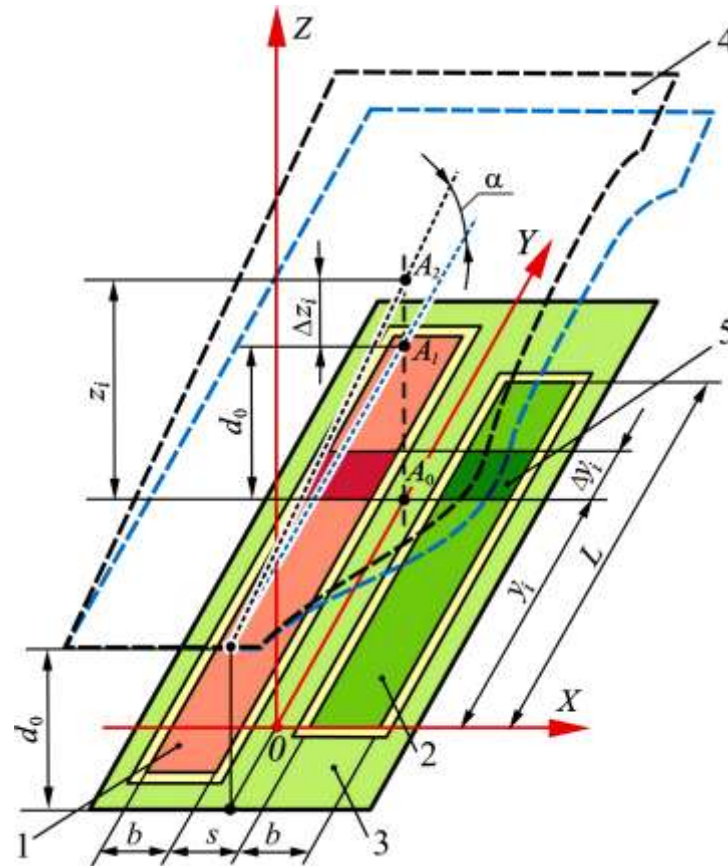


Рис. 4.6 Схема розрахунку впливу перекосу на функцію перетворення сенсора

Для розрахунку впливу перекосу на функцію перетворення сенсора введемо систему координат XYZ , причому вісь OX спрямована уздовж короткої сторони b низькопотенціального електрода 2 сенсора, а вісь OY – уздовж поздовжньої осі симетрії електродів 1 і 2. Виберемо елементарну смужку 5 шириною Δy_i в площині електродів 1 і 2 на відстані y_i від початку координат. Координата смужки 5 по осі Y – точка A_0 . Якщо в точці A_0 встановити перпендикуляр z_i до площини XOY , то він перетне початкове положення (до перекосу) площини 4 в точці A_1 , а після перекосу – в точці A_2 , елементарна смність ΔC_{12i} між частинами смужки 5 на електроді 1 та електроді 2 складе [152]

$$\Delta C_{12i} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \Delta y_i \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i}}, \quad (4.8)$$

де b – ширина електродів 1 і 2; z_i – відстань між площиною смужки 5 та площиною 4 після появи перекосу; Δy_i – ширина елементарної смужки 5; z_i – відстань між точкою A_0 та площиною 4.

Враховуючи, що $A_0 A_1 = d_0$, $A_1 A_2 = \Delta z_i$ і $\frac{\Delta z_i}{y_i} = \operatorname{tg} \alpha$, отримаємо, що

$$z_i = d_0 + \Delta z_i = d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.9)$$

де y_i – відстань між елементарною смужкою 5 та початком координат O ; d_0 – відстань між площиною електродів та площиною 4 до появи перекосу; α – кут між площиною електродів та площиною 4, який виник внаслідок перекосу.

Тоді

$$\Delta C_{12i} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \Delta y_i \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)}} \quad (4.10)$$

Загальна ємність $C_{12\Pi}$ сенсора після перекосу, тобто ємність між електродами 1 і 2, буде сумою нескінченної кількості ємностей елементарних площадок та складе

$$C_{12\Pi} = \sum_{i=1}^{i=\infty} C_{12i} = \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \Delta y_i \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y_i \operatorname{tg} \alpha)}} \quad (4.11)$$

Замінивши суму ємностей інтегралом, отримаємо

$$C_{12\Pi} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \int_0^L \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \operatorname{tg} \alpha)}} dy \quad (4.12)$$

Як відомо з [152], ємність C_{12} між електродами 1 і 2 за відсутності перекосу визначається як

$$C_{12} = L \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}} \quad (4.13)$$

Визначимо ємності $C_{12\Pi}$ і C_{12} сенсора зазору [152], ($b=12$ мм, $s=2$ мм, $L=180$ мм), призначеного для використання на капсульному гідрогенераторі СГК 538/160-70М, використовуючи формули (4.12) і (4.13). Результати розрахунків $C_{12\Pi}$ і C_{12} наведені на рис. 4.7

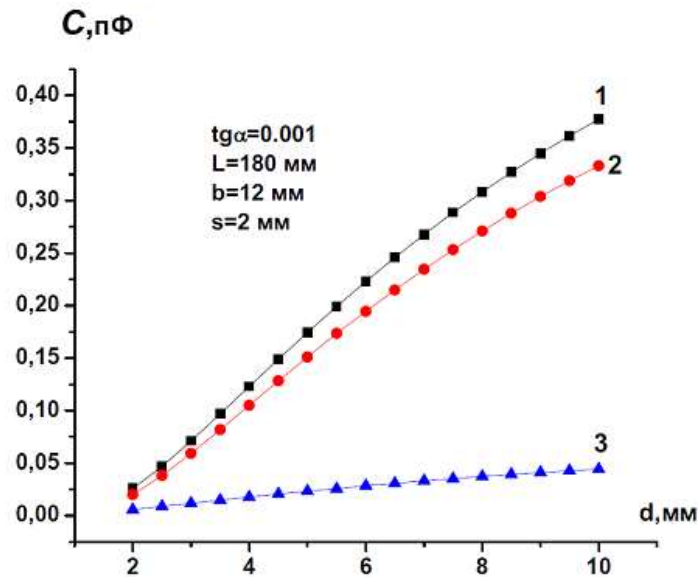


Рис. 4.7 Графіки залежності $C = f(d)$: 1 – зміна ємності $C_{12\Pi} = f(d)$ в номінальному діапазоні вимірювання від 2 до 10 мм за умови перекосу; 2 – зміна ємності $C_{12} = f(d)$ без перекосу; 3 – різниця ємностей $\Delta C = C_{12} - C_{12\Pi}$

Відносна різниця δ_{Π} між ємностями C_{12} і $C_{12\Pi}$ яка є похибкою, внесеною перекосом, буде дорівнювати

$$\delta_{\Pi} = \frac{C_{120} - C_{12\Pi}}{C_{120}} \cdot 100\% =$$

$$= \left(1 - \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon}{\pi} \int_0^L \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \text{tg} \alpha)} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \text{tg} \alpha)}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d_0 + y \text{tg} \alpha)} \text{th} \frac{\pi s}{4(d_0 + y \text{tg} \alpha)}} \right) dy}{L \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\text{th} \frac{\pi s}{4d_0} + \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_0}}{4 \text{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_0} \text{th} \frac{\pi s}{4d_0}} \right)} \right) \cdot 100\% \quad (4.14)$$

Використовуючи формулу (4.14), визначимо кількісну величину похибки δ_{Π} від перекосу та відобразимо її графічно. Рис. 4.8 ілюструє залежність похибки від кута перекосу $\delta_{\Pi} = f(\text{tg} \alpha)$ для номінального зазору ($d_0 = 6 \text{ мм}$) в

гідрогенераторі СГК 538/160-70М, а рис. 4.9 – залежність похибки від величини зазору $\delta_{\Pi} = f(d)$ в цьому ж гідрогенераторі в діапазоні вимірювання від 2 до 10 мм (при перекосі $\alpha \cong \text{tg}\alpha=0,001$).

Як видно з рис. 4.8 та рис. 4.9, через велику довжину сенсора, похибка, зумовлена перекосом в цьому напрямку, є досить значною. Отже, встановлення сенсора на розточенні осердя потребує заходів, щодо усунення факторів, які впливають на виникнення похибки. Перед усім, для кожного сенсора після встановлення необхідно провести вимірювання значення реального перекосу за допомогою годинникових індикаторів. Для цього необхідно виміряти відстані між площиною активного електроду сенсора 1 і поверхнею зубця 2 осердя, який є частиною розточення осердя. Середньоарифметичне значення виміряних величин дасть константу сенсора, яка враховується при налаштуванні приладу, а різниця – величину перекосу c в долях міліметра. . Знаючи c , можна розрахувати коригувальне виправлення, обумовлене перекосом, і вносити його величину в результат вимірювання (враховуючи, що $c / L = \text{tg}\alpha \cong \alpha$, де L – довжина сенсора).

4.3.2 Похибка, зумовлена кривизною поверхні розточення осердя статора

За умов вимірювання зазору між розточенням осердя статора 1 (точка O_P – центр розточення) та полюсом ротора 2 за допомогою сенсора 3 має місце похибка δ_d , зумовлена кривизною поверхні розточення осердя статора (рис. 4.10) [159, 396]. Ця похибка є адитивною складовою по відношенню до значення, виміряного сенсором зазору, тобто

$$d_P = d_C + d_{\Pi}$$

де d_C – відстань від поверхні електродів сенсора до полюса ротора, (d_{Π} – константа).

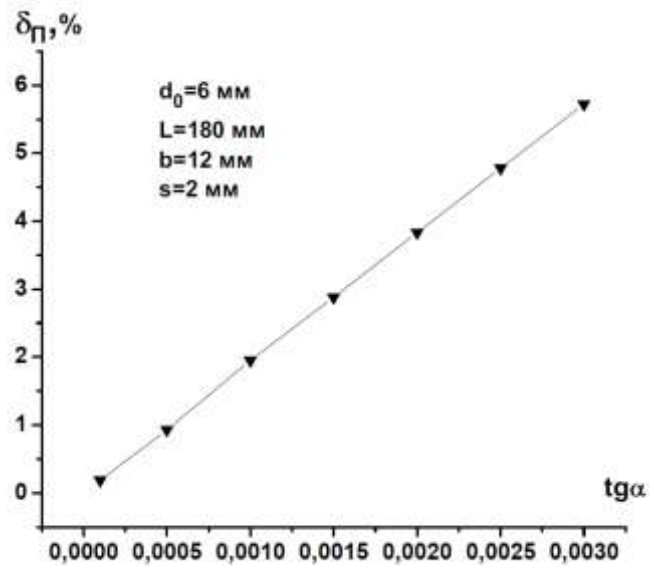


Рис. 4.8 Залежність абсолютної похибки від кута перекосу $\delta_{\Pi} = f(\text{tg} \alpha)$

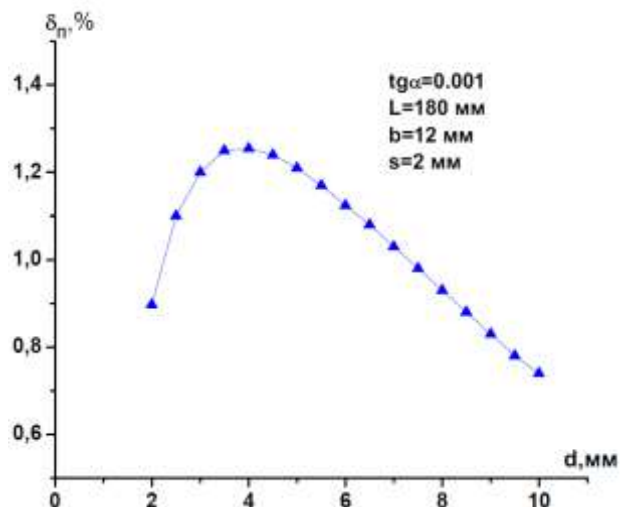


Рис. 4.9 Залежність абсолютної похибки від величини зазору $\delta_{\Pi} = f(d)$

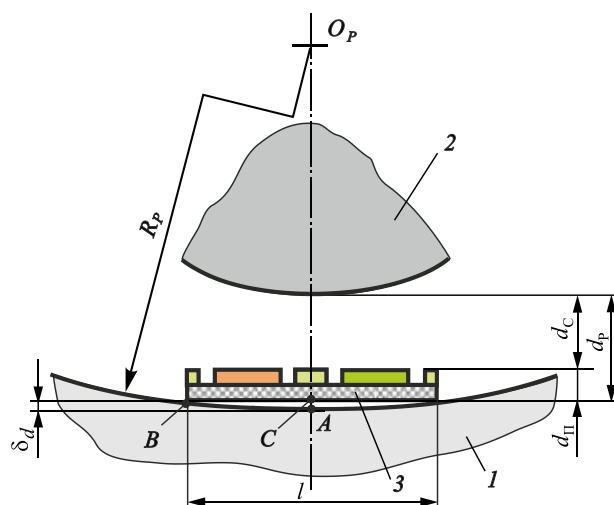


Рис. 4.10 Схема визначення похибки, зумовленою кривизною поверхні розточення осердя статора

Для розрахунку похибки δ_d скористаємося співвідношення в прямокутних трикутниках ABC та BO_pC , а також враховуючи розміри сенсора (його товщину), тоді значення похибки δ_d як

$$\delta_d = R_p \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{l}{2R_p} \right) \right], \quad (4.15)$$

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 буде становити $\delta_d = 0,041822$ мм.

4.4 Визначення функцій перетворення ємнісних сенсорів системи стабілізації тиску пресування осердя статора

Одним зі способів, що використовується для стабілізації тиску пресування осердя статора ТГ, є застосування силових акумуляторів (СА) з блоками тарілчастих пружин – спеціальних пружинних пристроїв з заданим і регульованим зусиллям (Схема та розрахунок тарілчастих пружин приведено в додатку Ж), що встановлюються під гайки (або замість гайок) на стяжні призми [1, 124, 2, 204, 354, 355, 332, 183, 268, 234, 146]. У такому разі стан пресування осердя оцінюється, вимірюванням ходу тарілчастих пружин в силових акумуляторах. Для вимірювання ходу пружин в [151, 395] запропоновано застосування компланарних ємнісних сенсорів, які вбудовуються в конструкцію СА.

4.4.1 Багатoeлементний компланарний ємнісний сенсор з однаковою кутовою шириною електродів

Схема силового акумулятора (СА) з сенсором зазначеного типу показана на рис. 4.11 [151, 156]. СА складається з корпусу 1, гайки 2, тарілчастих пружин 3, упорного кільця 4 і фіксуючих болтів 5, натискного кільця 6, діелектричної пластини 8, яка жорстко з'єднана з упорним кільцем 4. Пластина 8 містить електропровідний тонкий шар 7 (наприклад, мідний, коли пластина 8 виготовляється з фольгованого склотекстоліту). Внутрішній діаметр пластини 8 рівний D_1 , зовнішній – D_2 .

У провідному кільцевому шарі 7 сформовано (методом фотолітографії) N ($1 \leq i \leq N$) елементарних ємнісних сенсорів з компланарними електродами, які є частинами концентричних кіл (рис. 4.11 в, г). Розбиття концентричних кіл на сектори викликано наявністю отворів для фіксуючих болтів, які є в упорному кільці 4 і, відповідно, в пластині 8. Кількість N елементарних сенсорів дорівнює кількості фіксуючих болтів 5. Кутовий розмір кожного i -того сенсора рівний α .

Кожний елементарний сенсор складається з таких основних частин: високопотенціального електрода 7.1 шириною b , низькопотенціального електрода 7.2 шириною b , між якими розміщено заземлений охоронний електрод 7.3 шириною s . Радіус середньої лінії електродів 7.1, 7.2 і 7.3 дорівнює R_M (рис. 4.11 з). Електроди 7.1, 7.2 і 7.3 ізолювані один від одного тонкими діелектричними проміжками, мінімальна ширина h яких залежить від технології виготовлення. Картина електричного поля в радіальному перетині сенсора показана на рис. 4.11 з. Для того, щоб двовимірне електричне поле між електродами в радіальних перетинах сенсора було однакової форми, необхідно визначити оптимальні співвідношення між розмірами b , s , R_M та α для зменшення впливу крайових ефектів на торцях електродів.

На рис. 4.12 наведено принципову електричну схему багатoeлементного ємнісного сенсора.

При вимірюванні загальна електрична ємність $C_{7.1,7.2}$ сенсора визначиться як сума трьох електричних ємностей: ємності $C_{7.1,7.2A}$ між електродами 7.1 і 7.2 через повітряний проміжок з діелектричною проникністю ε_A , ємності $C_{7.1,7.2F}$ між електродами 7.1 і 7.2 через склотекстолітову підкладку 8 з діелектричною проникністю ε_F і паразитної ємності (spurious capacitance) C_S , зумовленої крайовими ефектами та ємністю між сенсором та вторинним вимірювальним перетворювачем.

$$C_{7.1,7.2} = C_{7.1,7.2A} + C_{7.1,7.2F} + C_S \quad (4.16)$$

Ємність $C_{7.1,7.2A}$ змінюється зі зміною відстані d_x , тобто $C_{7.1,7.2A} = f(d_x)$, а ємність $C_{7.1,7.2F}$ є постійною, тобто $C_{7.1,7.2F} = \text{const}$. Кожна з зазначених ємностей розраховується і є сумою ємностей відповідних елементарних сенсорів. Паразитна ємність C_S визначається шляхом експерименту.

Визначимо ємності $C_{7.1,7.2A}$ і $C_{7.1,7.2F}$. Оскільки ширина електродів b значно менше середнього радіусу R_M , умовно будемо вважати електроди 7.1 і 7.2 паралельними. Для розрахунку використаємо результати з визначення ємності C_L на одиницю довжини між двома нескінченними компланарними паралельними електродами, розділеними низькопотенціальним охоронним електродом [152, 316] використаємо вираз (4.5). Тоді змінна ємність $C_{7.1,7.2A}$ з урахуванням того, що довжина сумарної середньої лінії між електродами 7.1 і 7.2 (рис. 4.11 в,г)

$$L_{7.1,7.2} = N \cdot 2\pi R_M \frac{\alpha}{2\pi} = NR_M \alpha,$$

визначиться як

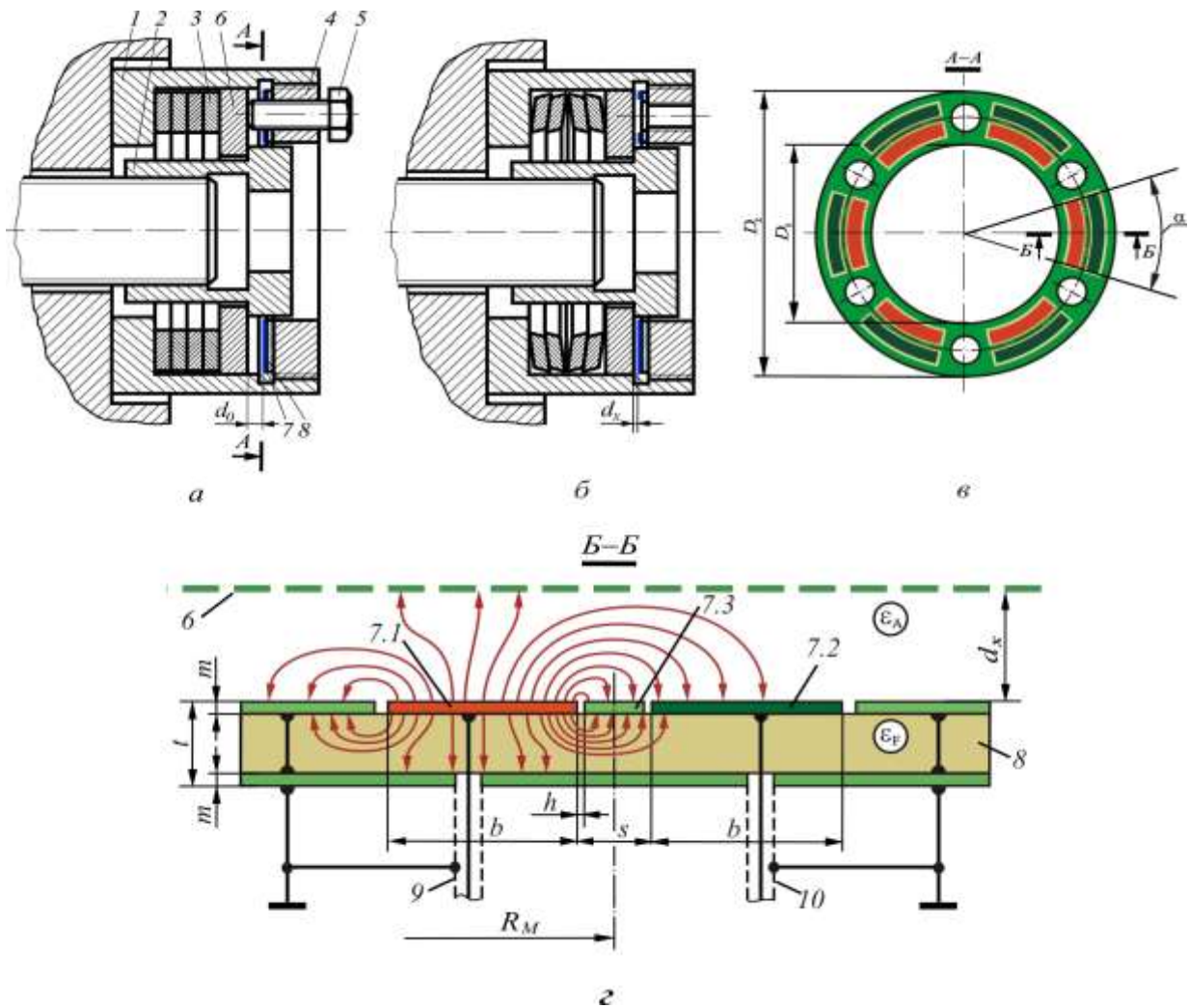


Рис. 4.11 Картина электричного поля ємнісного сенсора

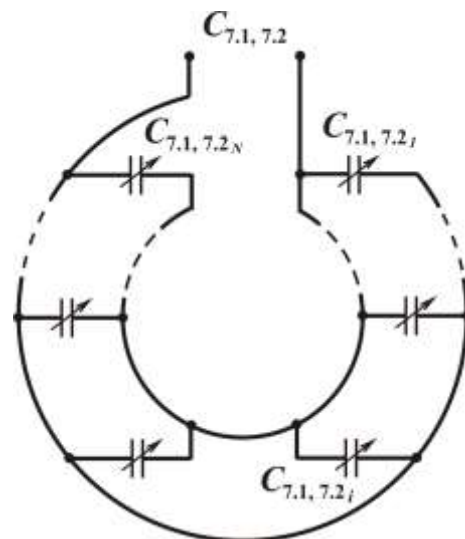


Рис. 4.12 Принципова електрична схема багатоелементного

$$C_{7.1,7.2A} = \varepsilon_0 \varepsilon_A \frac{\alpha}{\pi} N R_M \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_X} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_X} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_X} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_X}}, \quad (4.17)$$

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.

Графік функції $C_{7.1,7.2A} = f(d_X)$ для значень: $N = 8$; $b = 7,5$ мм; $s = 1,4$ мм; $R_M = 65$ мм; $0,5 \text{ мм} \leq d_X \leq 7,5 \text{ мм}$ наведено на рис. 4.13.

Практичні результати використання СА на ТГ потужністю 200–500 МВт показали, що під час стабілізації зусилля пресування осердя статора натискна плита зміщується на 3–5 мм [123]. З аналізу графіка залежності рис. 4.13 можна зробити висновок, що сенсор з заданими геометричними розмірами може бути використаний для вимірювання ходу блоку тарілчастих пружин, рівному 4 мм. При цьому початкова відстань d_0 між площиною електродів сенсора і торцем натискного кільця 6 становить 2 мм, а максимальна – 6 мм.

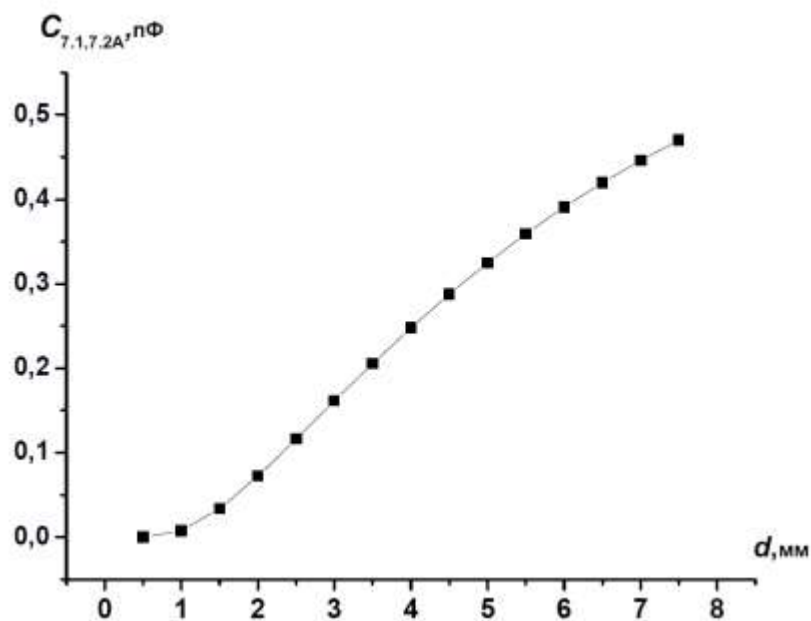


Рис. 4.13 Графік залежності $C = f(d)$

Величина постійної ємності $C_{7.1,7.2F}$ при виготовленні сенсора з фольгованого двостороннього склотекстоліту товщиною $t = 1\text{ мм}$ з товщиною мідного шару $m = 35\text{ мкм}$ і, враховуючи те, що відносна діелектрична проникність склотекстоліту $\varepsilon_F = 5,5$, буде дорівнювати

$$C_{7.1,7.2F} = \varepsilon_0 \varepsilon_F \frac{\alpha}{\pi} NR_M \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)}} = 8,8542 \cdot 10^{-12} \times$$

$$\times 5,5 \cdot \frac{24}{180} \cdot 8 \cdot 0,065 \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{3,14 \cdot 0,0014}{4 \cdot (0,001 - 2 \cdot 0,000035)} + \operatorname{th} \frac{3,14 \cdot (0,0014 + 2 \cdot 0,00075)}{4 \cdot (0,001 - 2 \cdot 0,000035)} \right)^2}{4 \cdot \operatorname{th} \frac{3,14 \cdot (0,0014 + 2 \cdot 0,00075)}{4 \cdot (0,001 - 2 \cdot 0,000035)} \cdot \operatorname{th} \frac{3,14 \cdot 0,0014}{4 \cdot (0,001 - 2 \cdot 0,000035)}} =$$

$$= 0,030028 \text{ пФ}.$$

На рис. 4.14 показано результати метрологічних досліджень експериментального зразка сенсора, коли використовується автоматичний міст Р5083, як вимірювача ємності. В результаті проведених досліджень отримана залежність ємності $C_{7.1,7.2}$ сенсора від відстані d_X між площиною електродів і плоскою заземленою металевою поверхнею (крива 1, рис. 4.14).

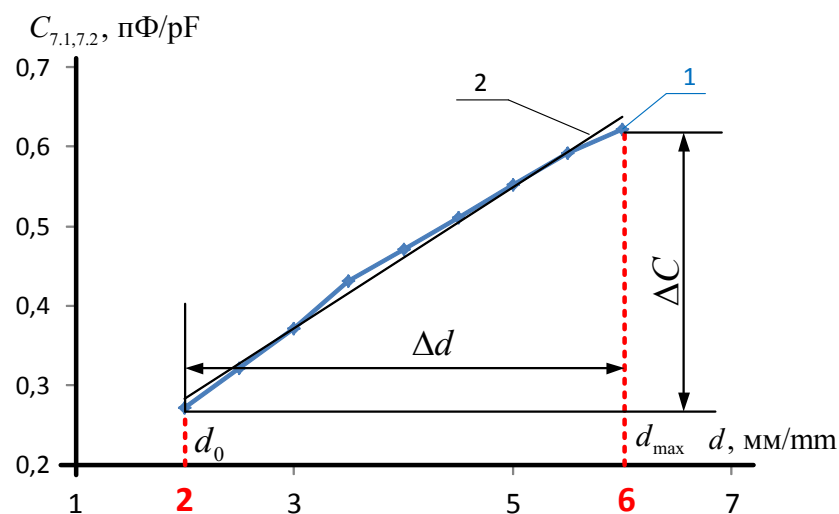


Рис. 4.14 Графік залежності $C = f(d)$:

1 - експериментальний; 2 - функція апроксимації

Для практичного використання отриманої залежності зручно використовувати функцію апроксимації. Як результат проведених аналітичних розрахунків за методикою, наведеною в [87, 394], на підставі експериментально отриманих даних (лінія 1, рис. 4.14) маємо графік апроксимуючої (функціональної) залежності з використанням лінійної моделі $C_{7.1,7.2} = 0,0884d_X + 0,1065$ (лінія 2, рис. 4.14) з коефіцієнтом детермінації $Q^2 = 0,9928$. При цьому похибка від не лінійності склала не більше 1,5% для експериментально отриманої залежності без апроксимації.

На основі проведених розрахунків для виконання досліджень було розроблено та створено ємнісний сенсор повітряного зазору, який показано на рис. 4.15.

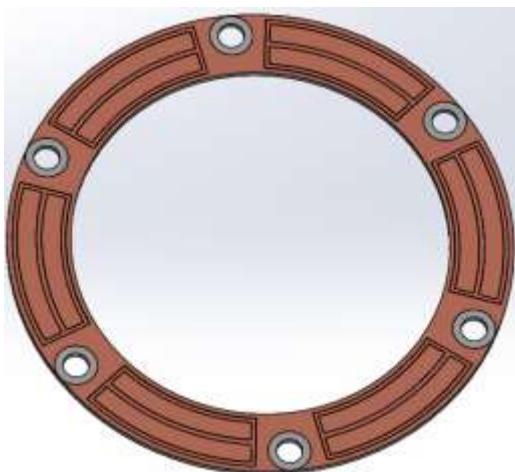


Рис. 4.15 3-D модель ємнісного сенсора з однаковою кутовою шириною високопотенціального та низькопотенціального електродів

4.4.2 Багатоелементний компланарний ємнісний сенсор з різною кутовою шириною електродів

Як було зазначено в попередньому підрозділі, до складу паразитної ємності C_S входить складова, яка зумовлена крайовими ефектами на торцях високопотенціального 7.1 та низькопотенціального 7.2 електродів. Для її зменшення в багатосекційному сенсорі з компланарними електродами запропоновано високопотенціальний електрод 7.1 виконати довжиною α_2 , а

низокопотенціальний електрод 7.2 – довжиною α_1 , причому $\alpha_2 > \alpha_1$ (рис. 4.16) [223]. У цьому разі в області коротких сторін сенсору проведемо зменшення довжини низькопотенціального електрода 7.2, в порівнянні з довжиною високопотенціального електрода 7.1 на величину

$$\Delta L = \frac{\alpha_2}{2} \left(R_M - \frac{s}{2} - \frac{b}{2} \right) - \frac{\alpha_1}{2} \left(R_M + \frac{s}{2} + \frac{b}{2} \right) = 2d_M \quad (4.18)$$

де d_M – середня значення відстані між електродами 7 та кільцем 6, рис. 4.11.

За умови $\Delta L = d_{\max}$ похибка вимірювання, зумовлена крайовим ефектом в цій зазначеній області, зменшується в декілька разів.

Змінна ємність $C_{7.1,7.2A}$ з урахуванням того, що довжина сумарної середньої лінії між електродами 7.1 і 7.2 (рис. 4.16 в,г) складе $L_{7.1,7.2} = N \cdot 2\pi R_M \frac{\alpha_1}{2\pi} = NR_M \alpha_1$ та визначається аналогічно виразу (4.17).

Графік функції $C_{7.1,7.2A} = f(d_X)$ для значень: $N = 8$; $b = 7,5$ мм; $s = 1,4$ мм; $R_M = 65$ мм; $\alpha_1 = 16^\circ$; $2 \text{ мм} \leq d_X \leq 6 \text{ мм}$ наведено на рис. 4.21.

Величина постійної ємності $C_{7.1,7.2F}$ за умови виготовлення сенсора з фольгованого двостороннього склотекстоліту товщиною $t = 1$ мм з товщиною мідного шару $m = 35$ мкм і, враховуючи те, що відносна діелектрична проникність склотекстоліту $\epsilon_F = 5,5$, буде дорівнювати

$$C_{7.1,7.2F} = \epsilon_0 \epsilon_F \frac{\alpha_1}{\pi} NR_M \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)}} = 0,02011876 \text{ пФ}.$$

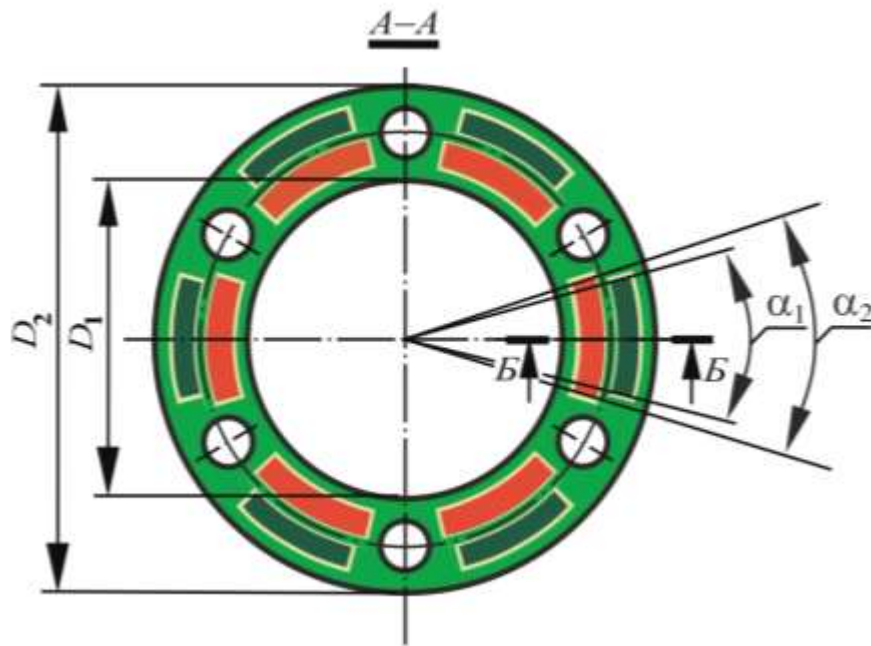


Рис. 4.16 Розрахункова схема сенсора

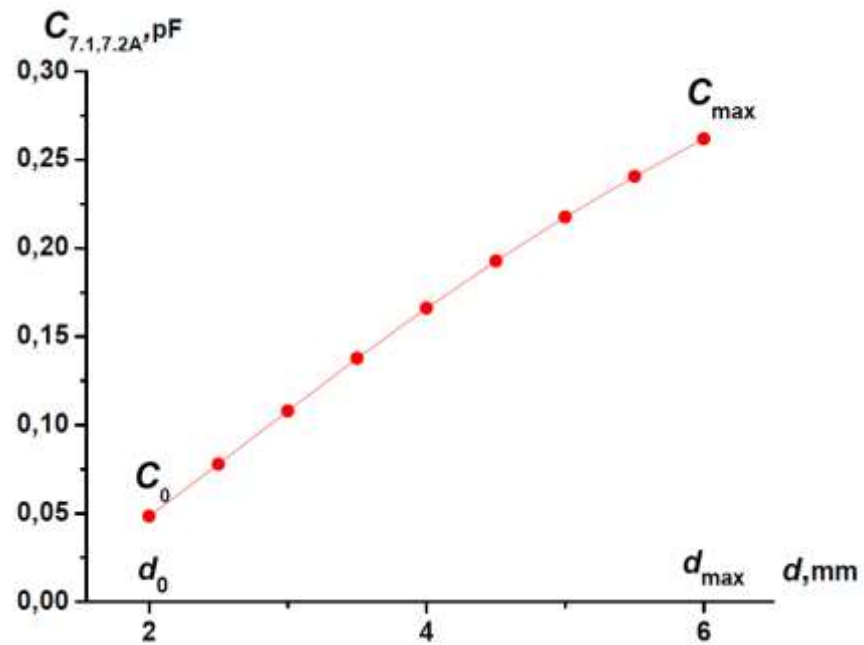


Рис. 4.17 Функція перетворення ємнісного сенсора

На основі проведених розрахунків для виконання досліджень було розроблено та створено ємнісний сенсор повітряного зазору, який показано на рис. 4.18.

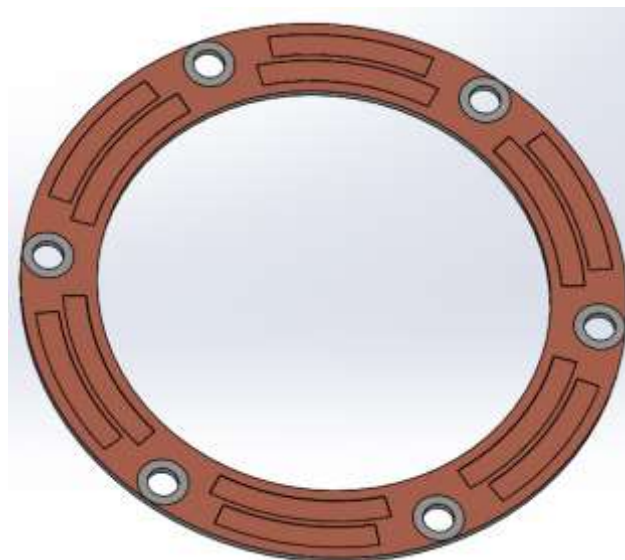


Рис. 4.18 3-D модель ємнісного сенсора з різною кутовою шириною високопотенціального та низькопотенціального електродів

4.5 Визначення функцій перетворення сенсорів на основі комірок Брегга для систем контролю та стабілізації тиску пресування осердя статора

В роботах [161, 380] запропоновано волоконно-оптичний вимірювач зусиль в стяжних призмах ТГ, в якому оптичне волокно з решіткою Брегга наклеюється на пружний силосприймаючий елемент у вигляді тарілчастої пружини (див. розділі 2).

Іншим можливим варіантом побудови засобів контролю та стабілізації тиску [144] є використання спеціального трубчатого пружного чутливого елементу (ПЧЕ) 3 та оптичних комірок Брегга (рис.4.19). Аналітичне визначення характеристик спеціального пружний трубчатий елементу системи контролю та стабілізації тиску пресування осердя статора приведено в Додатку Ж.

У цьому разі ПЧЕ встановлюється на призмі 1 ТГ і стискується між стяжною гайкою 2 і натискною плитою 4 ТГ. У цьому разі на ПЧЕ 3 з легким натягом монтується на кільце 5 товщиною h , виготовлене з фібергласу. На кільце 5 спеціальним клеєм і за спеціальною технологією наклеєне скловолокно 6 зі

сформованими в ньому основним (яка вимірює поздовжню деформацію волокна 6) та термокомпенсаційним БР. Період Λ в обох БР однаковий. Механічна напруга ε , прикладена вподовж оптичного волокна 6, розтягне його сердцевину і змінить період Λ основного БР.

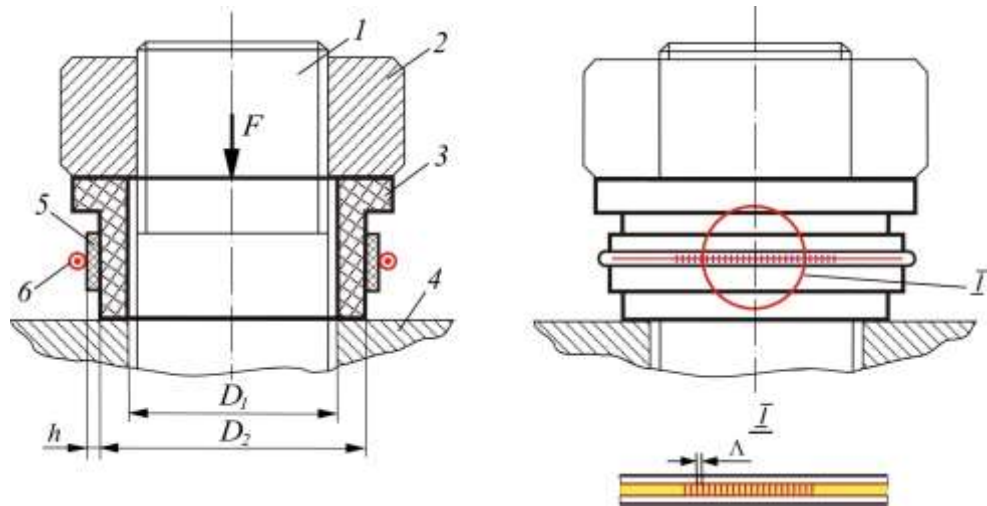


Рис. 4.19 Спеціальний трубчатий ПЧЕ з брегівським оптичним сенсором

Розрахуємо зміну періоду Λ . Під час навантаження силою F діаметр розташування скловолокна 6 зміниться і (з урахуванням коефіцієнта Пуассона ν_F для фібергласу та модулю пружності фібергласу E_F) складе [144]

$$D' = [(D_2 + 2h) + \nu_F \varepsilon_{II} (D_2 + 2h)] = (D_2 + 2h) \left(1 + \nu_F \frac{4F}{\pi(D_2^2 - D_1^2)E_F} \right), \quad (4.19)$$

Зміна довжини кільця 5 складе

$$\begin{aligned} \Delta A &= 2\pi D' - 2\pi(D_2 + 2h) = \\ &= 2\pi \left[(D_2 + 2h) \left(1 + \nu_F \frac{4F}{\pi(D_2^2 - D_1^2)E_F} \right) - (D_2 + 2h) \right] = \\ &= \frac{8\nu_F(D_2 + 2h)}{(D_2^2 - D_1^2)} \cdot \frac{F}{E_F} \end{aligned} \quad (4.20)$$

При цьому період Λ ВБР зміниться на величину $\Delta\Lambda$

$$\Delta\Lambda = \frac{\Delta A}{N} = \frac{8v_F(D_2 + 2h)}{N(D_2^2 - D_1^2)} \cdot \frac{F}{E_F}, \quad (4.21)$$

де N – кількість періодів ВБР

Складе

$$\Lambda' = \Lambda + \Delta\Lambda = \Lambda + \frac{8v_F(D_2 + 2h)}{N(D_2^2 - D_1^2)} \cdot \frac{F}{E_F} \quad (4.22)$$

Зміна періоду призведе до зміни брегівської довжини хвилі, і цю зміну система реєстрації (див. розділ 2) перетворить в зміну електричного сигналу. У цьому разі точність та роздільна здатність залежить, на сам перед визначається технічними характеристиками ПЗС приймачів та методів пошук у періоду брегівського піку Λ (див. розділ 3.5).

4.6 Визначення функцій перетворення ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами

В роботі [364] при безпосередній участі автора запропоновано та досліджено новий ємнісний сенсор з концентричними компланарними електродами, що може використовуватися для визначення радіального та торцевого биття циліндричних поверхонь системами контролю та технічної діагностики потужних генераторів, а також використаний як чутливий елемент в системі контролю ступеню пресування активного заліза статора потужного генератора. Схему сенсора приведено на рис. 4.20. Сенсор складається з таких основних частин: активного високопотенціального електрода 3 радіусом b , низькопотенціального електрода 4 шириною b , між якими розміщено низькопотенціальний охоронний електрод 5 шириною s . Електроди 3, 4 і 5 відокремлені один від одного тонкими діелектричними проміжками шириною h , яка залежить від технології виготовлення, зазвичай – фотолітографії. Завдяки малій величині h електричне поле між електродами 3 і 4 в кожному радіальному перетині, буде двовимірним і матиме однакову форму.

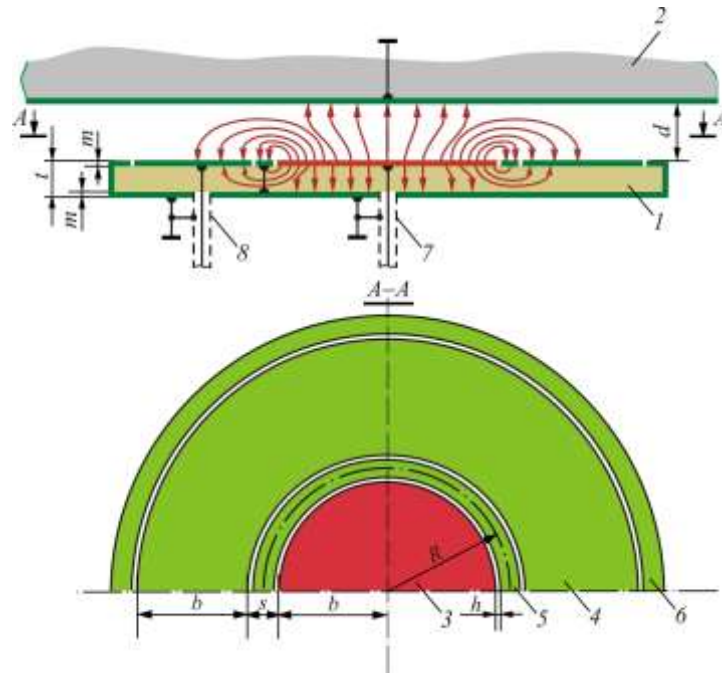


Рис. 4.20 Схема вимірювання відстані до заземленої поверхні ємнісним сенсором з концентричними компланарними електродами

Електрична ємність C_{34} між електродами 3 і 4 складається з двох ємностей – робочої C_{34P} (через повітряний проміжок) та паразитної $C_{34П}$ (через діелектричну підкладку), на якій сформовані електроди, тобто $C_{34} = C_{34P} + C_{34П}$. Паразитна ємність є постійною ($C_{34П} = \text{const}$), а робоча ємність C_{34P} буде змінюватись зі зміною відстані d , тобто $C_{34P} = f(d)$. Для її розрахунку використаємо результати досліджень визначення ємності C_L на одиницю довжини між двома компланарними паралельними електродами, розділеними низькопотенціальним охоронним електродом [152, 316] за виразом (4.5). У цьому разі загальна робоча ємність сенсора C_{34P} з урахуванням того, що довжина середньої лінії між електродами 3 і 4 складає $L_{34} = 2\pi R = 2\pi(b + s/2)$, дорівнює

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

$$= 2\varepsilon_0\varepsilon_r \left(b + \frac{s}{2}\right) \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d}\right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (4.23)$$

де b – ширина електродів 3 і 4; s – відстань між електродами 3 і 4; d – відстань між площиною електродів 3 і 4 та поверхнею 2.

З аналізу формули (4.23) очевидним є наступне:

- відстань d прямує до нуля ($d \rightarrow 0$), то $C_{34P}|_{d=0} \rightarrow 0$;
- відстань d між площиною електродів 3 і 4 та поверхнею 2 є нескінченною великою ($d \rightarrow \infty$), то

$$C_{34P}|_{d \rightarrow \infty} = 2\varepsilon_0\varepsilon_r \left(b + \frac{s}{2}\right) \ln \frac{(s+b)^2}{s^2 + 2sb}. \quad (4.24)$$

де $\varepsilon_r = \varepsilon_{rF} = 5,5$ – відносна діелектрична проникність повітря підкладки (скловолокна).

В [152] визначено, що самим зручним для використання є ділянка графіка функції (4.24), коли $b \approx d_{\max}$, а $s = b/6$.

На рис. 4.21 наведено графік залежності $C_{34P} = f(d)$ (лінія 1) для наступних параметрів $1 \text{ мм} \leq d \leq 5 \text{ мм}$, $b = 6 \text{ мм}$, $s = 1 \text{ мм}$.

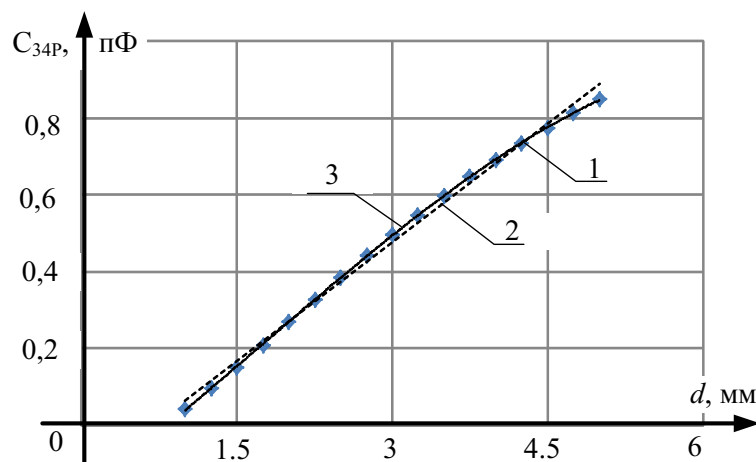


Рис. 4.21 Графіки функції:

1 – зміни робочої ємності сенсора; 2 – функції апроксимації

Паразитна ємність $C_{34\Pi}$ через діелектрик фольгованого склотекстоліту товщиною $t = 1,5$ мм (товщина мідної фольги $m = 35$ мкм) при цьому складе

$$C_{34\Pi} = 2\varepsilon_0\varepsilon_{rF} \left(b + \frac{s}{2} \right) \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)}} = 0,0746 \text{ пФ} \quad (4.25)$$

Для практичного використання отриманої залежності є необхідним розрахунок апроксимуючої залежності відповідно до методики, наведеної в [106, 394]. В результаті проведених аналітичних розрахунків отримані графіки апроксимуючої (функціональної) залежності: для лінійної моделі (лінія 2 рис. 4.21) $C_{34P} = 0,0206d - 0,0144$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9951$ та для поліноміальної моделі 3-го порядку (лінія 3 рис. 4.21) – $C_{34P} = -0,0003d^3 + 0,0015d^2 + 0,0206d - 0,018$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 1$.

На основі проведених розрахунків для виконання досліджень було розроблено та створено ємнісний сенсор вимірювання до заземленої поверхні, який показано на рис. 4.22.

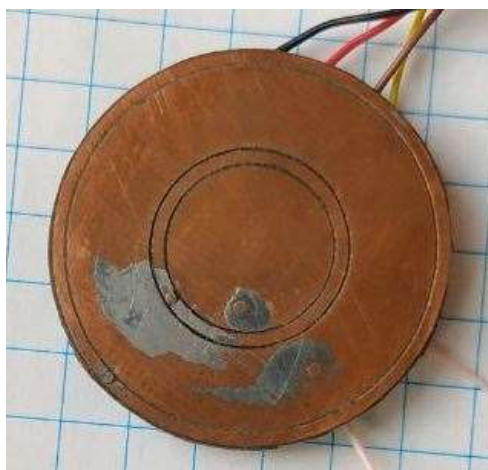


Рис. 4.22 Зразок ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами для проведення лабораторних випробувань

4.7 Визначення функцій перетворення спеціальної вимірювальної комірки системи контролю тиску пресування осердя статора

При складанні осердя статора, контроль тиску пресування осердя статора доцільно проводити з використанням картини нерівномірності торцевої поверхні відносно пресувальної плити, тобто її відхилення від площинності в як можна більшій кількості точок [110]. Реалізація описаного методу контролю вимагає використання спеціалізованої системи контролю із розподіленою системою спеціальних вимірювальних комірок. Метрологічні та технічні характеристики таких вимірювальних комірок визначаються мембраною із жорстким центром **2**, характеристика якої лінійна при малих прогинах [205, 255, 320] та ємнісним сенсором **5** (рис. 4.23), який призначений для вимірювання мікропереміщень центру мембрани під дією тиску пресування (рис. 4.23, б).

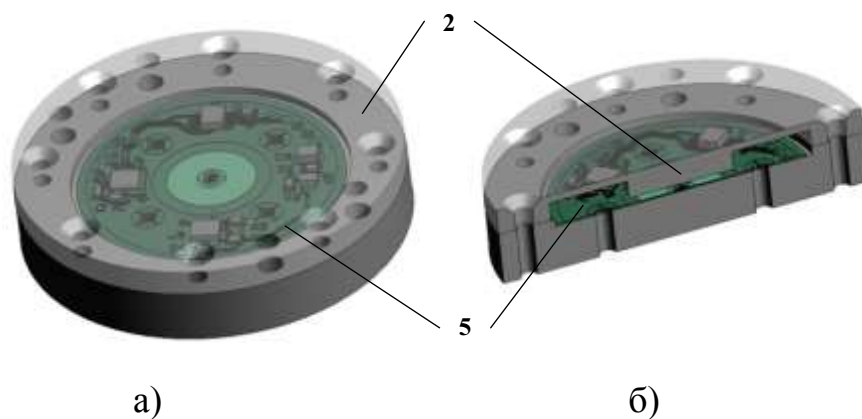


Рис. 4.23 3-D модель вимірювальної комірки системи контролю тиску
а) загальний вигляд; б) розріз

В якості ємнісного сенсору в вимірювальній комірці доцільно використовувати ємнісний сенсор із концентричними електродами [126, 339]. Особливості реалізації та характеристики, яких розглянуто в [364] та в розділі 4.6. Тому даний підрозділ присвячений розрахунку характеристик спеціальної вимірювальної мембрани із жорстким центром, які безпосередньо впливають на конструкцію ємнісного сенсору із концентричними електродами.

Як, було зазначено вище, під впливом тиску пресування P_x жорсткий центр мембрани 2 переміщається на деяку відстань W_x (рис. 4.24) відносно поверхні сенсору 5, яка визначається як

$$W_x = A_p \frac{P_x \cdot R_0^4}{Eh^3}, \quad (4.26)$$

де $A_p = f(k) = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{k^4 - 1 - 4k^2 \ln k}{k^4}$, коефіцієнт, що залежить від розмірів мембрани, $k = R_0 / r_0$, $R_0 = 2,5$ см – зовнішній радіус мембрани, $r_0 = 20$ мм – внутрішній радіус мембрани, $h = 0,15$ см = 1,5 мм, $0 \leq p_x \leq 30$ кгс/см² (294.1995 Н*см.) – діапазон зміни зусилля тиску.

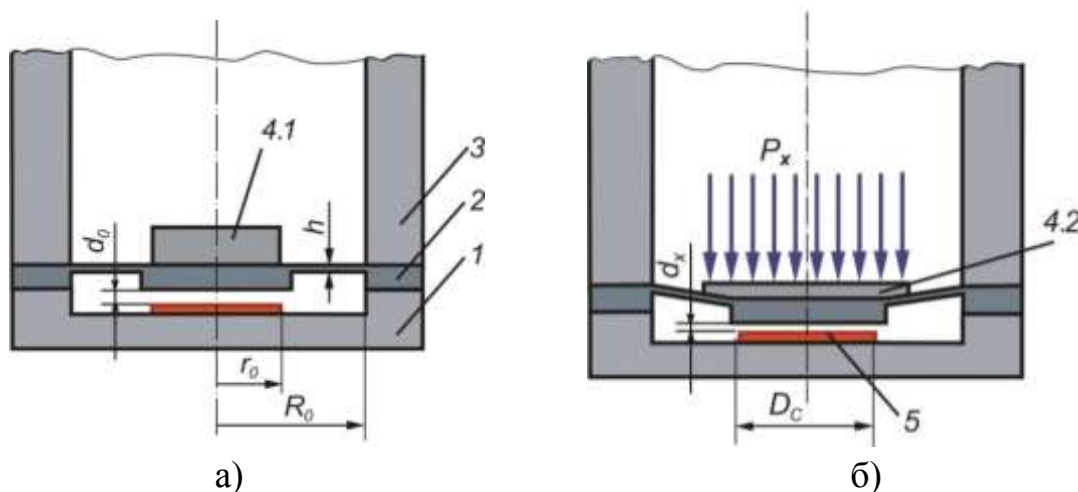


Рис. 4.24 Конструктивна схема комірки:

а) мембрана в початковому положенні $p_x = 0$ кгс/см²;

б) мембрана в кінцевому положенні $p_x = 30$ кгс/см²

1 – основа; 2 – мембрана; 3 – елементи кріплення; 4.1 – проба до дії тиску пресування; 4.2 – проба під дією тиску пресування; 5 – ємнісний сенсор.

В результаті розрахунку отримаємо, що при $P_x = 30$ кгс/см² переміщення центру мембрани складає $W_x = 0,01073$ см = 0,1073 мм.

При цьому ємність сенсора вимірювальної комірки складає

$$C_X = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d_0 - W_X} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\pi D_C^2}{4(d_0 - W_X)}, \quad (4.27)$$

де $d_0 = 0,5$ мм – початковий зазор в ємнісному сенсори; $D_C = 16$ мм – діаметр робочого електрода ємнісного сенсора.

Графік залежності $C_X = f(W_X)$, розрахований на основі виразу (4.27) приведено на рис. 4.25 для $d_0 = 0,5$ мм.

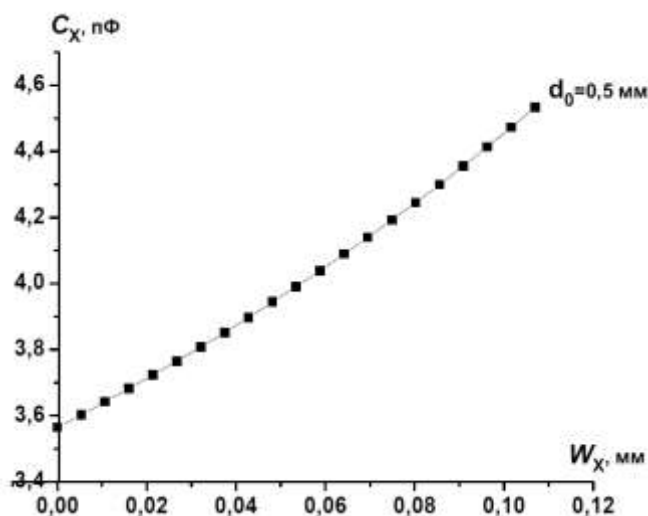


Рис. 4.25 Графік залежності $C_X = f(W_X)$

Враховуючи вираз (4.26), залежність для $C_X = f(p_X)$ визначається наступним співвідношенням

$$C_X = f(p_X) = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\pi D_N^2}{4(d_0 - W_X)} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\pi D_N^2}{4 \left(d_0 - A_p \frac{p_X \cdot R_0^4}{Eh^3} \right)} \quad (4.28)$$

Графік залежності $C_X = f(p_X)$, розрахований на основі виразу (4.28) відображено на рис. 4.26 для $d_0 = 0,5$ мм.

Для підтвердження адекватності прийнятої методики розрахунку механічного компоненту системи контролю зусилля пресування осердя статора при його складанні була розроблена імітаційна модель спеціальної

вимірjuвальної мембрани, що знаходиться під дією максимального питомого тиску $p_x = 30 \text{ кг/см}^2$, приведена на рис. 4.27.

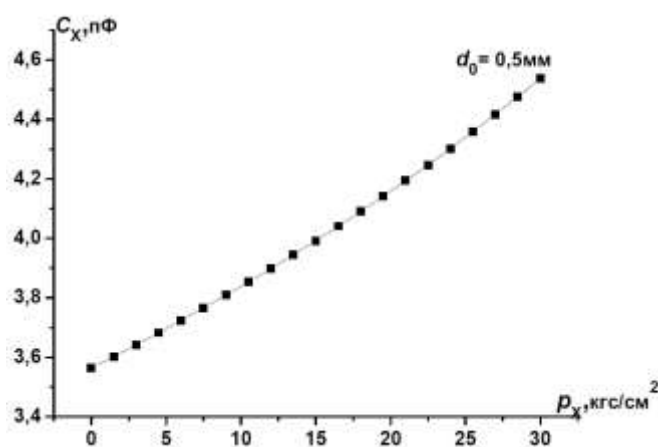


Рис. 4.26 Графік залежності $C_x = f(p_x)$

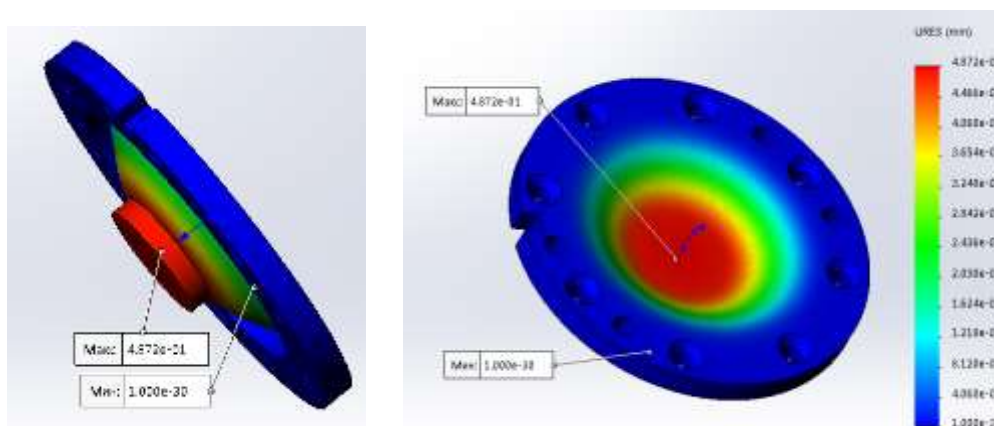


Рис. 4.27 Вимірjuвальна мембрана під дією питомого тиску p_x

У результаті проведення імітаційного моделювання були отримані значення, що є майже ідентичними розрахунковим. Проведені дослідження показали, що максимальний прогин мембрани складає 0,487 мм, що є результатом, близьким до розрахункового, а саме 0,5 мм, і підтверджує адекватність прийнятої методики розрахунку механічного компоненту системи контролю зусилля пресування осердя статора при його складанні.

Висновки до розділу 4

1. Теоретичні та експериментальні результати з визначення функції перетворення ємнісного сенсора з компланарними паралельними та концентричними електродами підтверджують можливість його практичного застосування в інформаційно-вимірювальних каналах систем діагностування механічних параметрів ПГ.

2. Отримані результати дозволяють оптимізувати конструкцію ємнісного сенсора для застосування в вимірювачі повітряного зазору між полюсом ротора та розточення осердя статора в капсульному гідрогенераторі СГК 538/160-70М.

3. Похибка від перекосу площини сенсора відносно твірної розточення осердя статора серед технологічних похибок є найбільш значною серед технологічних похибок. Встановлення сенсора на розточенні осердя вимагає зазначений перекис зводити до мінімуму.

4. Похибка, зумовлена кривизною розточення осердя статора, залежить від ширини сенсора та радіуса розточення осердя статора і має постійне значення.

5. Використання розроблених оптоелектронних перетворювачів інформаційних сигналів на основі комірок Брегга, як компонентів систем діагностування механічних параметрів ПГ дозволяє підвищити якість контролю параметрів потужних генераторів при їх експлуатації.

Посилання: [1, 2, 51, 58,84, 87, 106, 110, 123, 124, 127, 144, 146, 151, 152, 156-159, 161, 164, 166, 183, 192, 295, 204, 205, 215, 223, 234, 255,268, 300, 316, 320, 322, 332, 339, 354, 355, 364, 380, 391, 394-396]

див. список використаних джерел стор. 303–344.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ

В попередньому розділі було розроблено ряд первинних компонентів інформаційно-вимірювальних каналів (сенсори та їх допоміжні механічні елементи), які забезпечують високу чутливість і стабільність при утворенні контрольно-діагностичної інформації. Але, інформаційно-вимірювальні канали, окрім первинних компонентів утворення інформації, також містять вторинні вимірювальні перетворювачі інформації та засоби зв'язку.

Отже, задачею даного розділу є пошук загальних підходів до розробки вторинних вимірювальних перетворювачі інформації, систем їх живлення та зв'язку з підвищеною завадостійкістю до потужних магнітних полів внутрішнього середовища потужних генераторів.

5.1 Особливості реалізації вторинних вимірювальних перетворювачів для гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Для отримання контрольно-діагностичної інформації та передачі її до програмно-математичних засобів (ПМЗ) обробки системи технічної діагностики, необхідно забезпечити перетворення аналогової величини сенсора C_x в цифровий код із збереженням їх динамічного діапазону. Для такого перетворення використовується вторинні вимірювальні перетворювачі інформації (ВВП), тобто "вимірювальний канал" [65].

Методи та засоби, які розглянуті в Розділі 1, унеможливають реалізацію компактного інформаційно-вимірювального каналу механічних параметрів ПГ з забезпеченням корекції результату вимірювання в залежності від внутрішніх та зовнішніх факторів (температура, волога та тощо), що впливають на його

компоненти. Зниження впливу факторів стало можливим завдяки інтенсивному розвитку засобів мікроелектронних технологій, які дозволяють застосовувати цифрову обробку ближче до місця контролю та забезпечувати інтелектуалізацію аналогових інтерфейсів вимірювальних перетворювачів шляхом застосування первинних вимірювальних перетворювачів з вбудованими цифровими контролерами. Перераховані функції, у відповідності до стандартів серії IEEE-1451, притаманні інтелектуальним сенсорам "smart sensor". У цьому разі під "smart sensor" розуміють сенсор з інтегрованою електронікою, що виконує одну або кілька функцій: логічну (власне інтелектуальну), прийняття рішень (функцію управління) та функцію двостороннього зв'язку.

Інтелектуалізація вимірювальних перетворювачів дозволяє отримати додаткові функції: автоматичне калібрування та корекцію похибок, управління параметрами вимірювального каналу, можливість зміни конфігурації системи ІВС, зміни маркеру(адреси) ГВОВ параметрів МД, отримання додаткових інформаційних функцій. Тому для підвищення завадостійкості та забезпечення мініатюрності доцільною є побудова ГВОВ параметрів МД із застосуванням концепції "smart sensor", що є можливим за використання сучасних інтегральних мікросхем – перетворювачів ємність-код в сукупності з мікроконтролерами як ВВП. В [95] запропоновано структуру інформаційно-вимірювального каналу в структурі системи діагностування ПГ (рис. 5.1), що реалізує зазначену концепцію.

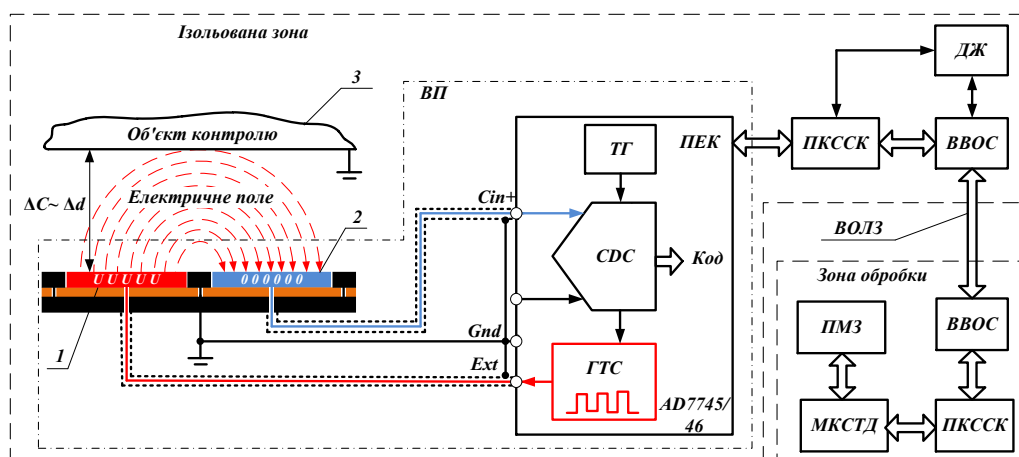


Рис. 5.1 Блок-схема ВВП ІВК системи діагностування ПГ

Приведена на рис. 5.1 блок-схема складається із ВП – вимірювального перетворювача, що містить чутливий елемент (ЧЕ) та інтегральну мікросхему AD7746, використану як ВВП; 1 – високопотенційний електрод ЧЕ; 2 – низькопотенційний електрод ЧЕ; 3 – металева заземлена поверхня; ПСК – перетворювач ємність-код на базі сигма-дельта модулятора типу AD7746; ТГ – тактовий генератор; CDC – перетворювач ємність код; ГТС – генератор тестового сигналу; ПКССК – перетворювач код-світло та світло-код (комунікаційна підсистема); ДЖ – джерело живлення; ВОЛЗ – волоконно-оптичні лінії зв'язку; ВВОС – оптична система вводу-виводу; МКСТД – модуль керування роботою системи технічної діагностики; ПМЗ – програмно-математичні засоби.

Основний принцип дії наведеної на рис. 5.1 схеми полягає у наступному: отримані від чутливого елемента дані в цифровій формі за допомогою перетворювача код-світло перетворюються в світловий потік, який передається по волоконно-оптичній лінії зв'язку із зони вимірювання механічного параметру до зони обробки. В зоні обробки за допомогою перетворювача світло-код оптичний потік перетворюється на цифровий код, прийнятний для обробки системою технічної діагностики. У випадку передачі сигналів з МКСТД до вимірювальних перетворювачів система працює аналогічно. У цьому випадку для усунення впливу зовнішніх факторів (електромагнітні поля, температура тощо), що мають місце в ізольованій зоні під час роботи енергетичного обладнання; засоби обробки інформаційних сигналів з первинних перетворювачів віднесені на безпечну відстань.

5.2 Розробка та дослідження мікроелектронних вимірювальних перетворювачів систем діагностування параметрів МД

Предметом даного підрозділу є створення основ для побудови вторинних вимірювальних перетворювачів інформаційно-вимірювальних каналів для розглянутих в розділі 3 ємнісних сенсорів.

Серед вторинних перетворювачів найбільш високими метрологічними характеристиками вирізняються перетворювачі на основі мостових зрівноважених або напівзрівноважених кіл [54, 55]. Схеми їх достатньо складні, енергозатратні і до нашого часу не реалізовувалися в інтегральному виконанні, що певним чином ускладнює їхнє застосування для вимірювання механічних параметрів в середині потужних генераторів.

Специфікою розроблених сенсорів механічних параметрів є те, що ємності конденсаторів замалі (до 4 пФ). Для вимірювання таких ємностей останнім часом досить успішно почав застосовуватися метод, що полягає у використанні зарядового підсилювача, який перетворює співвідношення ємностей (тієї, що вимірюється, та опорної) у сигнал напруги [30].

В останні роки суттєво удосконалилася технологія сигма-дельта перетворення, яка успішно застосовується для АЦП з високою розрізнявальною здатністю. У результаті розробок було отримано практичні схеми сигма-дельта перетворювачів ємності – CDC, які реалізовані у вигляді інтегральних мікросхем AD7745/AD7746 та AD7747 [189, 285, 286] та інші [341]. Перевагами використання мікросхем AD7745/46 є висока роздільна здатність в 24 біта з максимальною частотою вибірок, що рівна 90 SPS, висока лінійність ($\pm 0,01\%$), споживана потужність на рівні 2,5 мВт, високою розрізнявальною здатністю 4фФ із стандартним діапазоном вимірювання до 4пФ. Інтегральна мікросхема AD7745 має один вхідний канал, а AD7746 має два канали. ІС мають вбудований сенсор температури з роздільною здатністю 0,1 °C і точністю ± 2 °C. Вбудоване джерело опорної напруги і вбудований генератор тактових імпульсів усувають необхідність додаткового під'єднання інших зовнішніх компонент для вимірювання ємності. ІС AD7745/AD7746 мають I²C-сумісний серійний інтерфейс і працюють з напругою живлення від 2,7 до 5,25 В. Крім того, діапазон вимірювання може бути розширений до 17 пФ за допомогою вбудованого програмованого ємнісного цифро-аналогового перетворювача або до розрахункового значення за методикою, наведеною в [285] за використання

прецизійного резистивного подільника та додаткового повторювача напруги на операційному підсилювачі для забезпечення повної зарядки ємнісного сенсора

Такі CDC-перетворювачі з успіхом можуть бути застосовані в сенсорах механічних параметрів, причому інтегровані безпосередньо в конструкцію сенсора. Така інтеграція (рис. 5.2) дозволяє зменшити похибку, викликану ємністю підвідних провідників, реалізувати захист від завад та тощо.

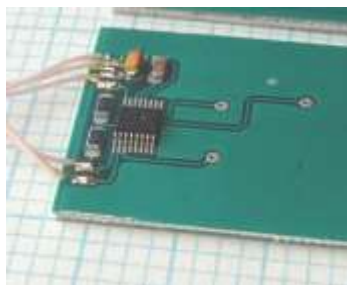


Рис. 5.2 Приклад інтеграції CDC перетворювача в структуру сенсора

Отриманий на виході CDC інформаційний сигнал в цифровій формі дозволяє реалізувати функцію перетворення та фільтрації отриманих даних програмним методом у мікроконтролері ВВП, без необхідності застосування додаткових апаратних засобів. Одним із параметрів CDC, які обмежують сферу їхнього застосування для вимірювання параметрів механічних дефектів у статичному або квазі- статичному режимі, є відносно низька швидкодія, яка безпосередньо пов'язана з розрізнявальною здатністю. Так, серійні CDC мають швидкість перетворення до 90 вибірок в секунду [285, 286]. Такі CDC доцільно використовувати в якості компоненти систем контролю ступеню стиснення осердя статора та повітряного зазору за умов планових оглядів.

При реалізації вимірювачів для діагностування повільно плинних процесів є доцільним використання серійних CDC. На рис. 5.3 показано структуру перетворювача на основі двох одноканальних CDC-мікросхем типу AD7745.

Особливістю використання інтегральних мікросхем типу AD7745 є їх унікальна адреса для шини I²C, яку неможливо змінити ні програмним, ні

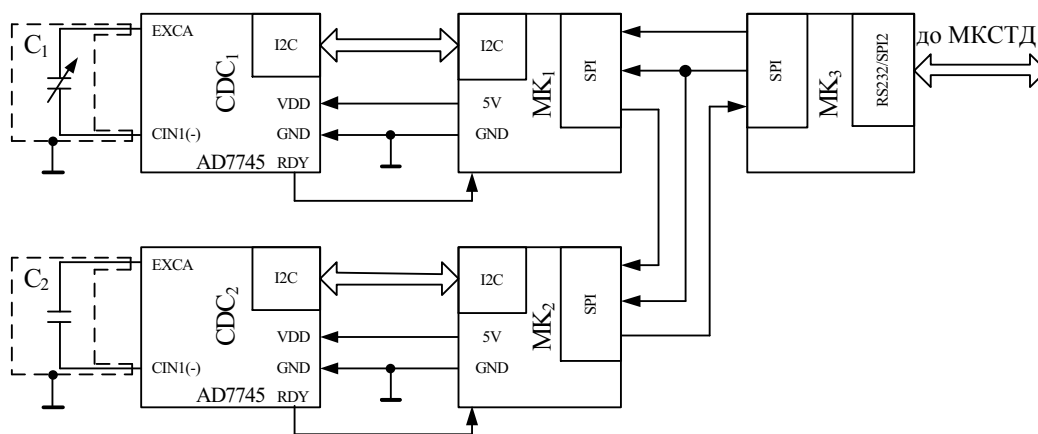


Рис. 5.3 Схема двоканального ВВП

апаратним способом. Тому у випадку реалізації вторинних вимірювальних перетворювачів для компланарних ємнісних сенсорів систем діагностування механічних параметрів потужних генераторів є необхідність використання опорної ємності.

У цьому разі кожен із CDC формує відлік значення ємності: CDC₁ – C_1 , CDC₂ – C_2 . Обидва перетворювачі своїми інформаційними виходами зв'язані також зі своєю схемою керування на МК₁ та МК₂ відповідно, який керує процесом і програмно реалізує функцію перетворення значень C_1 та C_2 . Як схему керування, може бути використано простий та поширений МК, наприклад ATmega328. Для оптимізації схеми може бути використаний більш потужний МК з підтримкою декількох I²C інтерфейсів, але недоліками такого рішення є неможливість масштабування за необхідності вимірювання декількох інформативних ємностей, які знаходяться в однакових умовах, а також збільшення вартості вторинного перетворювача та його масштабів (зазвичай МК з більшою кількістю портів мають більшу площу).

Отримані данні із МК₁ та МК₂ передаються у спільній МК₃ для подальшої попередньої обробки (визначення диференційного значення ємності, лінеаризації функції перетворення, тощо) та передачі вимірюваних даних до МКСТД і отримання даних керування з МКСТД.

В процесі роботи CDC відповідним рівнем напруги на виходах RDY сигналізують про готовність даних після чергового циклу перетворення. За умов

синхронного запуску обох перетворювачів та паралельній роботі інтерфейсів обміну з МКЗ, у такій структурі досягається швидкодія, рівна швидкодії перетворювачів. Особливість розглянутої структури – значні апаратні затрати і відносно висока вартість. Зниження вартості стає можливим, якщо застосовується керований комутатор за допомогою МК, який по чергово підключає ємності $C1$ та $C2$ до входу одноканального CDC. Структура з зазначеним принципом дії приведена на рис. 5.4.

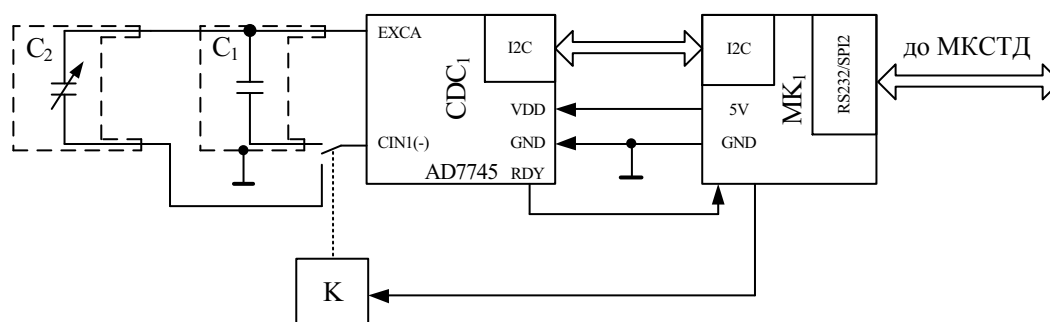


Рис. 5.4 Схема двоканального ВВП із одним AD7745

У структурі (рис. 5.4) використовується один одноканальний CDC, на вхід якого по чергово підключаються конденсатори $C1$ або $C2$ через перекидний ключ (К), що керується МК. У цій структурі значення ємностей $C1$ і $C2$ отримуються вже за два цикли перетворення, тобто швидкодія падає вдвічі, але зменшуються апаратні витрати. У цьому разі схема спрощується за рахунок використання К, а також стає більш економічно вигідною завдяки різниці вартості між CDC і схемою керування на МК, а також ключа К.

В обох розглянутих структурах функція перетворення механічного параметру у значення інформативної ємності обчислюється програмно з отриманих цифрових відліків у МК. У випадках, коли значення ємностей $C1$ та $C2$ досить близькі, – похибка обчислення різниці $C1 - C2$ визначається не лише похибкою CDC-перетворення, але й суттєво зростає похибка, що обумовлена обмеженням розрядності результату обчислення, що впливає на похибку всього результату вимірювання. Для таких випадків доцільно застосовувати CDC у напівдиференційному режимі перетворення. На рис. 5.5 показано структуру

перетворювача на основі однієї одноканальної CDC-мікросхеми типу AD7745 у диференційному режимі вимірювання.

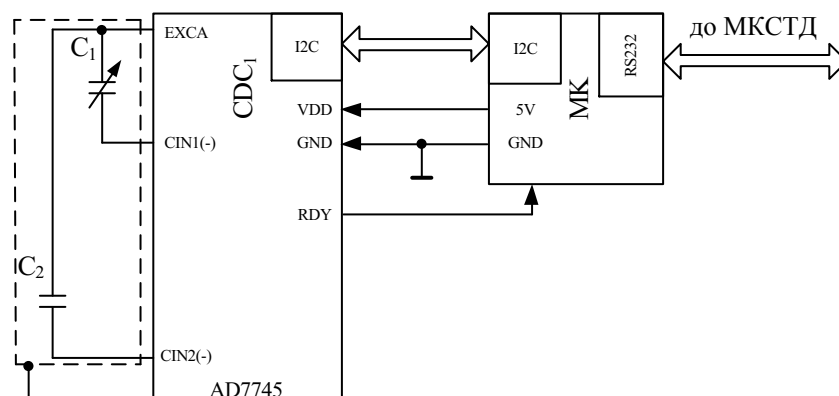


Рис. 5.5 Схема ВВП із диференційним режимом вимірювання

До складу перетворювача приведенного на рис. 5.5 входить схема керування реалізована на МК, яка згідно з кодом команди, поданим від МКСТД, при цьому перетворюється в код різниця ємностей. У випадку використання CDC у диференціальному режимі перетворення схема буде аналогічною схемі, приведений на рис. 5.5

Для реалізації функції перетворення відповідно до

$$p = k(C_1 - C_2) / (C_1 + C_2), \quad (5.1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Для реалізації вимірювань для обчислень за виразом (5.1) необхідно визначення окремо значень відліки C_1 , C_2 та $(C_1 - C_2)$. У цьому разі структура перетворювача (рис. 5.5) доповнюється зовнішнім керованим ключем К (рис. 5.6) та зміною режиму вимірювання CDC.

Робота структури, яка наведена на рис. 5.6 виконується за два цикли. У першому циклі отримуємо C_1 у другому $(C_1 - C_2)$, зазначення C_2 знаходиться за допомогою обчислень. Враховуючи те, що зміна режиму перетворення в CDC

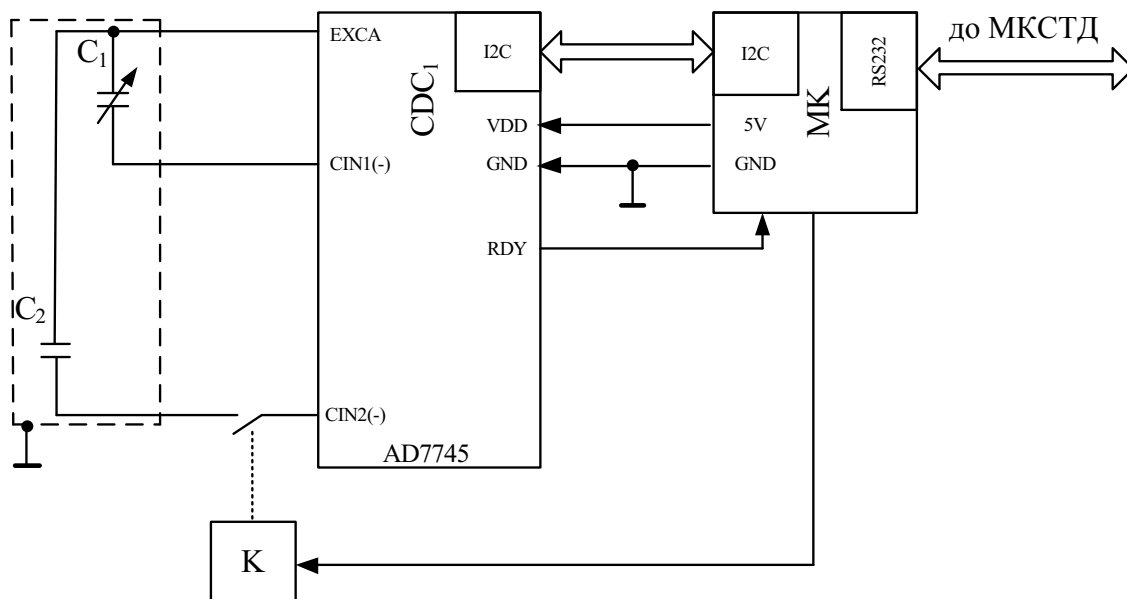


Рис. 5.6 Схема ВВП із диференційним режимом вимірювання та
можливістю визначення окремо $C1$ та $C2$

відбувається згідно командам, що передаються по інтерфейсу і мають єдиний протокол, інформаційно-надлишковий лише для зміни режиму, швидкодія цього пристрою більш ніж удвічі нижча, ніж у структурі (рис. 5.3).

На основі отриманих відліків можливо також обчислити функцію перетворення $p(C) = (C1 - C2) / C1$, яка нечутливою до основних зовнішніх впливів, але є нелінійною. Лінеаризація функції перетворення реалізується шляхом попереднього калібрування і використання отриманих калібрувальних функцій при розрахунках у МК. Методика отримання калібрувальних функцій буде розглянута в наступних розділі окремо.

Скорочення числа елементів структури можна досягти шляхом застосування двоканальних CDC типу AD7746. Структура такого перетворювача (рис. 5.7) не містить додаткових елементів, крім власне CDC та керуючого МК.

Для реалізації методики компенсації похибки від початкового перекосу електродів багатоелементного компланарного ємнісного сенсора, автором запропоновано використання структури ВВП приведеної на рис. 5.8.

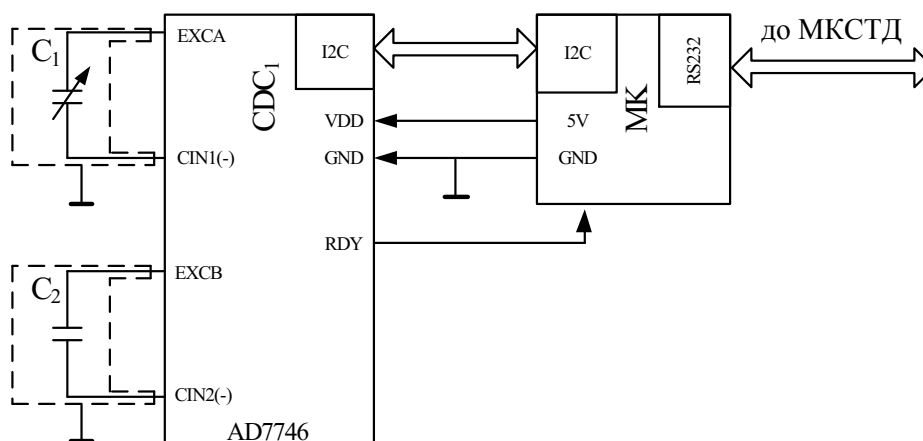


Рис. 5.7 Схема ВВП із диференційним режимом вимірювання на AD7746

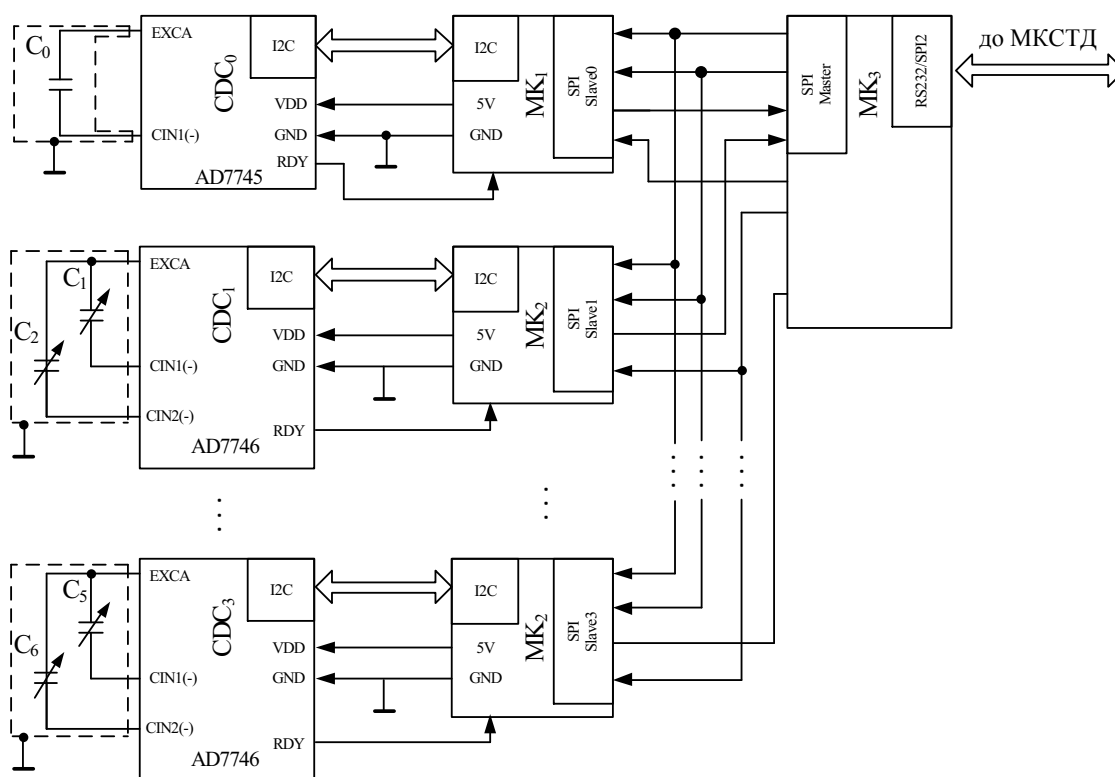


Рис. 5.8 Схема багатоканального ВВП

Для реалізації напівдиференційного режиму перетворення в схемі вимірювача використано CDC_0 на інтегральній мікросхемі типу AD7746. З урахуванням того, що зміна тиску є процесом, який повільно змінюється з часом, для здешевлення та спрощення схеми вторинного вимірювального перетворювача доцільно використовувати керований комутатор. У цьому разі схема буде аналогічна схемі зображених на рис. 5.6.

Для системи контролю та діагностики зусиль пресування осердя статора автором був розроблений вимірювач з використанням варіанту схеми вторинного вимірювального перетворювача (рис. 5.8). Слід було організувати роботу з ємнісним сенсором, у якого всі електроди не мають з'єднання з «землею» та забезпечити діапазон вимірювання до 1 пФ.

Електрична принципова схема підключення спеціалізованої мікросхеми AD7746 у складі вторинного вимірювального перетворювача для ємнісного сенсора зусиль показана на рис. 5.9, на рис. 5.10 приведена функціональна схема вимірювача. Конденсатори вимірювача у цій схемі підключено наступним чином: C_x – між контактами 3 і 8, C_0 – між контактами 9 і 3 інтегральної мікросхеми AD7746. Через лінію VCC на перетворювач подається напруга живлення, через лінії SCL, SDA та RDY здійснюється зв'язок з зовнішнім контролером для передачі вихідного коду. Коли на лінії RDY з'являється логічний «0», це сигналізує про готовність результату перетворення до передачі, після цього зовнішній контролер здійснює зчитування вихідного коду через лінії послідовного інтерфейсу SCL і SDA. На виході EXCA присутні напруга прямокутної форми типу «меандр». Ця напруга діє на конденсатори сенсора у процесі перетворення, сигнали з цих конденсаторів поступають на сигма-дельта-модулятор, що є у складі мікросхеми. Далі, отримана з виходу сигма-дельта-модулятора послідовність логічних «0» та «1» обробляється цифровим фільтром. Цифровий код з виходу цифрового фільтра нормується з використанням калібрувальних коефіцієнтів і видається за послідовним інтерфейсом типу I²C на МК (рис. 5.10).

Вимірювання інформативних параметрів C_x та C_0 відбувається за один етап. При цьому ємність C_x робочого конденсатора зі збільшенням сили стиснення пружного елементу збільшується.

З рис. 5.10 видно, що мікросхема AD7746 лініями обміну даними і синхронізації SDA, SCL інтерфейсу I²C з'єднана з мікроконтролером МК, наприклад, типу ATmega16L, який має незначне енергоспоживання, що в робочому режимі становить 1.1 мА, а в режимі очікування – 0,35 мА.

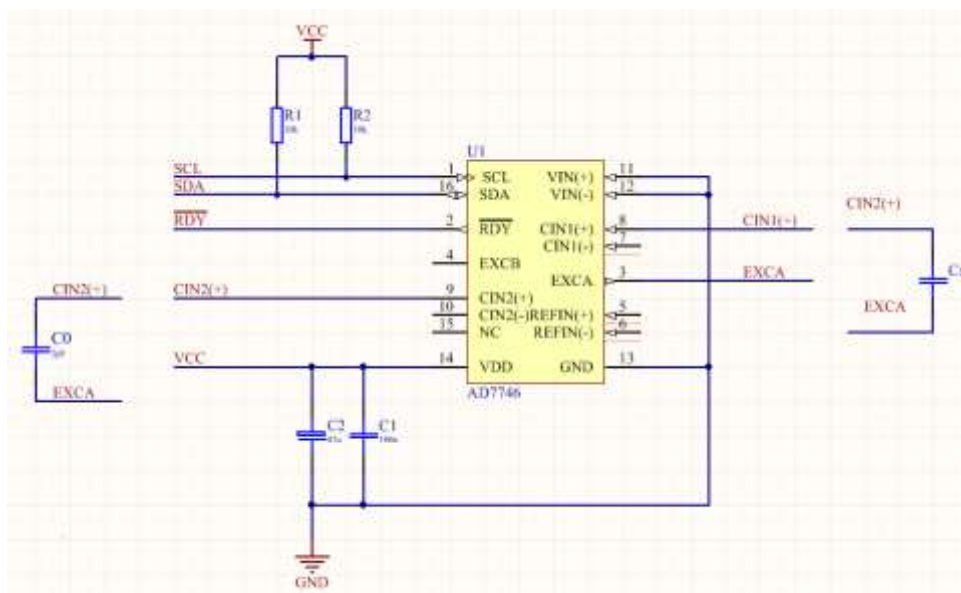


Рис. 5.9 Принципова схема ВВП на AD7746

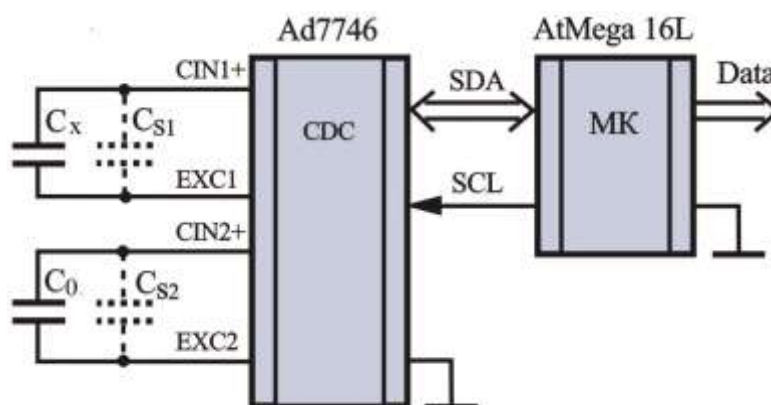


Рис. 5.10 Функціональна схема ВВП із диференційним режимом вимірювання на AD7746

У перетворювачі (рис. 5.10) іншим споживачем електричної потужності є мікросхема CDC. За напруги живлення 5,0 В струм споживання AD7745 не перевищує 0,85 мА. Разом CDC та ATmega16L споживатимуть струм, не більший за 1,2 мА. За напруги живлення 5,0 В вторинний перетворювач разом з сенсором споживає не більше 6 мВт.

В розробленій конструкції ВВП мікросхема AD7746 розташовується в безпосередній близькості від ємнісного сенсора і з'єднується з його електродами короткими провідниками безпосередньо на друкованій платі (рис. 5.2), при цьому слід враховувати, що в процесі роботи електроди змінного конденсатора в

напівдиференціальному сенсорі переміщуються. Оскільки це зміщення невелике – кілька десятків мікрометрів, для розв'язки цілком достатньо невеликої вставки з відрізка гнучкого проводу. Здійснити в такій конструкції ретельне міждротове екранування надто складно, тому для кожного з конденсаторів сенсора має місце шунтування паразитними ємностями. На рис. 5.10 позначені як C_{S1} , C_{S2} , і показані пунктирними лініями. Ці ємності невеликі і досить стабільні. Але C_{S1} призводить до спотворення лінійної залежності інформативного параметра p від величини зазору d_X , а C_{S2} призводить – до зміни крутизни характеристики $p = f(d_X)$, не порушуючи її лінійності. У ІМС AD7746 є вбудовані засоби компенсації зсуву результатів вимірювання ємностей C_W і C_R на значення вбудованої ємності, яке віднімається від значення зовнішніх ємностей, що складають величини в кілька пФ (CAPDAC), за допомогою цього вплив паразитних ємностей може бути компенсовано. В результаті обліку значення CAPDAC при обчисленні ємностей C_W і C_R строга пропорційність між приростами зазору Δd_X і збільшенням вихідної функції p відновлюється.

У мікроконтролер МК по черзі заносяться коди, що відповідають результату вимірювання ємностей C_W і C_R , далі виконується обчислення параметра p , а також масштабування для отримання результату в одиницях сили (з урахуванням геометричних розмірів і характеристик матеріалу пружного елемента). Отримані дані приводяться до зручного для подальшого використання виду, наприклад, в інформаційний сигнал в коді NRZ (зручний для передачі за протоколом Modbus). Інформаційні дані на зовнішні пристрої і сигнали керування передаються по шині Data.

На рис. 5.11 показано пристрій, що реалізує ВВП приведений на рис. 5.10. Основні вузли вимірювача: 1, 2, 3 – електроди ємнісного сенсора; 4 – пружний силосприймаючий елемент; 5 – перетворювач «ємність - цифровий код»; 6 – мікропроцесор; 7 – USB кабель до системи збирання та опрацювання даних; 8 – інтерфейсний перетворювач між мікропроцесором та системою збирання та опрацювання даних; 9 – I2C кабель між перетворювачем і мікропроцесором.

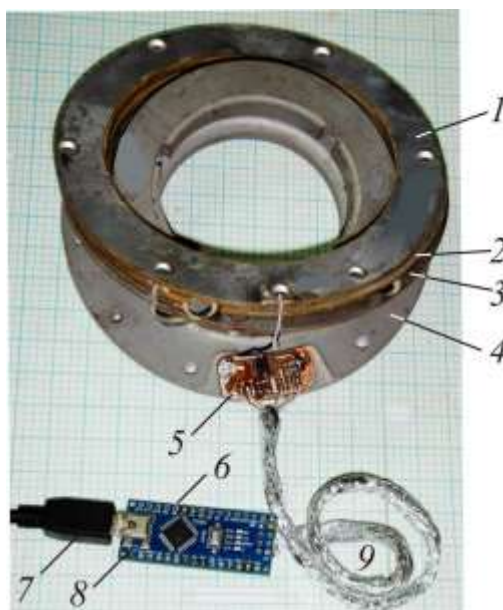


Рис. 5.11 Макетний зразок ВВП
із диференційним режимом вимірювання на AD7746

Зазначені вище принципи були покладені в реалізацію функціональної схеми та макету гібридної системи діагностування ступеню пресування осердя статора потужних генераторів типу ТГВ-200, ТГВ-300 та їх модифікацій. Розроблена схема зображена на рис. 5.12.

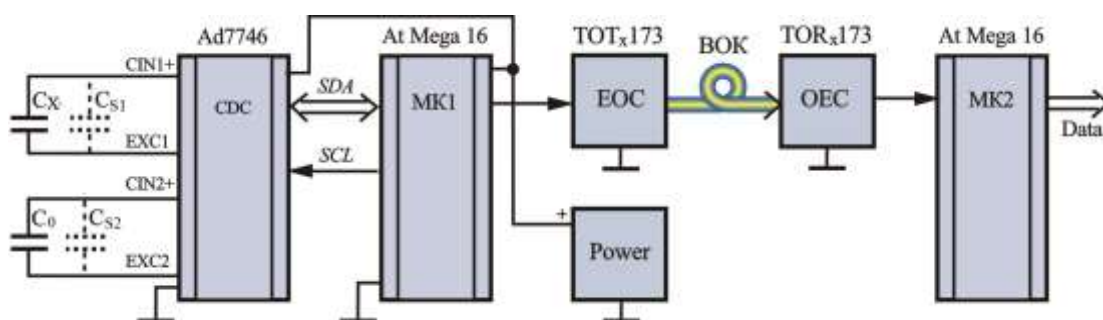


Рис. 5.12 Функціональної схема гібридного ІВК системи діагностування ПГ

В ході реалізації ГВОВ отримані дані у вигляді коду NRZ через електронно-оптичний конвертор подаються у волоконно-оптичний кабель ВОК, що з'єднує вимірювач у зоні контролю механічного параметру з засобами обробки даних системи контролю та технічної діагностики МКСТД. На вході засобів МКСТД оптичний сигнал перетворюється знову в електричний за допомогою оптико-

електричного перетворювача. За допомогою мікроконтролера МК2 інформація про виміряне зусилля масштабується (для одержання результату безпосередньо в одиницях зусилля) і приводиться до зручного виду для подальшого використання системами діагностування потужних генераторів.

У випадку багатоканальної системи (кількість каналів визначається числом точок вимірювання) кожний ГВОВ з'єднується своїм оптичним кабелем з засобами обробки МКСТД, в якому встановлено декілька (по числу каналів) оптико-електричних перетворювачів, підключених через мультиплексор до контролера МК2. Для зменшення кількості оптичних ліній можливо використання спільного багатомодового волоконно-оптичного, що стало можливим, завдяки застосуванню технології хвильового оптичного мультиплексування WDM (Wave division multiplexing).

На рис. 5.13 показано фотографію макету ГВОВ, створеного для вимірювання зусиль в стяжних призмах турбогенератора ТГВ-200, де: 1.1 – ємнісний сенсор зі спеціальним пружним трубчастим елементом; 1.2 – 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.

Використання описаних вище схем для вимірювання швидкозмінних процесів, які складають динамічний моніторинг повітряного зазору, є неможливим через низьку швидкодію. У цьому разі можливим варіантом є застосування одного з варіантів компенсаційно-мостового вимірювача з аналоговим або дискретним (цифровим) виходом, як вторинного вимірювального перетворювача для ємнісного сенсора повітряного зазору з компланарними електродами.

На рис. 5.14 наведена блок-схема варіанту компенсаційно-вимірювального перетворювача, що може бути застосований для вимірювання повітряного зазору в динамічному режимі. Вторинний вимірювальний перетворювач (рис. 5.14) працює в такий спосіб. Імпульси з виходу генератора ТГ безперервно з частотою в 30-70 кГц, керують роботою комутаторів 2 і 3 синхронно перемикаються з

одного положення в інше таким чином, що вони на їхніх входах формується змінна напруга з прямокутною формою сигналу "типу меандр".

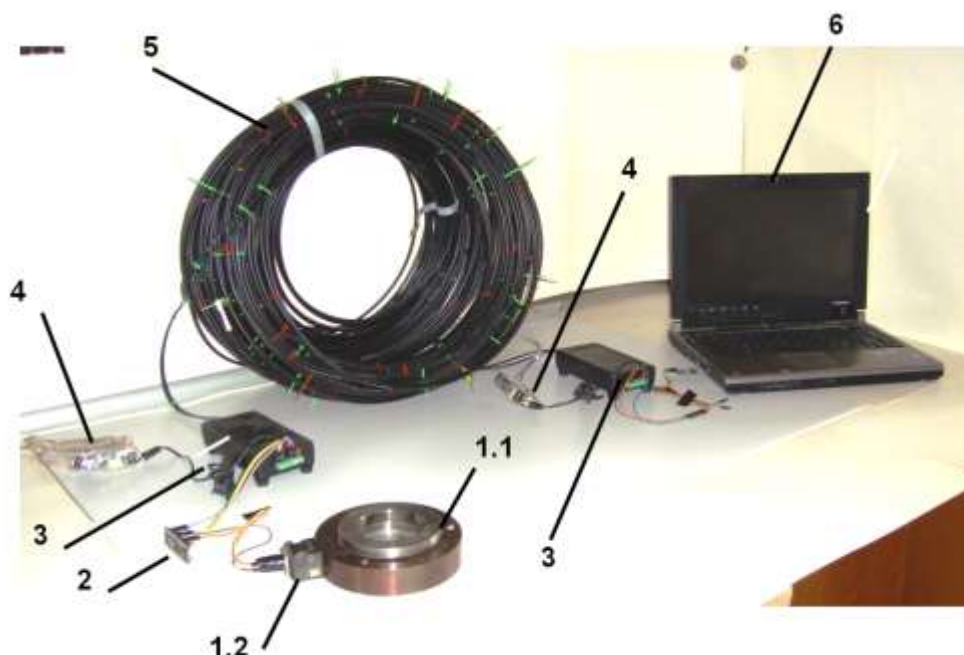


Рис. 5.13 Фотографія макету гібридної системи діагностування зусиль стягування в стяжних призмах турбогенератора

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 на виході ємнісного вимірювача

$$U_X = U_{DG} \frac{C_0}{C_X}, \quad (5.2)$$

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

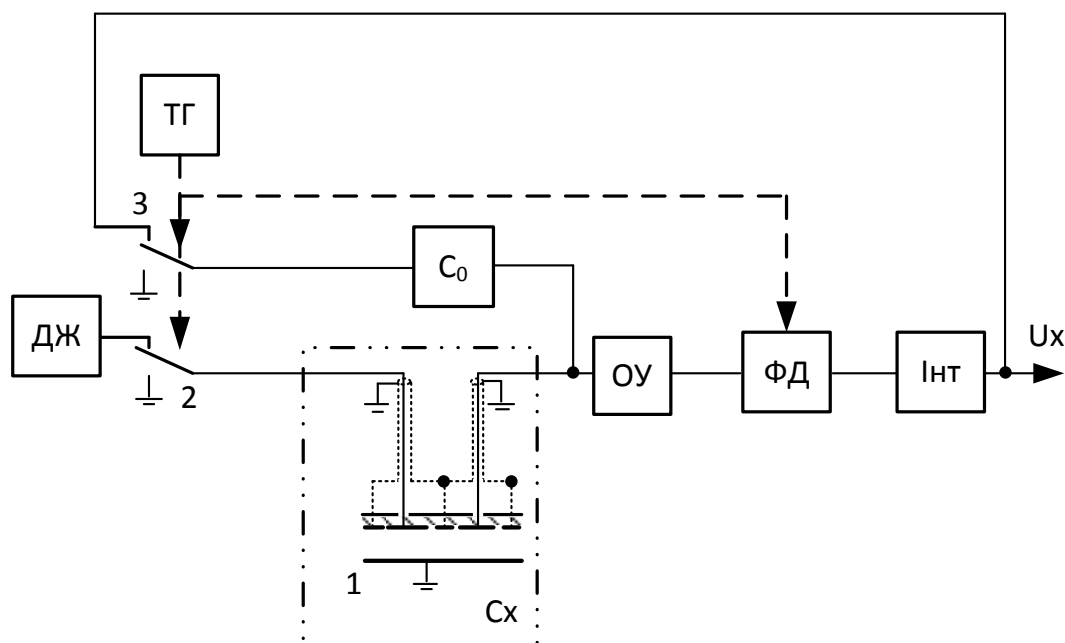


Рис. 5.14 Блок-схема вторинного перетворювача для сенсора повітряного зазору з компланарними електродами: C_x – ємнісний сенсор; C_0 – зразковий конденсатор; 1 – заземлена металева поверхня; 2 – комутатор; ДЖ – джерело напруги; ОУ – підсилювач; ФД – фазочутливий детектор; Інт – інтегратор; ТГ – тактовий генератор імпульсів.

Напруга на виході U_x може вимірюватися за допомогою цифрового вольтметра розробленого автором в [78] або будь-якого іншого спеціалізованого вимірювального перетворювача напруга-код.

Вимірювач (рис. 5.14) та ємнісний сенсор повітряного зазору з компланарними електродами може використовуватися при діагностуванні механічних параметрів аналогічно ВВП на CDC (рис. 5.3 – рис. 5.8). У такому випадку послідовно вимірюються зазори для всіх n полюсів ротора. За визначеними значеннями на основі методик (див. розділ 3), визначають форму ротора, а також значення ексцентриситету ε та кута α , що його характеризує. Використовуючи отримані значення за необхідності юстують положення ротора згідно розточенню статора. Вимірювання повторюють до досягнення відповідності інструкції з експлуатації та ремонту гідрогенераторів припустимого значення повітряного зазору. Повітряні зазори між ротором та статором генератора в діаметрально протилежних точках мають відрізнятися

один від одного не більше, ніж на $\pm 5\%$ їх середнього значення (рівного їх напівсумі) для ТГ потужністю 150 МВт і більше, з безпосереднім охолодженням провідників; $\pm 10\%$ – у інших ТГ; $\pm 20\%$ – у ГГ, якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми [7, 8, 324]. У цьому разі асиметрія повітряного зазору визначається відхиленням значень зазорів у діаметрально протилежних точках від півсуми значень цих зазорів.

Однак (рис. 5.14) для більш точного визначення значення повітряного зазору над кожним із полюсів у динаміці вимірювач доповнюється додатковими компонентами. Серед них основними є сенсор мітки вала, генератор мітки полюсу вала та сенсор електричного поля у вигляді витка. Сенсором мітки вала може бути будь-який сенсор, а саме – на основі оптичного, струмовихрового, магнітного, ємнісного і т.д. принципу дії. Даний сенсор використовується головним чином для синхронізації роботи системи контролю та діагностики повітряного зазору з іншими системами діагностування ПГ.

Генератор мітки полюсу вала може бути реалізований різними шляхами, та призначений для формування імпульсу початку та кінця вимірювання згідно "фронтів" кожного з полюсів ротора. Найбільш просто генератор мітки полюса реалізується на ПГ, що працює в штатному режимі. У цьому разі для формування строб-імпульсів використовують синусоїдальну напругу промислової частоти, що виробляється даним ПГ.

На генераторах, що працюють у маневрених режимах, або якщо використання власної синусоїдальної напруги неможливе, наприклад за відсутності збудження ротора, коли в обмотках статора машини, що контролюється, практично відсутня напруга, як генератор мітки полюсу валу допускається використовувати сенсор мітки валу, однак частота його імпульсів в n раз менша від частоти проходження полюсів повз ємнісний сенсор зазору. Для формування сигналу необхідної частоти, жорстко прив'язаного за фазою до тимчасового положення мітки вала, може бути використаний відомий принцип фазового автопідстроювання частоти.

Іншим варіантом є використання сигналу з ємнісного сенсора. У цьому разі в схему (рис. 5.14) додатково включається компаратор. На один із входів компаратора подається вихідна напруга вторинного вимірювального перетворювача, на інший вхід – гранично встановлена напруга з опорного джерела живлення. Коли на вході компаратора напруги стають рівними, на виході компаратора формується логічна одиниця, яка запускає аналого-цифровий перетворювач, що призначений для формування цифрових відліків про значення повітряного зазору.

Для компенсації похибки від дії на сенсор електромагнітного поля використовується сенсор електричного поля у вигляді витка. Дані з сенсору знімаються безперервно, та використовуються в цифровій формі для реалізації алгоритму адаптивної цифрової фільтрації завади промислової частоти, яка діє на ємнісний сенсор повітряного зазору з компланарними електродами.

Також додатково до системи контролю та технічної діагностики повітряного зазору для мінімізації похибки від дії зовнішніх факторів можуть бути включені вібросенсори. У цьому разі дані з вібросенсорів призначені для усунення похибки, що викликана некорегованими вібраціями статора відносно ротора.

На базі проведених наукових досліджень було створено експериментальний зразок ВВП із ємнісним сенсором з компланарними електродами для системи діагностування повітряного зазору капсульних ГГ типу СГК 538/160-70М та проведено їх лабораторні випробування.

Розроблені принципи побудови компонентів обґрунтовують реальність їх застосування для вирішення завдань діагностування стану електроенергетичного устаткування і створення систем діагностування з підвищеною завадостійкістю, що дозволяють підвищити надійність роботи ПГ.

5.3 Розробка та дослідження системи живлення гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Особливістю організації живлення ГВОВ параметрів МД всередині потужних ТГ або ГГ (небезпечна зона) є необхідність забезпечення стійкості до впливу потужного електромагнітного поля не лише ліній передачі інформаційних даних, а й джерел їх живлення. Слід зазначити, що в деяких випадках магнітне поле може досягати значень до 2 Тл [344-346].

Вирішення завдання забезпечення завадостійкості та стабільності живлення в таких умовах є складною задачею на даний час та потребує застосування новітніх високоефективних технологій, методів та матеріалів, що дозволяють отримувати необхідні параметри енергії живлення сенсорів. На сьогодні найбільш перспективними для застосування всередині потужних ТГ або ГГ є технології, що базуються на використанні автономних джерел живлення та живлення через волоконно-оптичні лінії (Power-over-fiber) [77, 107, 133, 172, 304, 319, 359, 377, 379, 388]. Як автономні джерела живлення, використовують гальванічні, фотовольтаїчні елементи, та елементи, побудовані за технологією "Energy Harvesting" [261, 298, 389].

Таким чином, забезпечення живлення ГВОВ ПМД може здійснюватися багатьма способами, які умовно можна розділити на дві великі групи:

а) з автономним живленням:

- за допомогою енергії батарейного живлення, розташованого безпосередньо біля ГВОВ ПМД [133, 298];
- за допомогою енергії із ДЖ, реалізованих за технологією "Energy Harvesting" та розміщених безпосередньо біля та/або є складовою ГВОВ ПМД [261, 298, 389];

б) з живленням через волоконно-оптичну лінію:

- за допомогою енергії, переданої через енергетичний ВОК [77, 107, 133, 379], де, як такий, може бути використано:

а) одномодовий світловод;

- б) багатомодовий світловод;
- в) оптичний джгут;
- за допомогою енергії, яка передається через інформаційно-енергетичний ВОК, реалізований на основі технологій "Wavelength-Division Multiplexing" (багатомодовий світловод) [172, 379, 388].

5.3.1 З автономним живленням

Організація живлення ГВОВ ПМД за допомогою енергії гальванічних елементів дозволяє без застосування додаткових перетворювачів та електронних елементів забезпечувати живлення вимірювачів та їх електронних компонентів на необхідному рівні.

Основними складовими частинами ГВОВ з батарейним живленням є такі: ПВП – первинний вимірювальний перетворювач (чутливий елемент з ємнісним сенсором C_x); ВВП – вторинним вимірювальним перетворювачем ємність-код; БСЖ – блок стабілізації живлення (DC/DC стабілізатор) з батареєю Бат.; ПКССК – перетворювач код-світло/світло-код, що містить перетворювач код-світло ПКС та перетворювач світло-код ПСК; мікроконтролер МК та систему технічної діагностики МКСТД. Перетворювачі ПСК та ПКС з'єднані між собою волоконно-оптичною лінією керування ВОКК та волоконно-оптичною лінією передавання даних ВОКД.

В даному випадку вимірювач працює наступним чином. Мікропереміщення, що обумовлене механічним впливом, вимірюється ємнісним сенсором C_x , в ВВП, який має живиться від батареї Бат, значення C_x перетворюється в код $N_{СК}$ і надходить до ПКС, де код $N_{СК}$ перетворюється в еквівалентний світловий код. Потім світловий код, який містить дані про вимірювану величину мікропереміщення, через кабель даних ВОКД надходить до ПСК, де світловий потік знову перетворюється в код $N_{СК}$, який в подальшому обробляється в МК та реєструється в ПК та/або в системі технічної діагностики потужних ТГ або ГГ.

енергії в процесі обміну інформацією для мінімізації часу передавання інформації з метою економії енерговитрат, параметрів батарей та періодичності їх заміни [154].

Недоліком використання саме гальванічних елементів є залежність більшості елементів живлення (Alkaline, Lithium, Zinc-Air) від температури зовнішнього середовища.

Технологія "Energy Harvesting" є технологією перетворення механічної, електромагнітної, температурної та світлової енергії різними матеріалами та засобами в електричну для автономного живлення низькопотужних систем, сенсорів, невеликих виконавчих пристроїв [261, 298, 389].

В ГВОВ параметрів МД з живленням за технологією "Energy Harvesting" замість гальванічної батареї Бат. рис. 5.15 встановлено джерело живлення (ДЖ). ДЖ містить акумуляторну батарею та елемент, що здатний акумулювати енергію зовнішнього середовища та перетворювати її на електричну, і використовується для постійного заряджання акумулятора, який є основним джерелом живлення вимірювача. Структурна схема, що реалізує ГВОВ параметрів МД з живленням за технологією "Energy Harvesting", показана на рис. 5.17.

Алгоритм роботи та функціональна схема передачі даних аналогічні варіанту ГВОВ параметрів МД з живленням від батареї, який розглянутий в попередньому підрозділі.

Перевагою технології "Energy Harvesting" є можливість забезпечення живлення вимірювача енергією, яка безпосередньо отримується з робочого середовища. Детальний порівняльний аналіз [284, 298, 308, 353, 368, 386] існуючих технологій "Energy Harvesting" показав, що не всі вони можуть бути використані для організації автономного живлення ГВОВ параметрів МД всередині потужних генераторів. Так, наприклад: найбільш досконала технологія збору енергії сонця "Solar Energy Harvesting" на сьогоднішній день не може бути використана через складність забезпечення освітлення фотовольтаїчних модулів.

В таблиці 5.1 наведені основні типи перспективних способів для використання живлення ГВОВ параметрів МД за технологією "Energy Harvesting" всередині потужних генераторів та їх основні характеристики.

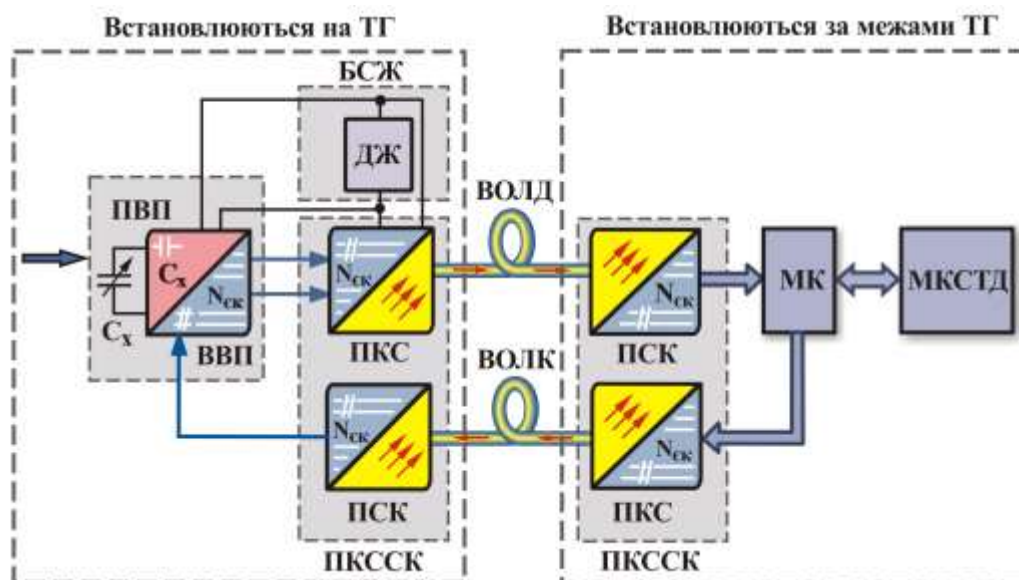


Рис. 5.17 Структурна схема ГВОВ параметрів МД з живленням за технологією "Energy Harvesting"

Таблиця 5.1

Основні типи живлення

Тип джерела енергії	Елемент енерго-акумуляції	Щільність енергетичної потужності	Переваги	Недоліки
Тепловий	Тонкоплівкові термоелектричні елементи	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ at 5 °C gradient, 3.5 mW/cm ² at 30 °C gradient [298, 386]	не потрібні рухомі частини, тривалий термін експлуатації	низька ефективність, великий розмір, потрібен значний і постійний температурний градієнт
Вібраційний	П'єзоелектричні перетворювачі, електромагнітні перетворювачі, електростатичні перетворювачі	500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (piezoelectric method), 4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (electromagnetic method), 3.8 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (electrostatic method) [284, 298]	велика кількість джерел, широкий частотний діапазон	низька ефективність, зміна потужності від зміни потужності вібрацій
Електромагнітне поле	Мініантени	0.26 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (from an electric field of 1 V/m; [298, 308])	велика кількість джерел, широкий частотний діапазон	низька потужність, потрібне значне і постійне електромагніт-не поле

Також необхідно зазначити, що окрім недоліків, притаманних попередньому способу організації живлення, значним недоліком застосування технології "Energy Harvesting" для живлення ГВОВ параметрів МД, в першу чергу, є висока вартість матеріалів, а також, в більшості випадків, завеликі габарити елементів для побудови ГВОВ параметрів МД в важкодоступних місцях з обмеженим простором.

Отже, за сукупністю переваг та недоліків, використання автономних джерел живлення (батарейного живлення та живлення за технологією "Energy Harvesting") для організації живлення ГВОВ параметрів МД є недоцільним [154].

5.3.2 Живленням через волоконно-оптичні лінії

Використання енергії, що передається через волоконно-оптичну лінію (ВОЛ), має цілу низку переваг перед використанням традиційних електричних ліній живлення та автономним живленням [109, 154]. Такими перевагами є: несприйнятливість до впливу електромагнітних завад, відсутність власного електромагнітного випромінювання, повна гальванічна розв'язка, відсутність струмів витоку, відсутність ризику короткого замикання та іскріння, відсутність необхідності захисту від блискавки, несприйнятливість до корозії і вологи, відсутність необхідності заземлення, відсутність сильних спотворень, що вносяться в результати вимірювань металевими лініями передачі живлення, тощо [154].

Системи, описані в розділі 1, мають ряд недоліків, основний – це унікальність та призначення виключно для лабораторних досліджень. Тому в Інституті електродинаміки НАН України були розроблені варіанти побудови систем живлення ГВОВ параметрів МД всередині потужних генераторів з використанням енергії, що передається через окремі та спільні ВОЛ передачі даних та живлення [154].

На рис. 5.18 показана структурна гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ з окремими ВОЛЗ передачі даних та живлення. В схемі

додатково застосовано волоконно-оптичну лінію живлення (ВОКЖ) та перетворювач напруга-світло ПНС, що містить лазерний діод ЛД. Замість батареї Бат. встановлено перетворювач світло-напруга ПСН, що містить фотовольтаїчний перетворювач (ФВП). У цьому разі, живлення до ВВП ємність-код надходить від перетворювача напруга-світло (ПНС) через волоконно-оптичний лінію живлення (ВОЛЖ) та блок перетворювача живлення (БПЖ), в якому міститься перетворювач світло-напруга (ПСН) та блок стабілізації живлення (БСЖ). Функціональна схема, роботи ПКССК, ПНС та ПСН приведена на рис. 5.19 при передачі даних та живлення між ГВОВ ПМД та МКСТД.

Алгоритм вимірювання контрольно-діагностичних параметрів гібридною системою діагностування механічних параметрів (рис. 5.19) аналогічний алгоритму вимірювання гібридних систем діагностування механічних параметрів з автономними джерелами живлення (5.3.1).

Варіантом збільшення потужності живлення (рис. 5.18) без використання додаткових оптичних елементів є використання замість одного ВОЛ – волоконно-оптичного джгута.

За умови реалізації систем технічної діагностики електрообладнання з обмеженнями на кількість ліній зв'язку, що можуть бути використані, або з обмеженням на діаметр таких ліній, доцільним є передачі даних керування та живлення по одній багатомодовій волоконно-оптичній лінії зв'язку (ВОЛЗб). Схема, що реалізує зазначений принцип приведена на рис. 5.20. В схемі додатково застосовано смуговий фільтр СФ, що призначений для виділення цифрового сигналу керування, перетворювач напруга/код ПНК та суматор, що призначений для формування вихідного об'єднаного сигналу керування ВВП та живлення ГВОВ параметрів МД.

На відміну від структури (рис. 5.18), в даному випадку, за допомогою суматора Σ формується спільний електричний сигнал, що через драйвер Др надходить на лазерний діод ЛД. З виходу ЛД оптичне випромінювання через ВОЛЗб, поступає на фотовольтаїчний елемент (ФВП), з виходу якого частина електричної енергії надходить на БСЖ та використовується для потреб живлення

ГВОВ параметрів МД, а інша частина подається на смуговий фільтр СФ, що призначений для виділення сигналу керування. Далі із виходу СФ сигналу керування надходить на перетворювач напруга/код ПНК, що призначений для формування цифрового кодового сигналу в форматі NRZ. Функціональна схема, роботи ПКС, ПСК, ПНС та ПСН приведена на рис. 5.21.

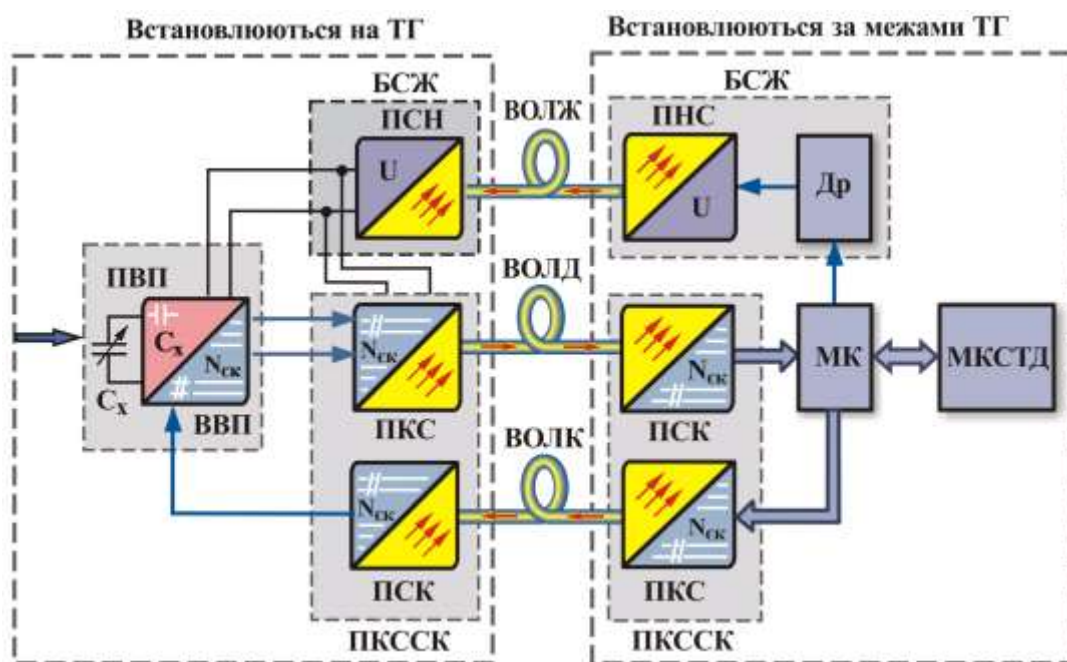


Рис. 5.18 Блок-схема гібридних систем діагностування механічних параметрів із окремими ВОЛЗ передачі даних та живлення

Алгоритм вимірювання ГВОВ параметрів МД (рис. 5.20) є аналогічним алгоритму вимірювання ГВОВ параметрів МД, у розглянутому вище випадку.

Іншим варіантом зменшення кількості ліній зв'язку, або їх діаметра є структура, яка використовує інформаційно-енергетичні волоконно-оптичні кабелі (ІЕВОК), в яких передача інформації, результатів вимірювання і живлення здійснюється через спільний багатомодовий волоконно-оптичний кабель (рис. 5.22) завдяки застосуванню технології хвильового оптичного мультиплексування WDM (Wave division multiplexing) [85, 154].

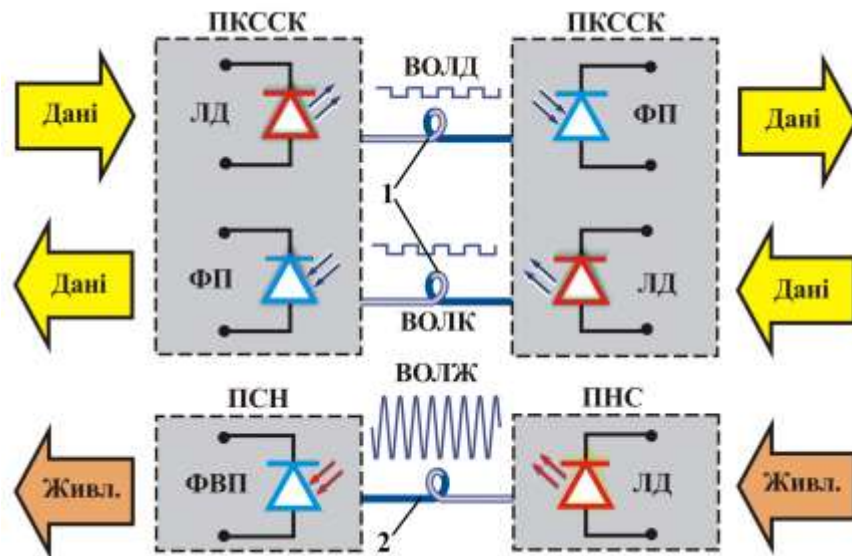


Рис. 5.19 Функціональна схема передачі даних та живлення із окремими ВОЛЗ між ГВОВ параметрів МД та МКСТД

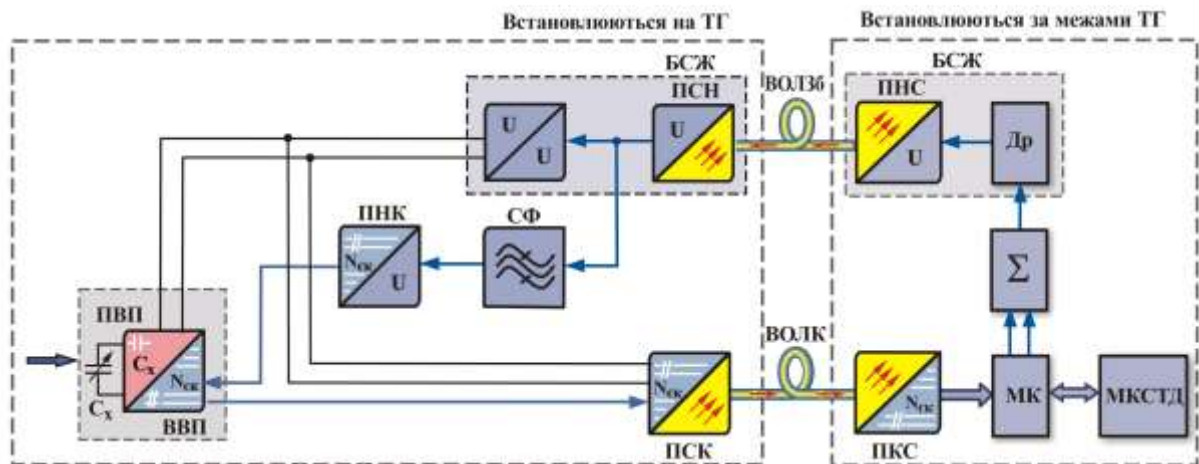


Рис. 5.20 Блок-схема гібридної системи діагностування механічних параметрів зі спільними ВОЛЗ передачі даних керування та живлення

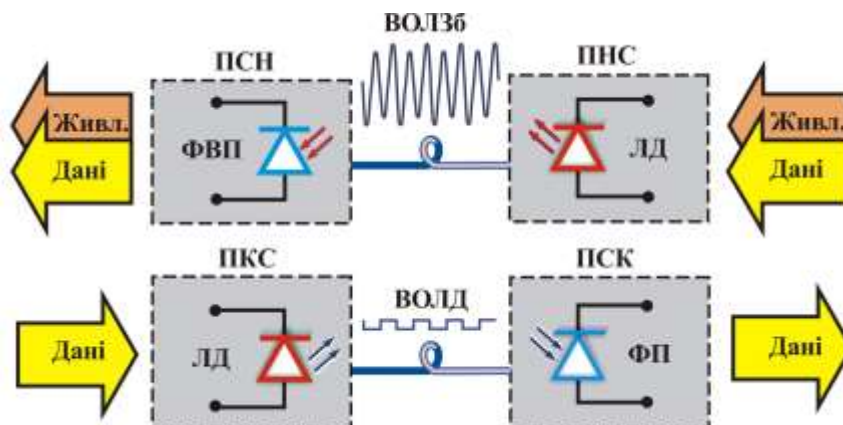


Рис. 5.21 Блок-схема передачі даних керування та живлення в гібридній системі діагностування механічних параметрів зі спільними ВОЛЗ

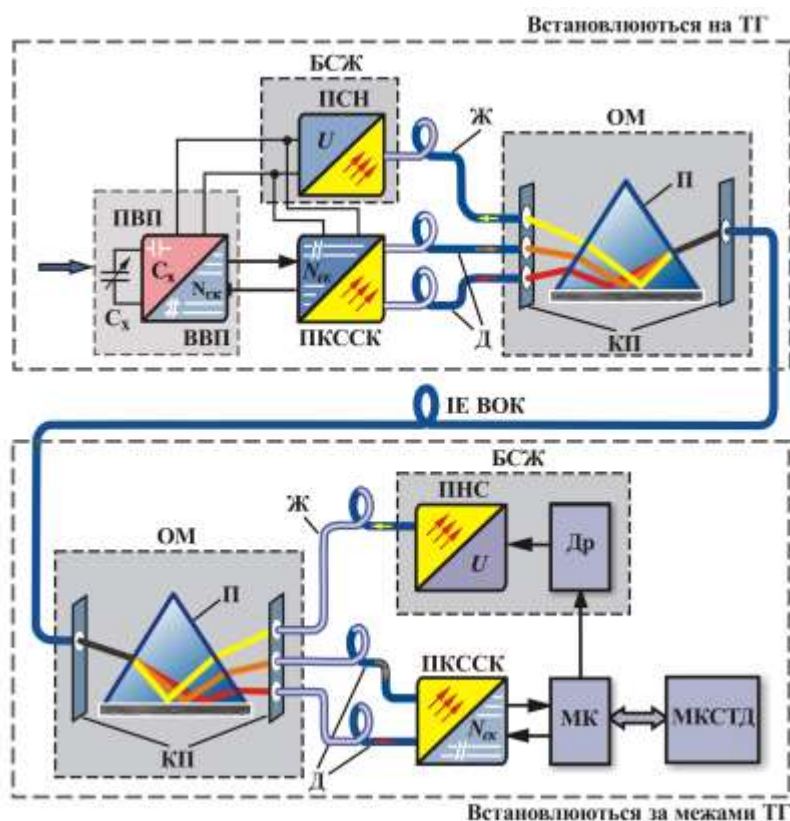


Рис. 5.22 Блок-схема гібридної системи діагностування механічних параметрів з об'єднаними ВОЛЗ для передачі даних та живлення

Схема, що реалізує зазначений принцип, приведена на рис. 5.22. В схемі додатково застосовано оптичний мультиплексор/демультиплексор ОМ, реалізований на основі оптичної призми та призначений для поділу та об'єднання сигналів оптичного живлення і передачі даних на різних довжинах хвиль, додаткового оптичного кабелю ІЕВОК та пластин для кріплення оптоволоконна КП.

Функціональна схема роботи ПКС, ПСК, ПНС та ПСН запропонованої схеми, приведена на рис. 5.22. Робота запропонованого на рис. 5.22 ГВОВ відрізняється від описаної раніше (рис. 5.18) тим, що для живлення вузлів первинного перетворювача, передачі даних від первинного перетворювача та даних керування роботою первинного перетворювача використовується один ІЕВОК. Основним елементом ГВОВ в даному випадку є оптична призма, в якій за рахунок дисперсії, тобто залежності показника заломлення від довжини хвилі оптичного випромінювання, відбувається просторове розділення (або об'єднання для зворотного напрямку) оптичних хвиль.

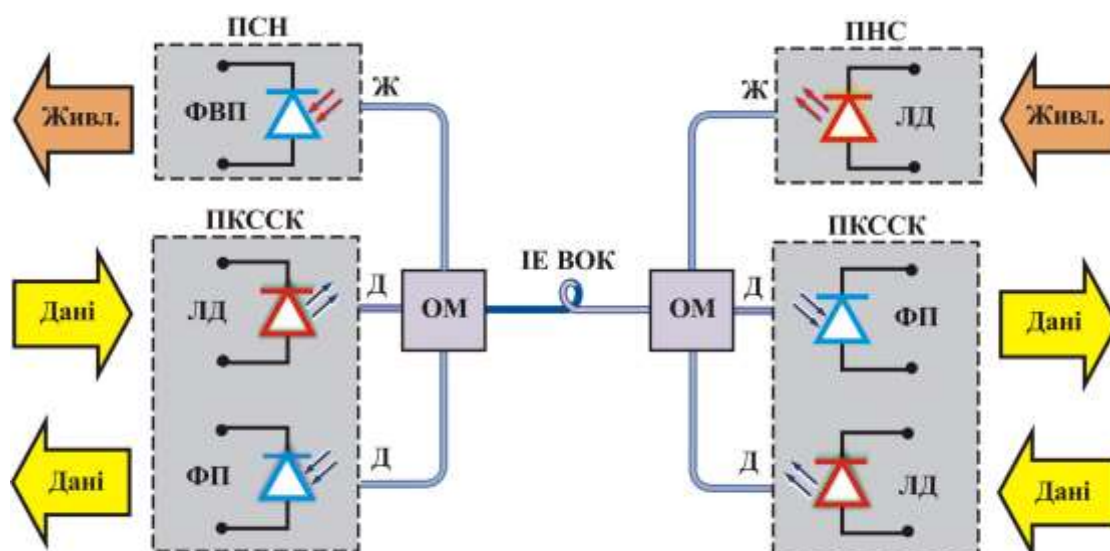


Рис. 5.23 Функціональна схема передачі даних та живлення в гібридній системі діагностування механічних параметрів з об'єднаними ВОЛЗ

ГВОВ має три оптичні канали, які працюють на довжині оптичного випромінювання λ_1 (живлення), λ_2 (вимірювальна інформація) і λ_3 (дані керування). Торець волоконного світловода (ІЕ ВОК), по якому передається оптичне випромінювання трьох каналів, розташовується на пластині кріплення. З торця ІЕ ВОК пучок падає на призму, і хвилі різної довжини відхиляються призмою на різні кути. З призми виходять паралельні пучки різного спрямування. За допомогою другої пластини кріплення світловодів з лінзами ці пучки надходять у волоконні світловоди для передачі живлення (Ж), передачі та приймання даних (Д).

5.4 Розробка та дослідження оптоелектронних перетворювачів інформаційних сигналів гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ

У випадку практичної реалізації ГВОВ для систем контролю та технічної діагностики параметрів МД виникає потреба в розробці спеціальних узгоджувальних перетворювачів цифрових електричних інформаційних сигналів в цифрові оптичні сигнали та у зворотному напрямку, у зв'язку із різною природою електричних та оптичних сигналів.

Реалізації оптоелектронних перетворювачів інформаційних сигналів присвячені роботи [37, 44, 61, 196, 302, 375, 376, 381, 390]. Так, в [390] розглянуто практичну реалізацію для цифрових аудіопристроїв. В [381, 383] наведено реалізацію перетворювачів сигналів USB/UART в оптичний сигнал, а в роботах [248] – використання перетворювачів з одномодовим або багатомодовим волоконно-оптичним каналом. В роботах [61, 90, 173, 174, 264] розглянуто перспективи використання, методи побудови, математичну модель та структуру волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних інтерфейс-каналів, які орієнтовані на спеціалізоване використання за сумісної передачі інформації та енергії за допомогою світла в системах зв'язку.

Застосування розглянутих систем [302, 381, 383, 390] в структурі ГВОВ є неможливим через їхні недоліки, а саме – низьку завадостійкість до впливу робочого навколишнього середовища та вібрацій, які виникають при роботі ТГ. Зазначені вище недоліки мінімізуються в волоконно-оптичній системі збирання аналогової інформації «Електроніка МС8201» за умов роботи в системах АСУТП, яка дозволяє циклічно опитувати 16 сенсорів аналогових сигналів [248], та в системі розподілу аналогових даних "Електроніка МС8401", яка призначена для передачі цифрових сигналів по оптоволоконному лінійному тракту з багатоканальним перетворенням цих сигналів в аналогові сигнали на приймальному кінці тракту [247]. Практичне використання системи [248] в структурі системи діагностики електрообладнання детально описано в роботі [38]. Недоліками систем [247, 248] є те, що вони призначені для опитування обмеженої кількості сенсорів, мають значні габарити та на даний час не випускаються промисловістю.

Зазначених вище недоліків позбавлена запропонована автором в роботі [201] схема оптоелектронних перетворювачів інформаційних сигналів (рис. 5.24). У цьому разі розробка схеми та її практична реалізація здійснювалась з урахуванням особливості протоколу обміну даних між компонентами ГВОВ та впливу робочого навколишнього середовища.

ОЕП конструктивно складається з двох частин: "OUT" (рис. 5.24, а), що містить блоки 1-8, та "IN" (рис. 5.24, 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 оптичного сигналу із ВОК в код типу NRZ. На блок-схемі ОЕП (рис. 5.24) 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.

На рис. 5.25 наведено часові діаграми імпульсів напруги при проходженні через ОЕП, а на рис. 5.26 – зовнішній вигляд розробленого діючого макету ОЕП.

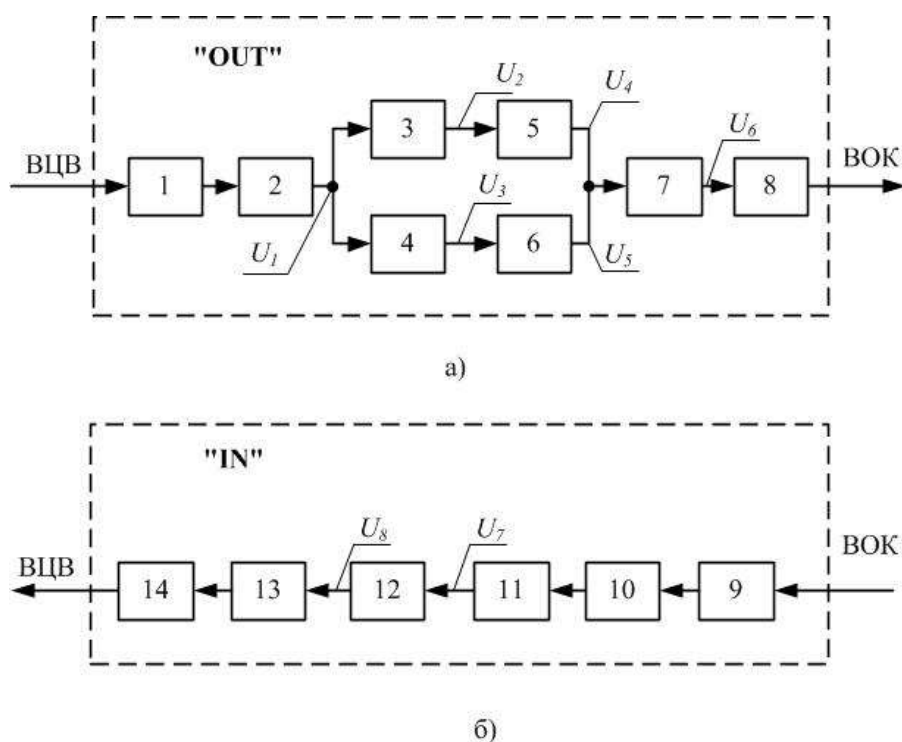


Рис. 5.24 Блок-схема оптоелектронного перетворювача:

а) вихідний каскад, б) вхідний каскад

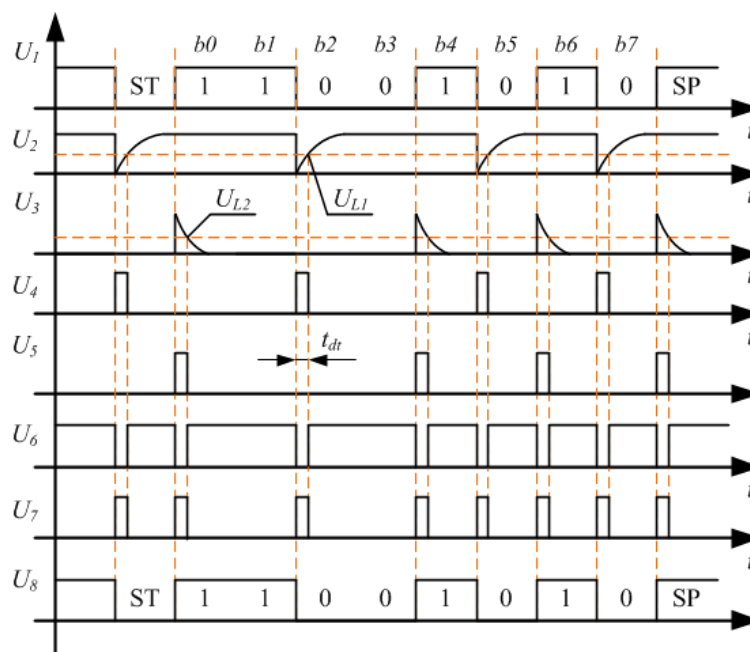


Рис. 5.25 Часові діаграми

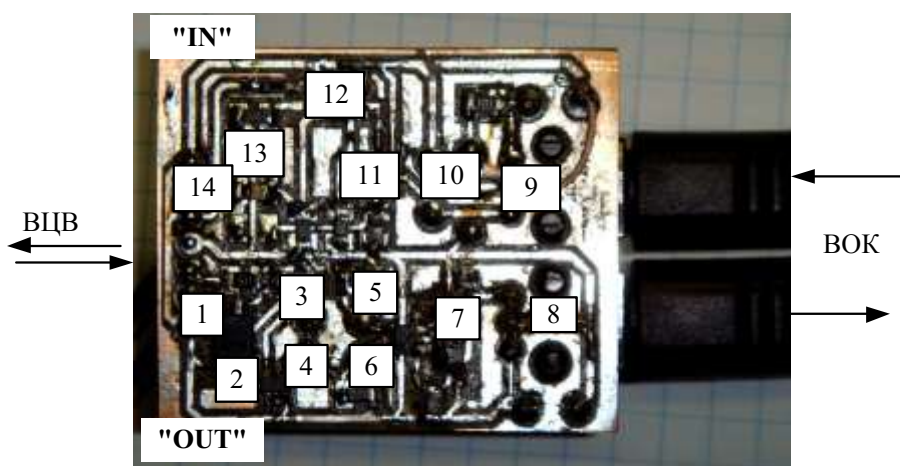


Рис. 5.26 Макетний зразок оптоелектронного перетворювача

Принцип дії ОЕП наступний. На вхід "IN" ОЕП, призначеного для перетворення сигналів в NRZ-кодi у відповідній імпульсній послідовності для модуляції оптичного потоку, надходять інформаційні дані від ВЦВ.

Для забезпечення гальванічної розв'язки між логічними мікросхемами ОЕП та загальною шиною, до якої під'єднані до ПКССК всередині потужного генератора та ПКССК на вході системи МКСТД (рис.2.2, див. розділ 2) на вході "IN" та на виході "OUT" відповідно, використовується оптрон ACFL-5211T виробництва Broadcom [371]. Для здешевлення вартості перетворювача може

бути використаний оптрон H11L1 виробництва Motorola [375] або інші елементи, що призначені для гальванічної розв'язки цифрових логічних сигналів.

Далі, з виходу гальванічної розв'язки, інформаційний сигнал поступає на мікросхему MAX485 виробництва Maxim Integrated [374], яка в ОЕП використовується для узгодження інтерфейсів. Конструктивно гальванічна розв'язка і мікросхема інтерфейсу показана як 1 на рис. 5.24 *а* для "OUT" та 14 на рис. 5.24 *б* для "IN" в загальній структурі ОЕП.

З виходу 1 інформаційний сигнал в NRZ-кодi надходить на вхід 2, що виконує функцію буферного каскаду узгодження та вирівнювання фронтів сигналу до рівня ТТЛ. Як 2, використано логічну мікросхему буфера на тригері Шмітта SN74LVC1G17 (виробництва Texas Instruments Incorporated) [373]. З виходу 2 сигнал U_1 (рис. 5.25) в NRZ-кодi рівня ТТЛ направляється на дві диференціальні ланки 3 і 4, що разом із логічними мікросхемами 5 та 6 призначені для формування імпульсів тривалістю t_{dt} рівня ТТЛ. Як 5 і 6 використовуються логічні мікросхеми буферів на тригері Шмітта з інвертуючим (SN74LVC1G14) та неінвертуючим (SN74LVC1G17) виходом (виробництва Texas Instruments) [373]. Діаграми сигналів U_2 і U_3 , відповідно на виході диференціальної ланки 3 і 4 та вихідних сигналів U_4 і U_5 на виходах 5 і 6, приведені на рис. 5.25. За допомогою 7 імпульсні сигнали з виходів 5 і 6 об'єднуються в один модулюючий сигнал U_4 (рис. 5.24 *а*), який є кодовою комбінацією. Функцію 7 виконує логічний елемент "І-АБО" SN74LVC1G02 (виробництва Texas Instruments) [373], який фактично реалізує "Штрих Шеффера".

Особливістю розглянутої структури формувача імпульсів тривалістю t_{dt} – є значні апаратні затрати і відносно висока вартість. Зниження вартості можливе у випадку використання логічних мікросхем як диференціальних ланок (рис. 5.27).

Елементи 1, 2, 3, 4, які утворюють диференціальну ланку виконані на тригерах Шмітта SN74LVC1G17. Буфер у такому разі виконує функцію затримки для формування імпульсів тривалістю t_{dt} рівня ТТЛ. Тривалість затримки t_{dt} визначається характеристиками логічних мікросхем. Як логічний елемент, 5

застосовано елемент 5 – "виключне АБО". Для практичної реалізації використано логічний елемент SN74LVC1G86 (виробництва Texas Instruments) [373]. Часова діаграма диференціальної ланки приведена на рис. 5.28

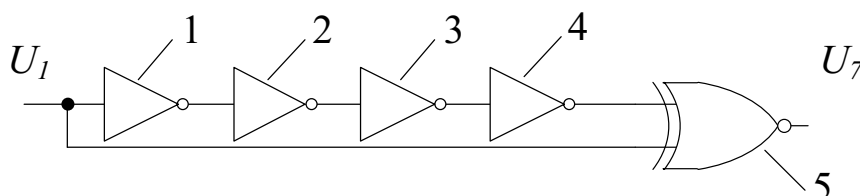


Рис. 5.27 Формувач імпульсів

З виходу 7 імпульсні сигнали безпосередньо подаються на волоконно-оптичний передавач 8 ОЕП, який перетворює електричний імпульсний сигнал в оптичний сигнал та вводить в волоконно-оптичний канал ВОК, що з'єднує ОЕП, працюють попарно для передачі оптичного сигналу по ВОК до ПКССК в зоні розміщення МКСТД 3 (рис. 2.2, див. розділ 2).

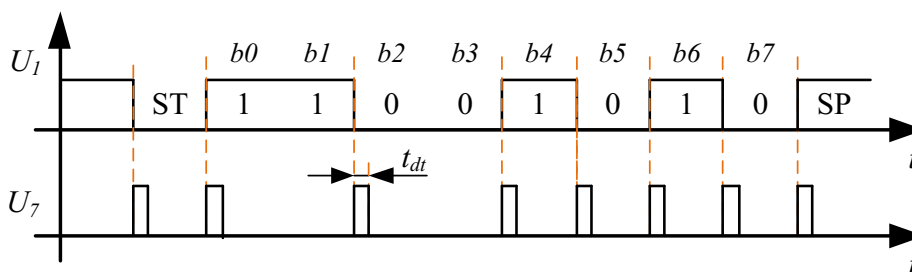


Рис. 5.28 Часові діаграми

Як 8 використано волоконно-оптичний передавач HFBR-1505CFZ виробництва Broadcom [372], що розміщений в металевому корпусі. Застосування металевого корпусу та рознімача типу SMA 905/906 забезпечують стабільність оптичного зв'язку в складних умовах дії вібрацій, впливу електромагнітного поля, температури та вологості.

Для зменшення вартості може бути використаний будь-який інший волоконно-оптичний передавач із аналогічними характеристиками

перетворення електричного імпульсного сигналу в модульований оптичний потік. Наприклад, в дослідному зразку (рис. 5.26) використано волоконно-оптичний передавач TOTx177 виробництва Toshiba [313] зі стандартним рознімачем EIAJ RC-5720B (ToshLink).

Для виділення електричних імпульсів із отриманого від 9 електричного сигналу використовується смуговий фільтр 10. Відфільтрований сигнал з 10 підсилюється та реконструюється за фронтами до рівня ТТЛ за допомогою 11. В якості 11 використано логічну мікросхему буфера на тригері Шмітта SN74LVC1G17 виробництва Texas Instruments [372].

Сигнал U_7 з виходу 11 за допомогою 12 перетворюється на сигнал U_7 NRZ-кода, який є ідентичним сигналу U_1 . Перетворювач 12 реалізовано на логічному елементі Д-тригера SN74LVC1G80 виробництва Texas Instruments [372]. Сигнал NRZ-коду поступає на вхід 13, де сигнал аналізується на полярність. У випадку, коли середня потужність сигналу з NRZ-коду для послідовності пакетів даних більша за встановлений поріг, то сигнал передається без змін на вхід 14, в іншому випадку сигнал спочатку інвертується, а потім передається на вхід 14.

Для зменшення негативного впливу дії перехідних процесів, що відбуваються при ввімкненні системи вимірювачів ГОЕВ (рис. 2.2 див. розділ 2) в структурі ОЕП може бути за необхідності реалізована затримка включення живлення модуля на мікросхемі TS5A3159 виробництва Texas Instruments [340] із застосуванням відповідної затримки на ввімкнення, наприклад, побудованої на базі RS-ланки та логічної мікросхеми – буфера на тригері Шмітта типу SN74LVC1G17 виробництва Texas Instruments [372].

Використання мініатюрних логічних мікросхем серії 74LVC в корпусі SOT23, дозволяє реалізувати надійний захист від впливу потужних магнітних завад та негативної дії вібрацій. За необхідності габаритні розміри ОЕП можуть бути зменшені на 30-60% за рахунок застосування логічних мікросхем серії в корпусі μ QFN [372].

В процесі проведення експериментальних досліджень дослідного зразка (рис. 5.26) було встановлено, що максимальна дальністю передачі даних може

становити до 30 метрів, у цьому випадку струм споживання ОЕП в безперервному режимі передачі та приймання даних склав до 600мА за напруги живлення 5 В. З використанням більш потужного лазерного випромінювача та відповідного фотоприймача було реалізовано оптоелектронний перетворювач інформаційних сигналів з максимальною дальністю передачі даних до 1000 метрів (рис. 5.29). Принцип його дії аналогічний описаному раніше (рис. 5.24).

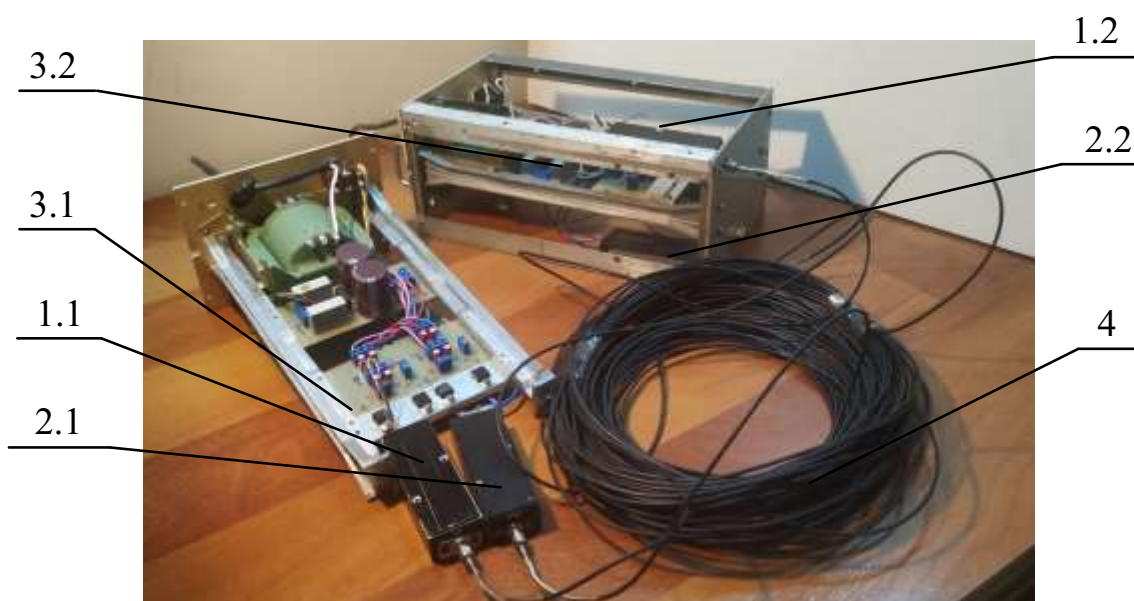


Рис. 5.29 Макетний зразок оптоелектронного перетворювача з передачею даних до 1000 м

Розроблений макетний зразок оптоелектронного перетворювача для реалізації передачі даних в системі діагностування механічних параметрів ПГ представлено на рис. 5.29, де: 1.1 – ОЕП приймання інформаційних сигналів в зоні ГВОВ; 1.2 – ОЕП відправлення інформаційних сигналів в зоні ГВОВ; 2.1 – ОЕП відправлення інформаційних сигналів в зоні обробки сигналів МКСТД; 2.2 – ОЕП відправлення інформаційних сигналів в зоні обробки сигналів МКСТД; 3.1 – блок живлення в зоні ГВОВ; 3.2 – блок живлення в зоні обробки сигналів МКСТД; 4 – волоконно-оптична лінія зв'язку.

5.5 Розробка та дослідження принципів функціонування та структури компонентів інформаційно-вимірювальних каналів оптоволоконних систем діагностування механічних параметрів ПГ

Одним з основних вузлів оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ, що впливають на їх точність і швидкодію, є фазовий детектор. Останній може бути реалізований різними способами: компенсацією фази, перетворенням інтервалу часу в напругу або частоту, синхронним детектуванням, перетворенням Фур'є з подальшим вилученням фазової складової, перетворенням Гільберта і іншими [27, 44, 59, 83, 321, 369].

В роботах [83] автором для цілей створення швидкодіючих і завадостійких систем, які мають найбільшу ефективність, запропоновано застосування фазового детектора, заснованого на використанні алгоритму ортогонального перетворення [79, 25]. В цьому випадку фазовий зсув може бути визначений, як [202]:

$$\varphi = \arctg \left(\int_0^{t_n} U(t) U_m \sin(\omega t) dt / \int_0^{t_n} U(t) U_m \cos(\omega t) dt \right), \quad (5.3)$$

де $U(t)$ – досліджуваний сигнал; $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота сигналу $U(t)$; $U_m \sin(\omega t)$ і $U_m \cos(\omega t)$ – опорні напруги, що використовуються при ортогональній обробці; U_m – амплітудне значення ортогональних складових; t_n – час спостереження сигналу.

При цьому слід зазначити, що структурам фазових детекторів, заснованих на аналоговому ортогональному перетворенні, притаманні деякі недоліки: низька стійкість по відношенню до вузькосмугових (зосередженим по спектру) завад; інструментальні похибки, що виникають при апаратурній реалізації (формуванні квадратурних сигналів, множенні сигналів і т.д.) та впливають на точність перетворення [59]. Такі недоліки знижують ефективність перетворення значення фазового зсуву в рівень напруги для наступної цифрової обробки. У зв'язку з цим

для оцінки фазового зсуву доцільно попередньо виконувати дискретизацію вимірювального сигналу на проміжній частоті з подальшим ортогональним застосуванням дискретного перетворення [83]. Однак при цьому з'являються специфічні похибки вимірювання відстані, викликані дискретизацією аналогових сигналів [79].

У зв'язку з цим виникла задача моделювання принципів функціонування та структури ОВ на основі фазового методу, а також оптоелектронних системах з ортогональним дискретним перетворенням, обумовлених некратністю періоду вимірювального сигналу інтервалу дискретизації, а також відхиленням окремих інтервалів дискретизації на випадкову величину від їх розрахункових значень [25, 91, 83]. Для вирішення поставленої задачі розглянемо узагальнену структурну схему системи контролю та діагностики параметрів МД важкодоступних об'єктів з цифровим фазовим детектором, яка показана на рис. 5.30, де: СВ1, СВ2 – оптоволокна; Пл1, Пл2 – кріпильні пластини оптоволокон СВ1 і СВ2; КО – контрольований дифузно-відбиваючий об'єкт; ОЕПП – оптико-електронна приймально-передавальна система; Об – об'єктів; НЛВ – напівпровідниковий лазерний випромінювач; МСЧ – малогабаритний синтезатор частоти; ФП – фотоприймач; НДз – напівпрозоре дзеркало; Зм1 і Зм2 – змішувачі; БУЗД – блок управління і збору даних; ПММ – програмно-математичні модулі; АЦП – аналого-цифровий перетворювач напруги в код; ЦСП – цифровий сигнальний процесор; ПК – персональний комп'ютер; Гт – генератор тактових імпульсів.

Під управлінням ЦСП на одному з виходів МСЧ формується сигнал із заданою частотою модуляції [251]. При цьому f_m може змінюватися дискретно в смузі частот 22...90 МГц по циклічно зростаючому закону [251]. На іншому виході МСЧ формується сигнал з частотою модуляції, значення якої більше на значення проміжної частоти $f_{пр}$.

Сигнали з виходів $З_{м1}$ і $З_{м2}$ надходять на входи двоканалного синхронізованого АЦП, керованого ЦСП. При цьому, для досягнення максимальної швидкодії дані з АЦП через ЦСП пересилаються в ПК через USB порт комп'ютера. Сформовані в результаті пересилання фрейми (пакети даних) використовуються підпрограмами зі складу ПММ, в результаті виконання яких знаходиться значення фазового зсуву φ_X шляхом дискретного перетворення Гільберта на кожному кроці перелаштування частоти модуляції.

Блок-схема, що реалізує обчислення на основі ортогонального дискретного перетворення, наведено на рис. 5.31, де: ЦСП – цифровий сигнальний процесор; Гт – генератор тактових імпульсів; АЦП1, АЦП2 – аналого-цифрові перетворювачі напруги в код; $\Phi_{\cos}$, $\Phi_{\sin}$ – формувачі ортогональних сигналів в дискретному вигляді; ФД1 і ФД2 – дискретні фазові детектори відповідно для вимірювального і опорного сигналів; БУК – блок урахування квадранту; СВК – суматор з урахуванням вихідного коду БУК; X – помножувач; Σ – суматор; $\arctg()$ – пристрій обчислення значення функції арктангенс; $\div$ – дільник; Ін – інтерфейс в якості якого використаний USB порт комп'ютера; БУПМ – блок управління роботою програмних модулів збору і обробки даних.

При цьому фазовий зсув φ_X між дискретизованої сигналами $U_{З_{м1}}(t)$ і $U_{З_{м2}}(t)$ визначається як:

$$\hat{\varphi}_X = |\varphi_{З_{м1}} - \varphi_{З_{м2}}|, \quad (5.6)$$

де $\varphi_{З_{м1}}$, $\varphi_{З_{м2}}$ – фазовий зсув в опорному і вимірювальному каналі відповідно.

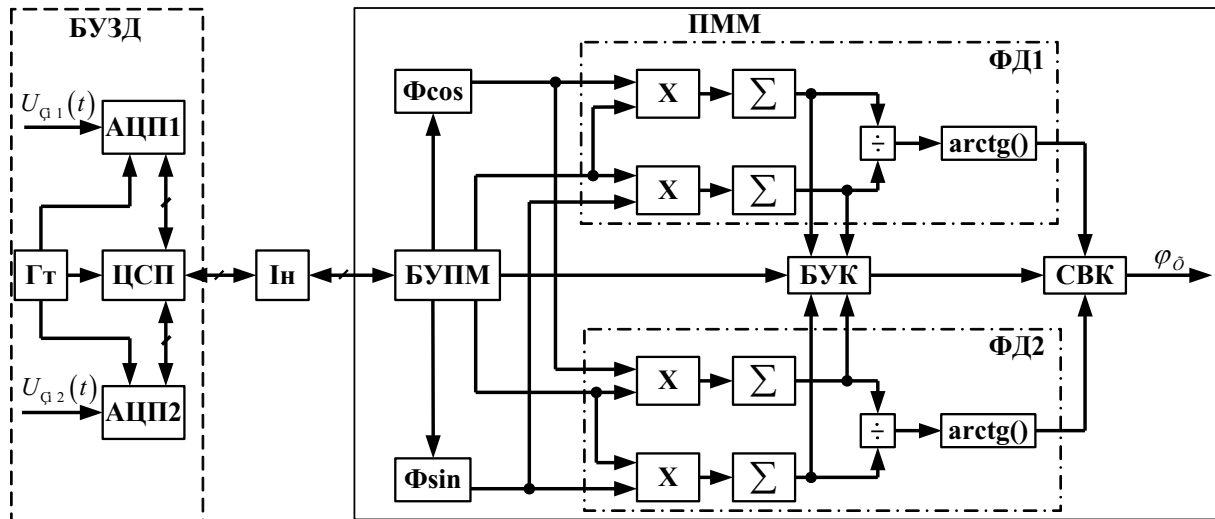


Рис. 5.31 Блок-схема ортогонального дискретного фазового детектора

Використовуючи вираз (5.3), формулу (5.6) приводимо до виду:

$$\hat{\varphi}_X = \left| \begin{array}{l} \arctg \left(k \cdot \frac{\sum_{n=1}^M \left(\sin(\omega_{\text{пр}} n t_d + \varphi_0 + \varphi_X) \cdot \sin(\omega_{\text{пр}} n t_d) \right)}{\sum_{n=1}^M \left(\sin(\omega_{\text{пр}} n t_d + \varphi_0 + \varphi_X) \cdot \cos(\omega_{\text{пр}} n t_d) \right)} \right) \\ - \arctg \left(k \cdot \frac{\sum_{n=1}^M \left(\sin(\omega_{\text{пр}} n t_d + \varphi_0) \cdot \sin(\omega_{\text{пр}} n t_d) \right)}{\sum_{n=1}^M \left(\sin(\omega_{\text{пр}} n t_d + \varphi_0) \cdot \cos(\omega_{\text{пр}} n t_d) \right)} \right) \end{array} \right|, \quad (5.7)$$

де $\omega_{\text{пр}} = 2\pi f_{\text{пр}}$ – циклічна проміжна частота сигналу; t_d – період дискретизації аналогових сигналів; n – поточний номер відліку з фрейму; M – кількість відліків в фреймі.

За практичної реалізації запропонованої схеми (рис. 5.31) на точність визначення φ_X за формулою (5.7) впливає нестабільність величини t_d , обумовлена роботою генератора ГТ [82]. В цьому випадку найменша похибка в обчисленні φ_X має місце при рівномірному розміщенні імпульсів дискретизації в інтервалі, рівному періоду сигналу:

$$T_C = N t_d p^{-1} = q t_d, \quad (5.8)$$

де $q = N p^{-1}$ – коефіцієнт кратності періоду сигналу до інтервалу дискретизації; p – ціле число; N – кількість імпульсів дискретизації.

Залежно від особливостей формування періоду між окремими моментами дискретизації мають місце такі випадки [91]:

а) інтервал дискретизації укладається ціле число раз в періоді вимірювального сигналу, тобто період сигналу кратний інтервалу дискретизації, $T_C = q \cdot t_d$;

б) інтервал дискретизації не вкладається ціле число раз в періоді вимірювального сигналу, $T_C \neq q \cdot t_d$, що викликано відхиленням періоду t_d від номінального значення на постійну величину $\pm \Delta t$;

в) моменти часу t_d відхиляються на величину Δt , яка носить випадковий характер і відповідає величині джитера при формуванні імпульсів дискретизації.

Перший випадок є ідеалізованим і складно реалізованим на практиці. Найчастіше зустрічається другий випадок, коли $T_C \neq q \cdot t_d$. Похибка в оцінці фазового зсуву $\Delta \varphi_X$ визначалася як різниця заданого значення φ_X і обчисленого значення φ_X відповідно до виразу (5.7) шляхом імітаційного моделювання в середовищі графічного програмування LabView. При моделюванні використовувалися технічні характеристики пристроїв БУЗД і ОЕПП. Управління ЦСП і пересилання даних реалізовані через порт USB. Частота дискретизації АЦП становила $f_{\text{АЦП}} = 16$ МГц, при цьому $\Delta t_d = f_{\text{АЦП}}^{-1} = 6,25$ нс, при цьому в якості АЦП використана плата Hantek 6022BE з 8 розрядним двоканальним синхронізованим АЦП [382]. Також на виході ОЕПП мають місце сигнали $U_{3M1}(t)$ і $U_{3M2}(t)$ з встановленої проміжною частотою $f_{\text{пр}} = 85$ кГц.

Результати проведених досліджень, отримані шляхом імітаційного моделювання, наведені у вигляді графіка на рис. 5.32. На графіку показана

залежність похибки $\Delta\varphi_X$ в діапазоні вимірюваних фазових зсувів $0...360$ градусів від значення Δt , яке визначено для одного періоду вимірювального сигналу, виходячи із заданих значень $f_{\text{АЦП}}$ і $f_{\text{пр}}$, відповідно до виразу

$$\Delta t = \left| \left(f_{\text{АЦП}} / f_{\text{пр}} \right) - \left\lfloor f_{\text{АЦП}} / f_{\text{пр}} \right\rfloor \right| = |188,24 - 188| = 0,24, \quad (5.9)$$

де $\left\lfloor f_{\text{АЦП}} / f_{\text{пр}} \right\rfloor$ – ціла частина числа $(f_{\text{АЦП}} / f_{\text{пр}})$ при його округленні до меншого за модулем значенням.

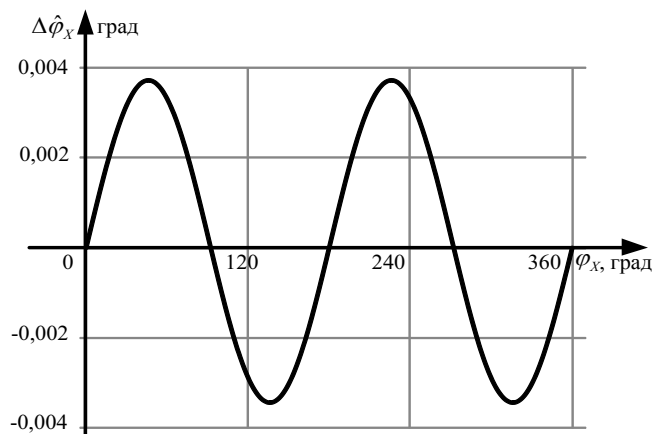


Рис. 5.32 Похибка визначення фазового зсуву $\Delta\varphi_X$ в діапазоні вимірюваних фазових зсувів $0...360$ градусів

Як випливає з отриманих результатів імітаційного моделювання, похибка $\Delta\varphi_X$ є систематичною з квазісинусоїдальним законом зміни і не перевищує $0,0037$ градуса в точках, що наближаються до $\pm\pi/2$ р. Дана складова похибки визначення може бути компенсована введенням поправочного коефіцієнта обернено пропорційного величині Δt в ПММ при визначенні інтервалу формуванні відліків в формувачах ортогональних сигналів.

Наступним найбільш характерним для даного фазового детектора є випадок, при якому похибка $\Delta\varphi_X$ залежить від величини випадкових відхилень t_d на величину Δt від ідеальних (розрахункових) моментів. Причиною таких відхилень є всі види шумів, а також випадкова нестабільність генератора тактових

імпульсів (джитер), який стає ключовим параметром, що обмежує роздільну здатність аналого-цифрової системи в цілому. Джитер сигналу тактового генератора виникає, якщо фронт імпульсу реального і ідеального генераторів відрізняються, що призводить до фазової модуляції форми цифрового сигналу. Максимальна величина джитера для тактового генератора GEYER-KXO-V97, що використовується в схемі МСЧ, становить 7 пс. Таке значення джитера при часі дискретизації 62,5 нс викликає випадкове відхилення часу дискретизації від розрахункового не більше, ніж на 1%.

Оцінка похибки $\Delta\varphi_X$ від впливу величини випадкового відхилення Δt проведена за умов, аналогічних попередньому випадку. Для цього Δt представимо як лінійний стаціонарний процес $y(nt_d)$ з розподілом у вигляді білого шуму зі спектром

$$N_0 = \sigma_y^2 / (2F_{\Pi}), \quad (5.10)$$

де F_{Π} – полоса шуму, $F_{\Pi} \rightarrow \infty$; σ_y – СКО сигналу $y(nt_d)$. При цьому $y(nt_d)$ має кінцеве значення енергетичної характеристики (процес $y(nt_d)$ розглядається для реальної фізичної системи з часом дискретизації t_d).

Результати імітаційного моделювання наведені на рис. 5.33, де позначено: 1 – залежність похибки від величини джитера при кількості усереднень 10; 2 – при кількості усереднень 100; 3 – при кількості усереднень 1000. Відповідно до рисунку 5.33, до значення $\Delta t = 2,5$ пс похибка $\Delta\varphi_X$ не залежить від кількості усереднень, а при великих значеннях джитера залежності мають невеликі розбіжності, але при цьому зберігається загальна лінія тренда для всіх трьох залежностей. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що дана складова похибки не може бути зменшена за рахунок збільшення часу осереднення. Один із способів зменшення даної похибки є застосування в якості тактових генераторів стабілізованих кварцових генераторів.

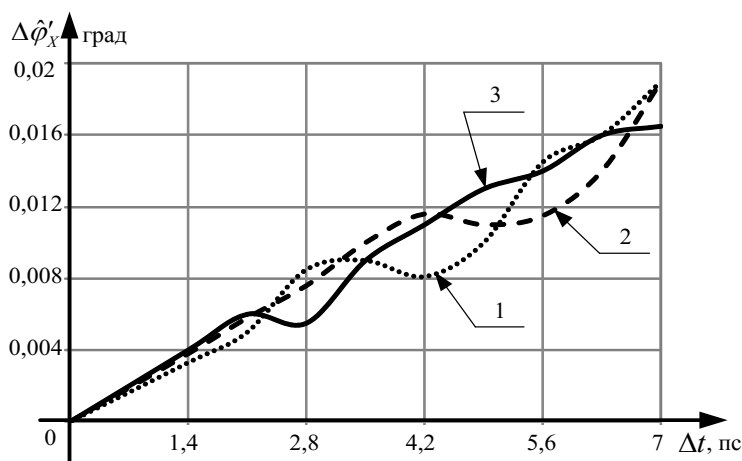


Рис. 5.33 Похибка визначення фазового зсуву $\Delta\phi'_x$ в залежності від величини джитера

Таким чином, використання розробленої імітаційної моделі структури цифрового фазометра на основі алгоритму дискретного перетворення Гільберта в середовищі графічного моделювання LabVIEW дозволило провести імітаційне моделювання похибок оцінки фазових зсувів, що виникають в дискретно-цифрових пристроях.

Проведені дослідження дають можливість оцінити похибку, яка обумовлена некрatністю 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 некрatність 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).

Виходячи з принципу роботи оптоволоконної системи діагностування механічних параметрів ПГ з ортогональним вимірювачем фази, до пристроїв генерації опорного та зонduючого сигналів – малогабаритних синтезаторів частоти (МСЧ), які входять до їх складу висуваються жорсткі вимоги по швидкодії, точності і діапазону перелаштування частоти вихідного сигналу синтезатора.

Виходячи з раніше проведених досліджень [59, 82], для побудови МСЧ, доцільно використання інтегральних мікросхем типу AD9851 [24], які мають крок перебудови за частотою менше 0,04 Гц, час перебудови не більше 10 нс і діапазон синтезованих частот від 5 МГц до 90 МГц.

Отже, параметри AD9851 забезпечують необхідну швидкодію і діапазон перебудови вихідної частоти МСЧ. Також важливим фактором, що впливає на точність вимірювання інформативного параметра в оптоелектронних вимірювальних систем, є похибка δ_M , викликана неточністю формування частоти вихідного сигналу МСЧ [82, 83].

Для оцінки похибки δ_M розглянемо алгоритм роботи і структурну схему розробленої МСЧ (рис. 5.34 а), на якій позначено: РП1, РП2 - регістри пам'яті; ДШ - дешифратор; СЧ - синтезатор частоти; ЕФ - еліптичний фільтр; УП1, УП2 - узгоджуючі пристрої; ЦСП - цифровий сигнальний процесор.

Принцип функціонування МСЧ є наступний: команди з ЦСП надходять на УП1, УП2 і керуючий ДШ, який перетворює ці команди в еквівалентний код управління РП і СЧ. Далі команди записуються в РП і в певній послідовності у переписуються в СЧ. Після циклу запису даних в СЧ, на його виході безперервно формується сигнал $U_{оп}$. Сигнал на виході СЧ відповідає синусоїді із заданою частотою. Для згладжування ефектів пов'язаних з квантуванням, на одному з виходів СЧ, встановлено ЕФ. На іншому виході СЧ формується сигнал $U_{плл}$ за допомогою вбудованого компаратора в AD9851, на вхід якого подається сигнал $U_{оп}$ з виходу СЧ. Для узгодження рівнів сигналів з наступними блоками структури ІВС використовуються УП1, УП2. У цьому разі алгоритм синтезу частоти AD9851 ґрунтується на методі прямого цифрового синтезу (DDS) [82].

У відповідності до описаного принципу функціонування була розроблена імітаційна модель СЧ виконана в середовищі графічного програмування NI LabView [244] за допомогою спеціальних модулів, що входять до її складу, а також найпростіших арифметичних операцій.

Програмний код моделі СЧ представлено на рис. 5.34 б, на якому позначено: 1 - блок завдання кількості тактів побудови сигналу $U_{оп}$; 2 - таблиця значень

синус, складена з 32 бітної розрядністю; 3 - завдання частоти сигналу $U_{оп}$; 4 - блок обчислення кроку перелаштування інтегруючого суматора; 5 - інтегратор; 6 - регістр зберігання поточного значення синтезованого сигналу; 7 - блок індикації сигналу $U_{оп}$ заданої частоти. На рис. 5.35 приведені осцилограми сигналу (рис. 5.35, а) і його амплітудного спектру (рис. 5.35, б) для частоти 24 МГц, отримані при використанні імітаційної моделі СЧ.

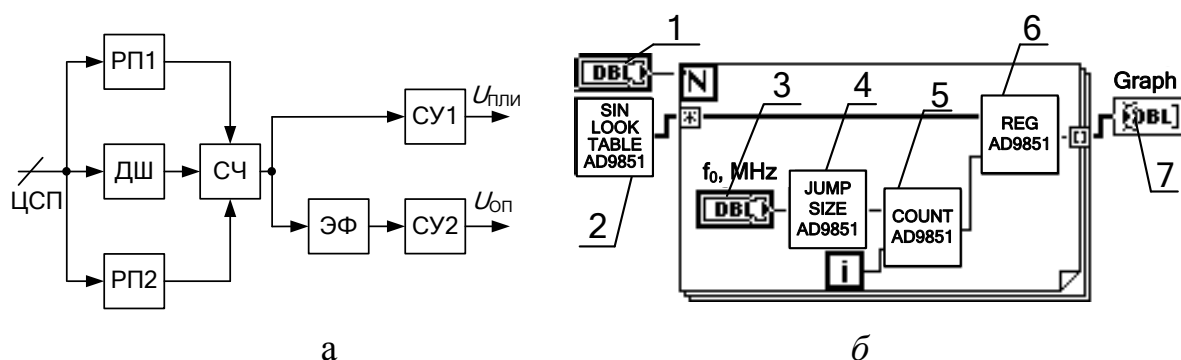


Рис. 5.34 Схема імітаційної моделі:

а – блок-схема; б – візуалізований програмний код

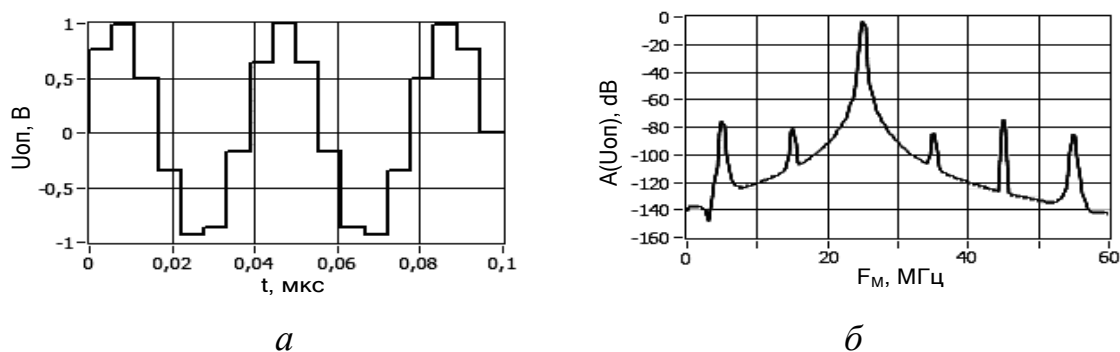


Рис. 5.35 Результати застосування імітаційної моделі:

а – осцилограма сигналу ; б – амплітудний спектр сигналу.

Висновки до розділу 5

1. Розглянуто особливості реалізації вторинних вимірювальних перетворювачів для гібридних систем діагностування механічних параметрів ПГ який показав, що для забезпечення реалізації діагностування механічних параметрів, за умов одночасного забезпечення малих розмірів, точності

визначення контрольно-діагностичних параметрів та завадостійкості до дії потужних магнітних полів внутрішнього середовища розроблено варіанти мікроелектронних вторинних вимірювальних перетворювачів для оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ.

2. Для забезпечення завадостійкості та надійності роботи гібридних систем діагностування механічних параметрів реалізовані принципи побудови систем живлення ємнісних сенсорів з цифровим виходом, які полягають в використанні автономних джерел живлення на базі технології Energy Harvesting та живленням через оптоволоконні лінії з використанням фотовольтаїчних елементів.

3. Використання розроблених оптоелектронних перетворювачів інформаційних сигналів, як компонентів систем контролю та моніторингу параметрів МД дозволяє підвищити завадостійкість передачі даних при дії потужних магнітних полів, що у свою чергу дозволяє підвищити якість контролю механічних параметрів ПГ в ході їх експлуатації.

4. Розроблені принципи побудови оптоелектронних інформаційно-вимірювальних компонентів обґрунтовують реальність їх застосування для вирішення завдання реалізації систем діагностування механічних параметрів електроенергетичного устаткування і створення на цій основі систем діагностування з підвищеною завадостійкістю, що дозволить забезпечити більш надійну роботу ПГ.

Посилання: [7, 8, 24, 25, 27, 30, 37, 38, 44, 54, 55, 59, 61, 65, 77-79, 82, 83, 85, 90, 91, 95, 107, 109, 133, 154, 172-174, 189, 196, 201, 202, 244, 247, 248, 251, 261, 264, 284-286, 298, 302, 304, 308, 313, 319, 321, 324, 340, 341, 344-346, 353, 359, 368, 369, 371-377, 379, 381-383, 386, 388-390]

див. список використаних джерел стор. 303–344.

РОЗДІЛ 6

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ

Завдання даного розділу – описати результати експериментальних досліджень досліджених в попередніх розділах інформаційно-вимірювальних каналів оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ та їх ключових компонентів. Результати експериментальних досліджень, які представлені в даному розділі, отримані під керівництвом та за безпосередньої участю автора і опубліковані в наступних працях: [24, 28, 62, 106, 151, 215, 337, 396, 397], а також представлені у протоколах випробувань та звітах з фундаментальних та прикладних НДР, які виконувались в Інституті електродинаміки НАН України.

6.1 Комп'ютеризована система діагностування повітряного зазору гідрогенераторів типу СГК 538/160-70М з компланарним ємнісним сенсором

З метою перевірки результатів досліджень компонентів систем діагностування повітряного зазору, був розроблений та створений макетний зразок (рис. 6.1). Макетний зразок призначено для експериментальної перевірки нового ємнісного способу вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах та пристрою, що його реалізує, а також методів, алгоритмів та програмно-математичного забезпечення системи.



Рис. 6.1 Загальний вигляд комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору з компланарним ємнісним вимірювачем

6.1.1 Параметри та технічна характеристика комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору

1. Тип сенсора – безконтактний, ємнісний, з компланарним розміщенням електродів.

2. Система (рис. 6.1) складається з первинного перетворювача (сенсора) та вторинного перетворювача, інтегрованого в структуру первинного перетворювача; апаратури, для реєстрації та контролю результатів вимірювань у вигляді персонального комп'ютера; з'єднувальних кабелів; оптоелектронного перетворювача інформаційних сигналів.

3. Конструкція первинного сенсора перетворювача з інтегрованим вторинним перетворювачем забезпечує мінімізацію паразитних електричних ємностей, які можуть впливати на з'єднувальні провідники між первинним (сенсором) і вторинним перетворювачем, а також між робочими електродами

сенсора, елементами його конструкції та елементами конструкції гідрогенератора.

4. Габаритні розміри (рис.6.2) :

- первинного перетворювача (сенсора) – $30\text{мм} \times 220\text{мм} \times 1\text{мм}$;
- вторинного перетворювача $30\text{мм} \times 10\text{мм} \times 2\text{мм}$.

5. Технічні характеристики:

5.1. Номінальна величина вимірювального зазору 6 мм.

5.2. Діапазон вимірювання від 2 до 10 мм (6 ± 4) мм.

5.3. Похибка вимірювання – не більше $\pm 1\%$ від величини номінального зазору ($\pm 0,06\text{мм}$).

5.4. Номінальна швидкість обертання гідрогенератора 85,7 об/хв.

5.5. Вихід вимірювача – цифровий сигнал рівня TTL.

5.6. Відстань від сенсора до системи контролю – до 10 м, у гібридному виконанні – до 30 м та 1000 м, – в залежності від оптоелектронного перетворювача інформаційних сигналів.

6. Вимірювач зберігає роботоздатність за впливу таких параметрів зовнішнього середовища:

а) температури в діапазоні:

- для сенсора – від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$;
- для вторинного перетворювача – від -15°C до $+55^{\circ}\text{C}$.

б) відносній вологості до 100% за температури $+20^{\circ}\text{C}$;

в) радіальній складовій індукції магнітного поля 1 Тесла для первинного та вторинного вимірювальних перетворювачів;

г) вібрації від 0 Гц до 20 кГц, амплітудою 40 мкм (для сенсора);

д) ударних навантажень – 30g , 11мс (для сенсора).

7. Потужність, яку споживатимуть первинний та вторинний вимірювальний перетворювач, становитиме не більше 1 Вт.

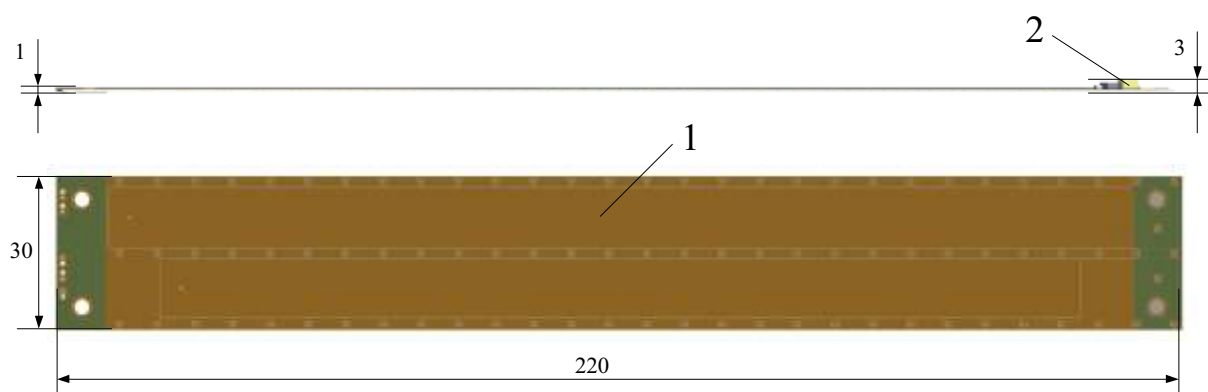


Рис. 6.2 Креслення компланарного ємнісного вимірювача для комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів типу СГК 538/160-70М:

1 – пластина сенсора; 2 – вторинний вимірювальний перетворювач CDC.

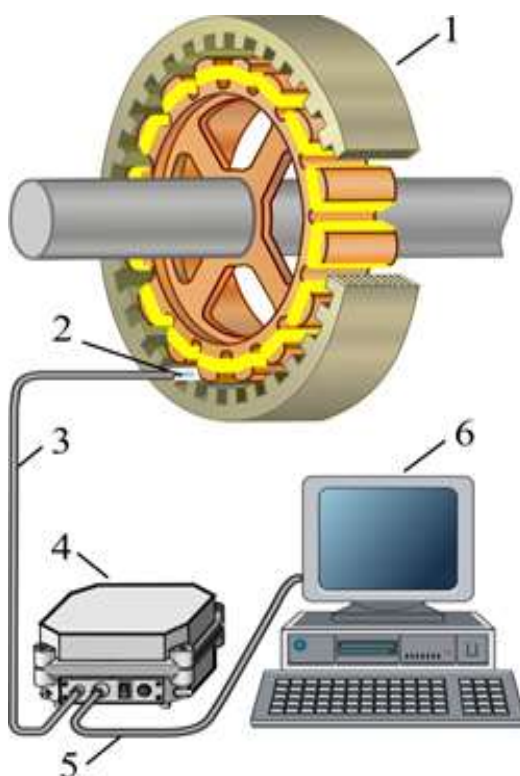


Рис. 6.3. Схема вимірювання зазору в ГГ за умов використання комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору з компланарним ємнісним вимірювачем: 1 – осердя статора ГГ; 2 – ємнісний сенсор з інтегрованим ВВП; 3 – інформаційний з'єднувальний кабель; 4 – оптоелектронний перетворювач інформаційних сигналів; 5 – оптичний інформаційний кабель; 6 – блок індикації.

6.1.2 Компоненти макетного зразка комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором

Макетний зразок комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором було створено для перевірки роботоздатності вимірювача, відпрацювання та налагодження електронної схеми на базі мікросхеми типу CDC типу AD7746.

Функція перетворення для сенсора вимірювача при вимірюванні відстані до поверхні полюса ротора ГГ СКГ 538/160-70М має вигляд

$$C_{12} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}, \quad (6.1)$$

де d – відстань між поверхнею активного електрода сенсора і поверхнею полюса ротора (зазор); $L_2 = 200$ мм – розмір активного електрода сенсора;

$b = 12$ мм – ширина електродів сенсора; s – відстань між електродами сенсора.

Розрахунковий графік функції перетворення у відповідності до виразу (6.1) наведено у розділі 4.

Витяг із протоколів лабораторних випробувань компонентів макетного зразка комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором

1. Об'єкт випробувань.

Об'єктом випробувань є компоненти макетного зразка комп'ютеризованої системи діагностування повітряного зазору між статором і ротором у гідрогенераторі СКГ 538/160 - 70М з компланарним ємнісним сенсором.

2. Мета випробувань.

2.1 Перевірка роботоздатності ємнісного вимірювача повітряного зазору і зняття метрологічних характеристик.

2.2 Дослідження впливу зміни температури на метрологічні характеристики первинного та вторинного вимірювальних перетворювачів.

2.3 Дослідження впливу електромагнітного поля промислової частоти на метрологічні характеристики вторинного вимірювального перетворювача.

3. Програма випробувань.

Визначити залежність електричної ємності $C_{12} = f(d)$ між високопотенціальним 1 та низькопотенціальним 2 електродами сенсора, де d – відстань (зазор) між загальною площиною електродів сенсора та заземленою плоскою металевою поверхнею.

4. Прилади і устаткування.

У проведенні випробувань використовувалися наступні прилади і устаткування

1) Пристрій (стенд) з мікрометричною головкою для встановлення зазначеного переміщення металевої поверхні (зміни величини d) – рис. 6.5.

2) Макет зразка комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором, який встановлюється на стенд (рис. 6.5).

Конструктивна схема комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором наведена на рис. 6.4. Вимірювач з цифровим виходом складається з таких основних частин: компланарного ємнісного сенсора з інтегрованим вторинним перетворювачем (СЦВ) та інформаційно-вимірювальної системи. СЦВ у своєму складі містить: ємнісний компланарний сенсор, який складається з високопотенціального електрода 1, низькопотенціального електрода 2, охоронного електрода 3 та мікросхеми 24-розрядного сигма-дельта перетворювача ємність-код "AD7745" з вбудованим сенсором температури 4, який використовується як вторинний вимірювальний перетворювач ВВП. ІВС у своєму складі містить такі компоненти: мікроконтролер "АТmega328" 5, мікросхему перетворювача інтерфейсів 6 та персонального комп'ютера 7 з відповідним програмним забезпеченням.

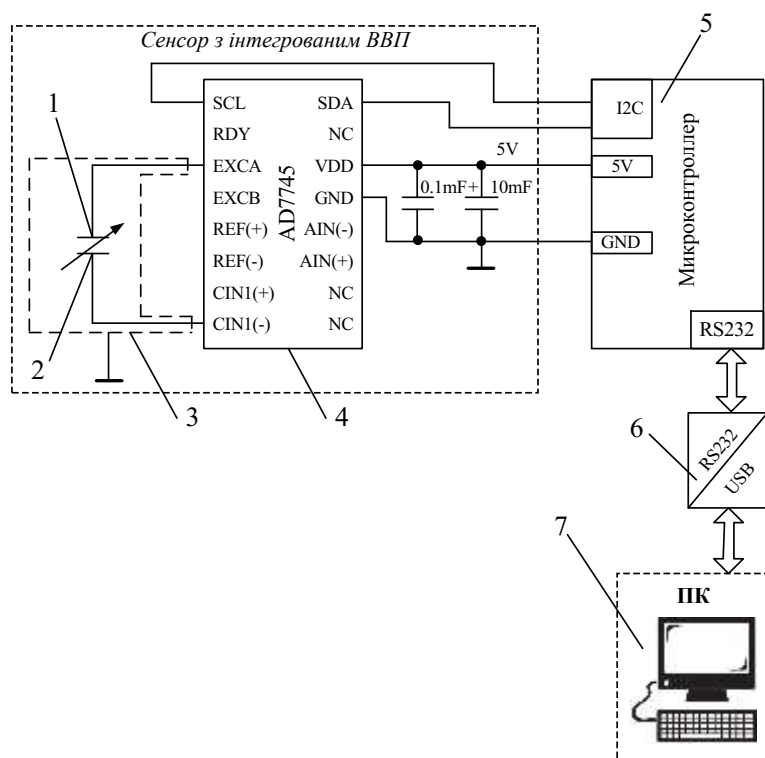


Рис. 6.4 Функціональна схема комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору з компланарним ємнісним вимірювачем

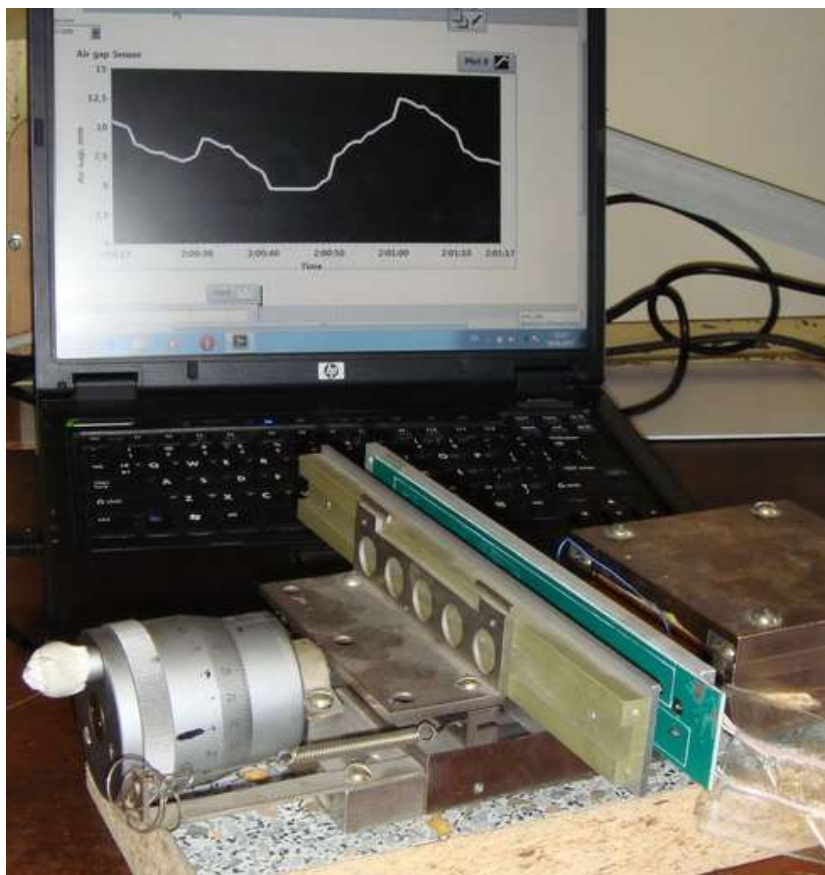


Рис. 6.5 Загальний вигляд випробувально-вимірювального стенда

5. Методика випробувань.

5.1 Випробування здійснювалося методом вимірювання електричної ємності C_{12} між електродами 1 і 2 в процесі зміни d (за допомогою мікрометричної головки стенда) від 0,5 мм до 10,0 мм, зняттям відповідних показань за допомогою інформаційно-вимірювальної системи з наступним виведенням даних на дисплей персонального комп'ютера. Функціональна схема випробувань представлена на рис. 6.6.

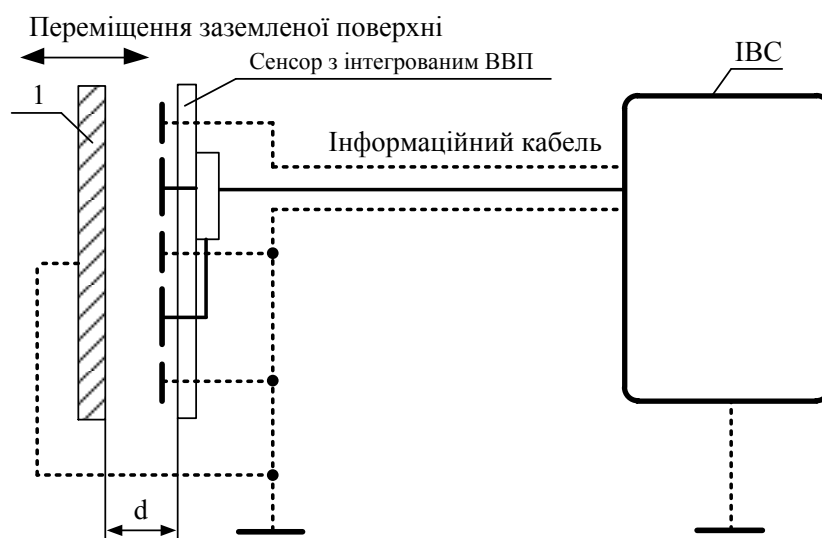


Рис. 6.6 Функціональна схема випробувань макета комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору в гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М з компланарним ємнісним сенсором

5.2 Під час випробування використано метод вимірювань електричної ємності C_{12} між електродами 1 і 2 в процесі зміни температури T °C всередині камери, де був розміщений сенсор, шляхом зняття відповідних показів за допомогою інформаційно-вимірювальної системи з наступним виведенням даних на дисплей персонального комп'ютера. Схема випробувань зображена на рис. 6.7.

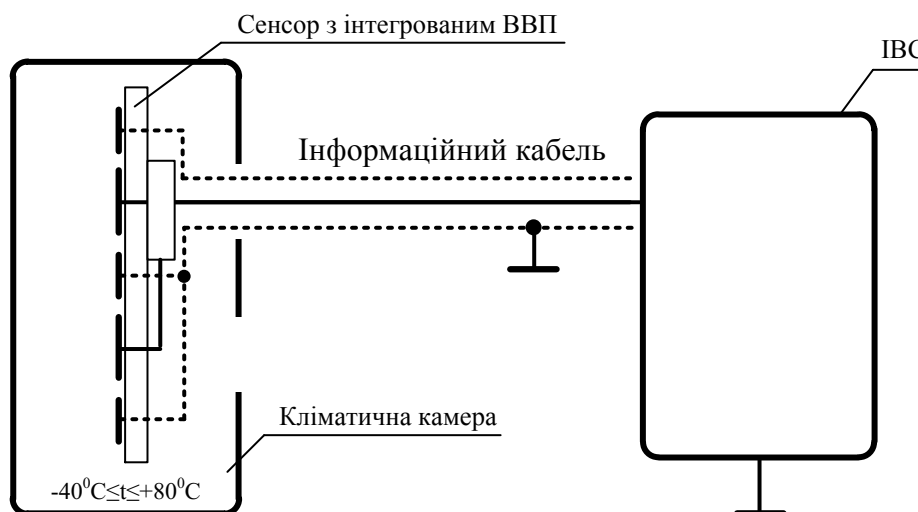


Рис. 6.7 Функціональна схема випробувань на вплив температури

5.3 Випробування здійснювалось шляхом вимірювання електричної ємності C_{12} під час зміни індукції B_λ магнітного поля від 0 до 0,67 Т, зняттям відповідних показів за допомогою інформаційно-вимірювальної системи з наступним виведенням даних на дисплей персонального комп'ютера. Для оцінки впливу магнітного поля промислової частоти застосовано спеціальний стенд, схема якого показана на рис. 6.8. У цьому випадку стенд складався з осердя 1, котушки 2, джерела живлення 3 і вимірювача сили струму 4. За подання змінної напруги U від джерела 3 на котушку 2 в повітряному зазорі λ осердя 1 виникало змінне магнітне поле з індукцією B_λ . Індукція B_λ викликала в спеціальній вимірювальній котушці 5, також розміщеній в зазорі λ , напругу U_{BK} , функціонально залежну від індукції B_λ . Перетворювач «ємність–код» 6.1 (AD7746), що підлягав випробуванням, розміщувався в зазорі поруч з вимірювальною котушкою 5 (рис. 6.8). Ємнісний сенсор 6.2, що конструктивно виконаний як частина плати вимірювача, розміщувався поза межами зазору λ . Відлік ємності C_x та температури t° здійснювався за допомогою інформаційно-вимірювальної системи 7 (рис. 6.4).

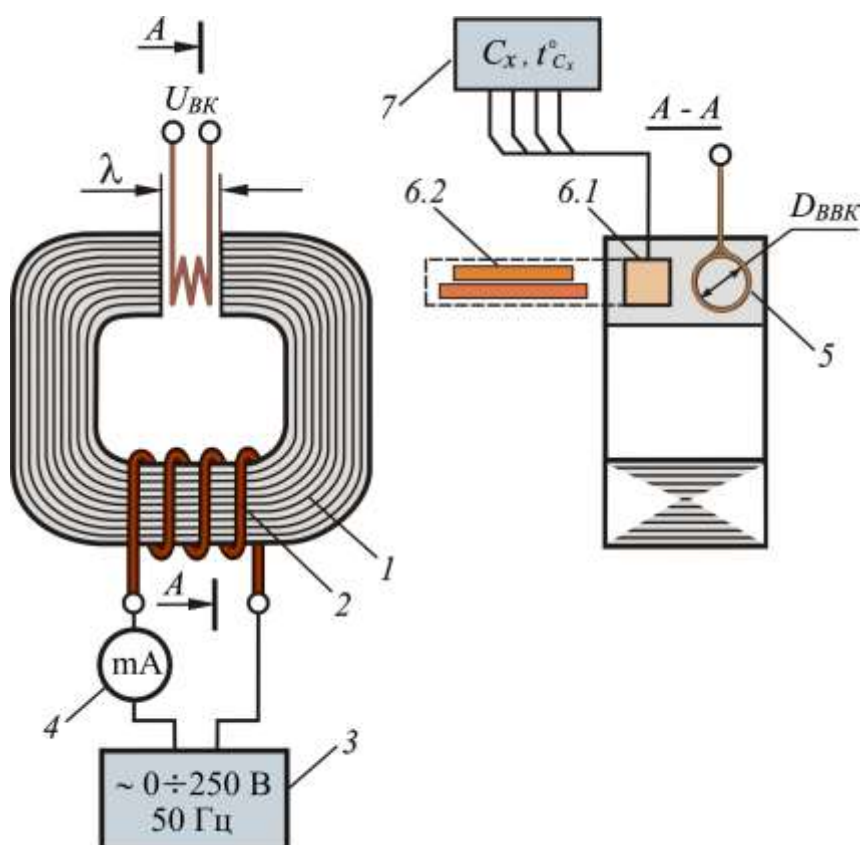


Рис. 6.8 Схема випробувань вторинного перетворювача за умов зміни індукції B_λ магнітного поля від 0 до 0,67 Т

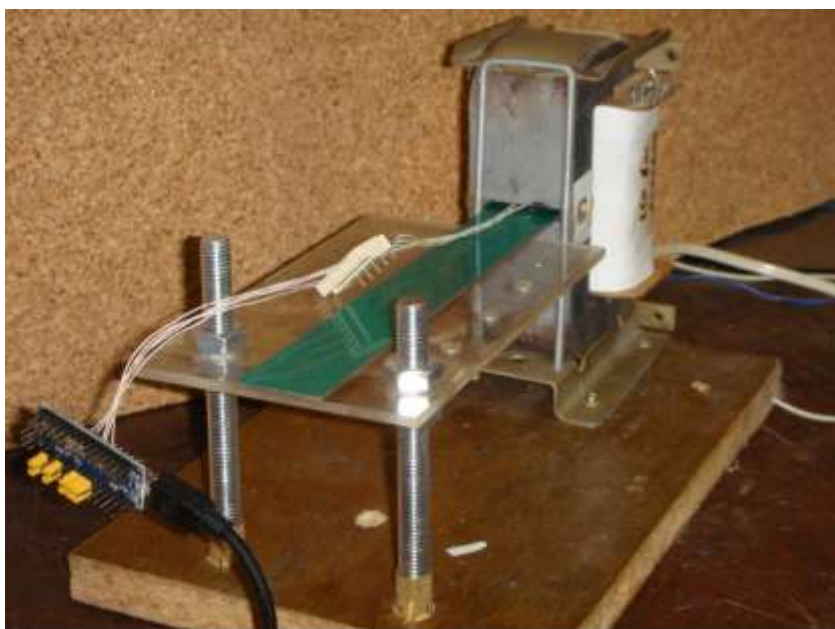


Рис. 6.9 Фото розміщення вторинного вимірювального перетворювача з метою дослідження впливу магнітного поля промислової частоти на метрологічні характеристики вторинного вимірювального перетворювача

6. Результати випробувань

6.1 Результати випробувань працездатності ємнісного вимірювача повітряного зазору і зняття метрологічних характеристик для отримання експериментальної залежності $C_{12} = f(d)$ наведені в таблиці 6.1. В процесі випробувань вимірювання в кожній точці здійснювалося з осередненням результату зі 100 однократних вимірювань для ємностей $C_{12\Pi}$ – за прямої зміни (у випадку збільшення зазору d), та C_{123} – за зворотної зміни (зменшення зазору d). Середні значення величини ємності $C_{12C} = (C_{12\Pi} + C_{123})/2$ показані в таблиці 6.1. Графік залежності $C_{12C} = f(d)$, в порівнянні з теоретично розрахованою залежністю $C_{12} = f(d)$, зображено на рис. 6.10.

Таблиця 6.1

Результати випробувань макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором

d , мм	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
$C_{12\Pi}$, 10^{-15} Ф	0,102	0,108	0,121	0,139	0,162	0,186	
C_{123} , 10^{-15} Ф	0,106	0,112	0,125	0,143	0,166	0,191	
C_{12C} , 10^{-15} Ф	0,104	0,11	0,123	0,141	0,164	0,1885	
d , мм	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$C_{12\Pi}$, 10^{-15} Ф	0,211	0,237	0,263	0,288	0,312	0,335	0,357
C_{123} , 10^{-15} Ф	0,215	0,240	0,265	0,290	0,314	0,336	0,359
C_{12C} , 10^{-15} Ф	0,213	0,2385	0,264	0,289	0,313	0,3355	0,358
d , мм	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
$C_{12\Pi}$, 10^{-15} Ф	0,378	0,397	0,416	0,436	0,454	0,471	0,568
C_{123} , 10^{-15} Ф	0,379	0,400	0,419	0,437	0,455	0,470	0,569
C_{12C} , 10^{-15} Ф	0,3785	0,3985	0,4175	0,4365	0,4545	0,4705	0,5685

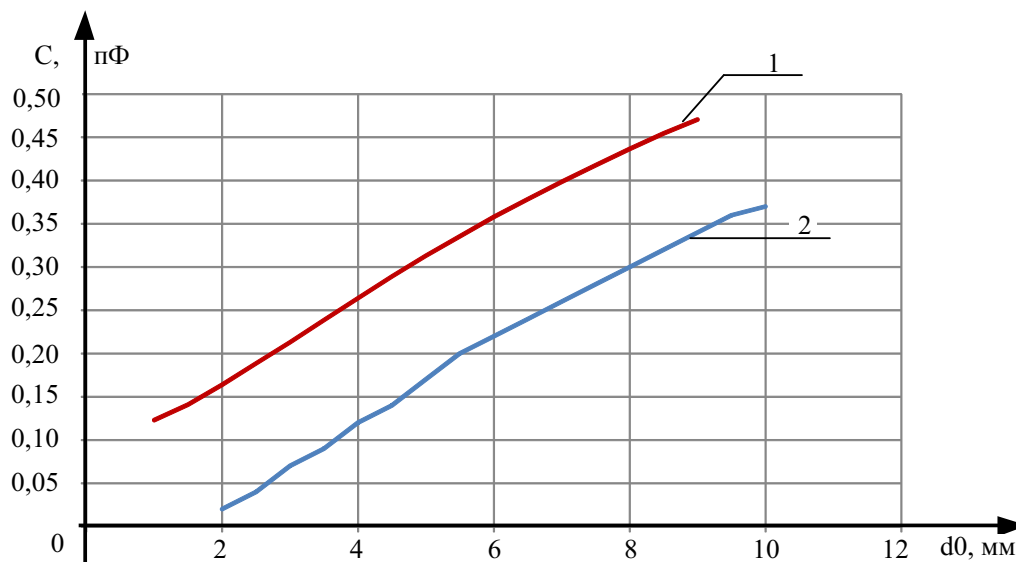
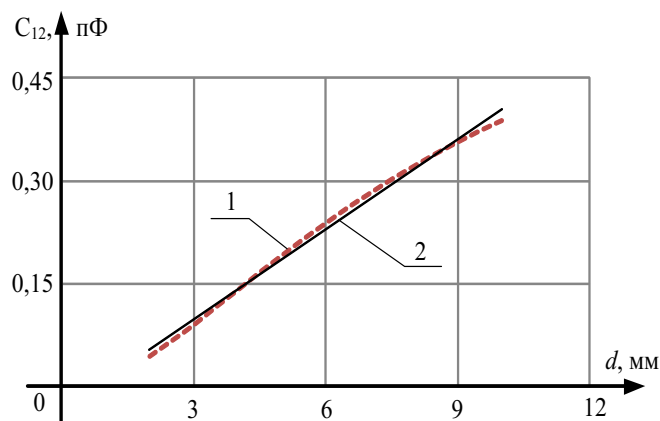


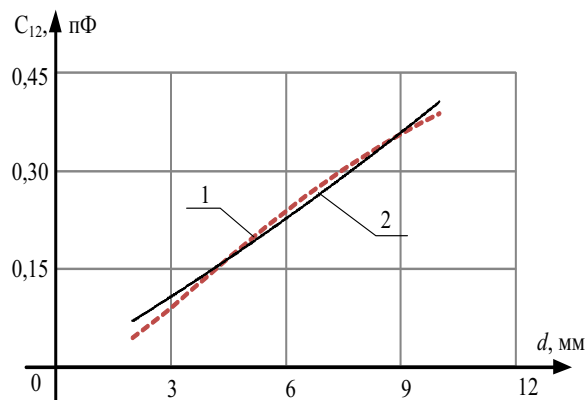
Рис. 6.10 Графіки залежності $C_{12} = f(d)$: 1 – експериментально отримана залежність; 2 – розрахункова залежність.

В результаті проведеного експериментального дослідження було отримано 20 базових точок для розрахунку експериментальної функціональної залежності значення ємності від розміру повітряного зазору. Для можливості застосування отриманих залежностей з метою лінеаризації експериментально отриманої функції перетворення даного ємнісного сенсора з компланарними електродами програмними засобами можуть бути використані методи, засновані на регресивному аналізі експериментально отриманих даних, що описують функціональні залежності, які детально викладені в розділі 3.

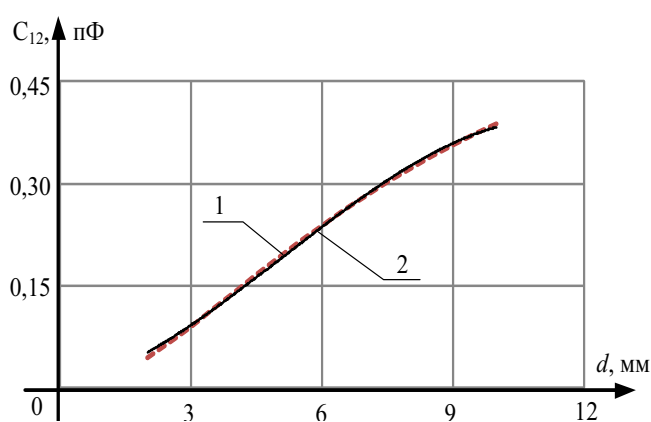
Графіки отриманих функціональних залежностей наведено на рис. 6.11 а-г, на яких: 1 – графік експериментальної залежності, 2 – графік функції апроксимації. У випадку використання лінійної моделі маємо залежність $C_{12} = 0,0439d - 0,0344$, графік якої приведено на рис. 6.11, а. При застосуванні поліноміальної моделі другого порядку – залежність $C_{12} = (0,7d^2 + 33,7d) \cdot 10^{-3}$ (рис. 6.11, б). Для моделі третього порядку – $C_{12} = -0,0005d^3 + 0,0069d^2 + 0,0141d$ (рис. 6.11, в). Для моделі четвертого порядку – $C_{12} = (0,06d^4 - 1,7d^3 + 14d^2 + 0,5d) \cdot 10^{-3}$ (рис. 6.11, г).



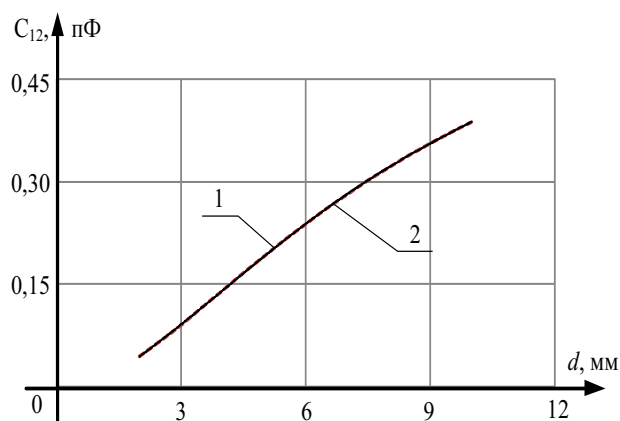
а)



б)



в)



г)

Рис. 6.11 Результати апроксимації

Внаслідок аналізу отриманих функціональних залежностей, обчислених за 20 точками, проведена оцінка, в результаті якої було отримано: для лінійної моделі – $Q^2 = 0,9946$; для поліноміальної моделі при $m=2$ – $Q^2 = 0,9863$; для поліноміальної моделі при $m=3$ – $Q^2 = 0,9989$; для поліноміальної моделі при $m=4$ – $Q^2 \approx 1$.

Відповідно до проведеного аналізу 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. Тобто, найбільша похибка апроксимації серед розглянутих моделей має місце у випадку використання поліноміальної моделі другого порядку, а найменша похибка – за

використання поліноміальної моделі четвертого порядку. Використання поліномів більш високих порядків не є доцільним, так як вони не зменшують значення похибки апроксимації, а в деяких випадках використання поліноміальних моделей високих порядків можуть призвести в проміжних точках апроксимації до аномально великих значень похибок.

Процедури розрахунків регресійних коефіцієнтів та побудови функціональної залежності зміни їх ємності від значення експериментально заданого повітряного зазору здійснювалися для області визначення залежності з використанням засобів MS Excel та NI LabVIEW.

6.2 Результати вимірювань ємності $C_{12П}$ у випадку прямої зміни температури T , ємності C_{123} та зворотній зміни температури T показані в таблиці 6.2. Графіки залежностей $C_{12П} = f(T)$ і $C_{123} = f(T)$ показані на рис. 6.12. Графіки похибок $\delta_{12П} = (C_{12П} - C_H) / C_H \cdot 100\%$ і $\delta_{123} = (C_{123} - C_H) / C_H \cdot 100\%$, зумовлених впливом температури, показані на рис. 6.13 ($C_H = 805,00 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$) – ємність сенсора за температури в приміщенні до початку випробувань $T = 20^\circ\text{C}$).

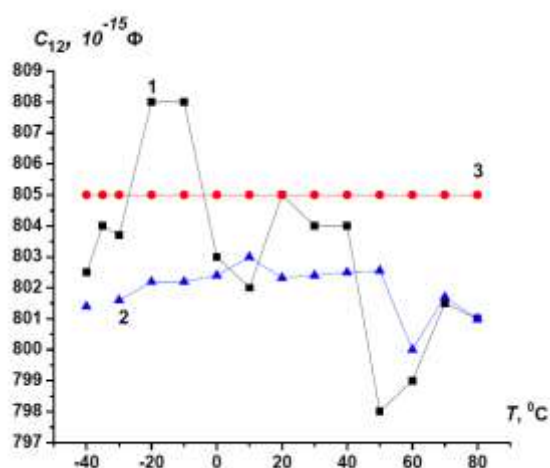


Рис. 6.12 Графіки залежностей
 $C_{12П} = f(T)$ і $C_{123} = f(T)$

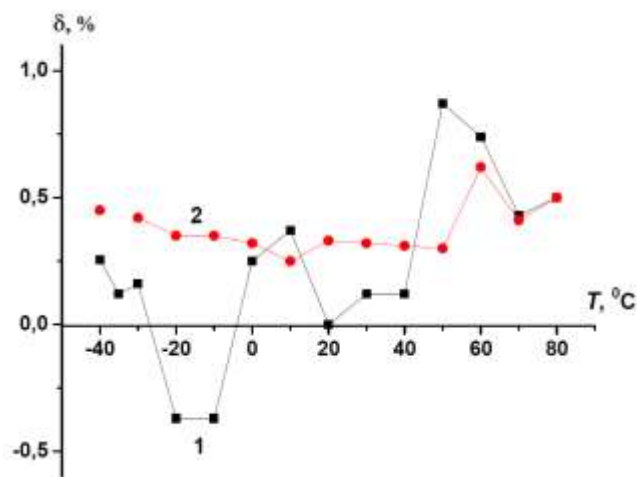


Рис. 6.13 Графіки похибок
 $\delta_{12П}$ і δ_{123}

Таблиця 6.2

**Результати випробувань первинного та вторинного перетворювача
макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору
з компланарним ємнісним сенсором**

$T, ^\circ\text{C}$	$C_{12}, 10^{-15} \text{ Ф}$	$\Delta C_{12}, 10^{-15} \text{ Ф}$	$\delta, \%$
-40	802,50	2,5	0,255
-35	804,00	1	0,12
-30	803,70	1,3	0,16
-20	808,00	-3	-0,37
-10	808,00	-3	-0,37
-10	808,00	-3	-0,37
0	803,00	2	0,25
10	802,00	3	0,37
20	805,00	0	0
30	804,00	1	0,12
40	804,00	1	0,12
50	798,00	7	0,87
60	799,00	6	0,74
70	801,50	3,5	0,43
80	801,00	4	0,5
70	801,70	3,3	0,41
60	800,00	5	0,62
50	802,55	2,45	0,3
40	802,50	2,5	0,31
30	802,40	2,6	0,32
20	802,32	2,68	0,33
10	803,00	2	0,25
0	802,40	2,6	0,32
-10	802,20	2,8	0,35
-20	802,20	2,8	0,35
-30	801,60	3,4	0,42
-40	801,40	3,6	0,45

6.3 У відповідності до описаної в п.5.3 методики випробувань, спочатку була досліджена калібрована вимірювальна котушка 5 для визначення функціональної залежності $U_{BK} = f(B_{\lambda})$. Визначення U_{BK} в котушці 5 здійснювалося за наступною залежністю [137]

$$U_{BK} = B_{\lambda} \cdot S \cdot N \cdot \omega, \quad (6.2)$$

де B_{λ} – магнітна індукція в зазорі λ ; S – площа котушки 5, через яку проходить магнітний потік; $N = 10$ – кількість витків котушки 5; $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{с}^{-1}$ – частота.

У свою чергу

$$S = \frac{\pi}{4} (D_{BBK} + 2d_{II})^2, \quad (6.3)$$

де $D_{BBK} = 10,4$ мм – внутрішній діаметр вимірювальної котушки 5; $d_{II} = 0,1$ мм – діаметр проводу вимірювальної котушки 5.

Використовуючи (6.2) і (6.3), з урахуванням числових значень, визначимо, що

$$U_{BK} = 0,267 \cdot B_{\lambda}, \quad (6.4)$$

і

$$B_{\lambda} = \frac{U_{BK}}{0,267}. \quad (6.5)$$

Результати випробувань котушки наведено в таблиці 6.3. Результати вимірювань ємності $C_{12\Pi}$ з осередненням результату вимірювання з 10 однократних вимірювань для ємностей $C_{12\Pi}$ – при прямій зміні значення $B_{\lambda\Pi}$ магнітного поля від 0 до 0,67 Т та C_{123} – при зворотній зміні значення $B_{\lambda3}$ наведено в таблиці 6.4.

На рис. 6.14 наведено залежності ємностей $C_{12П}$ та C_{123} від зміни індукції магнітного поля. Як видно з таблиці 6.4 та рис. 6.14, вплив індукції B_{λ} магнітного поля величиною до 0,63 Т на зразок ємнісного вимірювача зазору з цифровим виходом викликає незначне максимальне відхилення вимірюваних величини від їх середнього значення (на 0,0006pF) і, відповідно, не призводить до похибки у вимірюванні повітряного зазору.

Таблиця 6.3

Результати випробувань каліброваної вимірювальної котушки 5

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_{BK}, \text{В}$	$B_{\lambda}, \text{Т}$
31	0,2	2,45	0,09
61	0,45	5,05	0,19
86	0,65	7,15	0,27
120	0,95	9,65	0,36
149	1,2	11,90	0,45
185	1,4	14,75	0,55
210	1,6	17,00	0,64
224	1,8	17,95	0,67

Таблиця 6.4

Результати випробувань вторинного перетворювача макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору на вплив середнього значення магнітної індукції B_{λ} в повітряному зазорі

$B_{\lambdaП}, \text{Т}$	$C_{12П}, \text{pF}$	$t, ^\circ\text{C}$	$B_{\lambdaЗ}, \text{Т}$	C_{123}, pF	$t, ^\circ\text{C}$
0,10	0,7739	20,1	0,10	0,7734	23,3
0,15	0,7741	20,2	0,148	0,7738	23,3
0,18	0,7735	20,3	0,151	0,7735	23,3
0,22	0,7740	20,4	0,19	0,7742	23,3
0,26	0,7736	20,5	0,27	0,7736	23,3
0,30	0,7739	20,7	0,29	0,7735	23,4
0,34	0,7737	20,9	0,33	0,7733	23,4
0,39	0,7732	21,0	0,38	0,7736	23,5
0,43	0,7734	21,3	0,42	0,7730	23,6
0,47	0,7735	21,8	0,48	0,7735	23,7
0,54	0,7740	21,9	0,53	0,7738	23,7
0,60	0,7741	22,7	0,55	0,7734	23,7
0,66	0,7736	23,2	0,59	0,7734	23,7
			0,63	0,7737	23,7

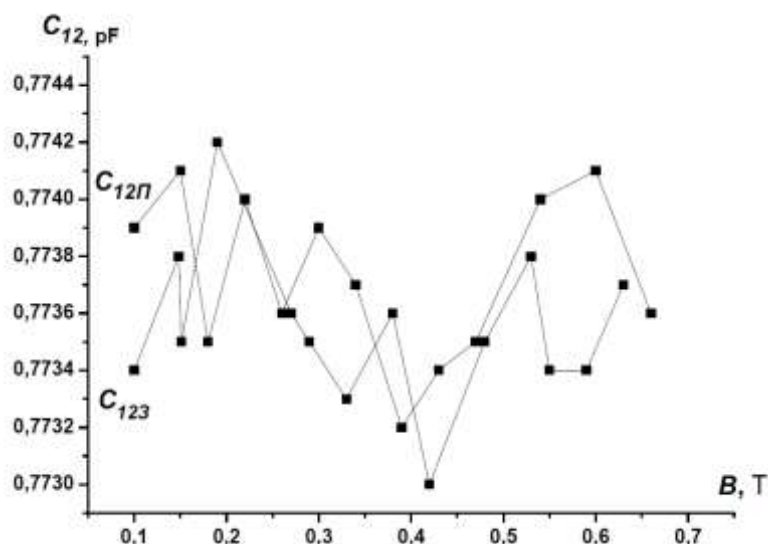


Рис. 6.14 Вплив індукції B_λ магнітного поля на стабільність визначення ємностей $C_{12\Pi}$ та C_{123}

Результат розрахунку похибок $\delta_{\Pi, B=0,1\text{ Т}}$ (у випадку підвищенні індукції) та $\delta_{3, B=0,1\text{ Т}}$ (при зниженні індукції) відносно початкового значення ємності C_0 (значення індукції $B_\lambda = 0\text{ Т}$) при зміні індукції магнітного поля B_λ приведено в табл. 6.5. Індукція B_λ змінювалась від 0,1 до 0,63 Т.

Таблиця 6.5

Результати розрахунку похибок

$B_{\lambda\Pi}, \text{ Т}$	$\delta_{\Pi} = \frac{C_0 - C_{12\Pi}}{C_0} \cdot 100\%$	$B_{\lambda3}, \text{ Т}$	$\delta_3 = \frac{C_0 - C_{123}}{C_0} \cdot 100\%$
0,10	0,7314	0,10	0,7987
0,15	0,7132	0,148	0,7406
0,18	0,7828	0,151	0,7841
0,22	0,7236	0,19	0,7010
0,26	0,7692	0,27	0,7733
0,30	0,7302	0,29	0,7874
0,34	0,7626	0,33	0,8109
0,39	0,8293	0,38	0,7690
0,43	0,7946	0,42	0,8547
0,47	0,7831	0,48	0,7792
0,54	0,7175	0,53	0,7487
0,60	0,7087	0,59	0,7965
0,66	0,7727	0,63	0,7600

В табл. 6.6 наведено результати розрахунку відцентрованих значень похибок δ'_Π та δ'_3 , відповідний графік похибок приведено на рис. 6.15

Як видно з табл. 6.5 та рис. 6.14, внесення ємнісного вимірювача зазору з цифровим виходом в магнітне поле величиною від 0,1 до 0,61 Т викликає зміщення показів на адитивну складову, яка виникає в момент дії поля, і є постійною в першому наближенні та зникає при винесенні вимірювача із поля. Для з'ясування природи явищ, що породжують адитивну складову похибки вимірювання необхідне проведення додаткових випробувань.

Таблиця 6.6

Результати розрахунку похибок

$B_{\lambda\Pi}, \text{ Т}$	δ'_Π	$B_{\lambda3}, \text{ Т}$	δ'_3
0,15	-0,0588	0,148	-0,0312
0,18	0,0114	0,151	0,0127
0,22	-0,0483	0,19	-0,0711
0,26	-0,0023	0,27	0,0018
0,30	-0,0416	0,29	0,0160
0,34	-0,0090	0,33	0,0397
0,39	0,0582	0,38	-0,0026
0,43	0,0233	0,42	0,0838
0,47	0,0116	0,48	0,0078
0,54	-0,0544	0,53	-0,0230
0,60	-0,0633	0,59	0,0321
0,66	0,0012	0,63	0,0252

Як видно із табл. 6.6 та рис. 6.15 вплив зміни індукції B_λ електромагнітного поля величиною від 0,1 до 0,61 Т на зразок ємнісного вимірювача зазору з цифровим виходом викликає незначну флуктуацію похибки вимірювання, яка є на рівні похибки АЦП, що входить до складу мікросхеми CDC AD7746. Отже, зміна індукції B_λ електромагнітного поля величиною від 0,1 до 0,63 Т не призведе до виникнення значної похибки вимірювання повітряного зазору.

Загальний час впливу магнітного поля на схему вторинного вимірювального перетворювача (від його мінімального до максимального значення) склав 30 хв.

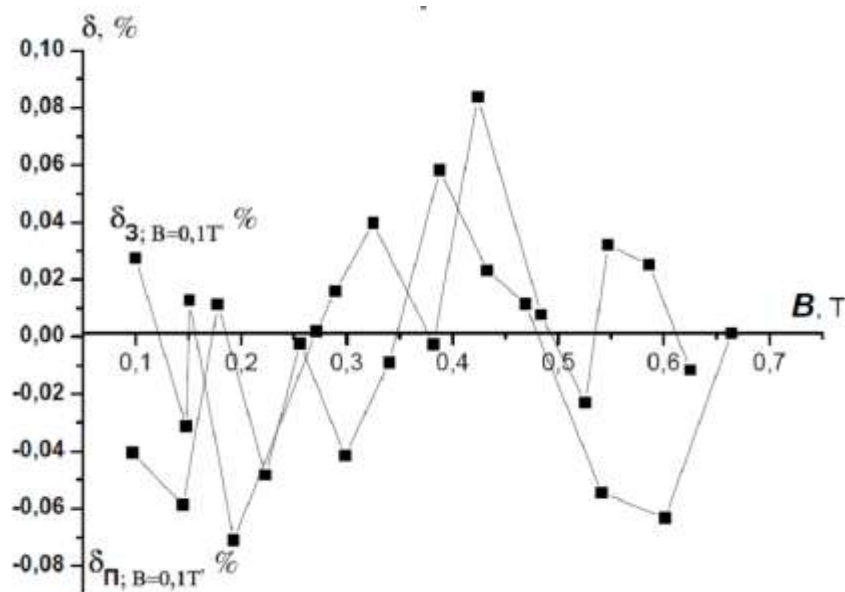


Рис. 6.15 Похибка стабільність визначення значення ємності в залежності від значення індукції магнітного поля B_λ

7. Висновки згідно випробувань

7.1. Отримані результати підтверджують працездатність макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором.

7.2. Отримані результати підтверджують правильність застосування розрахункової моделі сенсора для визначення функції перетворення. Різниця в графіках теоретичної та експериментальної залежності зумовлена додаванням паразитної ємності $C_{п12}$ між електродами 1 і 2 через діелектричну підкладку, та паразитної монтажної ємності, що виникає при підключенні ємнісного сенсора до мікросхеми.

7.3 Отримані результати свідчать про те, що електрична ємність компланарного сенсора з запропонованою системою електродів не змінюється в діапазоні температур від -40 до $+80$ °C. Це підтверджує можливість застосування ємнісного сенсора з запропонованою системою електродів для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М в діапазоні температур від -40 до $+80$ °C.

7.4. Отримані результати продемонстрували, що внесення вторинного вимірювального перетворювача вимірювача зазору магнітне поле величиною від 0,1 до 0,61 Т викликає зміщення показів на адитивну складову, яка виникає в момент дії поля, є постійною в першому наближенні і зникає при винесенні вимірювача із поля, та може бути компенсована програмними методами. Це підтверджує можливість застосування ємнісного датчика з цифровим виходом для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором (в діапазоні 6 ± 4 мм) в капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М при дії індукції магнітного поля від 0,1 до 0,63 Т.

6.2 Основні компоненти макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю зусиль пресування в ТГ типу ТГВ-200 та ТГВ-300, при експлуатації та в процесі складання

Для перевірки теоретичних результатів та проведення експериментальних досліджень створених компонентів систем контролю та технічної діагностики зусиль пресування в ТГ типу ТВВ-200 та ТВВ-300 при експлуатації, був розроблений та створений макетний зразок вимірювача зусилля пресування (рис. 5.13 див. розділ 5). Макетний зразок призначений для експериментальної перевірки нового способу стабілізації та вимірювання тиску пресування й пристрою, що його реалізує.

На спосіб вимірювання зусилля пресування та пристрій, що його реалізує, було подано заявку на патент України [156]. Мета винаходу – підвищення точності вимірювання ходу тарілчастих пружин, що дає можливість більш ефективно контролювати процес стабілізації тиску пресування осердя статора за допомогою силових акумуляторів, а значить підвищити надійність машини та подовжити її строк служби.

Для перевірки теоретичних положень, що стосуються виключно процесу складання, були розроблені компоненти для макетного зразка вимірювача зусилля пресування (див. розділ 4 та 5), а також створений випробувально-вимірювального стенд, рис. 6.24.



Рис. 6.16 Випробувально-вимірювальний стенд компонентів комп'ютеризованої системи контролю зусиль пресування осердя статора при складанні

6.2.1 Багатoeлементний секторальний ємнісний сенсор

Сенсор призначений для встановлення під стяжні гайки осердя для контролю зусиль при затягуванні гайок стяжних ребер в процесі ремонту генераторів та контролю зусилля під гайками після експлуатації. Сенсор може бути використаний під час «напівдиференціального» або «диференціального» способів вимірювання інформативної складової ємності. Це дозволило підвищити точність сенсора завдяки усуненню впливу на результат вимірювання дестабілізуючих неінформативних факторів таких, як температура і вологість газового середовища, в якому знаходиться сенсор, бо функція перетворення залежить від відношення ємностей: змінної інформативної і постійної зразкової. Використання секторальної структури дозволяє також мінімізувати дію впливу перекосу сенсора стосовно конструктивних елементів вимірювача на результат вимірювання.

Результати випробувань дослідження роботоздатності сектора багатoeлементного компланарного ємнісного сенсора і зняття метрологічних

характеристик для отримання експериментальної залежності $C_{12} = f(d_x)$ наведені в таблиці 6.7. В процесі випробувань вимірювання в кожній точці здійснювалися з осередненням результату зі ста однократних вимірювань. Графік залежності $C_{12} = f(d_x)$ та отримана функція апроксимації наведені на рис. 6.17.

Висновки за результатами випробувань

Отримані результати підтверджують роботоздатність макетного зразка сектора ємнісного сенсора системи контролю зусиль. Це підтверджує можливість застосування ємнісних сенсорів як первинних вимірювальних перетворювачів для системи стабілізації та контролю тиску пресування осердя статора потужних генераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300.

Таблиця 6.7

Результати випробувань макетного зразка сектора ємнісного сенсора системи контролю зусиль

d , мм	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$C_{12П}$, 10^{-15} Ф	0,2702	0,32	0,38	0,43	0,47	0,52	0,55	0,59	0,62

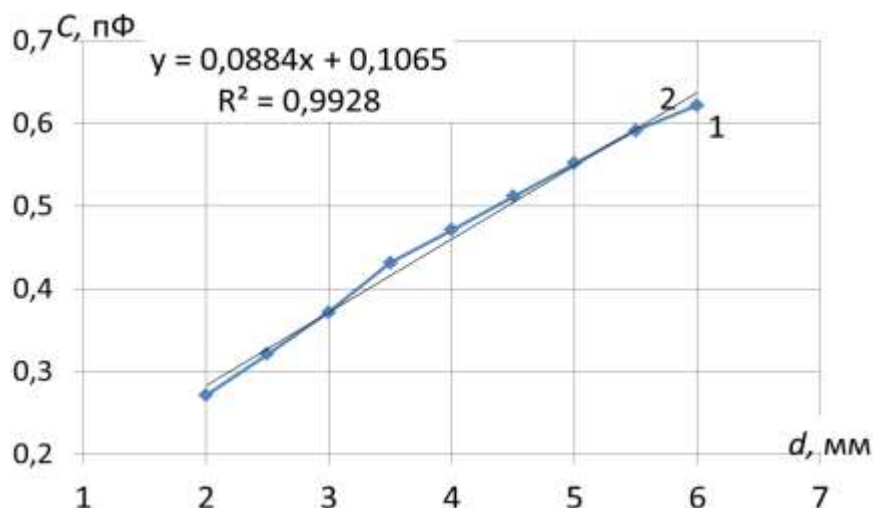


Рис. 6.17 Графіки залежності $C_{12} = f(d)$: 1 – експериментально отримана залежність; 2 – лінійна функція апроксимації

6.2.2. Ємнісний сенсор з концентричними компланарними електродами

Результати вимірювань з осередненням результату вимірювання зі 100 однократних вимірювань для ємностей C_{CL_P} – при прямій зміні зазору d_x та C_{CL_Z} – при зворотній зміні зазору d_x , а також їх середня величина ємності $C_{CL\_C} = (C_{CL\_P} + C_{CL\_Z}) / 2$ показані в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8

Результати випробувань

d , мм	0,01	0,03	0,05		0,08	0,10	0,13	0,15
$C_{CL\_P}, 10^{-15}$ Ф	7,946	6,965	6,355		5,553	5,139	4,625	4,324
$C_{CL\_Z}, 10^{-15}$ Ф	7,836	7,113	6,389		5,756	5,122	4,713	4,304
$C_{CL\_C}, 10^{-15}$ Ф	7,891	7,039	6,372		5,654	5,131	4,669	4,314
d , мм	0,18	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30	0,33	0,35
$C_{CL\_P}, 10^{-15}$ Ф	3,944	3,760	3,442	3,249	3,004	2,837	2,621	2,491
$C_{CL\_Z}, 10^{-15}$ Ф	3,979	3,654	3,407	3,160	2,979	2,797	2,642	2,486
$C_{CL\_C}, 10^{-15}$ Ф	3,962	3,707	3,424	3,205	2,991	2,817	2,631	2,488
d , мм	0,38	0,40	0,43	0,45	0,48		0,50	
$C_{CL\_P}, 10^{-15}$ Ф	2,3225	2,2251	2,0842	2,0026	1,8888		1,8161	
$C_{CL\_Z}, 10^{-15}$ Ф	2,3618	2,2370	2,1309	2,0248	1,9205		1,8161	
$C_{CL\_C}, 10^{-15}$ Ф	2,3421	2,2311	2,1076	2,0137	1,9046		1,8161	

Висновки згідно випробувань

Отримані результати підтверджують роботоздатність макетного зразка концентричного ємнісного сенсора системи контролю зусиль. Це підтверджує можливість застосування ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами для систем контролю тиску пресування осердя статора потужних генераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300 при їх складанні.

6.2.3 Дослідження впливу магнітних завад на вторинний вимірювальний перетворювач напівдиференціального сенсора зусиль

Елементи вимірювача зусиль в стяжних призмах, а саме: ємнісний сенсор і частина вторинного перетворювача знаходяться на призмі під стяжною гайкою, і, ясна річ, піддаються впливу сильних магнітних полів промислової частоти.

Електронний вимірювач ємнісного сенсора зусиль, створеного на базі CDC конвертора AD7745, було випробувано на вплив магнітного поля на спеціальному стенді, схема якого показана на рис. 6.18. Вимірювач призначений для перетворення ємність-код напівдиференціального сенсора зусиль, у якого C_1 – ємність змінного конденсатора, а C_2 – ємність постійного.

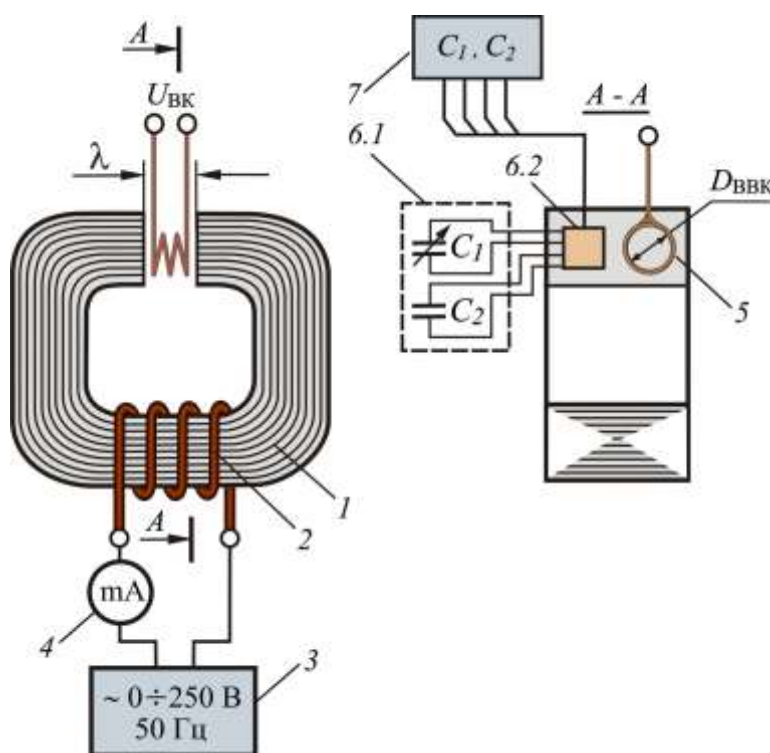


Рис. 6.18 Схема випробувань

Стенд складається з осердя 1, котушки 2, джерела живлення 3 і вимірювача сили струму 4. За подачі змінної напруги на котушку 2 в повітряному зазорі λ осердя 1 створювалося змінне магнітне поле з індукцією B_λ , яке викликає е.р.с. в спеціальній вимірювальній котушці 5, також розміщеній в зазорі λ . Вимірювач

6.2 розміщувався в зазорі поруч з котушкою 5, а сенсор 6.1 знаходився поза межами зазору λ , і на нього не було впливу магнітного поля. Відлік показань вимірювача (C_1, C_2) здійснювався за допомогою пристрою індикації 7. Загальний час впливу магнітного поля (від його мінімального до максимального значення) на вимірювач 6.2 склав 30 хв.

В розрахунках використовувалися дані, отримані під час дослідження мікроелектронних компонентів вторинного вимірювального перетворювача системи контролю та діагностики повітряного зазору потужних генераторів.

Результати випробувань відображені в таблиці 6.9. На рисунках показано: рис. 6.19 – відносна похибка ємності C_1 , зумовлена впливом магнітного поля, рис. 6.20 – відносна похибка ємності C_2 , зумовлена впливом магнітного поля.

Таблиця 6.9

Результати випробувань

I , мА	10	10 0	200	310	510	800	1000	1200	1500	2000	2430
U_{BK} , мВ	0,9	8,2	15,3	22,9	36,9	57,5	71,2	85,4	105,5	137,3	163,0
B_λ , Т	0,003	0,031	0,057	0,086	0,138	0,215	0,27	0,320	0,395	0,514	0,610
C_1 , пФ	24,7	24,5	24,6	24,5	24,55	24,65	24,5	24,7	24,85	24,55	24,75
δ_1 , %	0	0,8	0,4	0,8	0,6	0,2	0,8	0	-0,4	0,6	-0,2
C_2 , пФ	24,7	24,8	24,70	24,6	24,55	24,65	24,6	24,7	24,6	24,55	24,65
δ_2 , %	0	-0,4	0	0,4	0,6	0,2	0,4	0	0,4	0,6	0,2

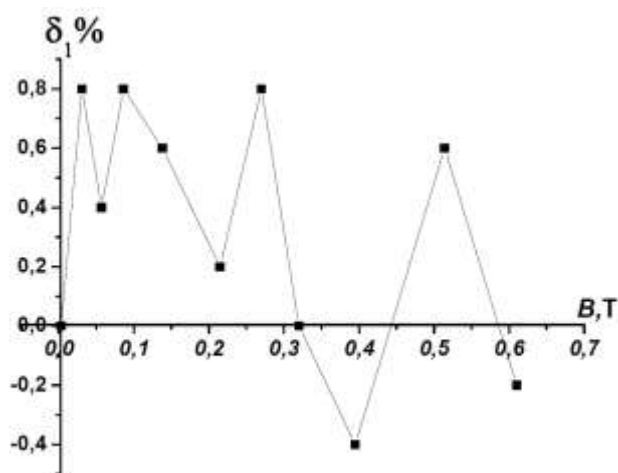


Рис. 6.19 Графік відносної похибки вимірювання ємності C_1 , зумовлена впливом магнітного поля

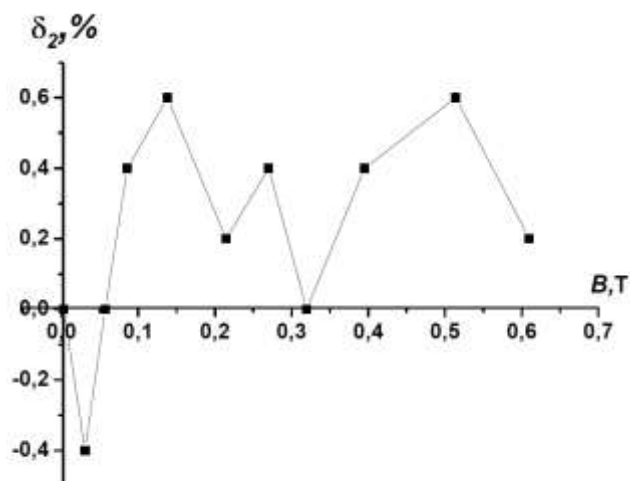


Рис. 6.20 Графік відносної похибки вимірювання ємності C_2 , зумовленої впливом магнітного поля

Висновки за результатами випробувань

Випробування вторинного вимірювального перетворювача на основі конвертора CDC типу AD7745 стосовно впливу індукції B_λ магнітного поля промислової частоти величиною до 0,61 Т показали, що дія поля викликає незначне відносне відхилення вимірюваних величин: ємності $C_1 - 0,8\%$ і ємності $C_2 - 0,6\%$. Це відхилення може бути враховано програмно на основі лінеаризації функції перетворення $N = f(C)$ з урахуванням значення індукції B_λ , що діє в момент вимірювання. Таке врахування може бути організоване за умови використання одного із каналів конвертора CDC типу AD7745 для вимірювання напруги на виході спеціальної каліброваної вимірювальної котушки, яка в даному випадку використовується як вимірювач індукції B_λ магнітного поля.

6.3 Компоненти макетного зразка комп'ютеризованої системи контролю биття циліндричних поверхонь валів ПГ

Параметри та технічна характеристика комп'ютеризованої системи контролю биття циліндричних поверхонь валів ПГ аналогічні параметрам та

характеристикам системи контролю повітряного зазору, тому приведемо лише їх відмінні риси, а саме:

а) Технічні характеристики:

- діапазон вимірювання від 0,2 до 3 мм.
- похибка вимірювання (розрахункова) – не більше 0,5 %.
- чутливість – 0,01 мм.

б) Первинних чутливих компонентів (сенсорів):

- тип сенсору – безконтактний, з концентричними компланарними електродами;
- призначені для безконтактного вимірювання відстані між поверхнею сенсора і циліндричною поверхнею вала потужних електричних машин;
- розмір сенсора від діапазону вимірювання і діаметра вала;
- функція перетворення сенсора не залежить від хімічного складу та технології виготовлення вала, незначних мікронерівностей контрольованої поверхні вала (до $R_a \approx 1,25$ мкм);

Величина биття визначається як різниця між найбільшим та найменшим значенням биття, виміряних за один оберт вала у відповідності до [7, 324].

Для перевірки теоретичних положень та проведення експериментальних досліджень був створений макетний зразок із сенсором з концентричними компланарними електродами. У даному разі електроди сенсора в макеті є круглими, пласкими. Фото розміщення сенсора на випробувально-вимірювальному стенді наведено на рис. 6.21.

Макет було створено для перевірки працездатності системи контролю.

Результати випробувань відображені в таблиці 6.10. Отримана функція перетворення сенсора у випадку вимірювання відстані до плоскої поверхні, в залежності від величини зазору d , приведена на рис. 6.22.



Рис. 6.21 Загальний вигляд ємнісного сенсора биття вала з концентричними компланарними електродами на випробувально-вимірювальному стенді

Таблиця 6.10

Результати випробувань

d , мм	2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
C_{12} , 10^{-15} Ф	0,27	0,29	0,31	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36	0,36	0,37
d , мм	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
C_{12} , 10^{-15} Ф	0,38	0,40	0,41	0,41	0,43	0,44	0,45	0,46	0,46	0,47
d , мм	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5
C_{12} , 10^{-15} Ф	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,54	0,54	0,55	0,55
d , мм	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6
C_{12} , 10^{-15} Ф	0,56	0,57	0,58	0,58	0,59	0,60	0,60	0,61	0,62	0,63

Висновки за результатами випробувань

Отримані результати підтверджують працездатність ємнісного сенсора биття вала з концентричними компланарними електродами. Розходження між результатами експериментальних та аналітичних розрахунків обумовлені паразитною ємністю фольгованого склотекстоліту товщиною, яка у відповідності до проведеного розрахунку в розділі 4, складає 0,0746 пФ для товщини $t = 1,5$ мм. З урахуванням паразитної ємності, похибка вимірювання ємності між розрахунковим значенням та отриманим експериментально є постійною

величиною і обумовлена кривизною вала, величина якої мало змінюється в діапазоні вимірювання і, зі зміною зазору, наближається до деякої константи, яка, за умови обчислення величини биття за формулою $\delta = d_{max} - d_{min}$, компенсується.

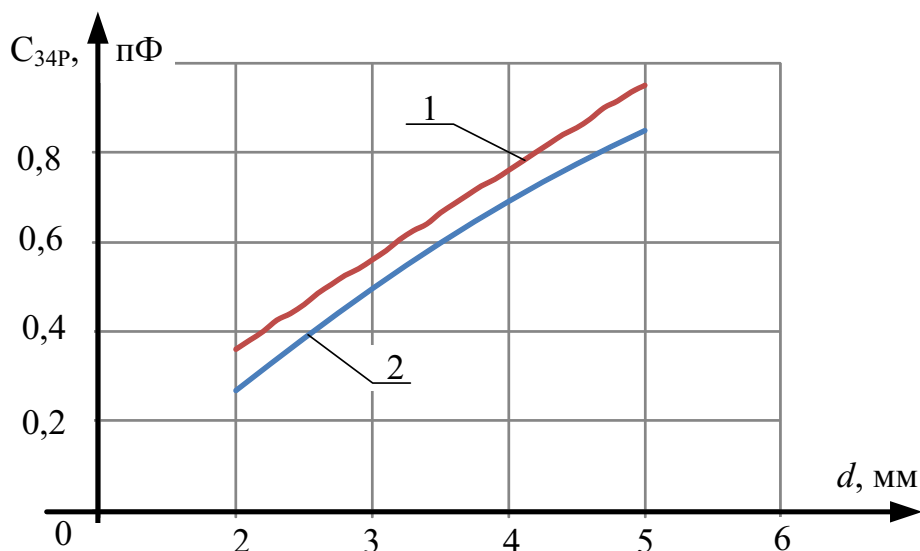


Рис. 6.22 Графіки функцій перетворення ємнісного сенсора з концентричними електродами у випадку вимірювання відстані до плоскої поверхні:

1 – експериментально отримана залежність; 2 – розрахункова залежність

6.4 Макетний зразок оптоволоконної системи діагностування МД ПГ

Для перевірки теоретичних результатів отриманих в розділі 3 та 4 був створений макетний зразок комп'ютеризованої оптоволоконної системи контролю та діагностики параметрів МД ПГ із фазовою вимірювальною системою, фотографія, якого приведена на рис. 6.23.

Макетний зразок складається з наступних вузлів:

- системи контролю та технічної діагностики, функції якої виконує ноутбук HP 8240w Workstation;
- спеціального програмного забезпечення, що розроблене в середовищі графічного програмування NI LabView;

- оригінального оптико-локаційного приймально-передавального пристрою;
- оригінального пристрою управління роботою лазерного випромінювача;
- пристрою збирання даних на проміжній частоті, яким є плата Hantek 6022BE з 8 розрядним 16МГц двоканальним синхронізованим АЦП.

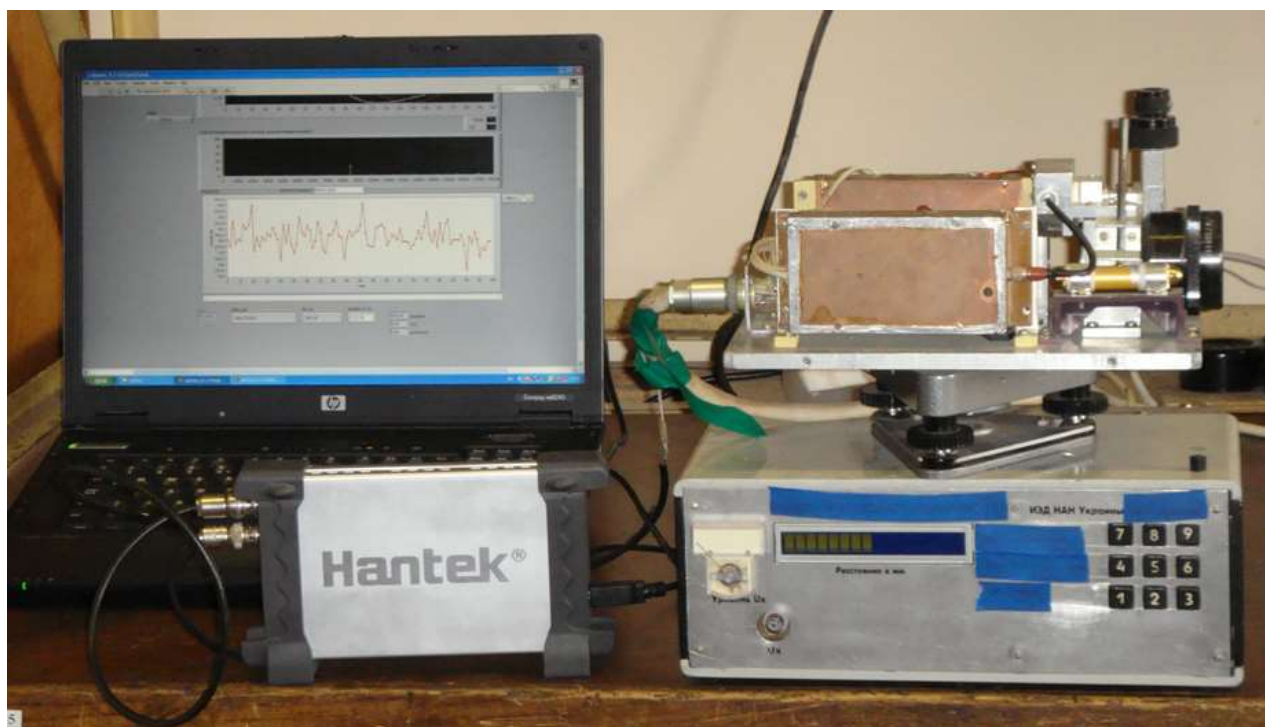


Рис. 6.23 Загальний вигляд макетного зразка комп'ютеризованої оптоволоконної системи діагностування параметрів МД ПГ

6.4.1 Цифровий фазовий ортогональний детектор

1. Об'єкт випробувань.

Об'єктом випробувань є експериментальний зразок цифрового фазового ортогонального детектора. Детектор виконано з використанням програмно-апаратного комплексу на базі оригінального програмного забезпечення та цифрового USB-осцилографа Hantek 6022BE (далі – детектор).

2. Мета випробувань

Дослідження метрологічних характеристик Детектора в діапазоні значень фазового зсуву 0-360 град.

3. Прилади та устаткування

У проведенні випробувань використовувалися наступні прилади і устаткування:

- 1) Вимірювач різниці фаз Ф2-34.
- 2) Дослідний зразок Детектора на основі осцилографічної плати Hantek 6022BE.
- 3) Калібратор фази Ф1-4.
- 4) Мілівольтметр ВЗ-38,
- 5) Зразкова вимірювальна лінія Р1-17.

4. Методика випробувань

4.1 Випробування здійснювалось методом співставлення показів Детектора з показами зразкового фазового детектора. В процесі випробувань визначалась похибка вимірювань фазових зсувів за допомогою Детектора в діапазоні 0-360 град. Як зразковий фазовий детектор, використано фазометр Ф2-34. Як міру, використано калібратор фази Ф1-4. При проведенні випробувань калібратором фазових зсувів встановлювалися значення фазових зсувів: 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 та 360 градусів між двома напругами синусоїдальної форми. В кожній точці фазового зсуву встановлювалось значення амплітуди тестового сигналу: 8,2 В, 7В, 5,9В, 4,4В, 2,12В, 986 мВ, 274 мВ та 88,5 мВ. При цьому значенням опорного сигналу було встановлено 9В. На кожному із встановлених фазових зсувів та амплітуд здійснювалось вимірювання фазового зсуву за допомогою Детектора з осередненням результату вимірювання з 10 та 100 однократних вимірювань $\bar{\varphi}_{100}$ і, відповідно, $\bar{\varphi}_{100}$, а також вимірювання фазового зсуву $\bar{\varphi}_{\Phi 2-34}$ фазометром Ф2-34 з 10 однократних вимірювань при встановленому часі осереднення результату однократного вимірювання 1 с.

4.1 Випробування відбувалися з фіксацією показів Детектора за умов встановлення за допомогою зразкової вимірювальної лінії Р1-17 значень переміщень в діапазоні ± 180 градусів у відповідності з обраною частотою модуляції. У даному випадку 25МГц.

5. Результати випробувань

Отримуємо визначення середнього значення показів Детектора та Ф2-34 в кожній точці діапазону фазових зсувів та амплітуд, що були встановлені за допомогою калібратора фазових зсувів Ф1-4

$$\bar{\varphi} = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n \varphi_i ,$$

де: φ_i – значення фазового зсуву, що виміряне в заданій точці діапазону випробувань; n – кількість вимірювань; $i = 1, 2, \dots, n$ – ціле число.

Для дослідження динамічного діапазону, запропонованого ФД, здійснювався наступний експеримент: за незмінного рівня 9 В опорного сигналу встановлювались різні амплітудні рівні вимірювального сигналу: 8,5 В (рис. 6.24, крива №3), 4,5 В (рис. 6.24, крива №2) і 1 В (рис. 6.24, крива №1). Похибка вимірювання була визначена в разі найбільшої різниці в амплітудних значеннях опорного і вимірювального сигналів (крива №3) і склала 0,43 град. Похибка вимірювання для кожного із діапазонів приведена на рис. 6.25.

Результати розрахунків наведені в таблиці 6.11.

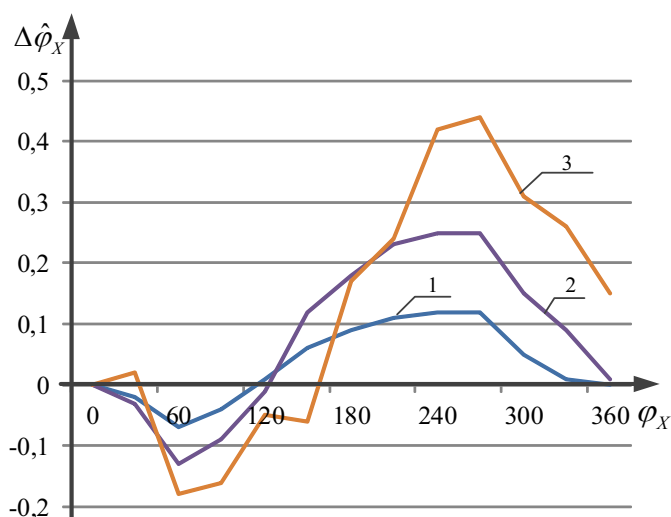


Рис. 6.24 Залежність визначеного фазового зсуву від фазового зсуву, що вимірюється і рівня входного сигналу: 1 – рівень входного сигналу 1В; 2 – рівень входного сигналу 4,5 В; 3 – рівень входного сигналу 8,5 В.

Таблиця 6.11

Результати випробувань

	Град	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
Амплітуда сигналів 8,2В	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	8,5	38,67	68,5	98,2	128,17	158,47	187,6	217,68	247,51	277,2	307,05	337,16	8,51
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	8,51	38,65	68,48	98,2	128,18	158,46	187,58	217,69	247,52	277,2	307,05	337,16	8,51
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	0	29,98	59,93	89,96	120,01	150,06	180,09	210,11	240,12	270,12	300,05	330,01	0
Амплітуда сигналів 7В	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	5,94	36,11	65,97	95,72	125,67	155,69	184,99	215,18	245,05	274,71	304,4	334,6	5,98
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	5,94	36,11	65,97	95,71	125,68	155,69	185	215,19	245,04	274,72	304,41	334,61	5,96
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	357,48	27,46	57,42	87,44	117,5	147,56	177,58	207,61	237,62	267,62	297,61	327,61	357,5
Амплітуда сигналів 5,9В	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	1,72	31,93	61,67	91,31	121,17	151,41	180,74	210,95	240,87	270,56	300,33	330,36	1,72
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	1,72	31,92	61,67	91,32	121,19	151,41	180,73	210,95	240,86	270,55	300,33	330,37	1,73
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	353,29	23,28	53,28	83,28	113,3	143,35	173,38	203,41	233,42	263,42	293,38	323,35	353,3
Амплітуда сигналів 4,4В	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	1,25	29,00	58,92	88,63	118,5	148,71	180,21	208,04	237,98	267,63	297,41	327,41	1,2
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	1,22	29,00	58,91	88,63	118,49	148,73	180,2	208,04	237,97	267,66	297,41	327,43	1,2
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	350,35	20,34	50,29	80,3	110,33	140,41	170,44	200,47	230,48	260,48	290,45	320,43	350,36
Амплітуда сигналів 2,12В	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	9,72	39,85	69,63	99,37	129,27	159,35	188,75	218,86	248,71	278,45	308,32	338,41	9,79
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	9,76	39,84	69,63	99,35	129,27	159,38	180,72	218,86	248,72	278,44	308,3	338,43	9,79
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	1,13	31,11	61,02	91,01	121,03	151,11	181,14	211,19	241,23	271,25	301,21	331,16	1,16
Амплітуда сигналів 986 мВ	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	37,77	67,83	96,48	126,88	156,33	186,74	216,12	245,58	276,35	304,96	336,76	7,37	37,48
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	37,27	67,13	96,78	126,68	156,93	186,34	216,42	245,98	275,95	305,84	336,06	7,3	37,41
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	28,5	58,55	88,45	118,43	148,46	178,32	208,49	238,51	268,67	298,69	328,66	358,67	28,64
Амплітуда сигналів 274мВ	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	56,78	86,34	115,68	145,86	182,85	205,46	235,42	265,08	294,65	325,05	3,58	26,58	56,41
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	56,38	86,04	115,77	145,9	182,91	205,4	235,36	265,1	294,93	325,1	3,55	26,55	56,48
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	47,55	77,5	107,34	137,35	167,37	197,4	227,44	257,53	287,69	317,63	347,67	17,65	47,63
Амплітуда сигналів 88,5мВ	Детектор $\overline{\varphi}_{10}$	64,48	93,82	123,76	153,98	183,38	213,74	243,38	273,19	303,05	333,31	4,64	34,62	64,39
	Детектор $\overline{\varphi}_{100}$	64,45	93,88	123,71	153,92	183,31	213,7	243,31	273,13	303,02	333,37	4,67	34,66	64,33
	Ф2-34 $\overline{\varphi}_{\Phi 2-34}$	56,94	86,2	115,98	145,98	175,97	205,99	236,08	266,15	296,31	326,25	356,37	26,35	56,31

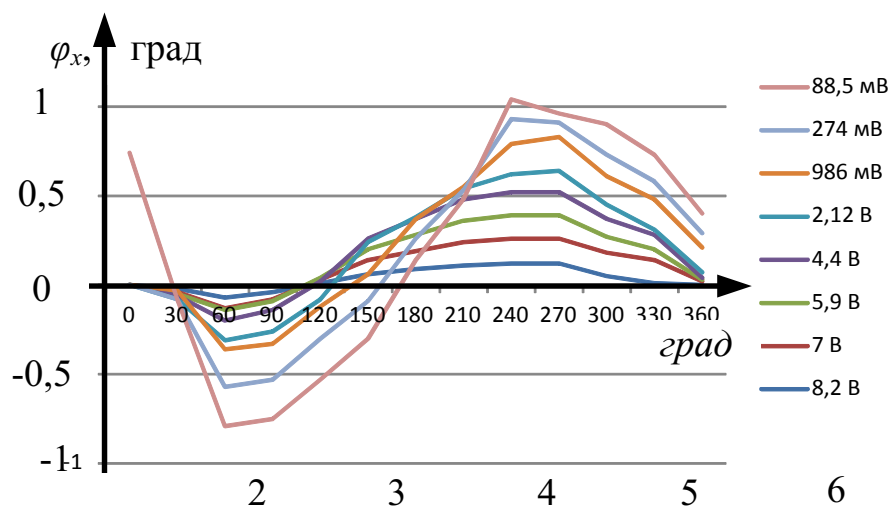


Рис. 6.25 Відносна похибка визначення фазового зсуву

В результаті випробувань із використанням зразкової вимірювальної лінії Р1-17 було, встановлено, що середнє значення похибки в діапазоні вимірюваних значень фазового зсуву ± 180 градусів складає не більше 0,5 градуса.

Висновки за результатами випробувань

Отримані результати підтверджують можливість застосування макетного зразка цифрового ортогонального фазового детектора в складі комп'ютеризованої оптоволоконної системи контролю та діагностики параметрів МД ПГ.

Проведені розрахунки параметрів систем, а також проведені експериментальні дослідження дозволили встановити, що СКВ випадкової похибки вимірювання амплітуд вібрацій становить 0,012 мм, розрізнявальна здатність дорівнює 0,01 мм, частотний діапазон складає від 15 до 15000 Гц. Максимальне значення амплітуд вібрацій не перевищує 20 мм[28].

6.4.2 Малогабаритний синтезатор частоти

Малогабаритний синтезатор частоти (МСЧ) призначений для використання в макетному зразку комп'ютеризованої оптоволоконної системи контролю та діагностики параметрів МД ПГ, як джерело генеруючих коливань, що застосовується у передавальному каналі для формування частоти модуляції лазерного потоку і для переносу частот зонduючого сигналу на робочу проміжну частоту. На основі результатів досліджень імітаційної моделі синтезатора частоти (див. розділ 5.5) та розробки структури в [24] був реалізований макетний зразок двоканального МСЧ (рис. 6.26) та алгоритм його роботи (рис. 6.27).



Рис. 6.26 Загальний вигляд макетного зразка двоканального МСЧ

Випробування розробленого макету здійснювалося з метою дослідження і оцінки похибки відтворення значення частоти вихідного сигналу МСЧ.

На рис. 6.28 представлені експериментально отримані осцилограми вихідного сигналу з макета плати МСЧ, (на прикладі частоти 24 МГц), зняті за допомогою цифрового осцилографа Tektronix TDS2014C для часового відображення сигналу (рис. 6.28.а) та його спектра без використання еліптичного фільтру ЄФ (рис. 6.28, б) і з використанням ЄФ (рис. 6.28, в, г).

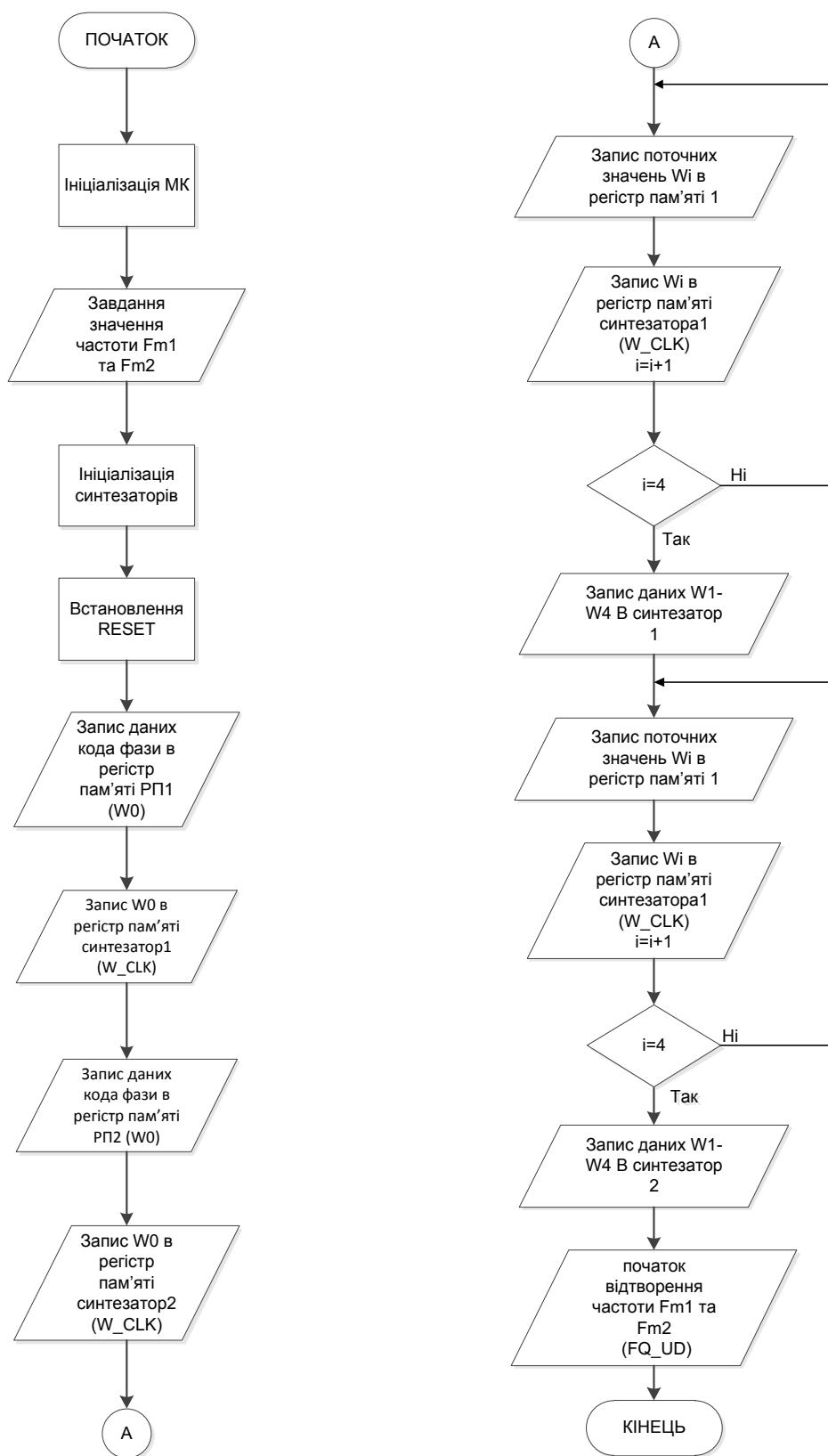
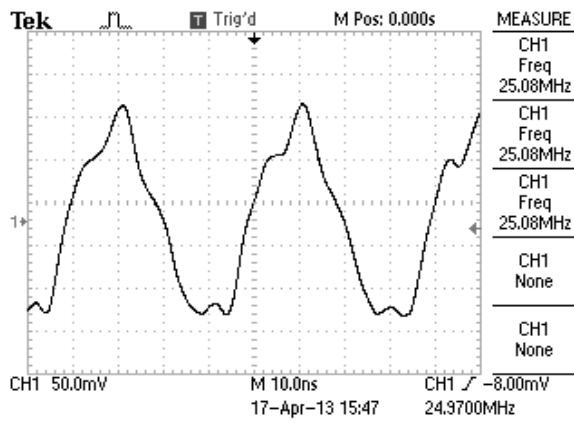
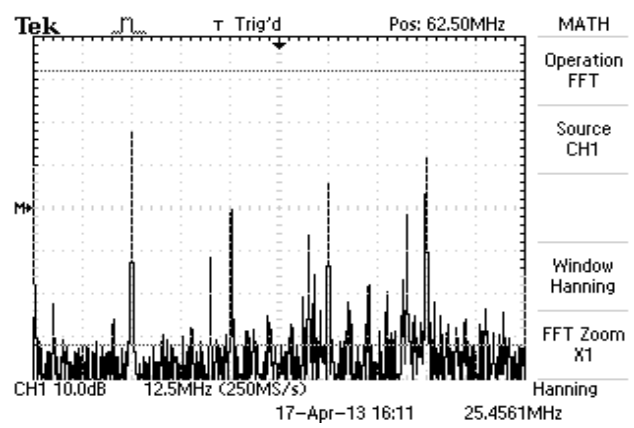


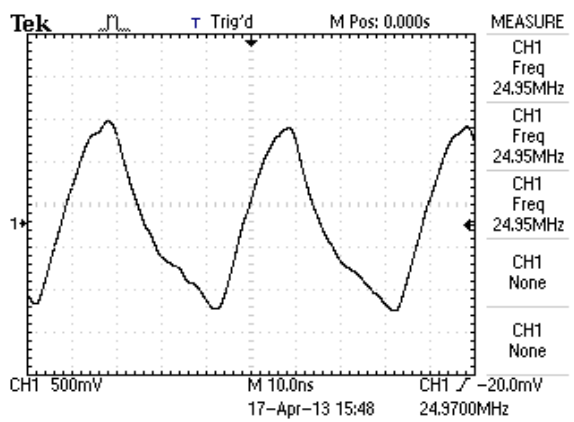
Рис. 6.27 Алгоритм роботи двоканального МСЧ



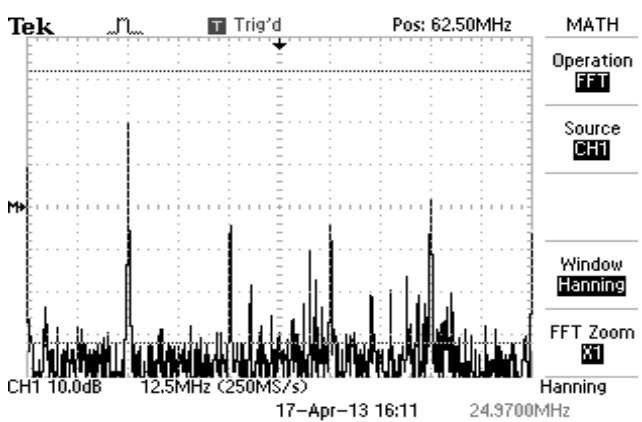
a



б



в



г

Рис. 6.28 Результати досліджень

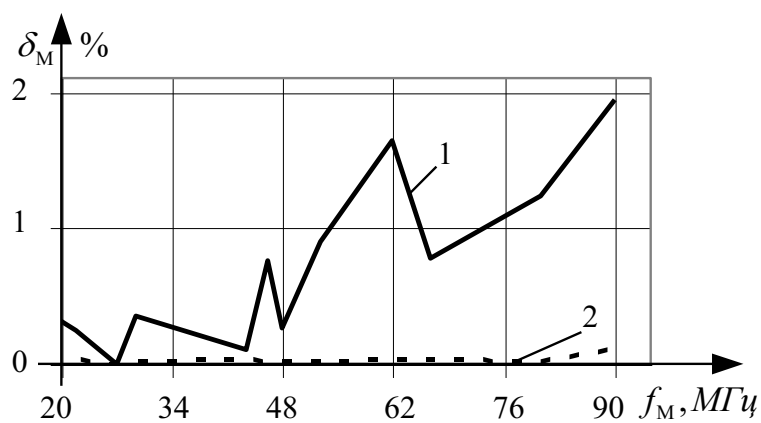


Рис. 6.29 Залежність похибки від поточної частоти модуляції

Дослідження спектрів сигналів на робочих частотах (рис. 6.28), показали необхідність використання на виході СЧ еліптичного фільтра. Застосування фільтру дозволило зменшити похибку δ_M від частоти модуляції f_M в 2-3 рази, як для макетного зразку так і для імітаційної моделі. Також дозволило зменшити вплив на вихідний сигнал СЧ бокових спектральних складових, які кратні основній гармоніці синтезованого сигналу та зменшити похибку обумовлену шумом квантування. Середнє значення похибки для макетного зразка не перевищує 1%.

На рис. 6.30 приведена залежність похибки від поточної частоти модуляції f_M . де позначено: 1 - залежність δ_M для макетного зразка; 2 - залежність δ_M для імітаційної моделі. Похибка розрахована для діапазону робочих частот модуляції ЧФ ІВС без використання фільтра на виході СЧ. Середнє значення похибки δ_M для макетного зразка складає не більше 1%, а для імітаційної моделі – не більше 0,3%. Використання фільтра дозволяє зменшити значення похибки δ_M для макетного зразка до 0,4%.

Висновки за результатами випробувань

В результаті експериментальних досліджень макетного зразка МСЧ (без використання ЕФ), було з'ясовано, що додаткове збагачення спектру вихідного сигналу так само відбувається за рахунок внутрішніх і зовнішніх наведень, фазових шумів МСЧ, а також за рахунок флуктуацій опорного генератора, що використовується в структурі двоканального МСЧ в порівнянні з результатами роботи імітаційної моделі. Використання ЄФ дозволяє зменшити додаткове збагачення спектру до рівня похибок, отриманих в імітаційній моделі. Отже отримані результати підтверджують можливість застосування макетного зразка малогабаритного синтезатора частоти в складі комп'ютеризованої оптоволоконної системи контролю та діагностики параметрів МД ПГ.

Результати досліджень МСЧ підтвердили достовірність використовуваних теоретичних положень при розробці імітаційної моделі СЧ. Розроблена імітаційна модель СЧ може бути використана для подальших досліджень оптоелектронних вимірювальних систем призначених для вимірювання биття циліндричної поверхні валу потужного генератора.

6.6 Випробувально-демонстраційний стенд

Для перевірки результатів досліджень компонентів систем контролю та технічної діагностики механічних параметрів (биття вала, повітряного зазору) та проведення лабораторних випробувань було використано випробувально-демонстраційний стенд, фотографія якого приведена на рис. 6.30.

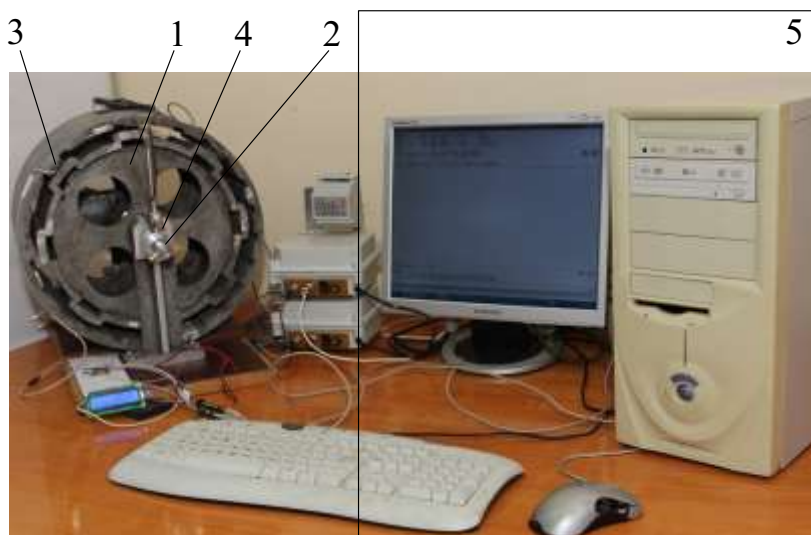


Рис. 6.30. Загальний вигляд випробувально-демонстраційного стенда:
1 – макет генератора; 2 – вал; 3 – ємнісний сенсор; 4 – сенсор мітки вала;
5 – система контролю механічних параметрів.

Слід зауважити, що перспективним напрямком подальшого розвитку та продовження робіт є застосування сучасних інструментів наскрізного мультифізичного моделювання для дослідження компонентів систем контролю та діагностики параметрів механічних дефектів потужних генераторів на вплив внутрішнього середовища машини в залежності від режиму її експлуатації. Використання результатів моделювання дозволяє розробляти оптимальні за структурою методи і засоби для систем діагностування механічних параметрів потужних генераторів.

Крім того, досліджені в даному розділі компоненти можна застосувати як окремі контрольно-вимірювальні пристрої та і складові частини систем діагностування, що містять первинні та вторинні вимірювальні перетворювачі, а також лінії передачі даних та живлення.

Висновки до розділу 6

1. Досліджено метрологічні характеристики ємнісного з первинного перетворювача ІВК системи діагностування повітряного зазору між статором і ротором ГГ типу СГК 538/160-70М в діапазоні 6 ± 4 мм. Крім того, отримані результати підтверджують правильність застосування розрахункової моделі для визначення функції перетворення сенсора.

2. Досліджено компоненти макетного зразка системи контролю зусилля пресування осердя статора турбогенератора типу ТГВ-200 та ТГВ-300 в процесі складання та експлуатації. Експериментальні дослідження компонентів системи стабілізації зусилля пресування показали, що первинний вимірювальний перетворювач ІВК, що містить ємнісний сенсор та спеціальними механічними елементами, призначеними для перетворення сили стиснення в мікропереміщення є ефективним засобом покращення контролю стану осердя.

3. Експериментальні дослідження ємнісного вимірювача радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних генераторів із концентричними компланарними електродами показали можливість розроблення приладів з високою точністю і роздільною здатністю вимірювання биття для валів з різними діаметрами.

4. Отримані результати досліджень компонентів оптоволоконної системи контролю підтверджують потенційно високу точність вимірювання параметрів механічних дефектів за умов забезпечення високої завадостійкості.

Посилання: [7, 24, 28, 62, 106, 137, 151, 156, 215, 324, 337, 396, 397]

див. список використаних джерел стор. 303–344.

ЗАГАЛЬНІ 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 контрольних-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, еліпсність 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, викликану 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 ємнісних 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-250-2ПТЗ 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А.С. 1669047 СССР, МПК H02K 1/16, H02K 1/18. Статор электрической машины / Г. М Федоренко, В. Ю. Аврух, О. С. Голоднова и др. № 4606908/07; заявл. 12.09.88.; опубл. 07.08.91, Бюл. № 29.
2. А.С. 1669051 СССР, МПК H02K 15/00. Способ подпрессовки сердечника статора генератора / О. С. Голоднова, Е. П. Фирсанов, В. В. Титовец. № 4492222/07; заявл. 01.08.88; опубл. 07.08.91, Бюл. № 29.
3. Александров А.Д., Колмогоров А.Н., Лаврентьев М.А. Математика: её содержание, методы и значение: довідник. М.: Изд. АН СССР, Том 3, 1956. 336 с.
4. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: монография. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
5. Алексеев А.Э., Тезадов Я.А., Потапов В.Т. Регистрация внешнего акустического воздействия на оптическое волокно с помощью интерферометра рассеянного излучения методом фазового разнесения. *Радиотехника и электроника*. 2013. Т.58 (№3). С.1522-1530.
6. Алексеев А.Э., Тезадов Я.А., Потапов В.Т. Регистрация внешнего акустического воздействия на оптическое волокно с помощью интерферометра рассеянного излучения. *Радиотехника. Нелинейный мир*. 2013. Т.11(№2). С. 112–113.
7. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов: монография. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, №2, 2002. 144 с.
8. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов: монография. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. 152 с.
9. Анализ фазовой системы автоматической коррекции частоты в лазерных дальномерах / Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Сидорчук В.Є. *Технічна електродинаміка*. 2015. №.1. С. 91 - 94.
10. Анализ фазовых систем автоматической подстройки частоты в лазерных дальномерах /Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А.,

Ниженский А.Д. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС – 2013): Збірник тез доповідей 3-я Міжнародна наукова конференція, 27-29 жовтня 2013 р., м. Вінниця, Україна: ПП "ТД"Едельвейс і К", 2013. С. 250-251.*

11. Анашин А.М., Тарабрин Ю.А., Пфафродс Д.О. О возможности визуализации объектов, находящихся в поле сильного ионизирующего излучения: довідник. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. 31 с.

12. Андрищенко А.И. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: монография. М.: Высш. шк., 1991. 301 с.

13. Аппаратурное обеспечение системы непрерывного контроля вибромониторинга роторных агрегатов/Шульженко Н.Г., Билетченко В.П., Метелев Л.Д. и др. *Енергетика и Електрифікація*. 2000. №.7. С.35-38.

14. Ахметвалаева Л.В., Немтарев А.В. Разработка дистанционной микропроцессорной системы измерения формы статора гідрогенератора. *Проблемы энергетикi*. 2005. № 11–12. С.30-35.

15. Ачеркан Н.С. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник., М. «Машиностроение», 1968, 408 с.

16. Бабак С.В. Комп'ютеризовані системи контролю докiлля об'єктiв енергетики на базі безпiлотних авіаційних комплексiв: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.05/ Інститут електродинаміки. Київ, 2016. 328 с.

17. Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования: учебное пособие. К.: ИЭД НАН Украины, 2015. 456 с.

18. Бадеева Е.А. Волоконно-оптические датчики давления для информационно-измерительных систем ракетно-космической и авиационной техники: дис. ... док. техн. наук: спец. 05.11.16/ Пензенский государственный университет, Пенза, 2017. 463 с.

19. Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Бростилова Т.Ю. Принципы построения, модели и конструкции волоконно-оптических датчиков давления отражательного типа. *Модели, системи, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. №2 (26). С. 99-106.

20. Белоглазов А.В., Глазырин Г.В. Разработка средств мониторинга биений вала гидроагрегата. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2008. №3(53). С.79–84.
21. Беляев С.А., Литвак В.В., Солод С.С. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС: учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 218 с.
22. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений: учебное пособие. М.: ГИФМЛ, Т.1, 1962. 464 с.
23. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики: учебное пособие. М.: Наука, 1983. 416 с.
24. Бородий В.И., Зайцев Е.А., Синицкий О.П. Двухканальный синтезатор сигналов специальной формы на основе AD9851. *Збірник тез доповідей науково-технічної конференції до Днів Науки 2013: Збірник тез доповідей Конф. Викладачів, науковців, аспірантів та студентів*. Київ: К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2013. С.15-17.
25. Бородий В.И., Зайцев Е.А., Синицкий О.П. Проектные исследования лазерной дальномерной системы. *Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конф. 17-18 апреля 2013 р. Украина, Київ. 2013. С. 385-389.*
26. Бортаковский А.С., Пантелеев А.В. Линейная алгебра в примерах и задачах: учебное пособие. М.: Высш. шк., 2005. 591 с.
27. Брагинец И.А., Зайцев Е.А. Помехоустойчивость фазовых лазерных датчиков вибраций. *Технічна електродинаміка*. 2010. №.3. С.67-73.
28. Системы для измерения параметров вибраций с оптическими датчиками / Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А. *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології: Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції (СЕМСТ-6), 29 вересня - 03 жовтня 2014 р., Одеса, 2014. С. 207.*
29. Лазерний далекомір / Брагинец І.О., Зайцев Є.О., Жукінський І.М., Кононенко О.Г., Масюренко Ю.О.: пат. 91534 Україна: МПК G01M, G01C 3/08. № u 201400566; заявл. 21.01.2014; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.

30. Брихта М. Преобразователи емкости в цифровой код на основе сигма-дельта модулятора. *Компоненты и технологии*. 2006. №1. С.34-37.
31. Бутов А.В. Повреждаемость и контроль зубцовых зон запеченных крайних пакетов стали сердечников статоров турбогенераторов. *Электрические станции*. 2001. №5. С.41-47.
32. Васьковский Ю.Н., Федоренко Г.М., Воцинский К.В. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в демпфере ротора гидрогенератора при неравномерном воздушном зазоре между ротором и статором. *Гидроэнергетика Украины*. 2006. №3. С. 11–17.
33. Васьковський Ю. М., Мельник А. М. Електромагнітні віброзбуджуючі сили в турбогенераторі з урахуванням несиметрії струмів в обмотці статора. *Технічна електродинаміка*. 2017. №1. С. 52-57.
34. Веснин В.Л. Метод гауссовской аппроксимации пика спектра отражения волоконно-оптического брэгговского датчика. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2003. №1(5). С.156-164.
35. Вовк И. Г. Геометрическое моделирование движения систем в задачах прикладной геоинформатики. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2015. №.2 (30). С. 72–77.
36. Волоконно-оптические датчики / Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К.; Под редакцией Т. Окоси. Пер. с яп. Ленинград «Энергоатомиздат» Ленинградское отделение, 1990. 256 с.
37. Волоконно-оптические системы связи/Фриман Р.; под. ред. Н.Н. Слепова. М. : Техносфера, 2003.590 с.
38. Волоконно-оптический интерфейс в адаптивной системе диагностики электроустановок/Жукинский И.Н., Логвиненко И.В., Скрипник И.Ю., Цымбурская Л.В. *Микропроцессорные средства и системы*. 1988. №5. С.82-83.
39. Волоконно-оптический уровнемер - сигнализатор давления жидкостных сред /Бадеева Е.А., Бадеев А.В., Хасаншина Н.А., Мурашкина Т.И., Серебряков Д.И. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. №4 (28). С. 113-121.

40. Волоконно-оптическое устройство для измерения абсолютных расстояний и перемещений с нанометровым разрешением/ Потапов В.Т., Жамалетдинов М.Н., Жамалетдинов Н.М., Мамедов А.М.,Потапов Т.В. *ПТЭ*. 2013. №.5. С. 103-107.

41. Волоконные решетки показателя преломления и их применение/ Васильев С.А., Медведков А.И., Королев И.Г. и др. *Квантовая электроника*. 2005. Т.35. №.12. С.1085– 1103.

42. Воцинський К.В.,Левицький А.С., Сорокіна Н.Л. Вплив електромагнітної обстановки ГЕС на контрольно-вимірювальну апаратуру. *Гідроенергетика України*. 2015. №1-2. С.33–36.

43. Ганнинг Р., Росси Х. Аналитические функции многих комплексных переменных: навч.посіб. М.: Мир, 1969. 397 с.

44. Гауэр Дж. Оптические системы связи : монография. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.

45. Гашков С. Б. Центры тяжести и геометрия : Монографія.М.: МЦНМО, 2015. 64 с.

46. Глазырин Г.В. Разработка моделей и методов вибрационной диагностики агрегатов гидроэлектростанций: дис. ... техн. наук: 05.14.02. Новосибирск, 2006, 338 с.

47. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов: учебное пособие. Л.: Наука, 1989. 119 с.

48. Глебов И.А., Домбровский В.В., Дукштау А.А. Гидрогенераторы: довідник. Ленинград: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982. 368 с.

49. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов. *Сборник «Электросила»*. 2004. №.43. С.56-64.

50. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов. *Электросила*. 2004. №43. С. 56-64.

51. Горбова Г. М. Приборы контроля линейных микроперемещений на основе бесконтактных электроемкостных трехэлектродных первичных измерительных преобразователей: дис. ... доктора техн. наук : 05.11.13/ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Барнаул, 2003. 289 с.

52. ГОСТ 29254-91. Аппаратура измерения, контроля и управления технологическими процессами. Технические требования и методы испытаний на помехоустойчивость. [Введ. 01.01.93.] ИПК Издательство стандартов, 1993. 12 с.

53. Гриневич Ф.Б., Лежоев Р.С. Компенсация погрешности, вызываемой непараллельностью электродов емкостного датчика. *Техническая электродинамика*. 1988. № 5. С. 68–71.

54. Гриневич Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками: учебное пособие. К.: Наук. Думка, 1987. 112с.

55. Гриневич Ф.Б., Сурду М.Н., Левицкий А.С. Емкостины : монография. К.: Наук. Думка, 1990. 168 с.

56. Губаревич О.В., Козынько А.С. Природа вибрации и современные методы вибродиагностики электрических машин. *Вісник східноукраїнського національного університету ім.В. Даля*. 2017. №.3(233). С. 53-58.

57. Гуров И.П. Теория информации и передачи сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2000. 97 с.

58. Джежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета: монография. Минск : Белорусская наука, 2008. 305 с.

59. Динамические свойства частотно-фазовых лазерных дальномерных систем с цифровыми синтезаторами частоты/ Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Латенко В.И. и др. *Технічна електродинаміка*. 2013. №.3. С.87 – 92.

60. Диск ЗАО "Сенсор". Веб-сайт. URL: www.sensor-com.ru (дата звернення: 20.10.2019).

61. Дмитриев А. Л., Оптические системы передачи информации. СПб:СПбГУИТМО, 2007, 96 с.

62. Дослідження впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6/ Зайцев Є.О.,

Левицький А.С., Кромпляс Б.А., Панчик М.В. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. №.52.С.80–86.

63. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. [Чинний від 01.01.1995]. Київ:Державним конструкторським бюро "Луч" Мінмашпрому України , 1994. 25 с.

64. ДСТУ 2465-94 .Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги і методи випробувань (ІЕС 61000-4-8:1993) [Чинний від 1995-01-01]. Київ, 1995. 31с.

65. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення.[Чинний від 01.01.1995]. Київ, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського" (НТУУ КПІ), 1994. 72 с.

66. ДСТУ 2793-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до потужних електромагнітних завад. Загальні положення [Чинний від 1995-07-01].Київ: Держстандарт України, 1994. 15 с.

67. ДСТУ 2793-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до потужних електромагнітних завад. Загальні положення : Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к мощным электромагнитным помехам. Общие положения.[Чинний від 1996-01-01]. Офіц.вид. К.: Держстандарт України, 1994. 30 с.

68. ДСТУ 3681-98. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до дії грозових розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань (ГОСТ 30585-98). [Чинний від 01.07.1999]. Київ, Держстандарт України, 1998.

69. ДСТУ EN 61000-4-8:2017. Електромагнітна сумісність. Частина 4-8. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до магнітного поля частоти мережі (EN 61000-4-8:2010, IDT; ІЕС 61000-4-8:2009, IDT) [Чинний від 22.12.2017]. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2018.

70. ДСТУ EN 61000-4-8:2017. Электромагнитная совместимость. Часть 4-8. Методики испытания и измерения. Испытание на невосприимчивость к магнитному полю частоты сети (EN 61000-4-8:2010, IDT; ІЕС 61000-4-8:2009, IDT).[Чинний від 01.01.2019]. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2018. 38с.

71. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. [Чинний від 01-07-2016]. Київ: Держстандарт України, 2015. 45 с.

72. ДСТУ ІЕС 61000-4-4:2008. Электромагнитная совместимость. Часть 4-4. Методики испытания и измерения Испытание на невосприимчивость к быстрым переходным процессам / пакетов импульсов. [Введ 01.09.2008.]. Київ, ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2008. 63с.

73. Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. LabVIEW для радиоинженеров: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. М.: ДМК Пресс, 2007. 400 с.

74. Егоров Ф.А., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики, основанные на флуктуационных колебаниях световодных микрооптомеханических резонансных структур. *Журнал технической физики*. 2013, №83(11). С.100-104.

75. Жилин В.Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления: Монография. М.: Энергоатомиздат, 1987. 111 с.

76. Журавлев О.А., Шапошников Ю.Н., Ивченко А.В. Лазерная виброметрия механических конструкций: справочник. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 72 с.

77. Задворнов С.А. Исследование методов построения гибридных волоконно-оптических измерительных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01. Москва, 2009. 23 с.

78. Зайцев Е. А., Синицкий О. П. Метод коррекции инструментальной погрешности в цифровых вольтметрах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2014. № 2. С. 77-80.

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

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

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

82. Зайцев Е.А. Исследование погрешности установки частоты синтезаторов частотно-фазовых систем с использованием LABVIEW. *Технічна електродинаміка*. 2014. №.2. С.84-88.

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

84. Зайцев Е.А., Левицкий А.С., Сидорчук В.Е. Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов. *Приборы и методы измерений*. 2017. №.8(2).С.122-130. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

85. Зайцев Е.А., Левицкий 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 международной научно-технической конференции, 19-20 сентября 2017 года, г. Могилев, Беларусь: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. С. 447-452.*

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

87. 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. №.7(2). С.186–194.

88. Зайцев Е.А., Синицкий О.П. Исследование возможности применения лазерных измерителей перемещений в гироскопических системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2014. №.1. С.41-46.

89. Зайцев Е.А., Левицкий А.С., Сидорчук В.Е. Применение ЛЧМ-модуляции в волоконно-оптических системах мониторинга воздушного зазора гидрогенераторов. *"Приборостроение-2016"* : Сборник материалов докладов 9-й Международной научно-технической конференции. 23–25 ноября 2016, г. Минск, Беларусь: Минск: БНТУ, 2016. С.58-59.

90. Зайцев Е.А., Сидорчук В.Е., Архипова Л.В. Применение волоконно-оптических систем связи в системах технической диагностики энергетического оборудования. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології ("Information Security and Computer Technologies")*: Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції ,20-22 квітня 2017 року, м. Кропивницький, Україна :ЦНТУ, 2017.С.139 -140.

91. Зайцев Є.О. Вплив нерівномірності дискретизації на метрологічні характеристики ортогональних фазових детекторів оптичних моніторингових систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*:Збірник тез доповідей XVI міжнародної науково-технічної конференції, 10-14 червня 2016, Хмельницьк: РВЦ ХНУ, 2017. С. 134.

92. Зайцев Є.О. Застосування авторегресійного аналізу на основі методу найменших квадратів в лазерних системах моніторингу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. №. 2. С.43 – 48.

93. Зайцев Є.О. Метод визначення ексцентриситету ротора гідрогенератора у циліндричній системі координат. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси(ІІРТК-2019)*:Тези доповіді X Міжнародної науково–практичної конференції,21-22 травня 2019 р., м. Київ, Україна: НАУ, 2019. С.85 – 87.

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

95. 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

Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, 17-18 листопада 2016 р., м. Тернопіль, Україна : ТНТУ, 2016. С.201-202.

96. Зайцев Є.О. Гібридні електронно-оптичні вимірювачі механічних параметрів потужних гідрогенераторів. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*: Збірник матеріалів XIX Міжнародної науково-практичної конференції, 26-28 вересня 2018р., Київ: К.: ТОВ "Календар", 2018. С.520-525.

97. Зайцев Є.О. Комп'ютеризована система контролю механічних параметрів електрообладнання. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016)*: Матеріали XIII міжнародної конференції, 3-6 жовтня 2016 р., Вінниця: ВНТУ, 2016. С.116-118.

98. Зайцев Є.О. Контроль механічних параметрів електрообладнання на основі комп'ютерної обробки оптичного потоку. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2017 (КТІПР – 2017)*: II Міжнародна науково-технічна конференція, 17-19 жовтня 2017 р. м. Житомир. С.126-127.

99. Зайцев Є.О. Контроль повітряного зазору в гідрогенераторах на основі статистичного аналізу кутових вимірювань. *"Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем"*: Тези доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції, 16-18 листопада 2016 р., м. Дніпро: Дніпро: "Ліра", 2016. С.75–76.

100. Зайцев Є.О. Модель зміни повітряного зазору в гідро та турбогенераторах. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем*: Тези доповідей XV Ювілейної Міжнародної науково-практичної конференції 20–22 листопада 2017 м. Дніпро: «Ліра», 2017. С.77–78.

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

102. Зайцев Є.О. Система моніторингу ступеня спресованості осердя статора з ємнісними гібридними волоконно-оптичними вимірювачами. „*Електроніка та інформаційні технології*”: Збірник матеріалів IX-ої Українсько-

польської науково-практичної конференції, 28 – 31 серпня 2017 смт. Чинадієво, Закарпатська обл., Україна: Л.: ВЦ ЛНУ ім. І.Франка, 2017. С.178-180.

103. Зайцев Є.О., Левицький А.С. Аналітичне визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора гідроге-нератора за даними сенсорів повітряного зазору. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2018. №.50. С.62–70.

104. Зайцев Є.О., Левицький А.С. Визначення орбіти центру обертання ротора потужного генератора за результатами вимірювання повітряного зазору. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*: Матеріали XVIII міжнар. наук.-техн. конференції 8-13 червня 2018 Одеса-Хмельницький: ХНУ, 2018. С.44-45.

105. Зайцев Є.О., Левицький А.С. Використання ємнісних сенсорів при контролі ступеня спресованості осердя статора турбогенераторів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*: Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції, 8-13 червня 2017 р., Одеса, 2017. С.77-78.

106. Зайцев Є.О., Левицький А.С. Експериментально-теоретичні дослідження ємнісного сенсора повітряного зазору для гідрогенераторів методами регресійного аналізу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. №.2. С .35–40.

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

108. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Балящук Л.І. Гібридні волоконно-оптичні вимірювачі фізичних параметрів літальних апаратів. «*ABIA-2017*»:Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції 19-21 квітня 2017 м. Київ, Україна: К.: НАУ, 2017. С. 2.37-2.39.

109. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромплас Б.А Вимірювальні перетворювачі для систем технічної діагностики електрообладнання на основі гібридних волоконно-оптичних сенсорів. *Інтегровані інтелектуальні*

робототехнічні комплекси(ІІРТК-2017: IX Міжнародна науково – практична конференція, 16-17 травня 2017, м. Київ, Україна:НАУ, 2017. С. 97–100.

110. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Панчик М.В. Особливості процесу пресування осердя статора потужного турбогенератора. *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації*: Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, 11-12 квітня 2019 м. Кременчук, Україна, 2019. С.81-83.

111. Зайцев Є.О., Лісогор М.В. Застосування АР-методів для побудови програмно-математичного забезпечення лазерних сенсорів вібрацій. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси*: VII Міжнародна науково – практична конференція, 19-20 травня 2014 р., Україна, Київ - К.: НАУ, 2014. С. 227-229.

112. 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)*:Тези доповідей XVI Міжнародної науково-практичної конференції, 21-23 листопада 2018р.,м. Дніпро, Україна: ПП "Ліра ЛТД", 2018. С.74–75.

113. Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є. Ентропійний підхід при оцінюванні результатів вимірювання моніторингових систем. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси: ІІРТК-2016: IX Міжнародна науково – практична конференція, 17-18 травня 2016, м. Київ, Україна - К.: НАУ, 2016. С.96–98.*

114. Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є., Лісогор М.В. Застосування дискретного перетворення Гільберта в лазерних далекомірах. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014)*: Збірник тез доповідей XII міжнародної конференції ", 14-16 жовтня 2014,м. Вінниця, Україна: ІВЦ ВНТУ, 2014. С.53.

115. Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є., Сидорчук І.В. Использование авторегрессионного метода Берга для анализа вибросигнала в системах бесконтактной диагностики. *"Приборостроение-2015"*: Сборник материалов докладов 8-й Международной научно-технической конференции, 25–27 ноября 2015, Минск, Беларусь: БНТУ. С.86-88.

116. Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є. Обробка результатів вимірювання лазерних далекомірів на основі статистичного аналізу даних. *Інформаційно-комп'ютерні технології 2016: ІКТ – 2016*: Збірник наукових публікацій за матеріалами VIII Міжнародна науково-технічна конференція, 22–23 квітня 2016 р., м. Житомир, Україна: ЖДТУ, 2016. С.171–172.

117. Зайцев Є.О. Реалізація гібридних волоконно-оптичних вимірювачів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*(м. Одеса, Україна): Матеріали XIX міжнародної наук.-технічної конференції, 14-17 червня 2019 р., Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. – Одеса: ФОП Бондаренко, 2019. С.28-29.

118. Застосування авторегресійного аналізу на основі методу найменших квадратів в лазерних системах моніторингу/Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є., Синица В.І., Лісогор М.В. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*.2015. №. 2. С. 43 – 48.

119. Застосування імітаційного моделювання авторегресійних методів спектрального аналізу для вирішення задач вібродіагностики/ Зайцев Є.О., Брагинец І.О., Синица В.І., Лісогор М.В. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. №.37. С. 109-113.

120. 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*:Збірник тез доповідей XV міжнародної науково-технічної конференції,10-14 вересня 2015,Хмельницьк: РВЦ ХНУ,2015. С.32-34.

121. Застосування методу найменших квадратів при обробці моніторингової інформації шліфувального обладнання /Зайцев Є.О., Сидорчук В.Є., Сидорчук І.В., Шпилька А.М. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. №.4. С.175 – 179.

122. Здановський В.Г. Досвід експлуатації турбогенераторів типу ТГВ з вичерпаним ресурсом на українських ТЕС. *Новини енергетики*. 2001. №.9. С.67-63.

123. Зозулін Ю. В., Антонов О. Є., Бичік В. М. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій: навч. посібник. Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
124. Иванов В.В., Петров В.Н., Ростик Г.В. О способе стабилизации плотности прессования активной стали турбогенераторов. *Энергетик*. 2009. № 8. С. 29–30.
125. Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов: Учебное пособие. М.: МЭИ, 2005. 440 с.
126. Измерение сил электрическими методами / Бауман Э; Под ред. И.И.Смыслова. М.: Мир, 1978. 430 с.
127. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 288 с.
128. Использование спектрального анализа при лазерной вибродиагностике системы шлифования/Доброскок В.Л., Зайцев Е.А., Сидорчук В.Е., Шпилька А.М. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я "MicroCAD-2016"*: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, 18-20 травня 2016 р., м. Харків, Україна: НТУ «ХП», 2016. С.134.
129. Источники и приемники излучений / Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. СПб.: Политехника, 1991. 240 с.
130. Каверт Дж., Питтс Дж. Фотохимия: учебное пособие. М.: "Мир", 1968. 671 с.
131. Кадук Б.Г. Анализ многопараметрических преобразователей и алгоритмов вычислительной обработки используемых в информационно-измерительной технике: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.16/Киевский институт автоматики. Киев, 1984. 267 с.
132. Клокова Н. П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки: монография. М.:Машиностроение, 1990. 224 с.

133. Ключников А.А., Левицкий А.С., Федоренко Г.М. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы – путь к повышению надежности эксплуатации генераторов АЭС, ТЭС и ГЭС. *Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля*. 2012. Вип. 18. С. 57–65.
134. Коваль А.А., Нецеевский А.Б. Эксплуатационный контроль асимметрии магнитного поля в воздушном зазоре гидрогенератора. *Енергетика и Електрифікація*. 1984. №.2. С.17-20.
135. Кодирование измерительной информации в гибридных волоконно-оптических датчиках/ Соколовский А.А., Задворнов С.А., Моисеев В.В. и др. *REDS: Телекоммуникационные устройства и системы*. 2016. №. 6(3). С.437-440.
136. Коломиец Л.Н. Дифференциальные волоконно-оптические датчики давления отражательного типа : дис. ... техн. наук : 05.13.05/ ГОУ ВПО «Московский государственный университет леса». Москва, 2007. 178 с.
137. Комаров Е.В., Покровский А.Д., Сергеев В.Г. Испытание магнитных материалов и систем: учебное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1984. 376 с.
138. Кузьмин В. В., Вакуленко А. Н. Режимы эксплуатации и наиболее часто встречающиеся повреждения гидрогенераторов ГЭС Днепровского каскада. Влияние параметров воздушного зазора между ротором и статором гидрогенератора на надежность его работы. *Гидроенергетика України*. 2005. №.2. С. 22 – 30.
139. Лавров С.С. Применение барицентрических координат для решения некоторых вычислительных задач. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1964. Том 4. №. 5. С. 905–911.
140. Лазерная локация / Матвеев И.Н., Протопопов В.В., Троицкий И.Н., Устинов И.Д. М: Машиностроение, 1984. 272 с.
141. Лазерный волоконно-оптический измеритель зазоров в гидрогенераторах /Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. *Технічна електродинаміка*. 2008. №. 2. С. 51-58.
142. Ландсберг Г.С. Оптика : Учеб. пособие: Для вузов. 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТЮ, 2003. 848 с.

143. Левицкий А.С. Измеритель биений вала гидрогенератора с помехозащищенным трактом передачи сигнала. *Гідроенергетика України*. 2013. №.1. С. 15-20.

144. Левицкий 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.

145. Левицкий А.С., Новик А.И., Зайцев Е.А. Емкостный датчик усилий в стяжних призмах статора турбогенератора с компенсацией погрешности от перекося электродов. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. №.78. С.126 – 132.

146. Левицкий А.С., Федоренко Г.М. Силовий акумулятор для стабілізації зусилля пресування осердя статора генератора з ємнісним датчиком контролю ступеня стиску. *Гідроенергетика України*. 2010. №1. С.21–24.

147. Левицький А.С. Методи та прилади автоматичного виміру повітряного зазору в гідрогенераторах. *Гідроенергетика України*. 2007. №. 4. С. 29–35.

148. Левицький А.С. Підвищення ефективності контролю та діагностики потужних гідрогенераторів за рахунок застосування ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. *Гідроенергетика України*. 2010. №. 4. С. 10-13.

149. Левицький А.С. Прилади та методи контролю радіальних биттів циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2009. №.1. С.14–20.

150. Левицький А.С. Розвиток теорії та практична реалізація ємнісного методу вимірювання параметрів дефектів потужних турбо- та гідрогенераторів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.05/Інститут електродинаміки. Київ, 2013, 311 с.

151. Левицький А.С., Зайцев Е.А., Кобзар К.О. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. *Приборы и методы измерений*. 2018. №.9(2). С.121-129.

152. Левицький А.С., Зайцев Є.О. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. №.43. С.134–136.

153. Левицький А.С., Зайцев Є.О. Гібридні волоконно-оптичні вимірювачі фізичних параметрів ракетно-космічної техніки. "Спеціальне приладобудування: стан та перспективи": Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції. 6-7 грудня 2016 року, м. Київ, Україна: К.: КП СПБ "Арсенал", 2016. С. 164-166.

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

155. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Закусило С.А. Спосіб визначення деяких механічних дефектів потужних генераторів за результатами вимірювання повітряного зазору. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» *ІРТК-2018*: Тези доповіді X Міжнародної науково–практичної конференції 22-23 травня 2018 м. Київ, Україна : К.: НАУ,2018. С.111-113.

156. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кобзар К. О. Силовий акумулятор стабілізації тиску пресування статора турбогенератора: Заявка на патент України: МКИ Н02К 1/16, G01B 7/14, G01B 7/22. № а 2018 03751; заявл. 06.04.2018.

157. 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. № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016; публ. 10.01.2018, Бюл. № 1

158. 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. № а2016 04728; заявл. 28.04.2016; публ. 10.10.2018, Бюл. № 19

159. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Похибки ємнісного вимірювача зазору в гідрогенераторі. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016.№.44. С.50–55.

160. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Особливості вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату. *Гідроенергетика України*. 2019. Вип. 1-2. С.39 –44.

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

162. 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. № а2017 09154; заявл. 15.09.2017; публ. 25.04.2019, Бюл. № 8.

163. Левицький А.С., Федоренко Г.М. Датчики для вимірювання зусилля пресування осердя статорів гідро- і турбогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2009. №.4.С.35 – 39.

164. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.

165. Левицький А.С., Новик А.И. Ёмкостный датчик измерителя воздушного зазора в гидрогенераторах. *Технічна електродинаміка*. 2008. №.2. С.68 – 71.

166. Левицький А.С., Новік А. І., Неболюбов Є. Ю. Створення ємнісного вимірювача повітряного зазору між ротором та статором в потужних гідрогенераторах. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2010. №.26. С.54 – 62.

167. Лигун А.А., Шумейко А.А. Асимптотические методы восстановления кривых: учебное пособие. Киев, 1997. 358 с.

168. Лиюкумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Волоконно-оптические интерферометры, СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2007, 110 с.

169. Лузин Н.Н., Новосёлова С.И. Дифференциальное исчисление: учебное пособие. М.: "Высшая Школа", 1961. 479 с.

170. Маделунг Э. Математический аппарат физики: монография. М.: Физматгиз, 1968. 620 с.
171. Мадоян А.А., Канцедалов В.Г. Дистанционный контроль оборудования ТЭС и АЭС: учебное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.
172. Маліновський В. І. Інформаційна мережа з об'єднаними оптичними інтерфейс-каналами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. Вінниця, 2010. 20 с.
173. Маліновський В. І., Кожем'яко В.П. Волоконно-оптичні канали для об'єданого передавання інформації та енергетичного живлення. *Оптико-електрон. інформ.-енерг. технології*. 2010. №. 2. С.244–255.
174. Маліновський В. І., Кожем'яко В.П. Організація каналів в оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2008. №.2 (12). С.19–25.
175. Мамиконянц Л.Г. Состояние и перспективы развития диагностики эксплуатационного состояния турбо-и гидрогенераторов электростанций. *Энергетика и Электрификация*. 1983. №.3. С.17 -19.
176. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений: монография. М.: Наука, 1978. 240 с.
177. Матюнин С.А. Бесконтактные волоконно-оптические датчики физических величин для высокоточных систем управления антропоморфными роботами и роботизированными платформами. *Перспективные системы и задачи управления: Тезиси доклада X Всероссийской научно-практической конференции 6-10 апреля 2015 года в п. Домбай, Карачаево-Черкесская республика*, 2015. С.21-32.
178. Медичне застосування оптичного волокна: огляд сучасного стану розвитку волоконно-оптичних сенсорів/Катан В.О., Нечипоренко Г.В., Кобернік А.О., Мельник М.О., Агаджанян А.Р. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2015. №. 1. С.124–131.
179. Метод и устройство контроля сердечника статора турбогенератора в процессе эксплуатации/ Кучинский К.А., Титко В.А., Крамарский В.А., Гуторова М.С. *Електротехніка та електроенергетика*. 2019. С.32-41.

180. Методи та засоби підвищення надійності виконавчих механізмів регулювально-запірної арматури трубопроводів АЕС/Кенсицький О.Г., Кромплас Б.А., Левицький А.С., Федоренко Г.М. К: НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. – Чорнобиль (Київ. обл.) : Ін-т проблем безпеки АЕС НАН України, 2016. 136 с.

181. Методика и измерительные средства определения усилий прессовки в сердечнике статора мощного турбогенератора/Федоренко Г.М., Бут А.А., Кузьмин В.В. и др. *Технічна електродинаміка*. 1991. №.4. С.64–69.

182. Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Ребрушкин М.Н. Виды и причины вибрации энергетических машин. *Современные наукоемкие технологии*. 2015. №.5. С. 32-36.

183. Минко А.Н. Оптимальная геометрия и массогабаритные параметры конструкции корпуса статора турбогенераторов с воздушной системой охлаждения. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. № 1. С. 33–39.

184. Молебный В.В. Оптико-локационные системы: монография. М.: Машиностроение, 1981. 181 с.

185. Муравлев О. П., Стрельбицкий Э.К. Определение неравномерности воздушного зазора в асинхронных двигателях по данным ОТК о числе задеваний ротора за статор. *Известия Томского политехнического института (Известия ТПИ)*. 1966. Т. 145. С.121–127.

186. Надточий В.М. Экспертные системы диагностики электрооборудования. *Электричество*. 1991. №.8. С. 9 –16.

187. Назолин А.Л., Поляков В.И. Способ обнаружения дефектов узлов крепления статора на работающей электрической машине: пат. 2279103 Росія: заявл. 15.07.2004; опубл. 2006, Бюл. № 18.

188. Назолин А.Л., Поляков И.В. Виброакустическая диагностика и ресурсосберегающая эксплуатация генераторов. *Новости ЭлектроТехники*. 2008. №.5(51). С.80-83.

189. Неболюбов Е.Ю., Новик А.И. Электронные преобразователи для работы с емкостными датчиками (аналоговые и цифровые). *Технічна електродинаміка*. 2015. №.3. С.67-74.

190. Неугольников А.П., Поспелов В.И. Волоконно-оптический датчик деформации. *Электроника. Наука. Технология. Бизнес*. 2006. №.1. С.74-75.
191. Нецеевский А.Б., Геллер Р.Л., Щетинин А.Д. Устранение асимметрии воздушного зазора в гидрогенераторе типа СВ 1340/150-96. *Электрические станции*. 1975. №.1. С. 45–49.
192. Новик А.И., Левицкий А.С., Воцинський К.В. Источники погрешностей емкостного измерителя воздушного зазора в гидрогенераторах. *Гидроенергетика України*. 2009. №. 3. С.58 – 60.
193. Новкунский А.А. Информационно-аналитическая система оценки и прогнозирования технического состояния гидросилового оборудования ГЭС. *Вестник науки Сибири. Спецвыпуск*. 2015. С.87-92.
194. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій [Чинний від 19.11.2007]. Київ, Державна інспекція ядерного регулювання України, 2008.
195. Обнаружение дефектов гидрогенераторов / Александров А.Е., Гуцин Е.В., Кулаковский В.Б., Мамиконянца Л.Г., Элькинда Ю.М. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
196. Оптика и связь / Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. М.: Мир, 1984. 504с.
197. Основные требования к системам технической диагностики энергетических машин / Глебов И.А., Амбросович В.Д., Быков В.М., Данилевич Я.Б. : *Сб. научн. тр. Киев: Наук. Думка*, 1984. с. 6-15.
198. Основы оптоэлектроники / Суэмацу Я., Катаока С., Кисико К., Кокубун Я., Судзуки Т., Исин О., Енэдзава С.; Пер. с яп. М.: Мир, 1988. 288 с.
199. Остерник Э.С. О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов разъемной конструкции. *Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ» : Динаміка та міцність машин*. 2011. №.52. С.1-15
200. Павлов А.В., Черников А.И. Приемники излучения автоматических оптико-электронных приборов: учебное пособие. М.: "Энергия", 1972. 240 с.

201. Перетворювач інформаційних сигналів для гібридних оптоелектронних вимірювачів переміщень/ Зайцев Є.О., Левицький А.С., Жукинський І.М., Кромпляс Б.А. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. №. 4. С.31– 37.
202. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы: монография. М.: Сов. Радио, 1968. 468 с.
203. Петров Ю.В. Неравномерность воздушного зазора гидрогенератора и ее влияние на вибрацию статора. *Електрические станции*. 1974. №.1. С.25-28.
204. Пикульский В. А. Влияние термомеханических деформаций в статоре турбогенератора на изменение плотности прессовки в зубцовой зоне крайних пакетов. *Електротехніка*. 1991. №.5. С.17-21.
205. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов: монография. 5-е изд. К.: Вища школа, 1986. 775 с.
206. Плотников С.В. Разработка и исследование лазерных триангуляционных приборов для промышленного размерного контроля : кандидат технических наук : 05.11.07 / Конструкторско-технологический институт. Новосибирск, 2000. 189 с.
207. Повышение помехозащищенности электроизмерительных приборов при их експлуатації на енергооб'єктах/Сопель М.Ф., Слинько В.М., Пилипенко Ю.В., Трофименко С.А., Мац В.Я. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2008. №.19. С.41 – 44.
208. Повышение помехоустойчивости фазовых лазерных дальномерных систем/Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. *Технічна електродинаміка*. 2014. №.3. С.91– 96.
209. Полищук В.И. Оценка остаточного ресурса турбогенераторов, отработавших свой срок службы. *Вестник ПГУ*. 2010. №.1. С.104-110.
210. Поташник С.И. Некоторые дефекты капсульных гидрогенераторов и их идентификация с помощью датчиков воздушного зазора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2009. №.24 .С.67–74.

211. Поташник С.И., Федоренко Г. М., Васьковский Ю.Н. Проблемы повышения надежности мощных гидрогенераторов при неустойчивости воздушного зазора. *Гидроэнергетика Украины*. 2006. №. 3. С.6-10.

212. Спосіб вимірювання повітряного зазору між статором і ротором в гідрогенераторі та пристрій для його реалізації/ Поташник С.І., Вошинський К.В., Грубой О.П., Левицький А.С., Неболюбов Є.Ю., Новік А.І., Федоренко Г.М., Шофул А.К.: пат. 86524 Україна: МПК G01B 7/14, G01R 27/26 . № а 2007 12431; заяв. 09.11.2007; опубл. 27.04. 2009, Бюл. № 8.

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

214. Родионов В. И. О применении специальных многомерных сплайнов произвольной степени в численном анализе. *Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. Мех. Компьют. науки*. 2010. №.4. С.146–153.

215. Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів/ Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромплес Б.А., Сидорчук В.Є. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2017. №.24(100). С.151–161. DOI: 10.15276/eltecs.24.100.2017.19

216. Розробка математичної моделі для визначення статичного ексцентриситету ротора гідрогенераторів/Закусило С.А., Зайцев Є.О., Левицький А.С., Жукинський І.М. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*: Збірник матеріалів XIX Міжнародної науково-практичної конференції 26-28 вересня 2018 м. Київ, Україна: К.: ТОВ "Календар", 2018. С. 515-519.

217. Ростик Г.В. Оценка технического состояния турбогенераторов, М.: ИПКГосслужбы, 2008, 489 с.

218. Рунов Б.Т., Зиле А.З., Голоднова О.С. Особенности технической диагностики турбогенераторов. *Энергетика и Электрификация*. 1983.№.3. С.19- 27.

219. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: монография. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989, 432 с.

220. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ: монография. М.: Мир, 1980. 456 с.
221. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи: монография. М.: КомпьютерПресс, 1998. 302 с.
222. Сидоров С.В., Соколовский А.А., Крамской Ю.Г. Гибридный волоконно-оптический трансформатор напряжения. *Фотон-экспресс*. 2011. №.6(94). С. 30.
223. Силовий акумулятор стабілізації тиску пресування осердя статора турбогенератора з контролем ходу тарілчастих пружин/Левицкий А.С., Зайцев Є.О., Титко А.И., Прус В.В. *Проблеми енергоресурсозбереження в електроенергетичних системах: ICPEES 2018 Наука, освіта та практика:Тези доповіді XVIII Міжнародної науково-технічної конференції, 15–17 травня 2018 р., м. Кременчук, Україна: КрНУ, 2018. С.114-116.*
224. Система автоматического построения орбиты вала в подшипнике скольжения/ Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э. *Современные научные исследования и инновации*. 2017. №.5. URL:<http://web.snauka.ru/issues/2017/05/82682> (дата звернення: 02.10.2014)
225. Сканави М.И. Элементарная математика: монография. 2-е изд. М.: Наука, 1974. 592 с.
226. Скворцов О.Б., Трунин Е.С. Синхронный динамический анализ формы ротора и магнитного поля для генераторов ГЭС И ГАЭС. URL: pennwell.websds.net/2013/Moscow/rp-hvr/papers/T3S6O5-paper-ru.pdf (дата звернення: 02.10.2014)
227. Складов В.Ф., Гуляев В.А. Диагностическое обеспечение энергетического производства: монография. К. Техніка, 1985. 184 с.
228. Смирнов В.А. Введение в оптическую радиоэлектронику: монография. М.: "Советское радио", 1973. 208 с.
229. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем : монография. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.

230. Соколовский А.А. Микрооптические элементы и устройства для волоконно-оптических измерительных систем : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 01.04.01. Москва Ин-т радиотехники и электроники (Фрязинский филиал), 2009. 39 с.

231. Соколовский А.А., Задворнов С.А. Энергосберегающее кодирование измерительной информации в гибридных волоконно-оптических датчиках. *Датчики и системы*. 2015. № 11. С.17-20.

232. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Київ: ОЕП. ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2007. 262 с.

233. Статистический анализ временных рядов / Андерсон Т. ; пер. с англ. под ред. Ю. К. Беляева. М.: Мир, 1976. 757 с.

234. Статор електричної машини : пат. 66717 Україна : МПК H02K 1/16. № а 2011 09022; заявл. 19.07.2011; опубл. 10.01.2012. Бюл. №1.

235. Структура гібридного оптично-електронного вимірювача повітряного зазору гідрогенераторів/ Зайцев Є.О., Левицький А.С., Жукинський І.М., Архипова Л.В., Балящук Л.І. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: Збірник матеріалів ХVІІ Міжнародної науково-практичної конференції, 27-29 вересня 2017 р., м. Київ, Україна: ТОВ "Календар", 2017. С. 563-567.*

236. Счастливый Г.Г., Тимошик А.М. Оцінка техніко-економічного стану турбогенераторів, які відпрацювали встановлений ресурс . *Енергетика и Электрификация*. 2004. №.1. С.2 – 8.

237. Счастливый Г.Г. Современное состояние и перспективы исследований по обеспечению надежности мощных энергетических электромашин. *сб. научн. тр. Надежность и диагностика энергетических электромашин: Киев: Наук. Думка*. 1984. С.15 – 22.

238. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети: учебное пособие. 5-е изд, СПб.: Питер, 2012. 960 с.

239. Технические средства диагностирования: Справочник/ Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. М.: Машиностроение, 1989, 672 с.

240. Тимербаев М.Р. Численные методы. Приближение функций. Численные интегрированные: учебное пособие. Казань: Казанский федеральный университет, 2015. 92 с.

241. Титко А.И. Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах: монография. Київ: "Наукова думка", 1994. 304 с.

242. Титко О.І. Наукові заходи та засоби підвищення надійності і ефективності роботи енергетичних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2004. №.2(8). С.158 – 159.

243. Титко О.І., Мистецький В.А. Математична модель, методика та результати розрахунку зусиль у стяжних призмах осердя статора турбогенератора за наявності дефектів на основі методу трьох моментів. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. №.39. С. 38-43.

244. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех: учебное пособие. М.: ДМК Пресс, 2010. 880 с.

245. Трофименко С.А. Повышение помехозащищенности при поверке средств измерений электрических величин. *Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития(МРФ-20056):* 2-й Международный радиотехнический форум :Сб. науч. Тр. Том VII. МЕэдунар. Конф. «Метрология и измерительная техника», Харьков:АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. С.247- 249.

246. Трунин Е.С., Скворцов Е.Б. Эксплуатационный контроль технического состояния агрегатов. *Электрические станции*. 2010. №.6. С.38 –45.

247. ТУ 11-БК0.305.048ТУ-85. Паспорт: устройство распределения аналоговых данных "Электроника МС 8401". М.: Электроника, 1984. 36 с.

248. ТУ 11-БК0.305.049ТУ-85. Паспорт: устройство сбора аналоговых данных "Электроника МС 8201". М.: Электроника, 1984. 40 с.

249. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА–М, 2002, 528 с.

250. Фаддеев Д., Фаддева В. Вычислительные методы линейной алгебры : навч. посіб. СПб: Лань, 2002. 736 с.

251. Фазовый лазерный измеритель параметров вибраций с расширенным частотным диапазоном/ Брагинiec И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д. *Технічна електродинаміка*. 2013. №.1. С.82-86.
252. Факторный анализ /Иберла К.; Пер. с нем. В. М. Ивановой. М.: Статистика, 1980. 398 с.
253. Федоренко Г.М., Васьковский Ю.Н., Саратов В. А. Моделирование электромагнитной нагрузки демпферной системы ротора гидрогенератора в синхронных режимах при эксцентриситете воздушного зазора. *Гидроенергетика України*. 2006. №. 1. С. 25-32.
254. Федоренко Г.М., Саратов В.О., Черниш В.В. Вплив параметрів повітряного зазору на характеристики гідрогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2005. №.4. С.26 – 33.
255. Феликсон Е. И. Упругие элементы приборов : монография. М.: Машиностроение, 1977. 311 с.
256. Фукс-Рабинович Л.И., Епифанов М.В. Оптико-электронные приборы: монография. Л.:Машиностроение, 1979. 362 с.
257. Харкевич А.А. Борьба с помехами: монография. М.: Наука, 1965. 276 с.
258. Хинрикус Х.В. Шумы в лазерных информационных системах: монография. М.: Радио и связь, 1987. 108 с.
259. Хоменко И.В., Поляков И.В. Анализ и математическое описание основных видов неравномерности воздушного зазора асинхронного двигателя. *Електромеханічне та електричне перетворення енергії*: Международная научная конференция MicroCAD Секція №9, Харьков:НТУ "ХПИ", 2016. С.120.
260. Хоменко И.В., Тихонравов С.Н. Методы косвенного контроля эксцентricности воздушного зазора асинхронных электродвигателей. *Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів №7*: Сборник научных трудов, Харьков:"Вестник НТУ "ХПИ", 2009. С.154-159.
261. Хужаниёзов М.О. Обзор технологии "Energy Harvesting" и перспективы ее применения. *Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития*. 2016. Том. 12. С. 127-132.

262. Цветков В.А., Уланов Г.А. О диагностическом обслуживании энергетических агрегатов. *Электрические станции*. 1996. №1. С.21 – 24.
263. Чепульский Ю.П., Замараев К.С. Вибродиагностика деталей машин: Учебное пособие. М.: МИИТ, 2009. 75 с.
264. Числовая апертура оптоволокна. URL: http://laser-portal.ru/content_626/ (дата звернення : 20.10.2019).
265. Шарапов В. М., Мусієнко М.П., Трембовецька Р.В. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин: пат. 6156 Україна : МПК G01L1/16, G01P15/09. №20041008284; заявл. 13.10.2004; публ. 15.04.2005, Бюл. №4.
266. Шарапов В. М., Трембовецька Р.В. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин : пат. 8609 Україна : МПК G01L1/16, G01P15/09. №200500336; заявл. 14.01.2005; публ. 15.08.2005, Бюл. № 8.
267. Шарапов В. М., Трембовецька Р.В. П'єзоелектричний перетворювач механічних величин: пат. 8613 Україна : МПК G01L1/16, G01P15/09. №200500359; заявл. 14.01.2005; публ. 15.08.2005, Бюл. № 8.
268. Шевченко В.В., Минко А. Н. Модернизация конструкций отечественных турбогенераторов с учетом требований поддержания их конкурентоспособности. *Вісник НТУ «ХП»*. 2014. № 38(1081). С. 146–155.
269. Шелемба И.С. Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практическое применение : автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук : 01.04.05/ Институт автоматики и электрометрии. Новосибирск, 2018. 135 с.
270. Шиндор О.В. Методика контроля критических режимов работы высокоэнергетических установок на основе вейвлет-анализа их нестационарных флуктуационных и шумовых сигналов: дис. канд. техн. наук : 05.11.13 / Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н.Туполева. Казань, 2015. 164 с.
271. Шнейдер В. Е. Краткий курс высшей математики: учеб. пособие. М.: «Высш. школа», 1972, 640 с.

272. Штогрин А. В. Научно-технические мероприятия по уменьшению повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванной вибрацией в торцевых зонах: дис. ... канд. техн. наук 05.09.01/Одес. нац. политехн. ун-т., Одеса, 2015. 161 с.

273. Шум (источники, описание, измерение)/Ван дер Зил.; пер. с англ. под ред. А.К. Нарышкина. М.: "Сов. радио" , 1973. 228 с.

274. Шум при измерениях / Ван дер Зил; пер. с англ. под ред. А.К. Нарышкина. М.: Мир, 1979. 292 с.

275. Щевелев А.С. Дифференциальные волоконно-оптические преобразователи микроперемещений для информационно-измерительных систем : дис. ... техн. наук : 05.11.16/ Пензенский государственный университет. Пенза, 2013. 159 с.

276. Электронные схемы и их применение / Сентурия С., Уэдлок Б.; пер. с англ. под ред. М. Д. Карасева. М.: Мир, 1977. 596 с.

277. Элькинд Ю.М., Нецеевский А.Б. Опыт разработки систем, устройств и алгоритмов диагностики гидрогенераторов. *Энергетика и Электрификация*. 1983. №3. С.21- 24.

278. Энергетика: история, настоящее и будущее. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики/ Базеев Е. Т., Билека Б. Д., Васильев Е. П., Варламов Г. Б., Вольчин И. А.; ред.: В.Н. Клименко, Ю.А. Ландау, И.Я. Сигал. Київ, 2011. 400 с.

279. Юрова О.В. Технологические методы и средства повышения точности волоконно-оптических преобразователей линейных и угловых перемещений отражательного типа : дис. ... к-та техн. наук: 05.11.14/ Пензенский государственный университет. Пенза, 2012. 246 с.

280. Якушенко Ю.Т. Теория и расчет оптико-электронных приборов., М. : Машиностроение, 1989, 360 с.

281. Яремчук А.А., Трофименко С.А. Подавление сетевых помех при поверке высокочувствительных средств измерений. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2003. №3(6). С. 92-96.

282. 4000 Series Air Gap Sensor. URL: http://www.gepower.com/prog_serv/products/oc/ja/downloads/4000_20mm.pdf (дата звернення : 20.10.2019).

283. A dynamometer design and analysis for measurement the cutting forces on turning based on optical fiber Bragg Grating sensor/ Liu M., Zhou Z., Tao X., Tan Y., Liu M. et al. *World Congress on Intelligent Control and Automation: Proceedings of the 10th: Beijing 2012*. P.4287-4290. DOI: 10.1109/WCICA.2012.6359200

284. A scoping study of electric and magnetic field energy harvesting for wireless sensor networks in power system applications/Moghe R., Yang Y., Lambert F., Divan D. *ECCE: Proceedings of the IEEE: San Jose, CA, USA 2009*. P. 3550–3557. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316052.

285. AD7745/46 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. 2019. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (дата звернення: 20.10.2019).

286. AD7745/46 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. 2019. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (дата звернення: 20.10.2019).

287. AGMS – Air Gap Monitoring System., Проспект фірми VibroSystM (Квебек, Канада). URL: <http://www.wibrosystm.com>. (дата звернення: 20.10.2019).

288. AGMS System Configuration and sensor locations within the generator. URL: <https://www.marubun.co.jp/legacy/product/measurement/electric/qgc18e0000000ohx-att/AGMDIAGE.pdf> (дата звернення 01.04.2019).

289. Air Gap Capacitive Sensor. URL: http://www.marubun.co.jp/product/measurement/electric/qgc18e_00000000охс_att/AGMS_DS.pdf (дата звернення : 20.10.2019).

290. Air Gap Measuring Systems LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. Проспект фірми Vibro-Meter SA (Швейцарія). URL: <http://www.skf.com/files/058406.pdf> (дата звернення :20.10.2019).

291. Air Gap Monitoring System. URL: <http://www.mc-monitoring.com/sensors/airgap-sensors.html> (дата звернення: 20.10.2019).

292. Air Gap Sensor AGS.URL: <http://www.mikrotrend.com/AGS.htm>(дата звернення 01.04.2019).
293. Azuare C., Millan A. Stator deformation of large hydrogenerators and its effects on the machines. *Proceedings of the SIGRE Session*. 29 August-3 September 2004 in Paris, 2004. P. 1 – 7.
294. Bakshi U.A., Bakshi A.V. Measurements And Instrumentation. Front Cover: навч.посіб. Shaniwar Peth (Pune, India):Technical Publications, 2009. 652 p.
295. Baxter L.K. Capacitive Sensors: design and applications. *IEEE Press*. 1997. 320 p.
296. Besnerais J. Le. Effect of lamination asymmetries on magnetic vibrations and acoustic noise in synchronous machines. *International conference on electrical machines and systems (ICEMS)*: Proceedings of the 18th, Oct. 25-28 2015 Pattaya City, Thailand.2015. P.1729– 1733.
297. Bissonnette Marc R. Case Studies of Problems Diagnosed Using On-Line Machine Monitoring on Hydro-Generating Machines. *Proc. of the Hydro Vision*. 2006. P. 1–11.
298. Budampati R., Kolavennu S. Industrial Wireless Sensor Networks Monitoring, Control and Automation: навч.посіб. Elsevier Ltd, 2015. 250 p.
299. Capacitive and Inductive Sensors for Diagnosing Air-Gap Anomalies in Synchronous Generators / Caetano R.E., Chabu I.E.,Stolfi G.,Santos J.C., Junior S.N., Gomes C.E., Paiva R.D., Nabeta S.I., Micerino F.J. *IEEE IEMDC*.2015. P.637-641.
300. Chen T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multi-layered dielectric structures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17, №4. P.1307–1318. DOI: 10.1109/ TDEI.2010.5539703.
301. Chitnis V.T., Narain R., Mohanan V. An optoelectronic transducer for vibration amplitude measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*. 1990. №. 24(2). P.123–127.
302. CMU 100 Fiber Optic to RS232 Converter. URL: <http://www.qoo.by/3ie3> (дата звернення: 20.10.2019).

303. Continuous On-Line Air Gap Monitoring for Hydro Generators. URL:<http://www.irispower.com/Upload/Brochures/AGTracII%20V1-Mar%202013.pdf> (дата звернення : 08.08.2016).
304. Cross W. Optical supply for fiber-optic hybrid sensors. *Sensors and actuators*. 1991. vol.25-27. P. 475-480.
305. Culshaw B., Dakin J. Optical Fiber Sensors: Systems and Applications. Boston: Artech House. 1989, 492 p.
306. G.F. (US) Use of fiber optic sensor techniques for monitoring and diagnostics of large AC generators: pat. 20120026482 A1 United States Patent: Int. Cl. G01J5/48; Appl. No. US 13/065,842; Publ date Feb. 02, 2012.
307. Dan M. S. Handbook of Force Transducers: Principle and Components: монографія. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 612 p.
308. Design considerations for ultra-low energy wireless microsen-sor nodes/Calhoun B.H., Daly D.C., Verma N., Finchelstein D.F.,Wentzloff D.D.,Wang, A., Cho S., Chandrakasan, A.P. *IEEE Trans. Comput.* 2005. №54 (6). P. 727–740.
309. Development of distance sensors for diagnosing airgap anomalies in synchronous generators/Caetano R.E., Chabu I.E.,Stolfi G., Santos J.C., Nagao S., Gomes C.E., Paiva R.D. , Nabeta S.I., Micerino F.J. *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*:Proceedings of the 2015 IEEE 24th: 3-5 June 2015 Buzios, Brazil, 2015. P. 146-149. DOI: 10.1109/ISIE.2015.7281459
310. Dong B. Fiber optic sensors for on-line, real time power transformer health monitoring. Diss: Electrical Engineering. *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2012. 83 p.
311. Eriksson K., Eriksson S. VIMOS condition monitoring for hydro power machines. *ABB Review*.1992. №. 1. P. 15–20.
312. Experience with Special Fiber Optic Sensors for Online Monitoring of High Voltage Stator Windings at Large Turbine Generators / Strack S., Weidner J.R., Ruhr A.D., Bosselmann T., Villnow M., Willsch M. *Long Term Reliability and Machine Operation Diagnosis: AMA Conferences 2013 - SENSOR 2013, OPTO 2013, IRS 2013*. P. 610-617. DOI 10.5162/sensor2013/D8.3.

313. Fiber-optic devices TOSLINK. Japan., 2008. URL: <https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/toshiba%20pdfs/fiber-optic%20devices%20toslink.pdf> (дата звернення: 20.10.2019).
314. Fisher N.I. Statistical analysis of circular data : Монографія. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 277 p.
315. Gangopadhyay T.K. Prospects for Fibre Bragg Gratings and Fabry-Perot Interferometers in fibre-optic vibration sensing. *Elsevier Since Direct Sensors and Actuators*. 2004. vol.113(1). P.20-38 . DOI:10.1016/j.sna.2004.01.043.
316. Gorbova G. M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor. *World Congress : Proceeding XVII IMECO 22–27 June 2003 Dubrovnic, Croatia, 2003*. P.1965–1968.
317. Grattan K. T. V., Grattan L.S., Meggitt B. T. Optical Fiber Sensor Technology. Applications and Systems, Vol. 3.: монографія. London: Kluwer Academic Publishers, 2000. 325 p.
318. Griščenko M. Air gap monitoring unit generator to advance vibration diagnostic procedure. *Summary of the Doctoral Thesis*. R. : RTU, 2015, 20 p.
319. Gross W. Optical power supply for fiber-optic hybrid sensors. *Sensors and actuators*. 1991. №. 25-27. P. 475-480.
320. Guide to the Measurement of Force. URL: http://resource.npl.co.uk/docs/science_technology/mass_force_pressure/clubs_groups/instmc_weighing_panel/forceguide.pdf. (дата звернення : 29.11.2019).
321. Hahn S.L. Hilbert Transforms, in Transforms and Applications Handbook: навч.посіб. Florida: CRCPress Inc, 2000. 176 p.
322. Heerens W.C. Multi-terminal capacitor sensors. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1982. №. 15. P. 137–141.
323. Hoffmann K. An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges: монографія. HBM, 2012. 250 p.
324. IEEE Std 492-1999(R2011). Guide for Operation and Maintenance of Hydro-Generators. [Approved: 28.01.1999]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1999. 70 p.

325. Investigation of wind turbine blade monitoring based on optical fiber Brillouin sensor/Zhang F., Li Y., Yang Z., Zhang L. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. 2009. Nanjing, China. 6-7 April 2009 P.1-4.

326. ISO 13373:2017. Condition monitoring and diagnostics of machines.Vibration condition monitoring. [Released:2017-10]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2017. 23p.

327. ISO 13374:2007. Condition monitoring and diagnostics of machines. Data processing, communication and presentation [Released: 2007-07] ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems , 2007. 70p.

328. ISO 13381-1:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines . Prognosics .Part 1: General guidelines. [Released: 2015-09]. ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems, 2015. 21p.

329. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration . Measurement and evaluation of machine vibration . Part 1: General guidelinesISO79 [Released: 2016-11-30]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2016. 46 p.

330. ISO 20816-5:2018. Mechanical vibration.Measurement and evaluation of machine vibration. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plantsISO20_1[Released:2018-07-24]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2018. 60 p.

331. ISO 7919-5:2005. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts . Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants [Released:2005-04]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2005. 16 p.

332. Jovanovska V., Arapcheska M. Increasing the Power of the Turbogenerator in the Process Of Modernization in the Mining and Energy Industry.

International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2015. № 2 (2). P. 162–166.

333. Kallaste A. Analysis of the eccentricity in a low speed slotless permanent-magnet wind generato. Conference 2012 *Electric Power Quality and Supply Reliability*: Proceedings of 8th International:Tartu,2012. P.47-52.

334. Kuzmin V.V. Hydrogenerator poles damage by electrical erosion-pattern, cause, diagnostics and failure prevention. *Proceedings of the SIGRE Session*. August 27th - September 1st, Palais Des Congres – Paris, 2006. P.1 – 9.

335. Kuznetsov D.V., Polyakov F.A., Shandybin M.I. Instrumental and visual inspection of turbogenerator stator cores. *Power Technology and Engineering*. 2014. Vol.48, №. 3. P. 241–248.

336. Lamela H.,Garcia-Souto J.A.,Macia-Sanahuja C. Interferometric optical fiber sensors for measurements within oil-filled power transformers. *Optical Fibers: Applications*. 2005. №. 5952. P. 56-63.

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

338. Lin J. Applying Stator End-Winding Vibration Monitoring Technology At J.H. Campbell Generation Plant.Texas. *Iris Rotating Machine Conference*. San-Antonio, Texas, 10-13 June, 2002. P.1-7.

339. Mamishev A.V. Interdigital Dielectrometry Sensor Design and Parameter Estimation Algorithms for Non-Destructive Materials Evaluation. *Cambridge: MIT*. 1999. 709 p.

340. Manual. TS5A3159 1-Ω SPDT Analog Switch. USA., 2014. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ts5a3159.pdf> (дата звернення : 20.10.2019).

341. MAS6512. Micro Analog System. Capacitive Sensor Signal Interface IC MAS6512. [Data Sheet DA6512.000]. 2012. 26 p.

342. Michalzik R., Ebeling K. J. Operating principles of VCSELs. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices. *Springer Berlin Heidelberg*. 2003. P.53-98.
343. Mikalauskas R., Volkovas V. Air gap modelling and control possibilities in rotary systems. *Ultragarsas*. 2003. №. 1(46). P. 7 – 11.
344. Milykh V.I., Dubinina O.N. Numerical calculation of the magnetic field in the end zone of the turbogenerator under load conditions. *Electrical engineering and electrical mechanics*. 2003. №.1. P. 64-69.
345. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of the electromagnetic parameters of electrical machines on basis of numerical calculations of magnetic fields. *Electrical engineering and electrical engineering*. 2006. №.2. P. 40-46.
346. Milykh V.I., Vysochin A.I. Principles of calculation of the magnetic field in the end of the turbo generator in various regimes of its work. *Electrical engineering*. 2010. №. 3. P.19-24.
347. Mobius A.F. Der barycentrische Calcul, ein neues Hilfsmittel zur analytischen Behandlung der Geometrie: монографія. Leipzig: Barth, 1827. 388 p.
348. Monitoring applications of power generators for the increase of energy efficiency using novel fiber optical sensors/ Villnow M., Willsch M., Bosselmann T., Schmauss B. *SPIE Eco-Photonics 2011: Sustainable Design, Manufacturing, and Engineering Workforce Education for a Green Future. Vol. 8065*. Strasbourg, France. 19 April 2011. P. 154-162. DOI: 10.1117/12.882864.
349. Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field/ Santos H. F., Rigoni M., Elias R.A., Feler L. A., Wengerkievicz C.A.C., Batistela N. J., Sadowski N., Kuo-Peng P., Bastos J. P. A., L. M. de Freitas *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017. Vol. 16, №. 1. P.70-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1872>
350. Nower D. Online Vibration Monitoring. URL: [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter /PM%20Articles/MaintWorld_May13_OnlineVibMonir.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Articles/MaintWorld_May13_OnlineVibMonir.pdf) (Last accessed: 08.08.2016)

351. On-line Monitoring of Hydro Generating Units for Optimized Operation and Maintenance. URL: http://www.vibrosystem.com/pdf/ZOOM_E.PDF (Переглянуто: 08.08.2016).
352. Othonos A. Fiber Bragg grating. *Rev. Sci. Instrum.* 1997. V.68. №12. P. 4309–4341.
353. Park C., Chou P.H. AmbiMax: autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes. *Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON 2006)*: Proceedings of the 3rd Annual IEEE: vol. 1. Reston, VA, USA 2006. P.168–177. DOI: 10.1109/SAHCN.2006.288421.
354. Paspalovski T., Jovanovska V. Partial Replacement of the Active Steel on the Turbogenerator End Zone. *Termotechnika*. 2015. XLI, vol. 1. P. 1–7.
355. Replacement (reconstruction) of the active steel end zone of the turbogenerator / Paspalovski T., Mojsoska N., Jovanovski N., Jovanovska V., Sorverski Z.V. *Prociding 1st Global Virtuale Conference*: Section 21. Energy. 8-12 april, 2013. P. 659–663.
356. Pollock G. B., Lyles I.F. Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992. Vol. 7. №.4. P. 680 – 668.
357. Polyanin A.D., Manzhirov A.V. Handbook of mathematics for engineers and scientists: справочник. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC, 2007. 1543 p.
358. Poularikas A.D. The Transforms and Application Handbook: монографія. Boca Raton (USA):CRC Press LCC, 2000. 1335 p.
359. Power-by-Light. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/photovoltaics/iii-v-and-concentrator-photovoltaics/power-by-light.html> (дата звернення: 20.10.2019).
360. Process Management Emerson. URL: <http://www.strongarm.su/Docs/kip.pdf> (дата звернення: 08.08.2016).

361. Rahmatian F., Blake J.N. Applications of High-Voltage Fiber Optic Current Sensors. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 18-22 June 2006. Montreal, Que., Canada. P. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2006.1709517.
362. Rasmussen J., Howard B. Condition Monitoring for Hydro Machinery. *Orbit Magazine*, vol.2, 2004. P. 49-57.
363. Reliable and lightning-safe monitoring of wind turbine rotor blades using optically powered sensors/Worms K., Klamouris C., Wegh F., Volkmer D., Volkmer D., Philipps S.P., Reichmuth S.K., Helmers H., Kunadt A., Vourvoulakis J., Bett A.W., Koos C., Freude W., Leuthold J., Stork W. *Wind Energy*. 2017. №.20.P.345–360. DOI: 10.1002/we.2009
364. Research of a Capacitive Distance Sensor to Grounded Surface/ Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Bereznynchenko V.O., Smyrnova A.M. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. №.78(2):1-8. P.173-180.
365. Rolim F., Tetreault A., Marshall R. Air gap monitoring system key element to correctly diagnose generator problems. *II ENAM*. 2004. URL: <http://vibrosystm.com/wp-content/uploads/PA003-a.pdf> (Last accessed: 08.08.2016)
366. Rosolem J.B., Floridia C., Sanz J. Optical system for hydrogenerator monitoring. *Proceedings of the International Council for Power Electroenergetical Systems CIGRE 2010*. Paris (France):2010. P. 1–8.
367. Study Influence Industrial Frequency Magnetic Field On Capacitive Pressing Sensor for Large Turbogenerator Core Clamping System/ Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Panchyk M., Bereznynchenko V. *2019 IEEE Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON-2019)*, 2 – 6 Jule, 2019 Lviv, Ukraine 2019. P. 566–569.
368. Sudevalayam S., Kulkarni P. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2010. №. 13, №. 3. P. 443-461.
369. Sviderskii A., Zaitsev E. Review of usual phase method for laser range finder. *"Інтелект, інтеграція, надійність": VII міжнародна конференція студентів та молодих вчених, квітень 2014 Україна, Київ: К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2014. С.44-45.*

370. Talas P., Toom P. Dynamic measurement and analysis of air gap variations in large hydroelectric generators. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1983. Vol. PAS-102. №. 9. P. 3098 – 3106.

371. Technical Data. ACFL-5211T-000E 1MBd Dual-channel, Bi-directional Optocoupler. USA, 2015. URL : <http://www.goo.gl/xwwaf4> (дата звернення: 20.10.2019).

372. Technical Data. HFBR-1515BFZ/2515BFZ Full Metal Fiber Optic Transmitters and Receivers., USA, 2011. URL: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-1413EN> (дата звернення: 20.10.2019).

373. Technical Data. Little Logic Guide. URL: <http://www.ti.com/lit/sg/scyt129f/scyt129f.pdf> (дата звернення : 20.10.2019).

374. Technical Data. MAX481/3/5/7 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422. URL: <http://www.maximintegrated.com> (дата звернення: 20.10.2019).

375. Technical Data. Optoisolators Logic Output. URL: <https://www.promelec.ru/pdf/h1111.pdf> (дата звернення: 20.10.2019).

376. Technical report MTe4P00647-1: Fiber optic sensors for high-voltage applications. Västeråsen: SP Technical Research Institute of Sweden, 13 p. (дата звернення: 20.10.2019).

377. The Power of Light: Photonic Power Innovations in Medical, Energy and Wireless Applications. URL: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=25278> (дата звернення: 20.10.2019).

378. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis / Toliyat A.H., Nandi S., Choi S., Meshgin-Kelk H. Boca Raton: CRC Press, 2012, 272 p.

379. Turán J., Ovseník Ľ. Optically powered fiber optic sensors. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2005. Vol. 5. №. 3. P.1-7.

380. Twerdochlib M. (US), Edward D. (US), Diatzikis E.V. (US) Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core: pat. 9,016,991 B2 United States Patent : Int. Cl. F16B 31/02, H02 K1/16, H02 K11/00, 3P 19/06, G01L 1/24, G01L 5/24, G01 D 5/353.; Appl. No. 13/863,473; Publ date Apr. 28, 2015.

381. USB-Serial Fiber Bridge. URL: <http://www.IORelay.com> (дата звернення: 20.10.2019).
382. User's manual hantek6022be v1.0.3 [http:// www.electronicaestudio.com/docs/Hantek6022BE_Manual.pdf](http://www.electronicaestudio.com/docs/Hantek6022BE_Manual.pdf). (дата звернення : 29.11.2019).
383. USO 4013 USB-to-serial/optical converter. URL: <http://www.qoo.by/3ie6> (дата звернення: 20.10.2019).
384. VMTM Air Gap. Capacitive Measuring Chains. URL: <http://vibrosystm.com/wp-content/uploads/9628-25D1A-103.pdf> (дата звернення: 20.10.2019).
385. Volkovas V., Mikalauskas R., Eidukeviciute M. Air gap measuring system for purpose of diagnostics and condition monitoring. *Diagnostyka* ' 30. 2004. P. 169-174.
386. Wan Z.G., Tan Y.K., Yuen C. Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks. *International Conference on Communication Technology (ICCT'11)* : Proceedings of the IEEE: Jinan, China 2011. P. 317–362. DOI: 10.1109/ICCT.2011.6157897.
387. A fiber-optic voltage sensor based on macro bending structure / Wangn P., Semenova Y., Wu Q., Farrell G. *Elsevier Optics & Laser Technology*. 2011. vol.43(5). P.922-925 DOI:10.1016/j.optlastec.2011.01.003
388. Wavelength-division multiplexing and demultiplexing on locally sensitized single-mode polymer microstructure waveguides/Wang M.R., Chen R.T., Sonek G. J.,Jannson T. *Optics letters*. 1990. vol. 15, №. 7. P. 363-365.
389. What is Energy Harvesting? URL: <https://www.conserve-energy-future.com/what-is-energy-harvesting-and-how-does-energy-harvesting-work.php> (дата звернення : 20.10.2019).
390. Wiazania M. Przedłużacz do cyfrowego toru audio AVT–514R, AVT–514OC, AVT–514CO. *Elektronika Praktyczna*. 2003. №.6. C.37-40.
391. Xiaohui H. Planar capacitive sensors - designs and applications. *Sensor Review*.2010. №30.(1). P.24–39. DOI: 10.1108/02602281011010772
392. Yuqing Lai. Current Displacement Sensor with LTCC Technology: Dissertation zur Erlangungl des Doktorgrades der Fakultät für Angenwandte

Wissenschaften der Albert-Lydwigs Universität Freiburg im Breisgau/ Freiburg, 2005, 110 p.

393. Zaitsev Ie.O. Electric machines faults monitoring system with hybrid electro-optic capacitive mechanical sensors. *Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)* :Abstracts of the 2017 IEEE International, 17-20 October 2017 Lviv, Ukraine,2017. P.15-18.

394. 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 2017 IEEE, August 29 – June 30 2017 : Kiev, 2017. P. 85-88. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075034

395. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. *International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*: Proceedings of the 2019 IEEE 39th, 16 – 18 April 2017:Kiev, Ukraine. 2019.P.644-647.

396. 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 2017 IEEE, May 29 – June 2 2017 Kiev, 2017. P. 390 – 394.

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

398. Zargari A., Blackburn T.R. Modified Optical Fibre Sensor for PD Detection in High-Voltage Power Equipment. Canada. *Conference of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. June 16-19,1996. Montreal: IEEE, 1996. P. 424–427.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

52. 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**

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

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

55. Зайцев Е. А. Исследование погрешности установки частоты синтезаторов частотно-фазовых систем с использованием LABVIEW. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 84-88. **Scopus**

56. 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**

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

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

59. 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**

60. 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**

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

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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**

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

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

68. Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів / Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромплас Б.А., Сидорчук В.Є. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2017. №24(100). С.151–161.

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

70. 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.

71. 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.

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

73. 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.

74. 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.

75. 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*

76. 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.

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

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

Scopus

79. 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.

80. 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.

81. 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..

82. 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. № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016; публ. 10.01.2018, Бюл. № 1.

83. 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. № а2016 04728; заявл. 28.04.2016; публ. 10.10.2018, Бюл. № 19

84. 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. № а2017 09154; заявл. 15.09.2017; публ. 25.04.2019, Бюл. № 8.

Праці апробаційного характеру

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. 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.

90. 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.

91. 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.

92. 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 (ІРТК-2017)*: Зб. тез доп. IX міжнар. науково – практичної конф., м. Київ, 16-17 травня 2017 р., НАУ, 2017. С. 97–100.

93. 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**

94. 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**

95. 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.

96. 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.

97. 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**

98. 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.

99. Zaitsev Ye.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**

100. 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.

101. 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.

102. Zaitsev Ye., Levytskyi A., Kromplyas B., Panchyk M., Berezhnychenko 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**

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер

ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»

А.П. Шевченко



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Чинний акт складено про те, що на Державному підприємстві «Завод Електроважмаш» при проектуванні нових та модернізації існуючих потужних турбогенераторів типу ТГВ будуть використані результати прикладної науково-дослідної роботи «Створення смісного вимірювача зусиль у стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора та щитових приладів контролю параметрів електричної енергії», яка виконувалась в Інституті електродинаміки Національної академії наук України в 2016 - 2018 рр. (шифр теми «Контроль-М», № держреєстрації 0115U004416, науковий керівник доктор технічних наук Левицький А. С.), а саме:

- удосконалений смісний метод вимірювання зусиль в стяжних призмах шляхом встановлення первинних перетворювачів зусиль під стяжними гайками;
- теорія та практичні результати досліджень диференціального та напівдиференціального смісних сенсорів зусиль;
- принципові електричні схеми вторинних електронних перетворювачів смісних сенсорів зусиль а) з компенсаційно-мостовим вимірювальним колом; б) з використанням конвертора CDC (Capacitance-to-Digital Converter);
- макетний зразок смісного вимірювача зусиль з конвертором CDC;
- теорія та практичні результати вимірювачів ходу тарілчастих пружин в силових акумуляторах системи стабілізації тиску пресування осердя статора потужного ТГ з багатоелементними смісними сенсорами;
- принципи побудови та схеми гібридних волоконно-оптичних вимірювачів (ГВОВ) зусиль;
- принципова схема та експериментальний зразок електронно-оптичного перетворювача ГВОВ.

Головний конструктор по турбогенераторам

ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»,

Лауреат державної премії України,

кандидат технічних наук



ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Державного підприємства

«Завод «Електроважмаш»

А. П. ШЕВЧЕНКО

2019.



АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи

« » 2019,

м. Харків

Чинний акт складено про те, що на Державному підприємстві завод «Електроважмаш» в обладнанні для контролю тиску пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ використані результати прикладної науково-дослідної роботи «Створення автоматизованих багатоканальних систем контролю в електроенергетиці», яка виконується в Інституті електродинаміки Національної академії наук України (термін виконання 2019–2021 рр.; шифр теми «ТОРЕЦЬ»; № держресстрації 0119U001215; науковий керівник – доктор технічних наук Левицький А. С., відповідальний виконавець – кандидат технічних наук Зайцев Є. О., виконавець – аспірант Панчик М. В.), а саме:

- метод контролю тиску пресування з застосуванням ємнісних сенсорів;
- теорія та практичні результати досліджень ємнісної вимірювальної комірки, до складу якої входить силосприймаючий елемент у вигляді плоскої мембрани з жорстким центром та ємнісний сенсор з цифровим виходом;
- електронно-оптичний перетворювач інформаційних сигналів гібридного волоконно-оптичного вимірювача зусилля пресування, який був використаний для живлення ємнісного сенсора з цифровим виходом і передачі сигналів від нього;
- макетний зразок ємнісного вимірювача зусиль.

Головний технолог
з турбогенераторобудування

В. М. Захожасв

Копія засвідчує
В.О. Вченого секретаря
Ю.Ф. Тодик

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукової роботи
Інституту електродинаміки НАН України,
чл.-кор. НАН України


А. Ф. ЖАРКІН
2019

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Державного підприємства
«Завод «Електроважмаш»
ПІДПРИЄМСТВО
«ЗВМ»
А. П. ШЕВЧЕНКО


2019 г.

ПРОТОКОЛ

технічної наради фахівців
державного підприємства завод «Електроважмаш» та
Інституту електродинаміки Національної академії наук України

8 серпня 2019р.
м. Харків

ПРИСУТНІ:**1. Від ДП «Завод Електроважмаш»:**

Захожаєв Володимир Миколайович, головний технолог з турбогенераторного виробництва;

Богасенко Федір Геннадійович, заступник головного технолога з турбогенераторного виробництва.

2. Від Інституту електродинаміки НАН України:

Зайцев Євген Олександрович, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук;

Панчик Михайло Вікторович, аспірант.

СЛУХАЛИ:

1. Інформацію Зайцева Є. О. стосовно технічних особливостей розробленого в ІЕД НАН України при виконанні НДР «Торець» (№ держреєстрації 0119U001215) ємнісного вимірювача зусиль пресування осердя статора потужного турбогенератора.

2. Інформацію Захожаєва В. М. відносно результатів випробувань макетного зразку вимірювача зусиль пресування під час складання і пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ.

УХВАЛИЛИ:

1. Запропонований спосіб вимірювання зусилля пресування та макет пристрою, що його реалізує, є корисним, і може бути застосований під час складання і пресування осердя статора потужних турбогенераторів.

2. Випробування макетного зразку вимірювача зусиль пресування, в якому застосовано ємнісний сенсор з цифровим виходом, в основному підтвердили технічні характеристики приладу.

3. Провести доробку конструкції ємнісного сенсора з урахуванням зауважень за результатами випробувань.

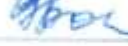
4. Рекомендувати створити силами ІЕД НАН України автоматизовану систему контролю зусилля пресування осердя статора, в якій застосувати розроблений сенсор зусиль.

5. Подати спільні заявки на патент України на спосіб контролю зусилля пресування осердя статора при складанні та пристрої, що його реалізують.

Від ІЕД НАНУ:

 Є. О. Зайцев
 М. В. Панчик

Від ДП «Завод Електроважмаш»:

 В. М. Захожаєв
 Ф. Г. Богасенко

Копію засвідчено
В. О. Вченою
Ю. Ф. Тесак


ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «Альмагруп»



О.Є. Петренко

2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

науково-практичних результатів та висновків докторської дисертації
старшого наукового співробітника Інституту електродинаміки НАН України,
к.т.н., с.н.с. **Зайцева Євгена Олександровича**

Даний акт складений про те, що розроблені автором методи та алгоритми вимірювання параметрів биття поверхонь елементів конструкцій, аналізу сигналів з використанням методу найменших квадратів, що базуються на використанні лінійних, експоненціальних та тригонометричних моделей використані ТОВ «Альмагруп» для покращення технічних та метрологічних характеристик безконтактних систем обстеження та дослідження стану будівель і споруд, в тому числі і об'єктів енергетичного комплексу України.



Провідний інженер
ТОВ «Альмагруп»

В.І. Марченко

ЗАТВЕРДЖУЮ



О.М. Костенко
2019 р.

АКТ

про використання та впровадження матеріалів докторської дисертаційної роботи старшого наукового співробітника Інституту електродинаміки НАН України,
к.т.н., с.н.с. **Зайцева Євгена Олександровича**
у навчальний процес на кафедрі технологій та засобів механізації аграрного виробництва Полтавської державної аграрної академії

Ми, що нижче підписались, комісія в складі голови завідувачого кафедрою технологій та засоби механізації аграрного виробництва д.т.н., с.н.с. Шейченко О.В. та членів: завідувач кафедрою галузевого машинобудування к.т.н., доцент Яхін С.В., к.т.н., доцент Горбенко О.В. засвідчуємо, що результати докторської дисертаційної роботи Зайцева Євгена Олександровича, а саме, принципи та методи побудови компонентів комп'ютеризованих систем контролю параметрів механічних дефектів потужних обертових машин, які реалізують можливості сучасних технологій з автоматизації отримання значень контрольно-діагностичних параметрів, які використовуються для функціонального діагностування машин впроваджені у навчальний процес кафедри під час розробки курсів лекцій, лабораторних робіт та практикумів з предметів «Конструювання автомобілів і тракторів», «Ремонт машин та обладнання», та «Конструювання та динаміка двигунів внутрішнього згорання» для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія».

Завідувач кафедри
технологій та засобів механізації
аграрного виробництва
доктор техн. наук, ст. наук. співроб.

В.О. Шейченко

Завідувач кафедри
галузевого машинобудування
канд. техн. наук, доцент

С.В. Яхін

Доцент кафедри
технологій та засобів механізації
аграрного виробництва
канд. техн. наук, доцент

О.В. Горбенко



Копію засвідчую
В.О. Ващенко секретар СВА
Ю.Ф. Тесик



Європейська техніка для управління потоками рідин та газів

ТОВ НВП "Техприлад"
пр-в. Куренівський, 4/9, 04073, м. Київ, Україна
тел.: +38 (044) 467 26 30/80/90
факс: +38 (044) 467 26 44

e-mail: info@techprilad.com
www.techprilad.com



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ НВП «Техприлад»

Бжикова Н.В.

«18» *серпень* 2019 р.

Акт впровадження

науково-практичних результатів та висновків докторської дисертації
старшого наукового співробітника Інституту електродинаміки НАН України,
к.т.н., с.н.с. Зайцева Євгена Олександровича

Даний акт складений про те, що розроблені автором методи та алгоритми обробки експериментальних даних, а саме, метод пошуку "центру ваги" в поєднанні з методом найменших квадратів, який орієнтований на згладжування експериментальних даних, використані ТОВ НВП «Техприлад» для покращення технічних та метрологічних характеристик вимірювальних приладів, які використовуються ТОВ НВП «Техприлад» за рахунок зменшення впливу дії випадкових сигналів на результат вимірювання, що у свою чергу дозволяє забезпечити підвищення точності обстеження та дослідження широкого спектру трубопровідної апаратури, в тому числі і об'єктів енергетичного комплексу України.

Копія засвідчує
В.О. Веніко
Ю.Ф. Тесля

Технічний директор
ТОВ НВП «Техприлад»
П.Г. Головачов

ІНСТИТУТ
ЕЛЕКТРО-
ДИНАМІКИ
НАН УКРАЇНИ
м. Київ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту
електродинаміки НАН України,
академік НАН України



О.В. Кириленко

" " 2019 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Зайцева Є.О.

"Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів",
яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи старшого наукового співробітника відділу електричних та магнітних вимірювань **"Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів"**, яка присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми підвищення якості контролю і діагностики потужних турбо- та гідрогенераторів (ПГ) шляхом створення теоретичних основ побудови та практичної реалізації оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів, 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.

До найбільш вагомих результатів слід віднести такі.

1. Запропоновано та обґрунтовано математичну модель функціонування компонентів інформаційно-вимірювальних каналів оптоволоконних систем діагностування механічних параметрів ПГ, що дозволяє оцінити похибки вимірювання, розробити заходи по їх компенсації та надає можливість підвищити точність вимірювання контрольно-діагностичних параметрів ПГ.

Розроблено структурні схеми інформаційно-вимірювальних каналів оптоволоконних систем діагностування повітряного зазору ПГ з використанням волоконно-оптичного сенсора.

Наведені результати використано в 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.

2. Розроблено метод корекції похибки від перекосу рухомого робочого електрода «напівдиференціального» ємнісного сенсора зусиль в стяжних призмах оптоелектронних систем контролю стану пресування осердя статора ПГ. Метод базується на розділенні електрода робочого сенсора по радіусу на два концентричних електрода у визначеному співвідношенні, що дає змогу створити два вимірювальних конденсатори. За рахунок цього похибка від перекосу зменшується в сто разів. Розроблено структурні схеми вторинних перетворювачів зусиль в стяжних призмах з ємнісним сенсором як первинного перетворювача інформаційно-вимірювальних каналів систем діагностування.

Наведені результати отримано при виконанні НДР «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);

3. Розроблено математичну модель зміни нерівномірності повітряного зазору між ротором і статором потужних електромашин в залежності від типу ексцентриситету ротора, що надає можливість підвищити точність визначення контрольно-діагностичних параметрів ПГ.

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. Це дає змогу зменшити у 2-3 рази вплив розкиду радіальних розмірів полюсів ротора на результат визначення параметрів таких дефектів гідрогенератора, як ексцентриситет і перекіс ротора, еліпсність розточення осердя, що дозволяє більш об'єктивно оцінювати фактичний стан машини.

Розроблено структурні схеми комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних каналів оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів ПГ.

Наведені результати отримано при виконанні НДР «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.

4. Розроблено метод контролю тиску пресування осердя статора потужного турбогенератора в процесі його складання шляхом вимірювання питомого тиску пресування в N точках перерізу осердя з використанням ємнісних первинних перетворювачів з цифровим виходом, що дає можливість підвищити достовірність визначення місця знаходження зони недопресування осердя статора.

Розроблено структурні схеми комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних каналів оптоелектронних систем контролю тиску пресування осердя статора потужного турбогенератора в процесі його складання та реалізовано лабораторний зразок, до складу якого входять як силосприймаючий елемент мембрана з жорстким центром та ємнісний сенсор мікропереміщень як первинний вимірювальний перетворювач. Визначено функцію перетворення ємнісного сенсора.

Лабораторний зразок пройшов випробування на Держаному підприємстві «Завод «Електроважмаш» під час складання осердя статора турбогенератора типу ТГВ-250-2ПТЗ.

Наведені результати використано в НДР «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.

Матеріали результатів досліджень компонентів інформаційно-вимірювальних каналів оптоелектронних систем діагностування механічних дефектів потужних турбо- та гідрогенераторів передані у відділ Головного конструктора Державного підприємства «Завод Електроважмаш» (м. Харків), де вони будуть використані під час розробок та випробувань нових та модернізації існуючих генераторів.

Завідувач відділу електричних
і магнітних вимірювань,
докт. техн. наук

В.Г. Мельник

Вчений секретар відділу електричних
і магнітних вимірювань,
канд. техн. наук

І. О. Брагинський

Копію засвідчує
В.О. Вчений секретар СВР
Ю.Ф. Тесля



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

Витяг з протоколу № 14 § 121 засідання бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України 25.09.2018р.

01601 Київ-30, МСП
т. 234-73-00

27.09.2018р.

Надсилається:
ІЕД НАН України

Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України
п о с т а н о в л я є :

§118. Наукове повідомлення молодого ученого «Гібридні електронно-оптичні вимірювачі механічних параметрів потужного енергетичного обладнання»

Доповідає: ст.п.с., к.т.н. Євген Олександрович Зайцев (Інститут електродинаміки НАН України).

Питання задавали: акад. НАН України Б.С. Стогній, акад. НАН України М.М. Кулик, акад. НАН України Б.І. Бондаренко, В.М. Кулик, акад. НАН України О.В. Кириленко.

Виступили: акад. НАН України Б.С. Стогній, акад. НАН України М.М. Кулик, чл.-кор. НАН України А.Ф. Жаркін, акад. НАН України О.В. Кириленко.

Постановили: Інформацію прийняти до відома, напрям діяльності схвалити, після доопрацювання робота може бути рекомендована для заслуховування на засіданні Президії НАН України.

Академік-секретар ВФТПЕ НАН України
академік НАН України



О.В.Кириленко

Учений секретар ВФТПЕ НАН України

В.М.Кулик

*Копія засвідчено
В.О. Височин
Ю.Ф. Тесак*



Протокол випробувань вимірювача зусиль пресування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заст. директора з наукової роботи
Інституту електродинаміки НАН України,
м. -кор. НАН України
А. Ф. ЖАРКІН
2019



ЗАТВЕРДЖУЮ
Головний інженер
Державного підприємства
«Завод «Електроважмаш»
А. П. ШЕВЧЕНКО
2019 г.



Протокол

випробувань макетного зразку вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора при складанні пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ на державному підприємстві завод "Електроважмаш"

8 серпня 2019р.
м. Харків

1. ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ

Об'єктом випробувань є макетний зразок вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора типу ТГВ-250-2ПТЗ при складанні.

2. ЦІЛЬ ВИПРОБУВАНЬ

Перевірка працездатності та метрологічних характеристик макету ємнісного вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора типу ТГВ-250-2ПТЗ.

ПРОГРАМА ВИПРОБУВАНЬ

Визначити можливість застосування ємнісного вимірювача зусилля для контролю тиску пресування в окремій точці пакету осердя статора при його складанні.

3. ПРИЛАДИ І УСТАТКУВАННЯ

При проведенні натурних випробувань при опресуванні пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ використовувався вимірювальний комплекс в складі:

- макетного зразку ємнісного вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора (рис.1) із цифровим виходом розробки ІЕД НАНУ;
- електронно-оптичний перетворювач інформаційних сигналів гібридного волоконно-оптичних вимірювачів зусилля пресування, який був використаний для живлення ємнісного сенсора з цифровим виходом і передачі сигналів від нього;
- апаратурою для реєстрації результатів вимірювань у вигляді персонального комп'ютера;

- відповідного розробленого в ІЕД НАНУ програмного забезпечення, встановленого на персональному комп'ютері та мікропроцесорі ємнісного вимірювача;
- вимірювальної комірки виробництва ДП заводу "Електроважмаш", що складалась із: стакану А5441/4, проби А54441/5, втулки А5441/3 та пальцю;
- спеціального силосприймаючого елемента (мембрани) сумісної розробки ІЕД НАНУ та ДП заводу "Електроважмаш" (рис.2).



Рис. 1 – Ємнісний вимірювач зусилля пресування осердя статора турбогенератора

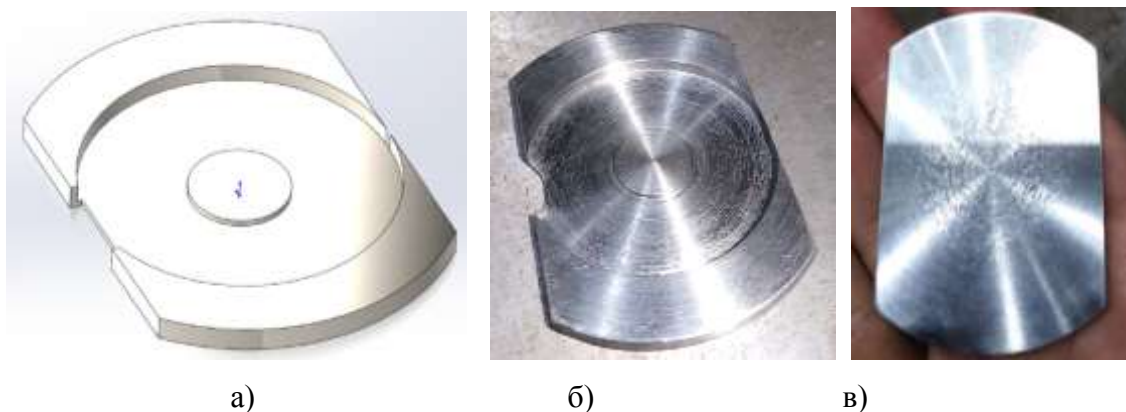


Рис. 2 – Спеціальний силосприймаючий елемент (мембрана):

- а) CAD-модель; б) дослідний зразок мембрани вид знизу;
- в) дослідний зразок мембрани вид зверху;

4. МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Випробування проводилися при пресуванні пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ за затвердженою програмою пресування активного заліза осердя статора. Вимірювальна комірка із ємнісним сенсором та мембраною встановлювалась замість стандартної комірки на заздалегідь затверджене місце у нижньому кільці А54446/1.

У відповідності до технологічного процесу навантаження пресування змінюється поступово від 0 т. до 600 т. для пресування перших пакетів та 680 т. для всіх інших. При цьому загальна площа нижнього кільця А54446/1 складає 30202,55 см². Залежність середнього зусилля на пресування осердя від навантаження приведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Найменування	маса, кг	середнє зусилля, кг/см ²
кільце верхнє	4167,5	0,14
парасолька пресу	8600	0,28
навантаження пресування	600000	19,87
навантаження пресування	68000	22,51

5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

В результаті проведених досліджень була отримана характеристика зміни ємності в часі від зміни навантаження пресування. Отримана залежність приведена на рис. 3.

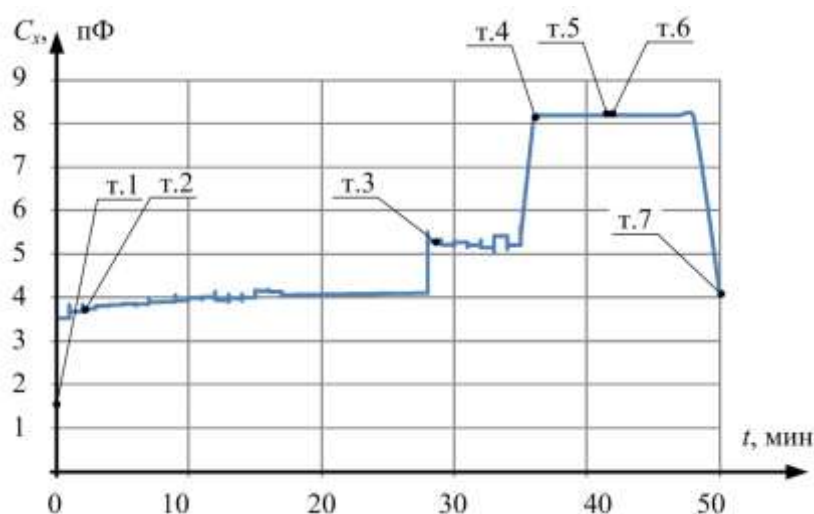


Рис. 3 – Характеристика ємності в часі від зміни навантаження пресування

На рис.3. введені наступні позначення:

т.1 = 1.834 пФ – встановлення нижнього кільця А54446/1 із вимірювальними комірками по місцю пресування осердя статора;

т.2 = 3.811 пФ – встановлення верхнього кільця масою 4167,5 кг.;

т.3 = 5.509 пФ – встановлення опресовувальної парасольки пресу масою 8600 кг. – встановлена не повною масою;

т.4 = 8.192 пФ – встановлення повною масою опресовувальної парасольки;

т.5 = 8.192 пФ – під'єднання пресувальної колони до опресовувальної парасольки;

т.6 = 8.192 пФ – пресування;

т.7 = 4.100 пФ – зняття елементів пресу.

При проведенні випробувань максимальне розрахункове навантаження на вимірювальну комірку виходячи із середнього зусилля (Таблиця 1) складало для:

$$т.1 = 0; \quad т.2 = 0,14 \text{ кг/см}^2; \quad т.3 = \text{від } 0,14 \text{ кг/см}^2 \text{ до } 0,42 \text{ кг/см}^2;$$

$$т.4 = 0,42 \text{ кг/см}^2; \quad т.5 = \text{від} 0,42 \text{ кг/см}^2; \quad т.6 = 22,51 \text{ кг/см}^2 \quad т.7 = 0 \text{ кг/см}^2.$$

В результаті сповзання проби за межі жорсткого центру мембрани виникло нерівномірне навантаження та деформація мембрани. Результати деформації мембрани продемонстровані на рис. 4, мембрана до деформації приведена на рис. 2, б, в. Деформація, що виникла в свою чергу призвела до похибки вимірювання ступеню зусилля пресування сенсором та виходом сенсора за розрахунковий діапазон вимірювання (т.4-т.6).



Рис. 4 – Дослідний зразок мембрани вид знизу після деформації

Після зняття всіх елементів пресу мембрана в деякій мірі відновила форму, що засвідчують показання отримані в т.7.

Результати отримані в т.3 демонструють пластичну деформацію проби А54441/5 виготовленої із листа ДПРНХ 3,0 С3 (свинцю). На рис.4 зображено динаміку деформації проби А54441/5, яка була зафіксована в т.3 (рис.3)

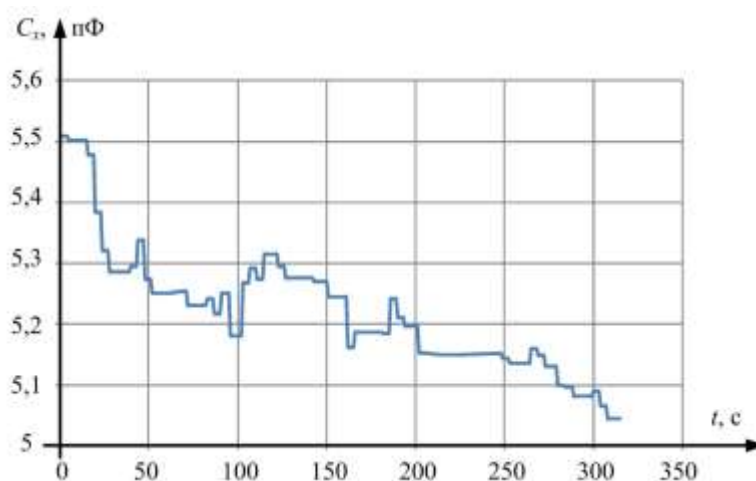


Рис. 4 – Залежність ємності C_x від зміни(деформації) проби А54441/5 отриманої в т.3

6. ВИСНОВКИ ПО ВИПРОБУВАННЯМ

6.1. Отримані результати свідчать про те, що розроблений метод та пристрій, який його реалізує у вигляді вимірювальної комірки із ємнісним сенсором дозволяє забезпечити необхідний рівень метрологічного контролю тиску пресування в окремій точці пакету осердя статора турбогенератора при його складанні.

6.2. Випробування макетного зразку вимірюючого зусиль пресування, в якому застосовано смісний сенсор з цифровим виходом, в основному підтвердили технічні характеристики пристрою.

6.3. Проведені випробування показали можливість створення багатоточкової системи контролю зусиль пресування, яка дозволить забезпечити визначення картини нерівномірності торцевої поверхні пакетів осердя статора відносно пресувальної плити при його складанні.

6. УХВАЛИЛИ:

7.1. Запропонований спосіб вимірювання зусиль пресування та макет пристрою, що його реалізує, є корисним, і може бути застосований під час складання і пресування осердя статора потужних турбогенераторів.

7.2. Провести доробку конструкції смісного сенсора з урахуванням зауважень та результатами випробувань.

7.3. Рекомендувати створити силами ІЕД НАН України автоматизовану багатоточкову систему контролю та моніторингу зусиль пресування осердя статора, в якій застосувати розроблену вимірювальну комірку із смісним сенсором зусиль.

Випробування проводили:

Від ІЕД НАНУ:

Старший науковий співробітник,
кандидат технічних наук

 **Є. О. Зайнев**
Аспірант

 **М. В. Панчук**

Від ДП «Завод Електроважмаш»:

головний технолог з турбогенераторного
виробництва:

 **В. М. Захарчук**
виступник головного технолога
з турбогенераторного виробництва

 **Ф. Г. Бобако**

Копію засвідчую
В. О. Вечко секретаря СВР
Ю. Ф. Тесля



ДОДАТОК Г

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГ ТА КОМПОНЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ

Г.1 Особливості процесу діагностування механічних параметрів ПГ

Г.1.1 Параметри повітряного зазору та їхній вплив на ключові характеристики ГГ

Повітряний зазор між ротором і статором є одним з найважливіших параметрів гідрогенератора. Розмір повітряного зазору значною мірою визначає характеристики генератора і його поведінку в процесі експлуатації [7, 14, 32, 138, 147, 164-166, 191, 192, 203, 210- 212, 253, 254, 293, 334, 343, 356, 362, 370]. До параметрів повітряного зазору між статором і ротором гідрогенератора відносять максимальне і мінімальне значення зазору (між зубцем статора та середньою лінією по довжині полюса), середнє і розрахункове значення повітряного зазору. Зазвичай значення повітряних зазорів у гідрогенераторів вертикального виконання – $20 \div 30$ мм, а в капсульних – $5 \div 8$ мм. Ці діапазони визначають індуктивні параметри та перевантаженість синхронних генераторів, потужність системи збудження, а також втрати у роторі. Значення повітряного зазору також істотно впливає і на ряд інших характеристик генераторів, а саме: на торцеві магнітні потоки втрат у крайніх пакетах осердя і натискних плитах статора, на вібраційний стан машини при експлуатації. Таким чином, і тепловий стан гідрогенератора в цілому, і рівень місцевих нагрівів значною мірою визначаються значенням повітряного зазору. Окрім того, діапазони допустимих режимів роботи генераторів (за умовами стійкості при недозбудженні) визначаються також значенням повітряного зазору.

Малі розміри полюсних розподілів гідрогенераторів у порівнянні з турбогенераторами спричиняють велике розсіювання їхньої полюсної системи, високі індукції в осерді полюсів і викликають труднощі в розміщенні необхідного обсягу міді обмотки збудження на полюсах. Це змушує вдаватися до зменшення повітряних зазорів у гідрогенераторах. На практиці, з урахуванням зазначених факторів, значення повітряних зазорів приймаються в одну тисячну діаметра ротора.

Спотворення форми ротора та статора, що призводить до нерівномірності повітряного зазору, може викликати аварії через зачеплення ротора за статор, руйнування обмоток, сталі статора та полюсів. Для гідрогенераторів (за умови невеликого повітряного зазору порівняно з діаметром розточення статора) особливо складно домогтися стабільної рівномірності зазору при експлуатації. Створення конструкції, що протистоїть зусиллям магнітного притягання при такій конфігурації машини, є одним з найскладніших завдань при розробці гідрогенераторів.

Нерідко спостерігалися пошкодження, викликані зміною форми або порушенням співвісності осердя статора та ротора. Так, найбільші у свій час гідрогенератори ГЕС Grand Coulee IV, що мали повітряний зазор 25 мм при діаметрі ротора 19 м, неодноразово виходили з ладу через зсув активних частин машини. При цьому відбувалося навіть зачеплення ротора за статор, що призвело до необхідності реконструкції генератора зі збільшенням повітряного зазору і підвищенням міцності осердя статора. Серйозні проблеми з деформацією ободу ротора були на гідрогенераторах ГЕС Mica Creek (Канада). Ці машини мають номінальне значення повітряного зазору 20,6 мм при діаметрі розточення осердя статора 14 м [7].

Під час експлуатації капсульних гідрогенераторів Київської та Канівської ГЕС, внаслідок викривлення форми статора і недосконалої форми ротора, повітряний зазор між ротором і статором змінювався як у радіальному, так і в осьовому напрямку: за номінального значення 5 мм місцями зазор не перевищував 3,5 мм [138, 334]. Через значне зменшення повітряного зазору різко зростало навантаження на демпферну обмотку, на яке вона не була розрахована. Зрештою, це призвело до руйнування демпферної системи: відбувся розрив стержнів, вигорання сталі осердя та випадання демпферних стержнів із осердя у повітряний зазор, а також спостерігались суттєві пошкодження осердя і обмотки статора. При реконструкції вказаних гідрогенераторів для запобігання подібних аварій було зроблено наступне: номінальний повітряний зазор між ротором і статором збільшено до 6 мм, введено регулювальні прокладки під полюси ротора, підвищено вимоги до правильності розточення статора.

Нерівномірність повітряного зазору, що супроводжується відхиленням розточення осердя статора та обвідної полюсів ротора від циліндричної форми, може відбутися під час монтажу, після нього, а також за умов експлуатації гідрогенератора. Електромагнітні сили взаємного притягання статора і ротора, так само як перерозподіл внутрішніх напружень, можуть призвести до деформації осердя статора і ротора. Нерівномірне нагрівання пакетів статора і полюсів ротора може також сприяти деформації вузлів гідрогенератора.

Відомо також, що нерівномірність повітряного зазору за висотою та радіусом магнітної системи гідрогенератора є причиною виникнення вібрації статора та ротора і причиною додаткових втрат на поверхні полюсів ротора [191].

Відхилення розміру повітряного зазору від номінального значення може бути також спричинено недоліками конструкції елементів кріплення, порушеннями технології складання гідрогенератора на станції, деградаційними процесами під час експлуатації енергоблоку під дією електромагнітних і термомеханічних навантажень [210].

При досягненні критичного значення ексцентриситету можуть мати місце деформації, які призводять до зачіпання полюсів ротора за розточення статора, що призводить до тяжких аварій. Перераховані фактори за певних умов можуть привести до порушення нормальної роботи ГГ і стати причиною ряду небажаних наслідків, що ведуть до аварійного результату, якщо їх своєчасно не виявити і не ліквідувати.

Також потрібно враховувати, що дані отримані за статистичними вимірюваннями не можуть служити повною характеристикою дійсної нерівномірності повітряного зазору машини і не може бути використані на практиці для виявлення перед аварійних станів машини і її своєчасної зупинки. Це пов'язано, насамперед, з тим, що в динаміці, при наборі обертів і роботі під навантаженням, форма ротора може зазнавати деформації під дією відцентрових сил, викликаних невірноваженістю обертових мас ротора, теплового прогину вала, зачеплення ротора об нерухомі деталі статора [166].

Г.1.2 Основні конструктивні дефекти, що призводять до зміни повітряного зазору в потужних ГГ

Основними конструктивними дефектами, які призводять до спотворення форми обвідної ротора і появи нерівномірності повітряного зазору між статором і ротором у ГГ, є такі [164]:

1) *нециліндричність ротора*. Виникає через технологічні похибки при виготовленні і складанні ротора, коли окремі його полюси можуть відрізнятись за висотою;

2) *нециліндричність розточення статора*. Виникає через складність забезпечення ідеальної форми циліндричної форми поверхні розточення статора при його виготовленні, складанні та під час тривалої експлуатації через значні радіальні розміри ГГ. Крім цього, на статор діють інтенсивні вібромеханічні навантаження та температура, що призводять до ослаблення механічної стійкості його конструкції. Так, наприклад, статори ГГ капсульного типу деформуються через гідродинамічні удари та значну різницю температур ззовні та усередині капсули;

3) *ексцентриситет ротора*. Під ексцентриситетом ротора розуміють порушення співвісного розташування вісі центру симетрії статора O_s , вісі симетрії ротора O_w і вісі обертання ротора O_R (рис. 1.2).

Г.1.3 Причини зміни повітряного зазору та їхній вплив на ексцентриситет в потужних ГГ

Основними причинами, що призводять до зміни повітряного зазору і появи ексцентриситету є:

- дефекти виготовлення ротора і статора;
- дефекти підшипників ковзання, які можуть розвиватись в процесі експлуатації;

- дія незрівноваженого механічного зусилля $P_{\text{МЕХ}}$ та незрівноваженого магнітного зусилля $P_{\text{МАГ}}$, зумовленого незбалансованим магнітним потоком, який направлений в сторону найменшого зазору.

- дія незрівноважених зусиль $P_{\text{МЕХ}}$ та $P_{\text{МАГ}}$ викликає пружну деформацію вала і підшипників, що може призвести до руйнації ротора і статора.

Розрізняють наступні типи ексцентриситету [164, 378]:

1. В залежності від зміни в часі просторової орієнтації центрів обертання і мас ротора, а також центра мас статора в поперечному перерізі системи статор-ротор (рис. Г.1):

а) статичний ексцентриситет, а саме, коли вісі обертання і симетрії ротора співпадають, але мають постійне (з плином часу) зміщення відносно вісі симетрії статора [378];

б) динамічний ексцентриситет (обертовий), за умов, що вісі обертання і симетрії ротора відносно вісі симетрії статора можуть змінювати взаємне положення в просторі в залежності від кутового положення ротора [378];

в) змішаний ексцентриситет, коли існують як статичний, так і динамічний ексцентриситети.

2. В залежності від просторової орієнтації вісі обертання ротора і вісі статора:

г) радіальний ексцентриситет, коли вісі ротора й статора залишаються паралельними, але мають постійне радіальне зміщення [164]);

д) кутовий ексцентриситет (або перекид), виникає за умови, що вісі ротора і статора нахилені одна до одної на деякий постійний кут, причому, в центрі машини вісі не мають радіального зміщення (детально розглянуто в [164]);

е) змішаний ексцентриситет, існує як випадок, спільної наявності як радіального, так і кутового ексцентриситету (детально розглянуто в [164]).

На рис. Г.1 зображено умовний поперечний переріз статора і ротора ГГ з розміщеними на розточенні осердя статора сенсорами повітряного зазору, де: 1,2 – сенсори; 3 – статор; 4 – ротор; Δ – товщина сенсорів; O – геометричний центр перерізу; O_s – центр симетрії статора; O_w – центр симетрії ротора; O_R – центр обертання ротора; d_{xG} – значення повітряного зазору в горизонтальній площині; d_{xV} – значення повітряного зазору в вертикальній площині.

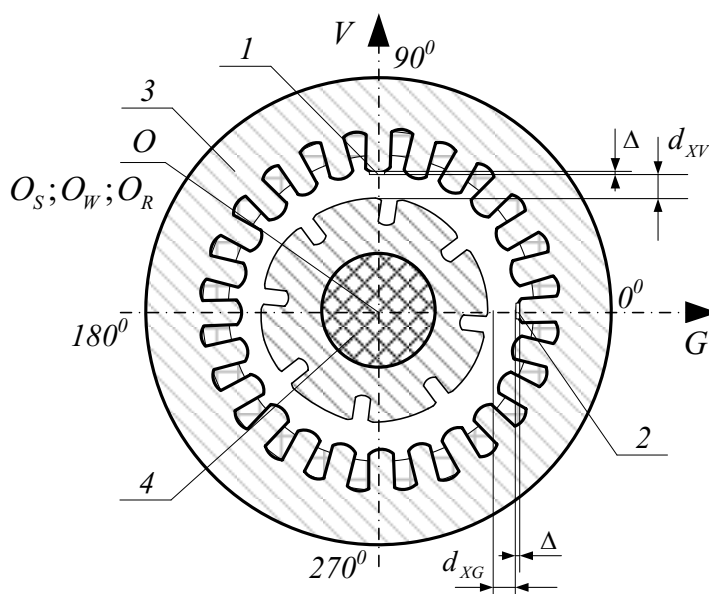


Рис. Г.1 Схема визначення ексцентриситету ротора

Статичний (радіальний) ексцентриситет

При статичному або радіальному ексцентриситеті повітряний зазор навколо ротора є нерівномірним, але не змінюється в часі в залежності від кутового положення ротора. Тобто при статичному ексцентриситеті вісь обертання ротора O_R зміщена на постійне значення статичного ексцентриситету відносно вісі O_S статора, що не має залежності від кутового положення ротора θ .

За статичного ексцентриситету відбувається зміщення центру обертання O_R ротора на постійне значення, при цьому центр обертання O_R і центр мас O_S ротора співпадають. Величина статичного ексцентриситету, визначається вектором $|O_R O_S|$ є фіксованою для всіх кутових положень ротора θ та має напрямок, що характеризується початковим кутом статичного ексцентриситету α_{se} (рис. Г.2) [378].

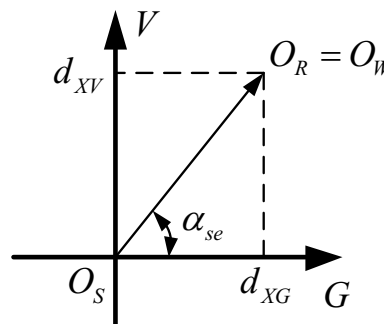


Рис. Г.2 Схема визначення статичного ексцентриситету

Значення статичного ексцентриситету e_{se} (рис. Г.2) може бути визначене як [378]:

$$e_{se} = \frac{|O_S O_R|}{\overline{d_{VZ}}} = \frac{\sqrt{(x_{O_S} - x_{O_R})^2 + (y_{O_S} - y_{O_R})^2}}{\overline{d_{VZ}}}, \quad (\text{Г.1})$$

де $\overline{d_{VZ}}$ – середнє значення повітряного зазору між ротором і статором, що визначене за результатами показів сенсорів 1 та 2 (рис. Г.1) за один повний оберт ротора; $(x_{O_S}; y_{O_S})$ координати центру вісі статора O_S ; $(x_{O_R}; y_{O_R})$ координати центру обертання O_R ротора.

Причини статичного ексцентриситету: неправильне встановлення ротора або недотримання співвісності центрів статора і ротора під час первинного монтування.

Динамічний ексцентриситет

У випадку динамічного ексцентриситету повітряний зазор навколо ротора є нерівномірним та змінюється в часі в залежності від кутового положення ротора θ . Тобто за динамічного ексцентриситету вісь симетричності ротора O_W , в поперечному перерізі системи статора-ротора, змінює своє положення, що залежить від кутового положення ротора θ відносно вісі O_S статора, але вісі O_S

статора і вісь обертання ротора O_R співпадають, а центр обертання O_R і мас O_W ротора не співпадають.

Величина динамічного ексцентриситету визначається вектором $|O_S O_W|$, що змінюється в залежності від кутового положення ротора θ та має напрямок, який характеризується кутом динамічного ексцентриситету α_{de} (рис. Г.3) [378].

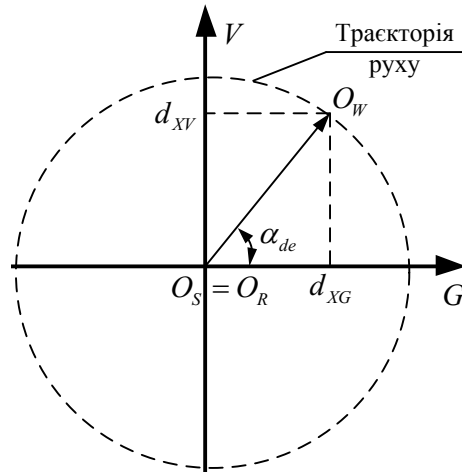


Рис. Г.3 Схема визначення динамічного ексцентриситету

Значення динамічного ексцентриситету e_{de} може бути визначене як [378].

$$e_{de} = \frac{|O_S O_W|}{d_{VZ}} = \frac{\sqrt{(x_{O_S} - x_{O_W})^2 + (y_{O_S} - y_{O_W})^2}}{d_{VZ}}, \quad (\text{Г.2})$$

де $|O_S O_W|$ – вектор напрямлення зміщення вісі центру обертання ротора з початкового положення центру симетрії статора; $(x_{O_S}; y_{O_S})$ координати центру вісі статора O_S ; $(x_{O_W}; y_{O_W})$ координати центру симетричності O_W ротора.

У цьому випадку, значення $|O_S O_W|$ є постійним для всіх кутових положень ротора θ . В часі, в залежності від кутового положення ротора θ , вектор $|O_S O_W|$ утворює траєкторію руху точки O_R (годограф), що характеризується кутом динамічного ексцентриситету α_{de} , величина якого залежить від кутового положення ротора θ .

Причини динамічного ексцентриситету: неспіввісність вісі обертання ротора щодо вісі симетрії ротора або статора, асиметричність магнітного поля в повітряному зазорі, що викликане статичним ексцентриситетом та при обертанні призводить до появи динамічного ексцентриситету, а також кривизни вісі ротора (вісь симетрії статора і вісь обертання ротора ідентичні, але вісь симетрії ротора зміщена).

Змішаний циклічний/нециклічний ексцентриситет.

При змішаному ексцентриситеті вісь симетрії статора, вісь симетрії ротора і вісь обертання ротора зміщуються в результаті дії на центр обертання ротора результуючого вектора статичних і динамічних векторів зміщення. У цьому

випадку розподіл повітряного зазору між ротором і статором, як і в випадку динамічного ексцентриситету, змінюється в часі в залежності від кутового положення ротора. У випадку змішаного ексцентриситету вісь симетрії ротора, статора та вісь обертання ротора зміщуються внаслідок впливу результуючого статичного і динамічного векторів зміщення вісі обертання [378, 333].

Величина змішаного ексцентриситету визначається вектором $|O_S O_M|$, що змінюється в залежності від кутового положення ротора θ та має напрямок, який характеризується кутом змішаного ексцентриситету α_{me} (рис. Г.4) [378].

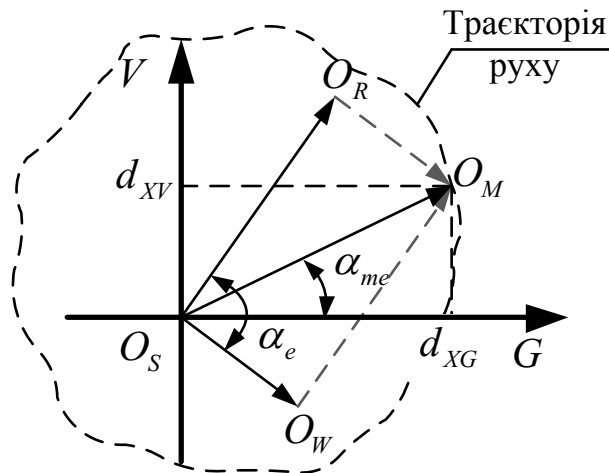


Рис. Г.4 Схема визначення змішаного ексцентриситету

За допомогою геометричного підсумовування векторів статичного та динамічного ексцентриситетів знаходиться значення змішаного ексцентриситету e_{me} :

$$e_{me} = \frac{|O_S O_M|}{\bar{d}_{VZ}} = \left| \frac{O_S O_W}{\bar{d}_{VZ}} + \frac{O_W O_R}{\bar{d}_{VZ}} \right| = \frac{\sqrt{(x_{O_W} + x_{O_R})^2 + (y_{O_W} + y_{O_R})^2}}{\bar{d}_{VZ}} = \frac{\sqrt{e_{se}^2 + e_{de}^2 + 2e_{se}e_{de}\cos\alpha_e}}{\bar{d}_{VZ}} \quad (\text{Г.3})$$

де $|O_S O_M|$ - вектор зміщення вісі центру обертання ротора з початкового положення центру симетрії статора (рис. Г.4). При змішаному ексцентриситеті $|O_S O_M|$ змінюється в залежності від кутового положення ротора, утворюючи траєкторію руху точки O_R (годограф) та характеризується кутом змішаного ексцентриситету α_{me} , величина якого залежить від кутового положення ротора θ .

Всі описані типи ексцентриситету одночасно присутні в реальних машинах під час їх функціонування та призводять до збільшення додаткових втрат потужності на поверхні ротора, а отже і до зниження ефективності роботи машини.

Г1.4 Основні фактори зниження ступеня спресованості

Технічний стан статора потужних турбогенераторів (ТГ) характеризується багатьма параметрами, серед яких вирішального значення набувають параметри, що характеризують статор як механічну систему. Однією із основних механічних властивостей статора, що визначає його працездатність, є наданий йому в процесі виготовлення стан пружного стиснення осердя, який після виготовлення забезпечується за допомогою натискних плит і стяжних призм. З часом, внаслідок експлуатаційних навантажень, виникає зниження зусиль, що стискають осердя. Це призводить до втрати запасу працездатності і є потенційною причиною виникнення небезпечних дефектів статора [164].

Виходячи з досліду типових випробувань та експлуатації ТГ типів ТГВ та ТВВ, що проводилися в останні 40 років [31, 49, 122, 164, 179, 195]. У значній частині турбогенераторів через 30-40 років внаслідок різних факторів виникає зниження зусиль середнього тиску пресування на 30–40% від початкового значення. Це призводить до нерівномірності розподілу навантаження тиску пресування по колу і довжині статора, а також втрати запасу працездатності генератора в цілому, і є однією із основних потенційних причин небезпечних ушкоджень активного заліза осердя статора при експлуатації. Тому найскладнішим з точки зору проведення відновлювального ремонту є пошкодження осердя статора, яке потребує в окремих випадках заміни на новий.

Основною причиною зниження тиску пресування є усадка шихтованих пакетів сердечника, що виникає в наслідок старіння, “усихання” та викришування ізоляційного лаку сегментів магнітопроводу. Крім того, на окремих турбогенераторах типу ТГВ-200 та ТГВ-300 було зафіксовано обрив шийок декількох стяжних призм в місцях закріплення натискних фланців осердя статора (в основному у верхній частині статора), що також послаблювало його запресовування [123, 188, 243], а в роботі [243] описано метод розрахунку такого послаблення.

Слід зазначити, що одна із причин, які наведені вище, не може призвести до пошкоджень, якщо одночасно не матимуть місце кілька факторів впливу [50], які умовно поділяються на технологічні, експлуатаційні та конструктивні.

До *технологічних факторів* відносяться недоліки виготовлення та експлуатації осердя на які впливають кількісні (витік, витрати, тиск) і якісні (хімічний склад, вологість) характеристики охолоджувальних середовищ і мастила [50], серед яких особливо варто відмітити наступні:

- початковий середній тиск пресування, нижчий розрахункового, призводить до зменшення тиску осердя після усадки до неприпустимо малих значень;
- нерівномірний розподіл тиску пресування по колу і довжині статора, а також в радіальному напрямку;
- недостатня міцність або неправильне встановлення натискних пальців, призводить до їх пластичної деформації та (або) зміщення від початкового положення.

До *експлуатаційних факторів* відносяться чинники, що діють на осердя під

час його експлуатації, серед яких особливо варто відмітити наступні:

- підвищений рівень напруги у мережі, який призводить до посилення нагріву стяжних ребер через збільшення струмів, що протікають по них”,”;
- видовження ребер зі зміщенням назовні натискних плит і, відповідно, зниження середнього тиску пресування в результаті підвищення рівня їх нагріву;
- фрикційний вплив закріплених стрижнів на крайні пакети і натискні пальці, що виникає внаслідок форсування збудження, що супроводжується різким зростанням струму статора та нагріванням стрижнів обмотки;
- зміщення пакетів в торцевій зоні всередину осердя внаслідок охолодження обмоток статора дистиллятом заниженої температури.

До *конструктивних факторів* в більшості випадків відносять помилки в проектуванні, серед яких особливо варто відмітити наступні:

- проектування машин за номінальними технологічними навантаженнями, які можуть значно відрізняється від реальних;
- визначення навантажень, що не враховують динамічні сили, які часто стають причиною руйнування конструктивних елементів;
- збільшення або зменшення мас елементів понад розрахункові, що є причиною зростання сил інерції, росту первісної та експлуатаційної вартості.

З іншої сторони фактори, наслідком яких є зниження тиску пресування, в залежності від місця виникнення, поділяються на внутрішні та зовнішні (рис.Г.5).

До внутрішніх відносяться – механічні, теплові, електромагнітні, вплив внутрішнього середовища (газового, масляного та водяного). До зовнішніх – електромагнітні, кліматичні та людський фактори. В табл. Г.1 наведені фактори, які впливають на розвиток дефектів активного заліза осердя статора та деякі можливі наслідки, до яких такі впливи можуть призвести [49].

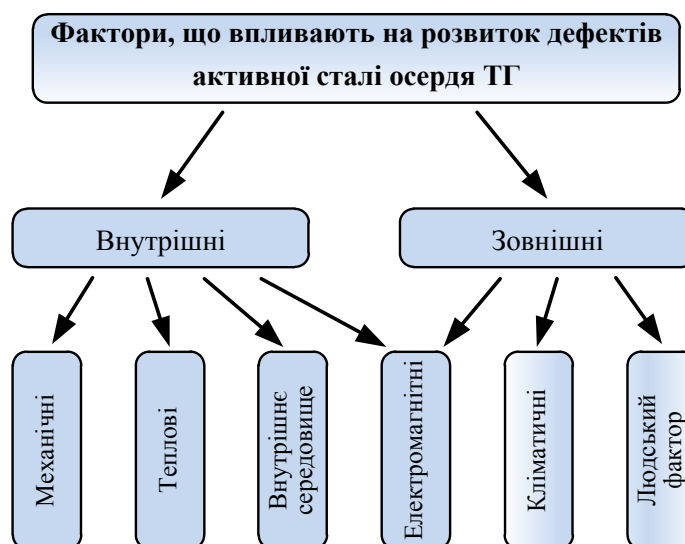


Рис. Г.5 Класифікація факторів, що впливають на розвиток дефектів активного заліза осердя статора ТГ

Як видно із табл. Г.1, для кожного із факторів, що впливають на працездатність осердя статора є характерною поява своїх, специфічних типів

дефектів. При цьому найбільш вагомими факторами, що призводять до появи нерівномірності розподілу навантаження тиску пресування по колу і довжині статора є саме механічні та теплові впливи. Тому розглянемо їх більш детально.

Механічні параметри, що призводять до зниження зусилля пресування осердя [47, 335] залежать від відносного зміщення листів активної сталі, стирання ізоляції між листами, розпушення зубців крайніх пакетів, викришування фрагментів листів, місцеве замикання листів та нагрівання пакетів. Підвищена вібрація, що виникає, та попадання масла поміж сегменти призводять до корозійного зношування сегментів. В результаті фреттінг-корозії, якій підлягають поверхні стиснутих сталевих листів, що взаємно переміщуються, та інші деталі, на зубцях з'являється напівпровідний червоно-коричневий пил (корозійне зношування). Суміш цього пилу і продуктів змішування лаку та мастила під впливом нагрівання та вібрації перетворюється в темну масу, яка нагадує дьоготь, і має слабомагнітні властивості [31, 204].

Зниження тиску спресованості в осерді, яке почалось в торцевих зонах зубців, за несприятливих умов може поширитись на інші зони осердя. Про це буде свідчити наростання нальоту червоно-коричневого пилу в розточенні та на спинці осердя. Досить небезпечним розвитком цього процесу є збільшення нагрітої дефектної зони в осерді і перехід до лавиноподібного росту нагрівання окремих осередків зони осердя, аж до виплавляння сталі – так званої «пожежі заліза», з ушкодженням корпусної ізоляції стержнів обмотки.

Схема розвитку дефекту осердя статора ТГ, пов'язаного з послабленням пресування осердя статора ТГ, показана на рис.Г.6.

До теплових характеристик відносяться значення температур (або їх перевищень) активних і конструктивних елементів турбогенераторів, їх охолоджувальних середовищ і мастильних матеріалів. Основні характерні дефекти для термічних впливів[49] наступні:

- «пожежа» в залізі як результат замикання листів;
- короткочасне збільшення зусилля пресування, яке посилює руйнування ізоляції і послаблює зусилля пресування осердя;
- зменшення зусилля пресування в результаті циклічності нагрівання-охолодження заліза температурами понад нормованих значень.

Отже, вимірювання зусилля пресування активної сталі осердя статора ТГ та ГГ дозволяє:

- проводити контроль стану спресованості осердя;
- відслідковувати зміни ступеню стиснення активної сталі осердя протягом всього часу його експлуатації;

Таблиця Г.1

**Фактори, що впливають на розвиток дефектів активного заліза осердя
статора та їх наслідки**

Фактор, що впливає	Прояв	Можливі відхилення технічного стану генератора
Механічний	Ослаблення зусилля пресування, підвищення амплітуди вібрацій осердя, фрикційний вплив обмотки статора, поява елементів деградації.	Деградація лакової плівки сегментів активної стали, руйнування, викришування, замикання сегментів, самовідгвинчування гайок натискних плит, порушення кріплення осердя в корпусі статора, обриви хвостовиків стяжних призм.
Тепловий/ Термічний	Підвищені втрати в осерді та в обмотці статора, порушення вентиляції, замикання листів активної сталі.	Деградація лакової плівки сегментів активної сталі осердя, замикання сегментів, послаблення пресування осердя, локальні прояви місць «пожежі заліза».
Електромагнітний	Поява несиметричних режимів, режими споживання реактивної потужності.	Пошкодження, аналогічні тим, що проявляються при механічних і теплових впливах, як правило, мають місце в торцевій зоні осердя.
Спеціальне середовище	Конденсована на поверхні осердя волога, наявність мастила у вигляді аерозолі.	Корозія, підвищений нагрів за умов роботи генератора із водяним охолодженням.
Кліматичний	Атмосферна волога, агресивні речовини в повітрі.	Корозія при зберіганні.
Людський	Помилки проектування.	Ослаблення кріплення осердя, деформація, замикання сегментів активної сталі, нагрів при роботі генератора.

– забезпечити достовірний прогноз можливого відхилення параметрів статора від нормованих параметрів на основі статистичного аналізу отриманих за час експлуатації генератора даних;

– істотно підвищити надійність і безпеку роботи турбогенератора;

– забезпечити автоматичне, напіваавтоматичне або ручне регулювання ступеню затягування натискних гайок для забезпечення рівномірності розподілу зусиль пресування між стяжними призмами генератора;

– надає можливість регулювати ступінь затягування призм гайками для забезпечення рівномірності розподілу між призмами зусиль віддачі активної сталі осердя, яка виникає після зняття тиску пресу [199].

Також потрібно зазначити, що при оцінках зусиль в призмах необхідно врахувати нерівномірність розподілу навантаження між окремими призмами. Ця нерівномірність обумовлена такими факторами: місцем розташування призм в осерді (в нижній або верхній його частині); особливостями технології виготовлення осердя; різницею температур призм та інше. Як показали, проведені в Державному підприємстві "Завод Електротяжмаш" (м.Харків,

Україна) спеціальні дослідження, коефіцієнт нерівномірності розподілу навантажень між окремими призмами в потужних ТГ досягає значення 2,6...3, причому тільки близько 25...30% призм працюють з напругою, що перевищують граничне зусилля, при якому починається їх руйнування [272].

На рис. Г. зображена діаграма нерівномірності розподілу навантажень між окремими призмами, отримана експериментально для ТГ типу ТГВ-320-2П, осердя якого стягується 30 призмами. З цих призм тільки призма № 10 і № 22 - 25 працюють з навантаженнями, при яких починається їх руйнування. Ці дані є характерними і для потужних ТГ інших типів [272].



Рис. Г.6 Схема розвитку дефектів осердя статора ТГ, пов'язаних із послабленням пресування осердя

Для зниження пошкоджуваності призм необхідно насамперед забезпечити рівномірність розподілу зусиль між усіма призмами протягом усього періоду експлуатації ТГ. Це дозволить забезпечити механічні напруження в призмах в межах їх штатних розрахункових значень, а значить і рівномірність спресованості осердя. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок регулярного дослідження стану призм і корекції натягу призм для збереження рівномірності розподілу між ними напружень. Для цього найбільш бажаним було б вимірювання механічних зусиль в призмах в режимі он-лайн або з заданою періодичністю. Обробка та аналіз отриманих результатів вимірювання зусиль стало б основою для прийняття рішень про додаткову підтяжку ненавантажених призм[92, 201].

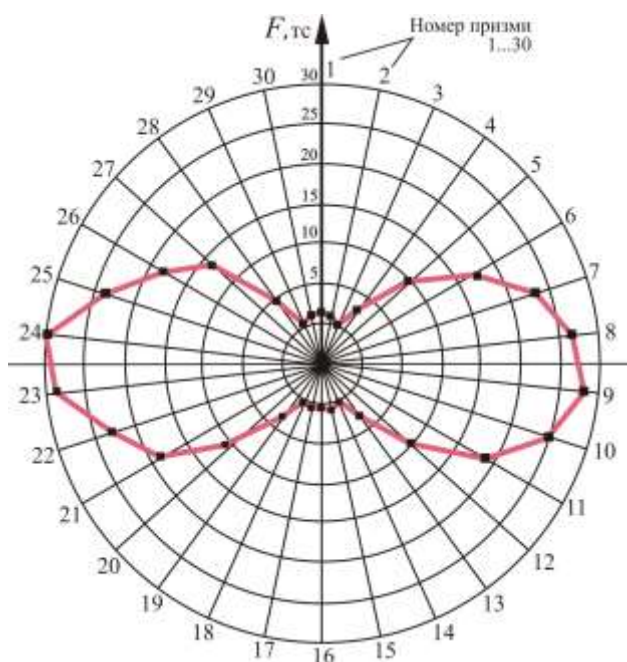


Рис. Г. Діаграма нерівномірності розподілу навантажень між окремими призмами для ТГ типу ТГВ-320-2П

Г.2 Переваги інформаційно-вимірювальних каналів з оптоволоконном

1) *високий рівень завадозахищеності* до впливу:

- зовнішніх електромагнітних полів,
- радіочастотних завад та завад промислової частоти,
- міжканальних наведень,
- завад, викликаних роботою електричних реле та перемикачів,
- завад, викликаних дією блискавки.

2) *високий рівень захищеності* інформації, що передається по оптоволоконним лініям від несанкціонованого доступу;

3) *широка смуга пропускання*, що дозволяє здійснювати розділення інформаційних потоків не тільки методами модуляції сигналу (наприклад: АМ, ФМ, ЧМ), а й передачею інформаційних сигналів на різних довжинах хвиль оптичного випромінювання;

4) *малий коефіцієнт затухання* світлового сигналу в волоконно-оптичних лініях;

5) *низький рівень шумів*, завдяки малому коефіцієнту затухання та високому рівню завадозахищеності волоконно-оптичних ліній;

6) *підвищений рівень достовірності контролю*, завдяки отриманню інформації про стан окремих вузлів у вигляді кодованих світлових сигналів за умов високого рівня захищеності;

7) *зменшення габаритів і маси* в порівнянні з масою металевих ліній провідного зв'язку, що використовуються, в 3-5 разів;

8) *висока іскро-, вибухо- та пожежобезпечність* за використання вимірювальних перетворювачів в середовищах із легкозаймистими газами з

температурою самозаймання 450–600 °С (наприклад: пропан – 450 °С, водень – 510 °С та метан – 53 °С, а також їх сумішшю з повітрям) [18, 77];

9) *потенційно низькою вартістю* волоконно-оптичних ліній в порівнянні із металевими лініями, завдяки заміні дорогих кольорових металів (мідь, свинець) на матеріали з необмеженим сировинним ресурсом (скло, кварц, полімери), що використовуються у виготовленні ліній;

10) *гальванічна розв'язка* між сенсором, розташованим в точці контролю механічного параметру та системою оброблення отриманої інформації;

11) можливість *використання волокна як первинного перетворювача* механічного параметру, що контролюється (наприклад: використання комірок Брегга при контролі ступеню спресованості та температури осердя статора турбогенератора).

Переваги оптичного мультиплексування WDM при передаванні вимірювальної інформації та живлення:

- забезпечення спільної передачі енергетичного живлення, даних керування та вимірювальної інформації;
- забезпечення підвищеної інформаційної захищеності каналу;
- підвищення пропускної здатності ВОЛ;
- можливість організації двостороннього зв'язку;
- нарощування інформаційної ємності вже прокладених оптичних ліній зв'язку;
- здійснення передачі різних видів даних на різних несучих хвилях від різних типів первинних перетворювачів до одного МКСТД.
- використання оптичного волокна (діаметром $\varnothing$ 200÷1000 мкм), в якому, окрім передавання інформації, реалізується передавання енергії живлення оптичним потоком високої потужності шляхом хвильового оптичного мультиплексування.

Г.3 Переваги ємнісних первинних чутливих елементів (сенсорів)

- нечутливістю до впливу потужних електромагнітних полів;
- збереженням характеристик сенсора в широкому діапазоні робочих температур, які визначаються лише стійкістю матеріалів, що застосовуються;
- різноманітністю форм і розмірів ємнісних сенсорів, що дозволяють використовувати їх в різних контрольно-діагностичних точках електроенергетичного обладнання;
- простотою конструкції та її реалізації в умовах штучного і серійного виробництва;
- простотою розрахунків геометричних характеристик чутливого елементу сенсору;
- відносно невисокою вартістю матеріалів та компонентів, що використовуються для виготовлення;
- отриманням принципово лінійних функцій перетворення сенсорів;
- можливістю виготовлення первинних вимірювальних перетворювачів для сенсорів, які можуть бути розроблені на базі сучасних інтегральних мікросхем.

Г.4 Просторово-розподілені систем діагностування ПГ

Варіанти використання ГВОВ параметрів МД в структурі ІВС технічної діагностики потужного електрообладнання приведено на рис. Г.8. На рис. Г.8.а приведено варіант використання безпроводного зв'язку (наприклад: мережі WLAN) при передачі даних від ПКССК до системи технічної діагностики. В схемі додатково застосована WLAN – бездротова локальна мережа, що побудована із використанням технологій Wi-Fi или WiMax та ПКК - перетворювач код-код. Відомо, що дана конфігурація ІВС успішно використана для реалізації системи технічної діагностики лопатей вітрогенератора потужністю 1.5MW [363].

У цьому разі в якості магістралі використано волоконно-оптичний канал (ВОК), що дозволяє досягти високої завадостійкості вимірювача, а як лінії зв'язку між інформаційно-вимірювальним каналом та модулем мікроконтролера (МК), використовуються стандартні екрановані виті пари, що дозволяють організувати оптимальну за собівартістю та метрологічними характеристиками розподілену мережу вимірювального комплексу із контролю механічних параметрів об'єкту діагностування.

Для забезпечення роботи системи необхідно розробити спеціальні програмно-апаратні засоби, що включають: інтерфейс користувача, модуль керування та модуль обробки даних. Модулі програмно-апаратних засобів призначені для забезпечення взаємодії пристрою збору даних, сенсорів та модулю обробки даних системи технічної діагностики, організації інформаційних потоків в системі, реалізації алгоритмів обробки даних, відображення отриманих результатів.

На рис Г.8.б приведено варіант використання безпроводного зв'язку у випадку розташування вихідного оптичного інтерфейсу ГЕОВ ПМД в зоні із безпечним рівнем дії електромагнітного та іншого випромінювання. Такою зоною може бути зовнішня частина статора ТГ або ГГ, де забезпечені умови для передачі інформації з використанням безпроводного зв'язку. Особливістю даної схеми є можливість розміщення засобів обробки на значній відстані від об'єкту діагностування.

Передача вимірювальної інформації в приведених структурах відбувається в цифровому вигляді за допомогою кодоімпульсної модуляції. У цьому разі при побудові кожного ГВОВ параметрів МД використовуються окремі вимірювальні канали, кожен зі своїм АЦП, що міститься у вторинному вимірювальному перетворювачі(ВВП). Об'єднання ГВОВ параметрів МД у єдину мережу здійснюється за допомогою цифрового інтерфейсу, що утворює локальну розподілену мережу.

Розподілені мережі, у свою чергу, у відповідності до стандарту IEEE-802, за структурою розділяють на комутовані (IEEE-802.3), із маркерним кільцем (IEEE-802.5) та з маркерною шиною (IEEE-802.4).

Кожна із перерахованих структур організації мережі має свої переваги та недоліки, які детально описані в [221, 238].

Для *комутованих мереж* головною перевагою є робота на значних відстанях між ГВОВ параметрів МД та МК, а основним недоліком – низька

ДОДАТОК Д

Визначення апроксимуючого поліному функції перетворення вимірювача для врахування дії робочого середовища потужних генераторів

Для визначення апроксимуючого поліному коротко зупинимось на визначенні барицентричних координат, що вперше були наведені в [347].

Для довільно існуючих в n -мірному евклідовому просторі базисних точок $C_0, C_1, \dots, C_j, \dots, C_m$, що знаходяться в загальному положенні таким чином, що їх визначник [139]

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_1^0 & x_1^1 & \dots & x_1^j & \dots & x_1^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_i^0 & x_i^1 & \dots & x_i^j & \dots & x_i^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n^0 & x_n^1 & \dots & x_n^j & \dots & x_n^m \end{vmatrix} \neq 0, \quad (\text{Д.1})$$

де $x_1^0, \dots, x_n^m$ – декартові координати точки C_i , шуканого значення одномірної цифрової величини на виході гібридного вимірювача відповідно до (5.77); $j \in \mathbb{N}$, $j = \overrightarrow{0, \dots, m}$ – номер вектору, що представляє як залежність одномірної вихідної величини від зміни одномірної вхідної величини для j -го вхідного впливу; $i \in \mathbb{N}$, $i = \overrightarrow{0, \dots, n}$ – номер вузла.

Умова Д.1 є справедливою тільки для випадку використання квадратної матриці для розрахунку визначника D , тобто коли $n = m$.

При цьому, якщо в кожному із точок C_i помістити масу p_i таку, що сумарна маса всіх точок

$$p_0 + p_1 + \dots + p_n = 1, \quad (\text{Д.2})$$

за умови, що не всі маси $p_0, p_1, \dots, p_n$ одночасно однакові та рівні нулю. У цьому разі єдина точка центру ваги C системи мас на площині для якої радіус-вектори $v_0, v_1, \dots, v_n$ від кожної координати $x_1^j, \dots, x_n^j$, направлені в центр C задовольняють нерівності

$$p_0 \vec{v}_0 + p_1 \vec{v}_1 + \dots + p_n \vec{v}_n = 0,$$

та мають декартові координати, що визначаються як [45]

$$C_i = p_0 x_0^j + p_1 x_1^j + \dots + p_n x_n^j. \quad (\text{Д.3})$$

У цьому разі величини $p_0, p_1, \dots, p_n$ називаються барицентричними координатами або коефіцієнтами декартових координат відносно вершини симплекса C [139].

Коротко зупинимося на деяких властивостях барицентричних координат:

1. Сумарне значення всіх коефіцієнтів $p_0 + p_1 + \dots + p_n = 1$ для координат точок, розташованих усередині обраного симплекса.
2. Барицентричні координати не змінюються при повороті всієї системи відносно будь-якого барицентричного центру симплексу.
3. Барицентричні координати не змінюються при паралельному перенесенні системи.
4. Барицентричні координати точок, що розташовані усередині симплекса можуть мати поза симплексом одну або дві негативні координати.

Для знаходження елементів поліному, що апроксимує функцію перетворення гібридного вимірювача на основі барицентричних координат скористаємося тим, що вершини симплексів ймовірних барицентричних комбінацій утворюються набором вхідних параметрів гібридного вимірювача. У цьому разі, під симплексом в n -мірному просторі розуміється багатомірна фігура, яка в будь-якому найскладнішому випадку в n -мірному евклідовому просторі $\mathbb{R}^n$ може бути представлена багатокутником простої структури, тобто симплексом.

У цьому разі, під симплексом в одновимірному просторі будемо розуміти дві незбіжні точки і відрізок, що їх з'єднує, в двовимірному – три точки, що не лежать на одній прямій і трикутник з вершинами в цих точках. У тривимірному – чотири точки, що не лежать на одній площині і утворюють тетраедр і т.д. Таким чином будь-який багатокутник в площині можна розбити на кілька трикутників, будь-який багатогранник в просторі можна розбити на кілька тетраедрів, тобто будь-яке багатогранне тіло в n -мірному просторі $\mathbb{R}^n$ можна розбити на декілька простих симплексів.

Розглянемо аналітичне визначення симплекса в n -мірному просторі $\mathbb{R}^n$ при його застосуванні для гібридних вимірювальних перетворювачів. Множина вхідних векторів $\vec{x}_i$ утворює симплекс, якщо система векторів $\{\vec{x}_i - \vec{x}_0\}$ є лінійно незалежною.

В якості приклада симплексних вхідних векторів, розглянемо нульовий вхідний вектор

$$\overrightarrow{x_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{Д.4})$$

відповідну йому вихідну одновірну величину $C_0 = C(\overrightarrow{x_0}) = C(\vec{0}) = 0$ та наступні після нульового вхідного вектора вхідні вектори

$$\overrightarrow{x_1} = \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \overrightarrow{x_j} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \overrightarrow{x_n} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{Д.5})$$

що визначають відповідні одновірні величини на виході $C_1, \dots, C_j, \dots, C_n$.

Коефіцієнти p_j при використанні лінійної моделі многочлена у виразі (5.77), можуть бути визначені у довільно вибраному симплексі при вирішенні системи $(n+1)$ лінійних рівнянь

$$C_j = \sum_{i=0}^n (p_i^j \cdot x_i^j), \quad (\text{Д.6})$$

або в матрично-векторній формі

$$X \cdot \vec{p} = \vec{C} \quad (\text{Д.7})$$

де

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_1^0 & x_1^1 & \dots & x_1^j & \dots & x_1^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_i^0 & x_i^1 & \dots & x_i^j & \dots & x_i^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n^0 & x_n^1 & \dots & x_n^j & \dots & x_n^n \end{pmatrix} \quad (\text{Д.8})$$

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overrightarrow{p_0} \\ \overrightarrow{p} \end{pmatrix}, \quad (\text{Д.9})$$

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} p_0 \\ \dots \\ p_i \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix} \quad (\text{Д.10})$$

$$\vec{C} = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_n \end{pmatrix} \quad (\text{Д.11})$$

Вирішення системи лінійних рівнянь (Д.6) може бути проведено багатьма способами, наприклад описаними в [219, 250]. При цьому внаслідок симплексності вхідних багатомірних величин x_i , що є характеристиками багатомірних вхідних впливів матриця X є квадратною із визначником не рівним нулю.

Розглянемо детально один із способів вирішення системи рівнянь (Д.6). Для знаходження коренів рівняння (Д.6) скористаємося умовою, що функція із виразу (5.78) f_i представлена неперервною "гладкою" функцією [3], тоді

$$C_i \equiv f_i(x_1, x_2 \dots x_n) = 0, \quad (\text{Д.12})$$

а також вибрані $n+1$ точка C_i , що знаходяться в загальному положенні, із координатами

$$C_i(x_{1i}, x_{2i} \dots x_{ni}) \quad (\text{Д.13})$$

Для апроксимації функції f_i із виразу (Д.12) многочленом лінійної форми представимо її значення в базисних точках C_i як

$$y_i = f_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (\text{Д.14})$$

тоді відповідний многочлен лінійної форми буде мати вигляд

$$q_i = p_0 y_{i0} + p_1 y_{i1} + \dots + p_n y_{in} \quad (\text{Д.15})$$

Тоді скориставшись виразами (Д.2) та (Д.15) можна скласти систему рівнянь для знаходження координат точки C в якій всі многочлени виразу (Д.15) дорівнюють нулю

$$\begin{cases} p_0 y_{i0} + p_1 y_{i1} + \dots + p_n y_{in} = 0 \\ p_0 + p_1 + \dots + p_n = 1 \end{cases} \quad (\text{Д.16})$$

Використовуючи розраховані коефіцієнти $p_0, p_1, \dots, p_n$ на основі виразу (Д.3) визначаються декартові координати точки C . Знайдені таким чином базисні точки формують вузли апроксимуючого поліному для функціональної залежності (5.77) гібридного перетворювача.

Вірність перевірки розрахунку базисних точок для залежності (5.77) з урахуванням значень y_i функції f_i в точці C_i здійснюється відповідно до виразу

$$|y_i| < \xi_{0i}, \quad (\text{Д.17})$$

При невиконанні умови (Д.17) замінюється одна із базисних точок C за умови

$$\sqrt{y_{1i}^2 + y_{2i}^2 + \dots + y_{ni}^2} \Rightarrow \max,$$

та повторюються обчислення із попередньою перевіркою знаходження системи базисних точок в загальному положенні.

Для оцінки похибки лінійної апроксимації залежності (5.77) розглянемо основні властивості метода лінійної інтерполяції на основі барицентричних координат. Враховуючи, що всі багатомірні вхідні величини (вхідні впливи), що визначають одномірну цифрову величину C знаходяться в середині симплекса

$$\{x \in \text{Simplex } x_i\},$$

тобто для n -мірної вхідної величини в просторі $\mathbb{R}^n$ справедливо співвідношення (5.78), при умові, що ξ_0 похибка апроксимації є нескінченно малою величиною.

У цьому разі коефіцієнти лінійної комбінації задовольняють виразу (Д.2), тобто

$$\sum_{j=0}^n p_j(x) = 1 \quad (\text{Д.18})$$

Вираз (Д.18) справедливий для будь-якої n -мірної вхідної величини x , причому величина x необов'язково повинна належати симплексу. При умові, що величина x виключно належить симплексу, то із урахуванням (Д.18) справедлива наступна система умов

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^n p_j(x) = 1 \\ p_j(x) \geq 0 \end{cases} \quad (\text{Д.19})$$

Враховуючи співвідношення (Д.2) та умови системи (Д.19) для апіорно заданої багатомірної величини x та фіксованих вершинах симплексів $\{x_j, j \in \mathbb{N}, j = \overline{0, \dots, n}\}$ барицентричні координати p_j визначаються системою лінійних алгебраїчних рівнянь (Д.6)-(Д.11). При вирішенні системи рівнянь (Д.6)-(Д.11) із урахуванням (Д.19), отримаємо

$$\vec{p} = X^{-1} \vec{\hat{C}} = Z \vec{\hat{C}} \quad (\text{Д.20})$$

де Z – обернена матриця до матриці X .

В координатному виді (Д.20) запишеться як

$$p_i = \sum_{j=0}^n Z_{ij} C_i + \xi_{0j} \quad (\text{Д.21})$$

В загальному випадку вираз (Д.21) має наступний запис

$$p_i = \sum_{j=0}^n Z_{ij} C_i \quad (\text{Д.22})$$

Похибка ξ_{0j} , що виникає при визначенні барицентричної координати, може бути визначена за допомогою ∇p градієнта, що вказує на зміну значення барицентричних координат в залежності від зміни однієї або декількох вхідних багатомірних величини, що належать симплексу, тобто

$$\nabla p = |p_{past} - p_{real}| = \Delta p \quad (\text{Д.23})$$

де p_{past} – значення барицентричної координати до зміни однієї або декількох вхідних багатомірних величини; p_{real} – поточне значення барицентричної координати після зміни однієї або декількох вхідних багатомірних величини.

Враховуючи систему (Д.16) та за умови, що зміна координат відбувається в межах симплексу для виразу (Д.18) отримаємо для суми градієнтів барицентричних координат

$$\sum_{j=0}^n \nabla p_j(x) = 0 \quad (\text{Д.24})$$

Визначимо максимальну зміну градієнту ∇p барицентричних координат однієї багатомірної величини x в напрямку до однієї із фіксованих вершин симплекса (одномірне значення тестового сигналу визначене для фіксованих значень всіх впливів крім тестового при градуванні гібридного вимірювача за відомого значення одномірної цифрової величині C) використовуючи наступну Лему.

Враховуючи, що зміна довільної v -ої барицентричної координати $p_v(x)$ при умові $\{0 \leq v \leq n, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}$ в напрямку $\{x_j - x, j \in \mathbb{N}, j = \overline{0, \dots, n}\}$ j -ї вершини симплексу характеризується співвідношенням [131]

$$[\nabla p_v(x), x_j - x] = \delta_{vj} - p_v(x) \quad (\text{Д.25})$$

де δ_{vj} – символ Крокенера.

У цьому разі співвідношення (Д.25) вказує на градієнт зміни барицентричної координати $p_v(x)$ в напрямку до j -ої вершини базового симплексу утвореного багатомірною величиною x^j .

Оцінимо максимальну величину зміни барицентричних координат в симплексі багатомірної величини x_j , тобто норму (абсолютну зміну положення барицентричної координати) $\|\nabla p_v(x)\|$ використовуючи залежність

$$\{x^j, j \in \mathbb{N}, j = \overline{0, \dots, n}\} \equiv \{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}. \quad (\text{Д.26})$$

Для цього визначимо максимальний розмір (діаметр) h симплекса, який включає в себе $\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}$, як максимальну довжину базової вибірки

$$\begin{aligned} h &= \sup \|x - \tilde{x}\| \\ x &\in \text{simplex} \{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\} \\ \tilde{x} &\in \text{simplex} \{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\} \end{aligned} \quad (\text{Д.27})$$

Відповідно до виразу (Д.27) розмір h не перевищує діаметру описаної навколо симплекса багатомірної сфери.

Якщо в якості симплексу взяти одиничні базові вектори (Д.5), то для двовірного ($n=2$) симплекса в просторі отримаємо вершини симплексу із декартовими координатами $X_1(0,0,1)$, $X_2(0,1,0)$, $X_3(1,0,0)$ та центром координат $O(0,0,0)$. З'єднавши вершини симплексу отримаємо рівносторонній трикутник, як приведено на рис. Рис. Д.1. У цьому разі геометричний центр M утвореного трикутника буде мати координати $M\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$.

З урахуванням, що симплекс утворений рівностороннім трикутником та співвідношень в прямокутних трикутниках $\Delta X_1 M_1 O$, $\Delta X_2 M_2 O$, $\Delta X_3 M_3 O$, $\Delta O M X_1$, $\Delta O M X_2$ та $\Delta O M X_3$, утворених відповідними медіанами легко показати, що

$$|OM| = |X_1 M| = |X_2 M| = |X_3 M|.$$

При цьому радіус сфери, що описує утворений симплекс дорівнює

$$R = \frac{h}{2} = |OM| = \sqrt{\left(0 - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(0 - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(0 - \frac{1}{3}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{3}},$$

а, отже, в цьому разі, будемо мати

$$h \leq h_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}$$

У разі трьохвимірного симплексу для векторів (Д.5), аналогічно розглянутому випадку для двовірного симплексу отримаємо

$$h \leq h_3 = \frac{3}{\sqrt{6}}$$

Діаметр h_{n+1} описаної сфери навколо $(n+1)$ -го симплекса може бути визначений із урахуванням визначення h_n діаметру сфери описаної навколо n -го симплекса $\{x^s, s \in \mathbb{N}, s = \overline{0, \dots, n}\}$, за рекурентною формулою [131]

$$h_{n+1} = \frac{2}{\sqrt{4 - h_n^2}} \quad (\text{Д.28})$$

Так використавши формулу (Д.28) для випадку одновірного симплексу ($x_0 = 0$ та $x_1 = 1$) отримаємо

$$h_1 = \frac{2}{\sqrt{4 - h_0^2}} = \frac{2}{\sqrt{4 - 0}} = 1$$

Використовуючи вирази (Д.26), (Д.27) та (Д.28) можна оцінити максимальну зміну будь-якої барицентричної координати $p_v(x)$ багатомірної величини, що належить симплексу через його геометричні розміри (розмір h_n діаметру описаної сфери навколо симплексу) при умові, що зміни відбуваються в межах симплексу або через зміну градієнту ∇h на значення $\Delta h = |h - h'|$, де h' значення діаметру описаної сфери навколо симплекса при зміні будь-якої із координат, що привело до зміни розміру симплексу.

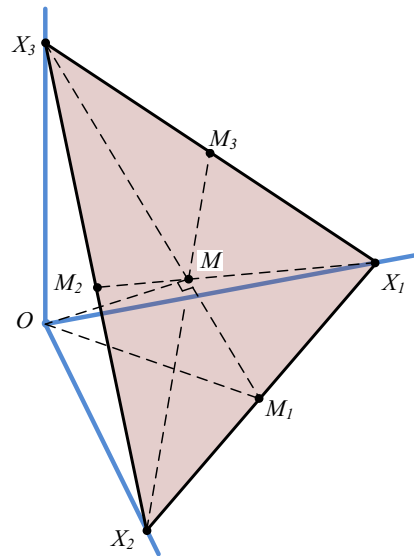


Рис. Д.1 Приклад двовимірного симплексу

Для оцінки зміни будь-якої барицентричної координати $p_v(x)$ використаємо визначення норми за виразами (Д.26) та (Д.27), в результаті будемо мати

$$\|\nabla p_v(x)\| = \sup_{\|\tilde{x}\|=1} \|\nabla p_v(x), \tilde{x}\| \quad (\text{Д.29})$$

Оскільки h є величиною максимального діаметру симплекса, то будь-який вектор $\tilde{x} \in \text{simplex}\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}$, що задовольняє умові $\|\tilde{x}\| \leq 1$ може бути представлений наступним чином

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= \frac{1}{h}(y - x) \\ x &\in \text{simplex}\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\} \\ y &\in \text{simplex}\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\} \end{aligned}$$

Далі, тому що $y \in \text{simplex}\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}$, то справедлива наступна рівність

$$y = \sum_{s=0}^n \mu_s x^s \quad (\text{Д.30})$$

за умови, що

$$\begin{aligned} \sum_{s=0}^n \mu_s &= 1 \\ 0 &\leq \mu_s \leq 1 \\ s &\in \mathbb{N}, s = \overline{0, \dots, n} \end{aligned}$$

Звідси виходить, що для будь-якого вектора $\tilde{x} \in \text{simplex}\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}$, норма якого $\|\tilde{x}\| \leq 1$ будемо мати

$$\begin{aligned} (\nabla p_v(x), \tilde{x}) &= \frac{1}{h} \left(\nabla p_v(x), \sum_{s=0}^n \mu_s x^s - x \right) = \\ &= \frac{1}{h} \left(\nabla p_v(x), \left(\sum_{s=0}^n \mu_s x^s - \sum_{s=0}^n \mu_s x \right) \right) = \\ &= \frac{1}{h} \left(\nabla p_v(x), \sum_{s=0}^n \mu_s (x^s - x) \right) = \\ &= \frac{1}{h} \left(\sum_{s=0}^n \mu_s (\nabla p_v(x), (x^s - x)) \right) \end{aligned} \quad (\text{Д.31})$$

Використовуючи вираз (Д.30) та лему 1 для виразу (Д.31) будемо мати

$$\begin{aligned} |(\nabla p_v(x), \tilde{x})| &= \frac{1}{h} \left| \sum_{s=0}^n \mu_s (\nabla p_v(x), (x^s - x)) \right| = \\ &= \frac{1}{h} \left| \sum_{s=0}^n \mu_s (\delta_{vj} - p_v(x)) \right| = \frac{1}{h} |\mu_s - p_v(x)| \end{aligned} \quad (\text{Д.32})$$

Враховуючи, що $0 \leq \mu_s \leq 1, s \in \mathbb{N}, s = \overline{0, \dots, n}$ та $0 \leq p_v \leq 1, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}$, а також те, що максимально можлива величина $|p_v - \mu_s| = 1$, то

$$|(\nabla p_v(x), \tilde{x})| \leq \frac{1}{h}, \quad (\text{Д.33})$$

для будь якого $\tilde{x} \in \|\tilde{x}\| \leq 1$. На основі отриманого та враховуючи, що до будь-яких $\tilde{x}$ відноситься значення $\sup(\tilde{x})$, будемо мати наступний вираз

$$\|\nabla p_v(x)\| \leq \sup_{\|\tilde{x}\| \leq 1} |(\nabla p_v(x), \tilde{x})| \leq \frac{1}{h} \quad (\text{Д.34})$$

Тобто у цьому разі маємо, що для будь-якої багатомірної величини x , яка $x \in \text{simplex}\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}$ є справедливим співвідношення (Д.34).

Використовуючи отримані результати, розглянемо один із способів розрахунку лінеаризованої функції перетворення (5.78) гібридного вимірювача механічних параметрів в потужних турбо- та гідрогенераторах.

Функція перетворення гібридного перетворювача, може бути визначена, окрім многочлена (5.78), також як функція від багатьох змінних x з урахуванням коефіцієнту перетворення k_{ef} гібридного перетворювача відповідно за формулою

$$L(x) = k_{ef}x + x_0, \quad (\text{Д.35})$$

яка однозначно на основі експериментально отриманих даних при комплексному градуюванні гібридного перетворювача може бути визначена, як

$$L(x) \equiv \sum_{v=0}^n p_v(x) C_v \quad (\text{Д.36})$$

де $C_v = C(x^v)$ – результати вимірювання гібридним вимірювачем, що відповідають v -ому вхідному вектору (тестовому вхідному впливу, що імітує вхідні впливи на гібридний перетворювач в робочому середовищі).

Тоді, з урахуванням виразу (Д.36) та функції (5.78), абсолютна похибка інтерполяції може бути визначена, як

$$\Delta = |L(x^v) - C(x^v)| \quad (\text{Д.37})$$

відносна як

$$\delta = \frac{L(x^v) - C(x^v)}{\nabla L(x) - \nabla C(x)} \cdot 100\% \quad (\text{Д.38})$$

Для отримання точних оцінок складових у співвідношенні (Д.35) та чисельника співвідношення (Д.36) проведемо розклад $C(x^v)$ відповідно до [131] на основі ряду Тейлора. У цьому випадку будемо мати наступний вираз

$$C(x^v) \approx C(x) + (\nabla U(x), x^v - x) + \frac{1}{2} [H(y^v)(x^v - x), x^v - x] \quad (\text{Д.39})$$

де $H(y^v) = \left(\frac{\partial^2 C(y^v)}{\partial x_i \partial x_j} \right)$, $i, j \in \mathbb{N}$, $i = \overrightarrow{0, \dots, n}$, $j = \overrightarrow{0, \dots, n}$ – матриця часткових

похідних другого порядку (матриця Гессе[26]), розрахована в проміжній точці y^v .

З урахуванням (Д.34) підставивши вираз (Д.39) у (Д.36) отримаємо

$$\begin{aligned} L(x) &= \sum_{v=0}^n p_v(x) C(x^v) = \\ &= \sum_{v=0}^n p_v(x) \left(C(x) + (\nabla U(x), x^v - x) + \frac{1}{2} [H(y^v)(x^v - x), x^v - x] \right) = \\ &= C(x) \sum_{v=0}^n p_v(x) + \sum_{v=0}^n p_v(x) (\nabla U(x), x^v - x) + \\ &\quad + \frac{1}{2} [H(y^v)(x^v - x), x^v - x] \end{aligned} \quad (\text{Д.40})$$

Враховуючи умову (Д.19) для (Д.41) отримаємо наступне спрощення

$$\begin{aligned} L(x) &= C(x) \sum_{v=0}^n p_v(x) + \sum_{v=0}^n p_v(x) (\nabla U(x), x^v - x) + \\ &\quad + \frac{1}{2} [H(y^v)(x^v - x), x^v - x] = \\ &= C(x) + \sum_{v=0}^n \left(\nabla U(x), p_v(x)(x^v - x) \right) + \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{v=0}^n p_v(x) [H(y^v)(x^v - x), x^v - x] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= C(x) + \left[\nabla U(x), \sum_{v=0}^n p_v(x) x^v - \sum_{v=0}^n p_v(x) x \right] + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{v=0}^n p_v(x) \left[H(y^v)(x^v - x), x^v - x \right]
\end{aligned} \tag{Д.41}$$

Із врахуванням (Д.30) для (Д.41) отримаємо

$$L(x) = C(x) + \frac{1}{2} \sum_{v=0}^n p_v(x) \left[H(y^v)(x^v - x), x^v - x \right] \tag{Д.42}$$

Для розрахунку $\nabla L(x)$ диференціюємо співвідношення (Д.36) та отримаємо

$$\nabla L(x) = \sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) C(x^v) \tag{Д.43}$$

Провівши розклад виразу (Д.43) на основі ряду Тейлора, отримаємо

$$\begin{aligned}
\nabla L(x) &= \sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) \left[C(x) + (\nabla C(x), x^v - x) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2} (H(y^v)(x^v - x), x^v - x) \right] = \\
&= \sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) C(x) + \sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) \left[(\nabla C(x), x^v - x) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2} (H(y^v)(x^v - x), x^v - x) \right]
\end{aligned} \tag{Д.44}$$

Враховуючи (Д.24) для виразу (Д.44) провівши спрощення, будемо мати

$$\begin{aligned}
\nabla L(x) &= \sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) (\nabla C(x), x^v - x) + \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) (H(y^v)(x^v - x), x^v - x)
\end{aligned} \tag{Д.45}$$

Таким чином враховуючи отримані результати у вигляді виразів (Д.37), (Д.38), (Д.42) та (Д.45) можливо визначити похибку інтерполяції.

У випадку коли похибка інтерполяції більше заданої або встановленої є доцільним використовувати інтерполяцію квадратичними поліномами.

При використанні інтерполяції квадратичними поліномами до багатомірного симплексного сигналу $\{x^v, v \in \mathbb{N}, v = \overline{0, \dots, n}\}$, що діє на вході гібридного вимірювача є необхідним створення додаткового багатомірного

сигналу $\{x^{v,s}, v \in \mathbb{N}, v = \overrightarrow{0, \dots, n}, s \in \mathbb{N}, s = \overrightarrow{0, \dots, n}\}$. Сигнал $x^{v,s}$ утворюється координатами середин ребер симплекса, що з'єднує v -у вершину із s -ю вершиною утвореного симплексу. Значення багатомірного сигналу $x^{v,s}$ можуть бути визначені, як

$$x^{v,s} = x^{s,v} = \frac{1}{2}(x^v + x^s) = \frac{1}{2}(x^s + x^v) \quad (\text{Д.46})$$

Графічне визначення за виразом (Д.46) для двовимірного випадку приведено на рис. Д.2, для трьохвимірного на рис. Д.3.

У цьому разі для n -го випадку кількість тестових багатомірних сигналів при використанні інтерполяції квадратичними поліномами буде дорівнювати

$$N_Q = C_n^0 + 2C_n^1 + C_{n+1}^2 = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (\text{Д.47})$$

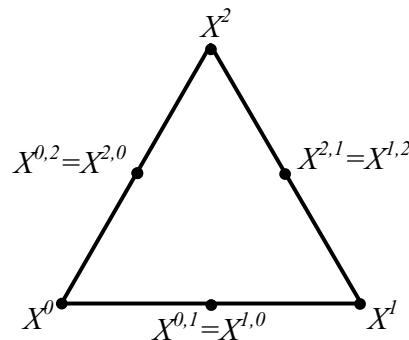


Рис. Д.2 Визначення координат $x^{v,s}$ для випадку двовимірного симплексу

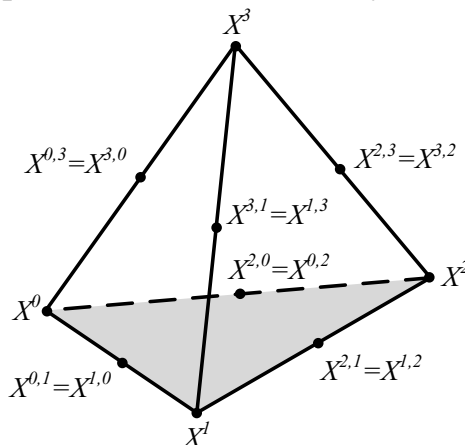


Рис. Д.3 Визначення координат $x^{v,s}$ для випадку трьохвимірного симплексу

У цьому разі кількість всіх коефіцієнтів необхідних для інтерполяції квадратичними поліномами для визначення функції перетворення (5.78) від n -мірного вхідного впливу визначається кількістю координат визначається враховуючи вираз (Д.47) та дорівнює

$$N_{QP} = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (\text{Д.48})$$

Для знаходження многочлену, аналогічно випадку лінійної інтерполяції, для випадку квадратичної інтерполяції скористаємося наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} Q(x^v) = C_v = C(x^v) \\ Q(x^{v,s}) = C_{v,s} = C(x^{v,s}) \\ v \neq s \end{cases} \quad (\text{Д.49})$$

де $C_{v,s} = C(x^{v,s})$ – вихідний одномірний сигнал на виході гібридного перетворювача при дії на його вхід багатомірному сигналу $x^{v,s}$; $v \in \mathbb{N}$, $v = \overline{0, \dots, n}$; $s \in \mathbb{N}$, $s = \overline{0, \dots, n}$.

З урахуванням (Д.46) для системи (Д.49) за умови, що $x^{v,s} = x^{s,v}$ маємо

$$Q(x^{v,s}) = Q(x^{s,v}) = C_{v,s} = C_{s,v} = C(x^{v,s}) = C(x^{s,v}) \quad (\text{Д.50})$$

У цьому разі кількість рівнянь для вирішення системи рівнянь (Д.49) буде дорівнювати

$$N_{QE} = n + 1 + \frac{(n+1)^2 - (n+1)}{2} = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (\text{Д.51})$$

враховуючи праві частини виразів (Д.48) та (Д.51) отримаємо

$$N_{QP} = N_{QE} \quad (\text{Д.52})$$

тобто враховуючи (Д.52) маємо, що кількість рівнянь необхідних для вирішення системи (Д.49) співпадає із кількістю коефіцієнтів необхідних для інтерполяції квадратичними поліномами для визначення функції перетворення (5.78) від n – мірного вхідного впливу.

Використовуючи отримані результати, а також властивості барицентричних координат, використаємо локальну систему барицентричних координат для симплексів та покажемо, що інтерполюючи квадратична форма від n – змінних може бути визначена відповідно до [131], як

$$Q(x) \equiv \sum_{v=0}^n C(x^v) [2p_v^2(x) - p_v(x)] + 2 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n C(x^{v,s}) p_v(x) p_s(x) \quad (\text{Д.53})$$

де $p_v(x)$ – барицентричні координати точки x , які визначені відносно вершин симплексу x_v , відповідно до (5.78), (Д.19) та (Д.21); $p_s(x)$ – барицентричні координати точки x , які визначені відносно вершин симплексу x_s , відповідно до (5.78), (Д.19) та (Д.21).

Вираз (Д.53) є функцію, що інтерполює експериментально отримані результати при дії тестових сигналів на вхід гібридного перетворювача, тобто є функцією відображення (реакцією) дії факторів із n -го простору E_n входу в однозначно визначений одновимірний простір E_1 на виході гібридного перетворювача у вигляді значення цифрової величини C при використанні квадратичних поліномів.

Для оцінки похибки від інтерполяції квадратичними поліномами, відповідно до виразу (Д.53), на основі запропонованого методу, коротко зупинимося на основних означеннях, що стосуються теорії нелінійного аналізу в багатовимірних просторах [271, 131].

1. Для n -го простору E_n існує простір E_n^k , який є добутком E_n на E_n k -разів в n -мірному просторі $\mathbb{R}^n$

$$E_n^k = \underbrace{E_n \times \dots \times E_n}_{k \text{ разів}} \quad (\text{Д.54})$$

де $k \in \mathbb{N}$.

2. Під елементом простору $x^k \in E_n^k$ розуміється довільний масив, такий що

$$(x^1, x^2, \dots, x^l, \dots, x^k) = x^k \quad (\text{Д.55})$$

де $x^l \in E_n, l \in \mathbb{N}, l = \overline{0, \dots, k}$

3. Для будь-якого $k \in \mathbb{N}$ розглядаються виключно симетричні k -лінійні відображення. У цьому разі під симетричним k -лінійним відображенням простору E_n^k в одновимірному просторі E_1 значень на виході гібридного вимірювача розуміється таке відображення

$$L[x^1, x^2, \dots, x^l, \dots, x^k]$$

яке лінійно по кожному із векторів $x^l \in E_n, l \in \mathbb{N}, l = \overline{0, \dots, k}$ та задовольняє наступному співвідношенню симетрії

$$L[x^1, x^2, \dots, x^l, \dots, x^k] = L[x^{i_1}, x^{i_2}, \dots, x^{i_l}, \dots, x^{i_k}] \quad (\text{Д.56})$$

де $i_1, i_2, \dots, i_l, \dots, i_k$ – можливі перестановки із ряду $l \in \mathbb{N}$, $l = \overline{0, \dots, k}$.

У цьому разі k – лінійним відображенням простору E_n^k в одновірному просторі E_1 є k – ті багатомірні похідні від нелінійного відображення $C(x) \in (E_n \rightarrow E_1)$.

При $k=1$, будемо мати матрицю похідних першого порядку (матрицю Якоби[26])

$$dC(x) = \nabla C(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x_1} \\ \dots \\ \frac{\partial C_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (\text{Д.57})$$

$$dC(x') = (\nabla C, x') = \sum_{i=1}^n \frac{\partial C}{\partial x_i}, \quad x_i \in E_1 \quad (\text{Д.58})$$

При $k=2$, будемо мати матрицю $H(x^n)$ часткових похідних другого порядку (матрицю Гессе[26])

$$d^2C(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 C}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 C}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 C}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} \quad (\text{Д.59})$$

Матриця Гессе (Д.59) відповідно до теореми Шварца [43]

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_j} \quad (\text{Д.60})$$

є симетричною, а отже вона задовольняє співвідношенню (Д.56).

З урахуванням (Д.60) для (Д.59) будемо мати

$$d^2C(x^1, x^2) = [H(x)x^1, x^2] = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_j} x_i^1 x_j^2 = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_i} x_j^2 x_i^1 =$$

$$= [x^1, H(x)x^2] = [H(x)x^2, x^1] = d^2C(x^2, x^1) \quad (\text{Д.61})$$

Для оцінку похибки квадратичної інтерполяції, по аналогії із лінійною інтерполяцією при якій використовувалася матриця Гессе $d^2C(x) = H(x)$, скористаємося симетричним відображенням часткових похідних третього порядку $d^3C(x)$, яке буде складатися із n^3 елементів.

Для отримання симетричним відображенням часткових похідних третього порядку $d^3C(x)$ розглянемо узагальнений випадок k – лінійного симетричного відображення часткових похідної k – го порядку $d^kC(x)$. У відповідності із [131] для обчислення $d^kC(x)$ маємо

$$d^kC(x) = \frac{\partial^k C}{\partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2} \dots \partial x_i^{\alpha_i} \dots \partial x_n^{\alpha_n}} \quad (\text{Д.62})$$

за умови, що

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = k$$

Функція (Д.62) з урахуванням (Д.60) задовольняє наступному співвідношенню симетрії

$$\frac{\partial^k C}{\partial x_1^{\alpha_{j_1}} \partial x_2^{\alpha_{j_2}} \dots \partial x_i^{\alpha_{j_i}} \dots \partial x_n^{\alpha_{j_n}}} = \frac{\partial^k C}{\partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2} \dots \partial x_i^{\alpha_i} \dots \partial x_n^{\alpha_n}} \quad (\text{Д.63})$$

за умови, що

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{j_i} = k$$

де $j_1, j_2, \dots, j_i, \dots, j_n$ – можливі перестановки із ряду $i \in \mathbb{N}, i = \overline{0, \dots, n}$.

Використовуючи співвідношення (Д.53) з урахуванням системи (Д.49) можливо оцінити абсолютну та відносну похибку квадратичної інтерполяції використовуючи в багатомірному просторі $\mathbb{R}^n$. Для оцінки похибок проведемо розклад в ряд Тейлора $C(x^v)$ та $C(x^{v,s})$ до третього члену ряду включно. У цьому випадку будемо мати

$$\begin{aligned}
C(x^v) &= C(x) + \frac{1}{1!} dC(y^v)(x^v - x) + \\
&+ \frac{1}{2!} d^2 C(y^v)(x^v - x)^2 + \frac{1}{3!} d^3 C(y^v)(x^v - x)^3
\end{aligned}
\tag{Д.64}$$

та

$$\begin{aligned}
C(x^{v,s}) &= C(x) + \frac{1}{1!} dC(y^{v,s})(x^{v,s} - x) + \\
&+ \frac{1}{2!} d^2 C(y^{v,s})(x^{v,s} - x)^2 + \frac{1}{3!} d^3 C(y^{v,s})(x^{v,s} - x)^3
\end{aligned}
\tag{Д.65}$$

де $C(y^v)$ – проміжна змінна в точці v відповідно до теореми Лагранжа [169];
 $C(y^{v,s})$ – проміжна змінна в точці (v,s) відповідно до теореми Лагранжа [169].

Для множника складової $C(x)$, що отримується в результаті підстановки (Д.64) і (Д.65) у співвідношення (Д.53) та проведення нескладних спрощень отримаємо

$$Kpp0 = \sum_{v=0}^n \left(2p_v^2(x) - p_v(x) \right) + 2 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) p_s(x)
\tag{Д.66}$$

З урахуванням (Д.18) та (Д.53) для (Д.66) отримаємо, що $Kpp0 = 1$.

У цьому разі для множника складової $dC(x)$ першого порядку отриманого виразу отримаємо

$$\begin{aligned}
Kpp1 &= \sum_{v=0}^n \left(2p_v^2(x) - p_v(x) \right) (x^v - x) + 2 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) p_s(x) (x^{v,s} - x) = \\
&= \left(1 - 2 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) p_s(x) \right) (x^v - x) + 2 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) p_s(x) (x^{v,s} - x) =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) - 2 \sum_{v=0}^n \sum_{s=0}^n p_v(x)p_s(x)(x^v - x) + \\
&+ 2 \sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) \sum_{s=0}^n p_s(x)(x^s - x) = \\
&= \sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) + 2 \sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) \sum_{s=0}^n p_s(x)(x^s - x) - \\
&- 2 \sum_{s=0}^n p_s(x) \sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) = \\
&= \sum_{v=0}^n p_v(x)x^v - \sum_{v=0}^n p_v(x)x + \\
&+ 2 \left(\sum_{v=0}^n p_v(x)x^v - \sum_{v=0}^n p_v(x)x \right) \left(\sum_{v=0}^n p_s(x)x^s - \sum_{v=0}^n p_s(x)x \right) - \\
&- 2 \sum_{s=0}^n p_s(x) \left(\sum_{v=0}^n p_v(x)x^v - \sum_{v=0}^n p_v(x)x \right) = \\
&= 2 \sum_{v=0}^n p_v(x) \left(\sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) - \sum_{v=0}^n p_s(x)(x^s - x) \right) \quad (Д.67)
\end{aligned}$$

Використовуючи співвідношенням (Д.6) , (Д.18) та (Д.66) будемо мати

$$Kpp1 = 2 \sum_{v=0}^n p_v(x) \left(\sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) - \sum_{v=0}^n p_s(x)(x^s - x) \right) = 0 \quad (Д.68)$$

Аналогічно до виразу (Д.68) множник $d^2C(x)$ коефіцієнту розкладу в ряд Тейлора другого порядку визначається, як

$$\begin{aligned}
Kpp2 &= \frac{1}{2} \sum_{v=0}^n \left(2p_v^2(x) - p_v(x) \right) d^2C(x)(x^v - x) + \\
&+ \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x)p_s(x) d^2C(x)(x^{v,s} - x) \quad (Д.69)
\end{aligned}$$

З урахуванням співвідношення (Д.66) в (Д.69) та проведення деяких спрощень отримаємо, що

$$\begin{aligned}
Kpp2 &= \frac{1}{2} d^2C(x) \left(\sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) \right)^2 + \\
&+ \frac{1}{2} d^2C(x) \sum_{v=0}^n p_v(x)(x^v - x) \left(\sum_{s=0}^n p_s(x) - 1 \right) (x^s - x) \quad (Д.70)
\end{aligned}$$

Враховуючи співвідношення (Д.6) та (Д.18) для виразу (Д.70) будемо мати, що $Kpp2 = 0$.

У цьому разі, з урахуванням результатів для співвідношень (Д.66), (Д.68) та (Д.70), абсолютна похибка інтерполяції, для випадку інтерполяції квадратичними поліномами виразу (5.78) для будь-якої точки $x \in E_n$ в n -мірному просторі $\mathbb{R}^n$, може бути визначена, як

$$\Delta_Q = |Q(x) - C(x)| \quad (\text{Д.71})$$

або з урахуванням (Д.53), (Д.64), (Д.65), (Д.68) та (Д.70) для (Д.71) отримаємо

$$\Delta_Q = \left| \frac{1}{6} \sum_{v=0}^n d^3 C(y^v) (x^v - x)^3 (2p_v^2(x) - p_v(x)) + \frac{1}{6} \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n d^3 C(y^{v,s}) (x^{v,s} - x)^3 p_v(x) p_s(x) \right| \quad (\text{Д.72})$$

Відносна похибка, для випадку інтерполяції квадратичними поліномами виразу (5.78) для будь-якої точки $x \in E_n$ в n -мірному просторі $\mathbb{R}^n$, може бути визначена, як

$$\delta_Q = \frac{Q(x) - C(x)}{\nabla Q(x) - \nabla C(x)} \cdot 100\% \quad (\text{Д.73})$$

Для розрахунку $\nabla Q(x)$, що входить до виразу (Д.73) виконаємо диференціювання співвідношення (Д.53) для інтерполяції квадратичними поліномами виразу (5.78) та отримаємо

$$\begin{aligned} \nabla Q(x) = & \sum_{v=0}^n (4p_v(x) - 1) \nabla p_v(x) C(x^v) + \\ & + 4 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) \nabla p_s(x) C(x^{v,s}) \end{aligned} \quad (\text{Д.74})$$

Аналогічно випадку, що розглянутий вище, підставимо (Д.64) та (Д.65) у співвідношення (Д.74) та для множника складової $C(x)$ отримаємо

$$\begin{aligned} \nabla Kpp0 = & \sum_{v=0}^n (4p_v(x) - 1) \nabla p_v(x) + 4 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) \nabla p_s(x) = \\ = & 4 \sum_{v=0}^n p_v(x) \nabla p_v(x) - \sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) + 4 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) \nabla p_s(x) \end{aligned} \quad (\text{Д.75})$$

З урахуванням співвідношення (Д.24) для виразу (Д.75) отримаємо

$$\begin{aligned}\nabla Kpp0 &= 4 \sum_{v=0}^n p_v(x) \nabla p_v(x) + 4 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n p_v(x) \nabla p_s(x) = \\ &= 4 \sum_{v=0}^n p_v(x) \left(\sum_{v=0}^n \nabla p_v(x) + \sum_{s=0}^n \nabla p_s(x) \right) = 0\end{aligned}\quad (Д.76)$$

Аналогічно до отримання значення множника для $\nabla Kpp0$ коефіцієнту розкладу в ряд Тейлора $C(x)$ другого порядку за формулами (Д.75)-(Д.76), можуть бути отримані множники при $dC(x)$ та $d^2C(x)$. З урахуванням нескладних математичних спрощень множники відповідно мають значення $\nabla Kpp1 = 0$ та $\nabla Kpp2 = 0$.

У цьому випадку (Д.73) з урахуванням множника при $d^3C(x)$ отримаємо

$$\delta_Q = \left(\sum_{v=0}^n d^3C(y^v) (x^v - x)^3 (2p_v^2(x) - p_v(x)) + \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n d^3C(y^{v,s}) (x^{v,s} - x)^3 p_v(x) p_s(x) \right) \times \quad (Д.77)$$

$$\times \left(\sum_{v=0}^n d^3C(y^v) (x^v - x)^3 (4p_v(x) - 1) \nabla p_v(x) + 4 \sum_{\substack{v=0 \\ s=0 \\ v \neq s}}^n d^3C(y^{v,s}) (x^{v,s} - x)^3 p_v(x) \nabla p_s(x) \right)^{-1} \cdot 100\%$$

1. Використання методу барицентричних координат та симплексів дозволяє отримати метод апроксимації залежності вихідної одновимірної величини на виході вторинного вимірювального перетворювача гібридних вимірювальних компонентів систем контролю та діагностики в залежності від багатовимірної величини, що діє на їх первинні вимірювальні перетворювачі при вимірюванні мікрозміщень конструктивних вузлів машини, що характеризують контрольно-діагностичні параметри в потужних генераторах.

2. Врахування мінімально можливої величини похибки дозволяє змінювати тип апроксимуючого поліному для лінеаризації функції перетворення вимірювальних перетворювачів гібридних вимірювачів систем контролю та діагностики в процесі вимірювання параметрів механічних дефектів. Застосування запропонованої методики надає можливість алгоритмічно проводити лінеаризацію вхідної величини C використовуючи будь-який апроксимуючим поліномом, проводити корекцію обчислень в залежності від обраного граничного значення коефіцієнту достовірності апроксимації R^2 .

ДОДАТОК Е

Приклади практичного застосування методів обробки даних**Е.1 Експериментальні дослідження систем шліфування при виготовленні конструктивних елементів обладнання потужних машин**

В [87, 120, 121] представлені результати практичного застосування МНК для оцінки вібраційних складових, що виникають в процесі шліфування при виготовленні конструктивних елементів обладнання потужних машин із твердого сплаву ВК8 та викликані:

- початковим відхилення форми і матеріалу оброблюваної деталі;
- хвилястістю поздовжнього профілю робочої поверхні шліфувального круга;
- ступеню його зносу і забрудненості;
- незбалансованістю круга та інших елементів верстату;
- демпфуючої здатності зон контакту круга з деталлю;
- жорсткістю і вібростійкістю технологічної системи;
- режимом шліфування.

Дослідження проводилися на шліфувальному обладнанні за допомогою спеціально розробленого модуля (рис. Є.1), що являє собою горизонтальну консольну пластину, на якій закріплена каретка із оброблюваним зразком. На вільному кінці пластини розміщений аналоговий датчик Холу, що фіксує зміну напруженості магнітного поля при зміні положення пластини відносно магнітної плити шліфувального верстату і, таким чином, надає інформацію про параметри механічних коливань системи в процесі шліфувальної обробки за методикою описаною автором в [120].



Рис. Е.1 Модуль для визначення параметрів механічних коливань в процесі шліфування

При проведенні досліджень параметри механічних коливань були синхронізовані з частотою обертання алмазного круга. Реалізація синхронізації

здійснювалась шляхом розміщення магніту на шківі пасової передачі верстату та встановлення біля нього цифрового датчика Холу, як показано на рис. Е.2. При кожному повному оберті круга датчик генерував прямокутний імпульс. На рис. Е.3 приведено осцилограми механічних коливань та імпульсів синхронізації з частотою обертання круга.

На рис. Е.4.а зазображено графік вібраційного процесу, що має місце при роботі шліфувального круга під час холостого ходу. На рис. Е.4.б зображена виділена періодична складова, а на рис. Е.4.в – шумова складова вібраційного процесу. На рис. Е.4.г приведено розподіл шумової складової за амплітудою формою, яка найбільш подібна до розподілу Гауса. Дослідження проводилися при попередньому виключенні інфранизько-частотних трендових складових.

Аналогічні результати були досягнуті при дослідження вібрацій алмазного круга в момент притискання до деталі (рис. Е.5) та під час шліфування деталі (рис. Е.6).



Рис. Е.2 Модуль синхронізації з частотою обертання алмазного шліфувального круга

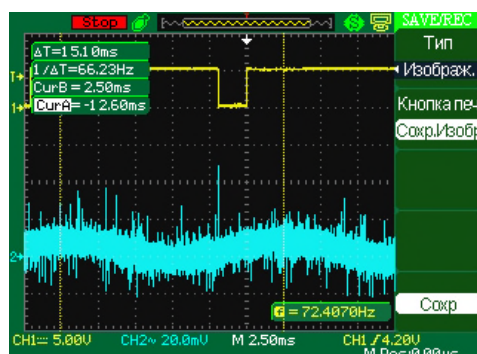


Рис. Е.3 Осцилограма параметрів механічних коливань, суміщеними з частотою обертання круга

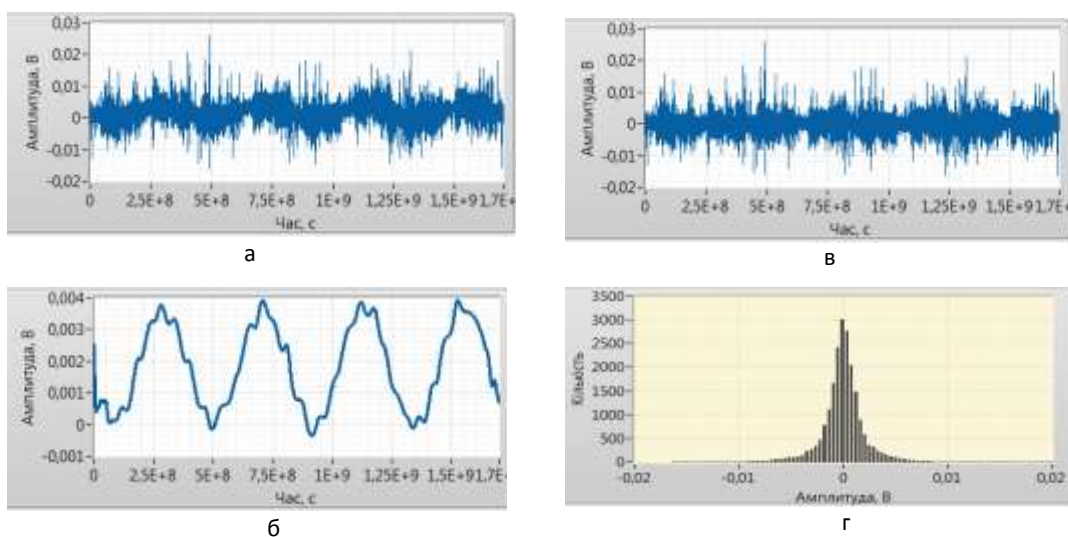


Рис. Е.4 Графіки механічних коливань, що виникають при холостому ході круга

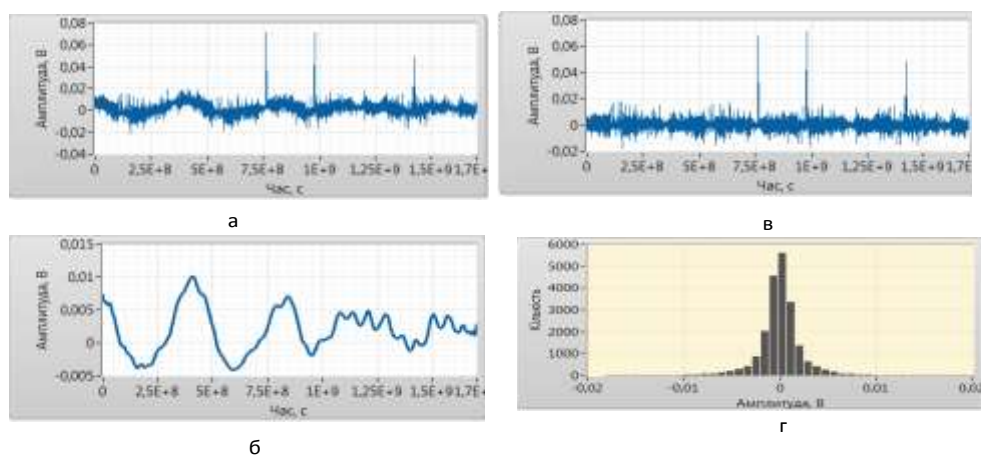


Рис. Е.5 Механічні коливання, що виникають під час притискання куга до заготовки з ВК8

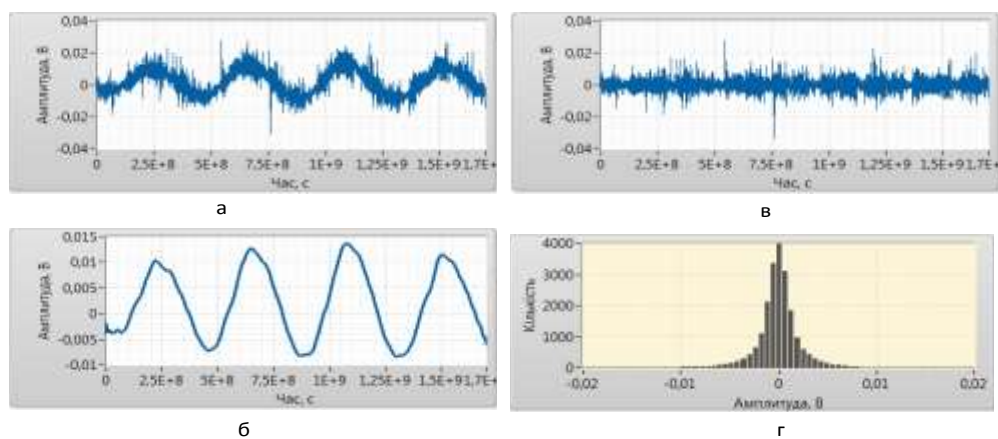


Рис. Е.6 Механічні коливання, що виникають в процесі шліфування заготовки з ВК8

На рис. Е.7.а представлено спектр низькочастотних складових вібраційного процесу в процесі холостого ходу після його нормування. Треба відзначити, що в спектрі явно виражена гармоніка основної частоти, яка відповідає частоті обертання шліфувального круга. В спектрі представленому на рис. Е.7.б з'явилися складові на частоті відмінній від гармоніка основної частоти, що свідчить про наявність демпфуючої частоти зони контакту круга з деталлю. На рис. Е.7.б представлено спектр, що містить аналогічний спектральний ансамбль режиму холостого ходу, що свідчить про добру вібростійкість технологічної системи з правильним підібраним режимом шліфування конструктивного елементу.

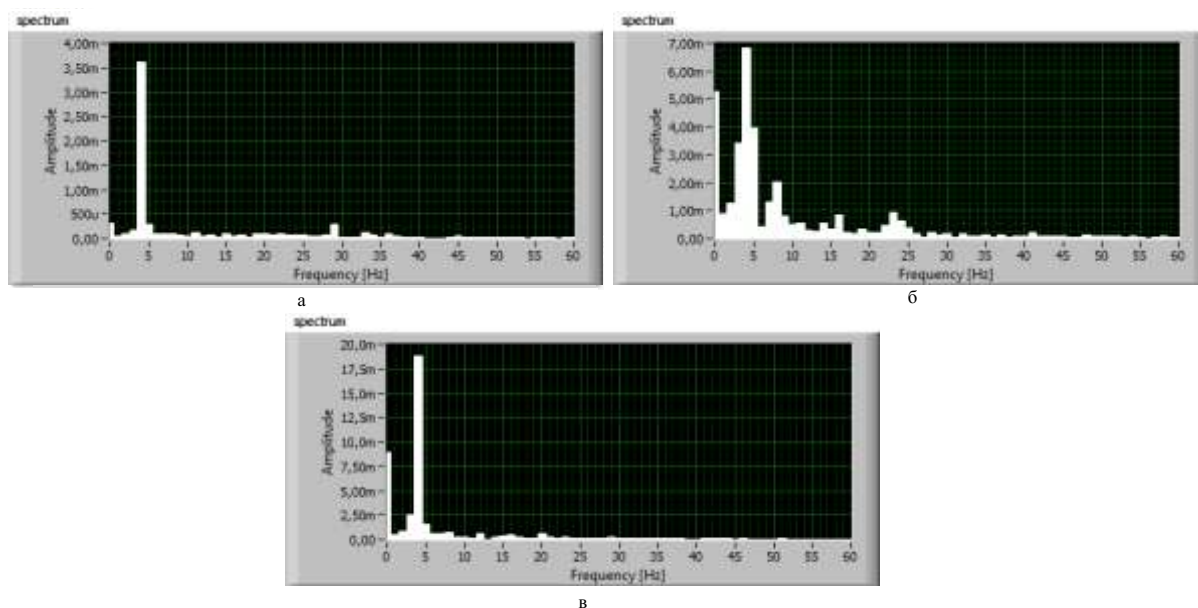


Рис. Е.7 Механічні коливання, що виникають в процесі шліфування заготовки з ВК8

Проведені дослідження в [95] із урахуванням результатів отриманих на рис. Е.4 - рис.Е.7, порівняльних випробувань традиційного процесу шліфування та з формоутворенням поздовжнього профілю електро корозійним методом в процесі шліфування представлені на рис. Е.8. У ході традиційного процесу шліфування (рис. Е.8, а) амплітуда коливань сягала 8 мкм, найбільш виражена гармоніка спостерігалася на частоті 300 Гц. В ході шліфування з формоутворенням поздовжнього профілю робочої поверхні круга (рис. Е.8, б) було зареєстровано суттєве зниження рівня вібрацій (амплітуда 3 мкм) і збільшення кількості складових гармонік, найбільш виражені з яких знаходяться на частотах 100 Гц і 300 Гц.

Проведені дослідження дозволяють проводити детальний аналіз періодичних та шумових складових вібраційного процесу механічної обробки. Такий аналіз, проведений безпосередньо під час робочого процесу, дає

можливість своєчасного керувати процесом шліфуванням з метою підвищення якості або припинення процесу в разі неможливості досягнення заданих параметрів обробки конструктивних елементів.

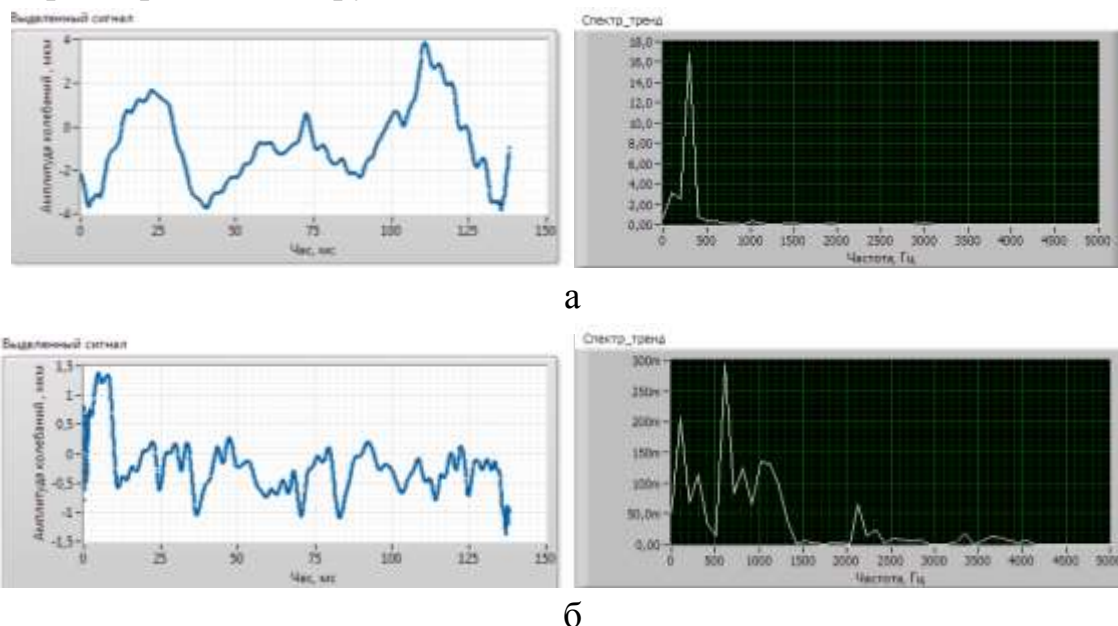


Рис. Е.8 Спектрограми вібрацій в ході традиційного алмазного шліфування (а) і шліфування з формоутворенням поздовжнього профілю робочої поверхні круга (б)

Е.2 Експериментальні дослідження оптоволоконної системи контролю та вимірювання биття

На рис. Е.9 представлено осцилограму отриману з використанням оптоволоконної системи контролю та вимірювання биття фазового типу при вимірюванні тестового сигналу частотою биття 30Гц. В якості джерела тестового сигналу було використано гучномовець 25ГДН-1-4, під'єднаний до генератора сигналів звукового діапазону ГЗ-118 через підсилювач нижніх частот TDA2822M.

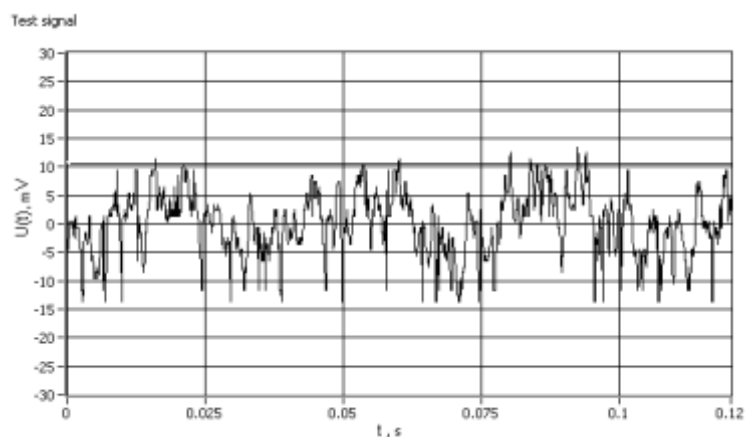


Рис. Е.9 Осцилограма тестового сигналу з частотою 30Гц, отриманого за допомогою фазового лазерного датчика вібрацій

На рис. Е.10 представлені результати обробки сигналу (рис. Е.9) спектроаналізатором на основі імітаційної моделі з використанням алгоритму ШПФ (рис. Е.10,а) та алгоритму АР-аналізу методом Берга (рис. Е.10,б). Визначений спектр за допомогою ШПВ (рис. Е.10,а) візуально розділяється на дві складові – спектр інформативного сигналу та спектр шумового сигналу (не-інформативної складової). Шумова складова виникає під дією мережевих наведень, індустриальних перешкод, флуктуацій температури повітря, тощо [27, 142].

Спектр визначений за допомогою методу Берга у порівнянні з класичним ШПФ дозволив зменшити спектральні складові викликані шумовими складовими досліджуваного сигналу. В результаті розрахунків за допомогою методу Берга спектр сигналу має псевдо-амплітудне значення, що кореговане відповідними розрахунковими коефіцієнтами амплітуди.

Для визначення впливу використаного підсилювача TDA2822M на тестовий сигнал було проведено наступні експерименти: живлення підсилювача гучномовця включене, генератор тесового сигналу вимкнено (рис. Е.11); живлення підсилювача гучномовця виключене, генератор тесового сигналу включений (рис. Е.12).

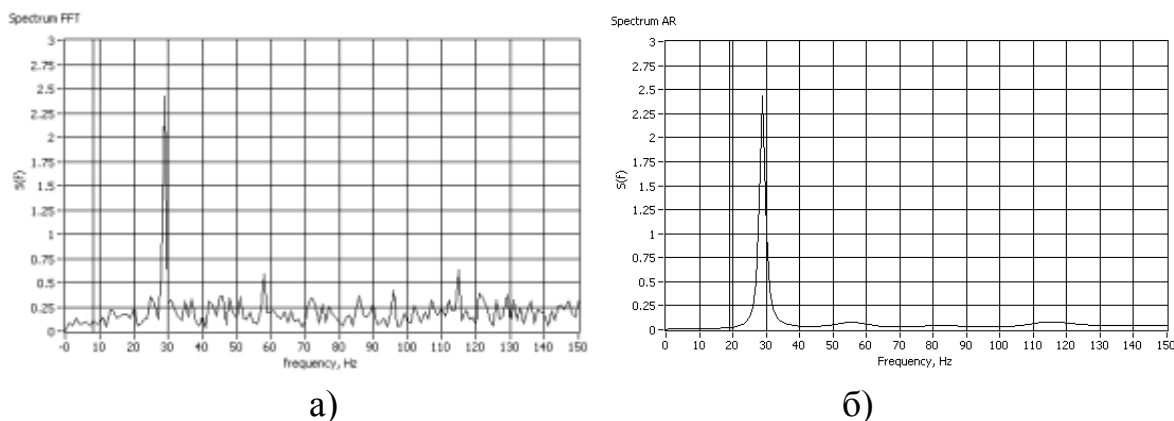


Рис. Е.10 Результат обробки тестового сигналу на 30Гц за допомогою розроблених програм: на основі алгоритму ШПФ (рис.3,а), на основі алгоритму АР-аналізу на основі алгоритму Берга (рис.3,б).

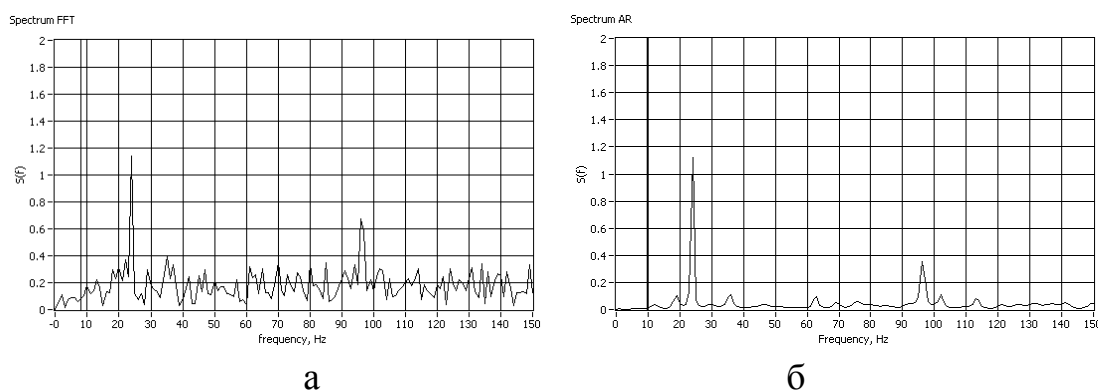


Рис. Е.11 СЦП тестового вхідного сигналу частотою 30 Гц з ввімкненим джерелом підсилювача динаміка та ввімкненим генератором без сигналу:
а – алгоритм ШПФ; б – АР алгоритм Берга

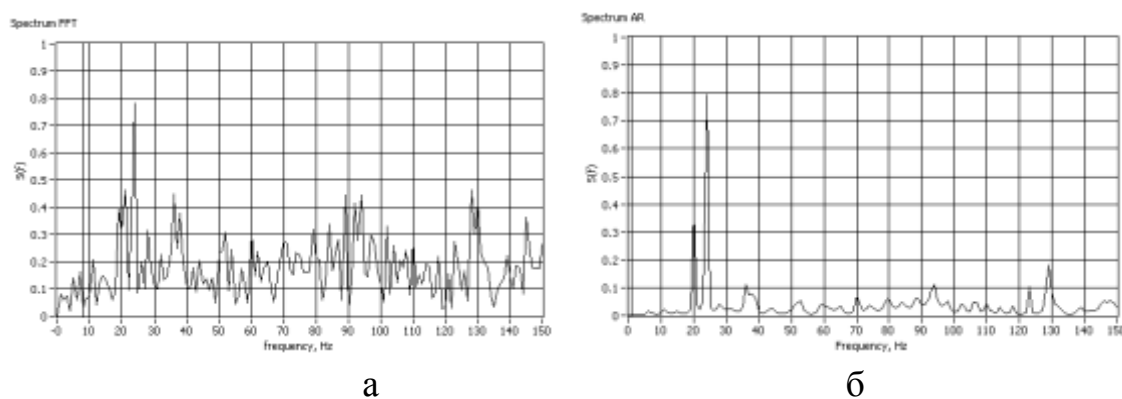


Рис. Е.12 СЦП тестового вхідного сигналу частотою 30 Гц з вимкненим джерелом підсилювача динаміка та ввімкненим генератором без сигналу:
а – алгоритм ШПФ; б – АР алгоритм Берга

В результаті експериментальних досліджень тестових сигналів, було з'ясовано, що додаткове збагачення спектру биття тестового сигналу відбувається за рахунок внутрішніх і зовнішніх наведень у підсилювачі TDA2822M, а також за рахунок флуктуацій джерела живлення.

Оцінка отриманих експериментальних тестових сигналів биття поверхні гучномовця свідчить про те, що спектри тестових сигналів, оброблені за допомогою методу Берга, мають явно виражені піки амплітуд, та не мають виражених шумових складових сигналу, тобто дозволяють придушити додаткові спектральні складові відмінні від основних гармонік. Тому доцільно є з використання АР-аналізу при оцінюванні сигналів биття за допомогою оптоволоконних систем контролю та вимірювання биття дифузійно-відбиваючих поверхонь енергетичного обладнання.

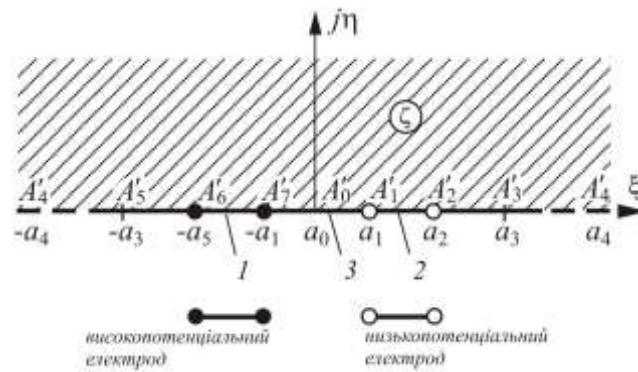


Рис. Ж.3 Схема комплексної Z-площини

У цьому випадку точка A_0 , що є початком координат комплексної Z-площини і розміщена на електроді 3 на половині відстані s між електродами 1 і 2 (рис. Ж.2), відобразиться в точку A'_0 , яка є початком координат комплексної ξ -площини (рис. Ж.3). Точка $A_4 = jd$ комплексної Z-площини відобразиться, як дві точки комплексної ξ -площини: точка A'_4 з координатами $\xi = a_4 = \infty$, $\eta = 0$ і точка A'_4 з координатами $u = -a_4 = -\infty$, $\eta = 0$. Відповідно, інші точки, а саме $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$, розташовані на Z-площині (рис. Ж.3), відобразяться у точки $A'_1, A'_2, A'_3, A'_4, A'_5, A'_6$ та A'_7 комплексної ξ -площини. Це конформне відображення здійснюється за допомогою функції відображення [127]:

$$\xi = d \operatorname{tg} \frac{\pi z}{2d}. \quad (\text{Ж.1})$$

Використовуючи (Ж.1), встановимо взаємозв'язок між точками в комплексній Z-площині і точками в комплексній ξ -площині і визначимо, що

$$a_1 = d \operatorname{tg} \frac{\pi s}{4d}, \quad (\text{Ж.2})$$

$$a_2 = d \operatorname{tg} \frac{\pi(s + 2b_2)}{4d}, \quad (\text{Ж.3})$$

$$a_3 = d, \quad (\text{Ж.4})$$

$$a_5 = d \operatorname{tg} \frac{\pi(s + 2b_1)}{4d}. \quad (\text{Ж.5})$$

Напруженість поля $E_{\eta=0}$ на границі $\eta = 0$, абсолютна величина заряду τ_2 , розподіленого по низьковольтному електроду 2 (який знаходиться при нульовому потенціалі) і абсолютна різниця потенціалів V_{12} між електродами 1 і 2, визначаються наступними рівняннями:

$$E_{\eta=0}(\xi) = \frac{B}{|\xi + a_1| |\xi + a_5|} \quad (\text{Ж.6})$$

$$\tau_2 = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{a_1}^{a_2} E_{\eta=0}(\xi) \partial \xi = \varepsilon_0 \varepsilon B \int_{a_1}^{a_2} \frac{\partial \xi}{a_1 a_5 + (a_1 + a_5) \xi + \xi^2} =$$

$$= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon B}{a_5 - a_1} \ln \frac{(a_1 + a_2)(a_1 + a_5)}{(a_2 + a_5)2a_1};$$

$$\Delta V_{12} = \pi \lim_{\xi \rightarrow a_1} \left([\xi - (-a_1)] E_{\eta=0}(\xi) \right) = \frac{\pi B}{a_5 - a_1} \quad (\text{Ж.8})$$

де ε – діелектрична проникність навколишнього середовища; ε_0 – діелектрична проникність вакууму; B – константа; a_1, a_2, a_5 – координати границь електродів в комплексній ξ - площині.

Часткова ємність C_{L12} між електродами 1 і 2 сенсора (на одиницю довжини) буде дорівнювати:

$$C_{L12} = \frac{\tau_2}{\Delta V_{12}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\pi} \ln \frac{(a_1 + a_2)(a_1 + a_5)}{2a_1(a_1 + a_5)} \quad (\text{Ж.9})$$

Ж.2 Метод визначення характеристик тарілчастих пружини силових акумуляторів систем контролю та стабілізації тиску пресування осердя статора потужного турбогенератора

Механічна характеристика групи (блоку) тарілчастих пружин[], зібраних у пакет (див. розділ 4 рис. 4.11), у відповідності до [15] має вигляд

$$F_X = N \frac{4E\delta\lambda_0}{(1-\mu^2)D^2B} \times (\lambda_0^2 B_2 - \lambda_0 f B_1 + f^2 B_0 + \delta^2), \quad (\text{Ж.10})$$

де F_X – зусилля стиску; N – кількість пружин; λ_0 – величина осідання однієї пружини; E – модуль пружності матеріалу пружини; μ – коефіцієнт Пуассона; δ – товщина пружини; f – висота внутрішнього зрізаного конуса пружини; B, B_0, B_1, B_2 – безрозмірні величини, що залежать від коефіцієнта Пуассона μ та співвідношення зовнішнього діаметра пружини D до внутрішнього діаметра d (співвідношення визначаються за спеціальною номограмою, наведеною в [15].

Схемо-технічно геометричні розміри тарілчастої пружини показано на рис. Ж.5.

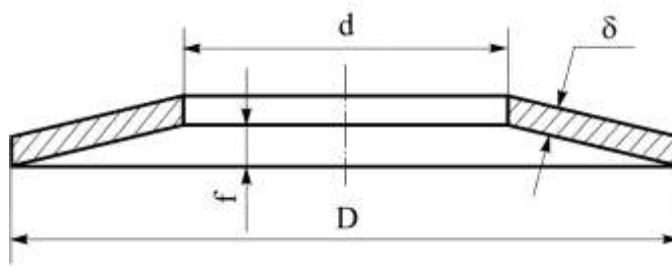


Рис. Ж.5

Враховуючи конструктивні особливості турбогенераторів типу ТГВ200 та ТГВ300, для тарілчастої пружини отримаємо співвідношення $D/d \leq 2,5$. У цьому разі для розрахунку механічної характеристики СА [15] скористаємося наступною формулою

$$F_X = N \frac{4E\delta\lambda_0}{(1-\mu^2)D^2A} \times \left[(f - \lambda_0) \left(f - \frac{\lambda_0}{2} \right) + \delta^2 \right], \quad (\text{Ж.11})$$

де A - коефіцієнт, що визначається за тією ж діаграмою, що й B, B_0, B_1, B_2 [15].

У пружин використаних для силових акумуляторів (див. розділ 4 рис. 4.11), $D/d \approx 1,5$. Тоді, відповідно до діаграми [15], величина коефіцієнта складе $A \approx 0,5$. З огляду на те, що коефіцієнт Пуассона для сталі дорівнює $\mu = 0,3$, можна скористатися наближеною формулою

$$F_X = N \frac{8,7912 \cdot E\delta\lambda_0}{D^2} \times \left[(f - \lambda_0) \left(f - \frac{\lambda_0}{2} \right) + \delta^2 \right]. \quad (\text{Ж.12})$$

Для комбінації пружин, зібраних в акумуляторі згідно, кількість пружин $N = 4$, і $\Delta L = \lambda_0 / 2$, де ΔL – максимальний хід блоку пружин. У цьому разі (Ж.12) буде визначатися як

$$F_X = N \frac{70,3296 \cdot E\delta\Delta L}{D^2} \times \left[(f - 2\Delta L)(f - \Delta L) + \delta^2 \right]. \quad (\text{Ж.13})$$

Таким чином, знаючи геометричні розміри конденсатора, розміри й механічні характеристики тарілчастих пружин, вимірявши величини початкової та поточної електричної ємності конденсатора, можна за формулами або графіками визначити зусилля натягу в стяжних призмах осердя і непрямым чином судити про тиск пресування. Для вирішення зворотного завдання задаються зусилля F_X та максимальний хід блоку пружин ΔL , а визначаються геометричні розміри, матеріал, кількість і спосіб встановлення тарілчастих пружин.

Ж.3 Метод визначення характеристик спеціальних пружних трубчастих елементів системи контролю та стабілізації тиску пресування осердя статора потужного турбогенератора

На відміну від силових пружних елементів, які розглянуті в попередньому розділі, до пружних трубчастих елементів висуваються інші вимоги. Такі механічні компоненти систем контролю повинні мати пружні властивості, які задовольняють наступним вимогам:

- висока часова стабільність механічних характеристик;
- стійкість до дестабілізуючих факторів (температури навколишнього середовища, електромагнітного поля, тощо);
- змін атмосферного тиску.

Перераховані вимоги задовольняються за рахунок правильного вибору геометричної форми, розмірів та матеріалу ПЧЕ [126].

У пружних елементах залежності між діючою силою і виникаючими можливими деформаціями мають бути однозначними та максимально простими (наприклад, лінійними). Цього можна досягти, використовуючи пружні матеріали, механічна характеристика яких описується законом Гука [126, 283, 307, 320, 323]. Для ізотропного матеріалу з коефіцієнтом пружності E , коефіцієнтом Пуассона ν та модулем зсуву G закон можна записати у вигляді

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}; \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}; \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}.\end{aligned}\tag{Ж.14}$$

Рівняння (Ж14) описують поздовжні ε_x , ε_y , ε_z , та зсувні γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz} деформації, які виникають в довільній точці пружного елемента, з нормальними σ_x , σ_y , σ_z , та зсувними напруженнями τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} .

Для повної механічної характеристики пружного елемента рівняння (Ж14) слід доповнити умовами рівноваги

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0.\end{aligned}\tag{Ж.15}$$

Системи (Ж.14) і (Ж.15) разом утворюють основні рівняння лінійної теорії пружності і визначають поведінку всіх можливих типів пружних елементів. Але практичне застосування формул (Ж.14) і (Ж.15) у проектних розрахунках навіть нескладних за формою елементів наштовхується на великі труднощі. Через це зазвичай відмовляються від застосування рівнянь (Ж.14) і (Ж.15), і з цього положення виходять, застосовуючи для практичних цілей найпростіші види деформацій, які дають можливість достатньо точно виконати розрахунки пружних елементів заданої форми. Метою таких розрахунків є встановлення функціональних залежностей між параметрами, що вимірюються, (наприклад, сили, деформації або переміщення) і основними геометричними розмірами та параметрами матеріалу пружного елемента (модулем пружності і максимально допустимою напругою). Окрім того, необхідно оцінювати дію паразитних навантажень.

Розрахункову схему трубчастого ПЧЕ, призначеного для вимірювання зусиль в стяжних призмах потужного ТГ, показано на рис. Ж.6.

Сила стягування F , яка діє в призмі, передається на ПЧЕ 1 через гайку 2 і натискну плиту 3 ТГ. Під дією сили F в 1 виникають напруги σ , які призводять до виникнення відносної поздовжньої деформації $\varepsilon_{\parallel}$

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{SE} \quad (\text{Ж.16})$$

де E – модуль пружності матеріалу ПЧЕ; $S = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)$ – площа поперечного перерізу ПЧЕ.

В той же час відносна деформація $\varepsilon_{\perp}$, перпендикулярна дії сили F , визначиться як

$$\varepsilon_{\perp} = \nu \frac{\sigma}{E} = \nu \frac{F}{SE}, \quad (\text{Ж.17})$$

де ν – коефіцієнт Пуассона (відношення поперечної деформації до поздовжньої при одновісному пружному стані).

Знаючи деформацію $\varepsilon_{\parallel}$ або напругу σ , які виникають під дією сили F , можна розрахувати необхідну площу поперечного перерізу S ПЧЕ.

$$S = \frac{F}{\varepsilon_{\parallel} E} = \frac{F}{\sigma} = \frac{F \cdot L}{\Delta L \cdot E}, \quad (\text{Ж.18})$$

де L – довжина вимірювальної бази; ΔL – номінальний вимірювальний хід (переміщення під дією сили) на базі L .

Отримане значення S площі ПЧЕ 1 має задовольняти умові

$$|\sigma_{\max}| \leq |\sigma_P|, \quad (\text{Ж.19})$$

де $\sigma_{\max}$ – напруга, що виникає в елементі 1 під дією максимально допустимої сили $F_{\max}$; σ_p – границя пропорційності матеріалу, тобто значення напруги, до якого дійсний закон Гука (рис. Ж.7).

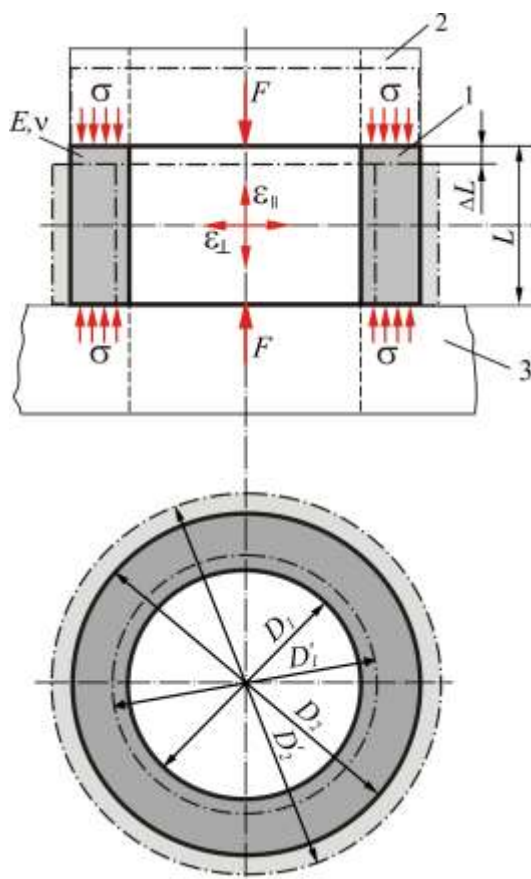


Рис. Ж.6

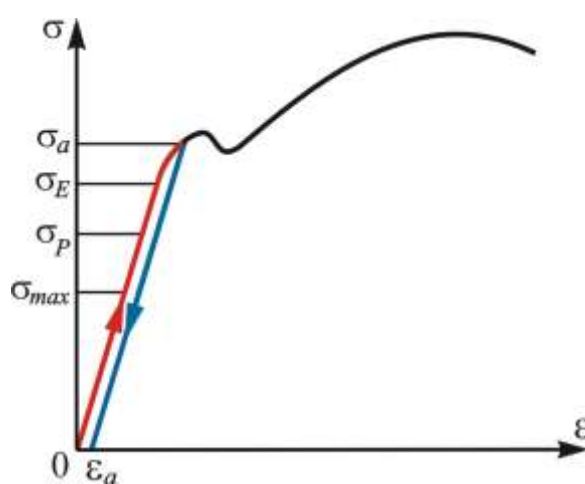


Рис. Ж.7

В області, обмеженій умовою (Ж.19), характеристика матеріалу лінійна, тобто стан зразка по розвантаженню повністю повертається до моменту початку деформації. Але на практиці σ_p можна визначити лише з великими труднощами.

Через це σ_P замінюють більшими значеннями межі пружності σ_E , або значеннями напруги σ_a , яка після зняття навантаження дає залишкову деформацію ε_a . Зазвичай регламентують деформації ε_a , рівні 0,001; 0,005; 0,01 або 0,02, а відповідні їм напруги позначаються як $\varepsilon_{0,001}$, $\varepsilon_{0,005}$, $\varepsilon_{0,01}$ і $\varepsilon_{0,02}$ (рис. Ж.7). Величини ε_a наводяться в технічних умовах на матеріал. Для сталевих ПЧЕ у розрахунках приймають $\sigma_P = 0,2 \div 0,5 \sigma_{0,01}$ [255].

Тобто

$$|\sigma_{\max}| \leq (0,2 \div 0,5) \sigma_{0,01}. \quad (\text{Ж.20})$$

З огляду на те, що з іншого боку $|\sigma_{\max}|$ визначається як

$$|\sigma_{\max}| = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{\frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)}, \quad (\text{Ж.21})$$

знайдемо зовнішній діаметр D_2 ПЧЕ (враховуючи те, що внутрішній діаметр D_1 задається діаметром різьбового кінця стяжної призми ТГ).

$$|\sigma_{\max}| = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{\frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)} = \frac{4F_{\max}}{\pi(D_2^2 - D_1^2)} \leq (0,2 \div 0,5) \sigma_{0,01} \quad (\text{Ж.22})$$

$$D_2 \geq \sqrt{\frac{4F_{\max}}{|\sigma_P|\pi} + D_1^2} \geq \sqrt{\frac{4F_{\max}}{\pi(0,2 \div 0,5) \sigma_{0,01}} + D_1^2}.$$

Розрахуємо D_2 , коли $D_1 = 68$ мм, $F_{\max} = 44000$ кгс, $\sigma_T = 80$ кгс/мм² (сталь 40Х). Отримаємо

$$D_2 \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 44000}{0,5 \cdot 80 \cdot 3,14} + 68^2} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 44000}{0,5 \cdot 80 \cdot 3,14} + 68^2} \geq 77,62 \text{ мм} \approx 78 \text{ мм}$$

Для точного розрахунку залежності «сила – відносна деформація» необхідно враховувати зміну площі поперечного перерізу ПЧЕ у відповідності з коефіцієнтом Пуассона [126]. Змінена площа S' складе

$$S' = \frac{\pi}{4} [(D_2')^2 - (D_1')^2] = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) (1 + \nu \varepsilon_{II})^2 = S (1 + \nu \varepsilon_{II})^2. \quad (\text{Ж.23})$$

Тоді дійсне значення відносної деформації ε'_{Π} буде дорівнювати

$$\varepsilon'_{\Pi} = \frac{F}{S'E} = \frac{F}{S(1+\nu\varepsilon_{\Pi})^2 E} = \frac{\varepsilon_{\Pi}}{(1+\nu\varepsilon_{\Pi})^2}. \quad (\text{Ж.24})$$

На рис. Ж.8 показано залежність $\varepsilon'=f(F)$ визначену для ПЧЕ ($D_1=68$ мм, $D_2=78$ мм), виготовленого із сталі 40Х ($E=2,1 \cdot 10^4$ кгс/мм², $\mu=0,3$).

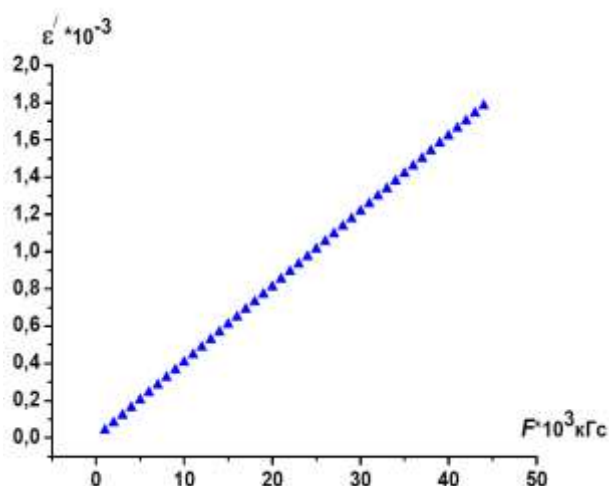


Рис. Ж.8 Залежність $\varepsilon'=f(F)$

Відносна похибка δ_{Π} , викликана зміною поперечного перерізу складе

$$\delta_{\Pi} = \frac{\varepsilon_{\Pi} - \varepsilon'_{\Pi}}{\varepsilon_{\Pi}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1}{(1+0,3\varepsilon_{\Pi})^2} \right) \cdot 100\%, \quad (\text{Ж.25})$$

$$\text{де } \varepsilon_{\Pi} = \frac{F}{SE} = \frac{4F}{\pi(D_2^2 - D_1^2)E}.$$

Залежність відносної похибки $\delta_{\Pi}=f(F)$ показана на рис. Ж.9.

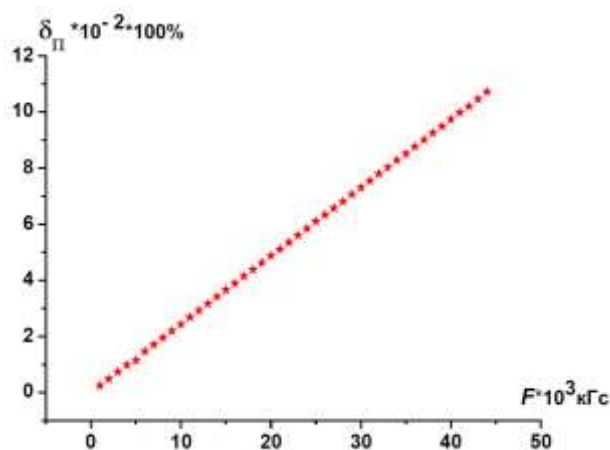


Рис. Ж.9 Відносна похибка $\delta_{\Pi}=f(F)$

При виконанні роботи розроблено та створено трубчастий ПЧЕ для напівдиференціального ємнісного сенсора зусиль, 3-D модель якого показна на рис. Ж.10, а. Для попередніх експериментальних досліджень ємнісного сенсора макет ПЧЕ виготовлено на 3-D принтері (рис. Ж.10, б).

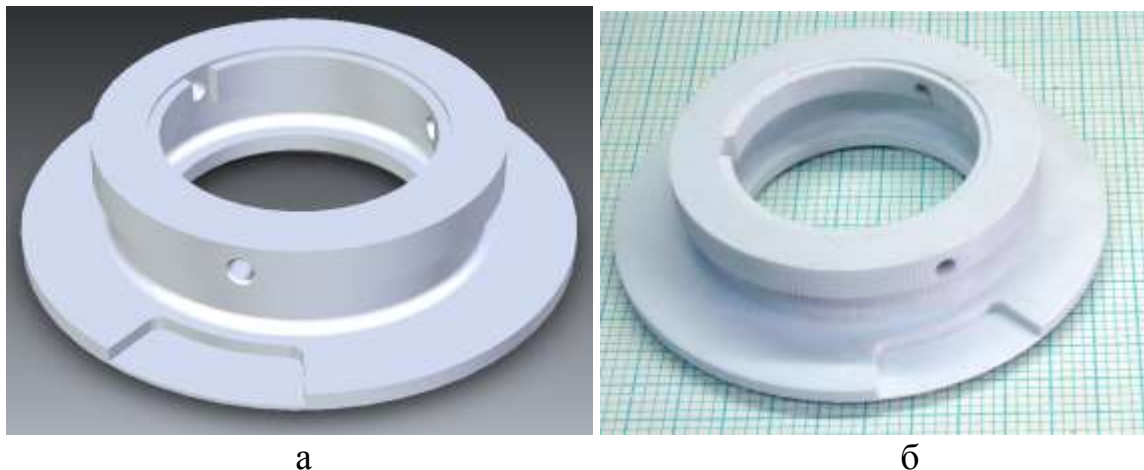


Рис. Ж.10 Модель ПЧЕ

Ж.5 Метод опрацювання сигналів оптоволоконних систем діагностування ПГ

Принцип роботи оптоволоконних вимірювачів базується на фіксації модуляції одного або декількох параметрів оптичного випромінювання, наприклад спектрального складу або інтенсивності оптичного випромінювання. У цьому разі модуляція виникає в оптичному чутливому елементі під впливом фізичного параметру або об'єкту, який контролюється. Узагальнено, сигнал $s_m(x)$ на вході оптичного чутливого елементу оптоволоконного вимірювача та може бути описаний як

$$s_m(x) = M\{s_{ConInf}(x), s_{car}(x)\}, \quad (\text{Ж.26})$$

де $s_{ConInf}(x)$ – модулюючий сигнал, що виникає або видозмінюється під впливом фізичного параметру, який контролюється; $s_{car}(x)$ – сигнал несучої частоти; $M\{.\}$ – оператор, який визначається видом модуляції.

Для виділення інформаційної складової $s_{Inf}(x)$ із сигналу $s_m(x)$ необхідно у вторинному вимірювальному перетворювачі виконати зворотне перетворення $M^{-1}\{.\}$ (демодуляцію), тобто

$$s_{Inf}(x) = M^{-1}\{s_m(x)\}, \quad (\text{Ж.27})$$

За даних умов діапазон контрольованих мікропереміщень може становити близько кількох сотих міліметра. У цьому разі актуальним є завдання підвищення роздільної здатності та завадостійкості. Один із таких варіантів був розглянутий в попередньому розділі. Основним недоліком описаного варіанту є необхідність використання хоча і економічної, але багатокомпонентної мікроелектронної бази безпосередньо в зоні контролю механічного параметру в сукупності з традиційними сенсорами, що є чутливими елементами, які мають обмежену роздільну здатність. Зазначених недоліків позбавлені оптоволоконні вимірювачі (ОВ), вони повністю інертні до впливу дії полів внутрішнього середовища потужних генераторів, хоча й мають більшу вартість засобів, що розміщуються в "безпечній зоні".

Завданням, що вирішуються за допомогою ОВ, є визначення зміни положення об'єкту (положення конструктивних елементів ПГ) в просторі, тобто мікропереміщень. Вирішення завдання забезпечується, насамперед, завдяки таким перевагам лазерних випромінювачів, як просторова та часова когерентність.

Отже, з урахуванням вище наведеного, виникає задача розробки принципів функціонування та узагальненої схеми комп'ютеризованих систем з оптоволоконними вимірювачами для контролю та діагностики параметрів механічних дефектів потужних генераторів, розгляду методів модуляції оптичного потоку, аналітичних залежностей формування інформаційного сигналу та розгляду практичного застосування ОВ вимірювачів в складі систем технічної діагностики, що дозволить забезпечити підвищення ефективності систем контролю та діагностики ПГ.

Одним із способів підвищення діапазону вимірювання, стійкість до впливу зовнішніх й внутрішніх завад, а також дестабілізуючих факторів на результат визначення $s_{Inf}(x)$ є використання методів синхронного або диференціального вимірювання.

Коротко зупинимося на основних визначеннях двох останніх понять.

Синхронний вимірювальний перетворювач – самостійний засіб вимірювання або ж його функціонально закінчена одиниця, що призначена для перетворення вхідного сигналу $s_m(x)$ синхронно з опорним сигналом $s_{mRef}(x)$ у вихідний(-і) сигнал(-и) $s_{Inf}(x)$ для отримання інформаційної складової про зміну механічних параметрів досліджуваного об'єкту, що містяться у вхідному сигналі $s_m(x)$.

У цьому разі, світловий потік від оптичного джерела розділяється на рівні або пропорційні частини. Одна із частин світлового потоку, зазвичай більша, використовується для вимірювання, а інша використовується для формування опорного сигналу $s_{mRef}(x)$. Сигнал $s_{mRef}(x)$ використовується для виконання зворотного перетворення $M^{-1}\{.\}$, відповідно до виразу (Ж.27). Застосовуючи розглянутий метод обробки інформаційного сигналу [83], автором була запропонована та розглянута структура електронно-оптичного вимірювача

переміщень та вібрацій, в якій використовуючи описаний вище метод. В даному випадку інформація про зміну відхилення нормованих параметрів між конструктивними елементами в ТГ та ГГ закладена в модуляцію фази сигналу на вході вимірювального перетворювача. Використання фази, як інформативного параметру при вимірюванні контрольно-діагностичних параметрів механічних дефектів в ТГ та ГГ має переваги за неможливості забезпечення достатньої стабільності несучої частоти, низькочастотної флуктуації фази сигналу або за рахунок умов поширення сигналу.

У більшості випадків описаних у роботах автором [59, 80, 81, 83, 88, 92, 213, 251, 367] сигнал на виході оптичного випромінювача в узагальненому вигляді може бути представлений наступним чином

$$u_{ma}(t) = U_{car}(t) \left[1 + m \frac{U_{Con}(t)}{|U_{Con}(t)|_{\max}} \right] \sin(\omega_{Con}t + \varphi_0) \quad (\text{Ж.28})$$

де $U_{car}(t)$ – амплітудне значення сигналу несучої частоти $s_{car}(x)$, визначене в момент часу t ; $U_{Con}(t)$ – амплітудне значення інформаційного (модуючого) сигналу $s_{ConInf}(x)$, визначене в момент часу t ; $m > 0$ – коефіцієнт амплітудної модуляції; φ_0 – початкове значення фазового зсуву сигналу $s_{ConInf}(x)$.

На вході детектора оптичного потоку (фотопроямача 4, рис.1) в узагальненому вигляді, за ідеальних умов, відбитий від поверхні конструктивного елементу сигнал, може бути представлений у вигляді

$$u_{inf}(t) = U_{car}(t) \left[1 + m \frac{U_{Con}(t)}{|U_{Con}(t)|_{\max}} \right] \sin(\omega_{Con}t + \varphi_0 + \varphi(t)) \quad (\text{Ж.29})$$

де $\varphi(t)$ – інформативна зміна фазового параметра, що виникає в результаті відхилення значення контрольно-діагностичних параметрів від їх нормованого значення.

Використовуючи складова $\varphi(t)$, що міститься в виразі (Ж.29), досить легко з урахуванням відповідних масштабних коефіцієнтів або калібрувальних таблиць розрахувати значення істинне значення мікропереміщення одного конструктивного елементу вузла, що контролюється відносно іншого.

Незважаючи на те, що інформативна зміна фазового параметра відбувається в процесі поширення тестового сигналу, саме фазові методи із використанням синхронних вимірювальних перетворювачів у своїй структурі мають ряд переваг в порівнянні із іншими методами вимірювання контрольно-діагностичних параметрів механічних дефектів в ТГ та ГГ. До переваг можна віднести заводо захищеність від регулярних перешкод, достовірність у передачі інформаційної складової вимірювального сигналу та можливість ефективного

виділення інформаційної складової сигналу при дії шумів.

Менш поширеним типом, який використовується для реалізації оптоволоконних вимірювачів є диференціальний метод вимірювання.

Під диференціальним вимірювальним перетворювачем далі будемо розуміти – самостійний засіб вимірювання або ж його функціонально закінчену одиницю, що призначена для отримання вихідного інформаційного сигналу $s_{Inf}(x)$, який є різницею вхідного сигналу $s_m(x)$ та зразкового (опорного) сигналу $s_{sup}(x)$ з подальшим перетворенням отриманого сигналу в цифровий код.

Практичне застосування диференціальних вимірювальних перетворювачів в оптоелектронних вимірювачах, аналогічні розглянутому вище випадку застосування синхронних вимірювальних перетворювачів, але й має ряд відмінностей, тому розглянемо процес повністю. У цьому разі, світловий потік від оптичного джерела розділяється на рівні або пропорційні частини. Одна із частин світлового потоку, зазвичай більша, використовується для вимірювання, а інша подається через оптичне волокно або оптичну систему на зразковий оптичний елемент, який розташований в опорному каналі. У цьому разі на вхід фотоприймача 4 світлові потоки можуть подаватися за допомогою використання засобів оптичної комутації (наприклад: комірок Керра) або використовуючи два однакові за характеристиками фотоприймачі. Тоді значення вихідного сигналу диференційного вимірювального перетворювача, в аналоговому вигляді визначається наступним виразом:

$$U_{diff}(t) = K \frac{U_1(t) - U_2(t)}{U_1(t) + U_2(t)} \quad (\text{Ж.30})$$

де $U_1(t) = K_1 \cdot \Phi_1(t)$ та $U_2(t) = K_2 \cdot \Phi_2(t)$ – сигнали на виходах фотоприймачів; K_1, K_2 – коефіцієнти, що враховують перетворення оптичних потоків $\Phi_1(t), \Phi_2(t)$ в електричний сигнал; K – коефіцієнт перетворення.

Ідентичність змісту приєднанні
дисертації, що був поданий до ради,
з іншими приєднаннями на
електронних носіях, засвідчую

В. О. Вченою секретаря
СВР Д 26.187.02

Ю. Ф. Тесик

