

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Закусило Сергій Анатолійович

УДК 621.317

ДИСЕРТАЦІЯ

**Розробка компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю
обертових вузлів гідрогенераторів**

152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело. Частини тексту дисертації, під час написання яких використовувалися технології штучного інтелекту, перевірені та відредаговані особисто.


_____Серій ЗАКУСИЛО

Науковий керівник: Зайцев Євген Олександрович, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Закусило С.А. Розробка компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів гідрогенераторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка". – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання, що полягає у розробці нових та удосконаленні існуючих компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів гідрогенераторів, зокрема сенсорів, математичних моделей їх вихідних сигналів і алгоритмів обробки в реальному масштабі часу з урахуванням складних та змінних експлуатаційних режимів.

Метою дисертаційної роботи є розробка компонентів отримання, обробки та передачі контрольної-діагностичної інформації, які забезпечують підвищення точності інформаційно-вимірювальних системи контролю обертових вузлів гідрогенераторів. Досягнення зазначеної мети передбачає врахування впливу робочого середовища (температури та вологості) на результат вимірювання кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенераторів.

Об'єктом дослідження є процес контролю технічного стану обертових вузлів потужного генеруючого обладнання електростанцій на основі вимірювання і аналізу контрольної-діагностичних сигналів, зокрема радіального биття валу та повітряного проміжку, що формуються під час експлуатації потужних гідрогенераторів.

Предметом дослідження є моделі та технічні засоби реалізації компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю технічного стану низькообертових вузлів потужних гідрогенераторів.

Основні завдання роботи полягають у проведенні аналітичного огляду існуючих інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів

потужних гідрогенераторів для визначення шляхів покращення характеристик компонентів цих систем відповідно до вимог сучасних стандартів; розробці конструкцій первинних вимірювальних перетворювачів інваріантних до впливу робочого середовища генератора та алгоритмів обробки їх інформативних сигналів; розробці математичних моделей вихідних сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів потужних гідрогенераторів; розробці програмно-алгоритмічного забезпечення компонентів засобів отримання, обробки та відображення контрольної-діагностичної інформації в системах контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів; створенні макетних зразків компонентів засобів отримання, обробки та відображення контрольної-діагностичної інформації в інформаційно-вимірювальних системах контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів; проведенні експериментальних досліджень розроблених апаратних компонентів та програмних засобів систем контролю обертових вузлів генеруючого обладнання, що забезпечують високий рівень інформаційної ефективності та стійкості до впливу параметрів внутрішнього середовища потужних гідрогенераторів.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

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

У першому розділі наведено аналіз сучасного стану та проблематики контролю і діагностування обертових вузлів потужних гідрогенераторів, що експлуатуються в складі гідроелектростанцій України. Обґрунтовано актуальність застосування спеціалізованих систем контролю, адаптованих до індивідуальних конструктивних і експлуатаційних особливостей конкретних гідроагрегатів, а також до умов їх тривалої роботи під дією змінних механічних,

електромагнітних і гідравлічних навантажень. Проаналізовано основні методи та засоби контролю фактичного технічного стану обертових вузлів, їх функціональні можливості, переваги та обмеження. Проаналізовано різні типи дефектів гідрогенераторів і їх вплив на технічний стан генераторів. Зазначено доцільність застосування систем діагностики із вимірювальними компонентами інваріантними до впливу внутрішнього середовища агрегату. Показано, що відповідність міжнародним стандартам зумовлює потребу підвищення інформативності та завадостійкості вимірювальних засобів.

У *другому* розділі роботи розглянуто розроблення удосконаленої структури інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів та обґрунтовано принципи побудови її основних вимірювальних і комунікаційних компонентів. Основну увагу приділено формуванню мультифізичної сенсорної інфраструктури, що поєднує ємнісні, вібраційні, електромагнітні, температурні та гігрометричні сенсори з метою підвищення достовірності й інформативності контрольних-діагностичних вимірювань. У розділі детально описано структуру інформаційно-вимірювального каналу контролю повітряного проміжку, принципи його синхронізації з обертанням ротора та організацію детермінованого обміну даними в реальному масштабі часу. Запропоновано принцип функціонування перетворювача-інтегратора та проаналізовано його часові параметри, що підтверджує можливість безперервного вимірювання за змінних швидкісних режимів роботи гідрогенератора без втрати інформації. Окрему увагу приділено розробці диференційного ємнісного сенсора повітряного проміжку, інваріантного до впливу температури та вологості внутрішнього середовища, що дозволяє суттєво зменшити систематичні похибки вимірювань. Також обґрунтовано застосування безпроводної технології LoRaWAN для організації інформаційно-комунікаційних засобів обміну, що забезпечує завадостійке та масштабоване передавання даних від просторово розосереджених вимірювальних вузлів. Отримані в розділі результати створюють апаратно-методичну основу для подальшої реалізації алгоритмів діагностики та

прогнозування технічного стану обертових вузлів гідрогенераторів.

У *третьому* розділі наведено математичні моделі і алгоритми обробки сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенераторів. Розділ спрямований на формування програмно-математичної основи інформаційно-вимірювальних каналів системи контролю, що забезпечує адекватне відображення реальних фізичних процесів у роторно-статорній системі. Розглянуто стохастичну природу формування сигналів, зумовлену взаємодією механічних, магнітних, гідродинамічних і термомеханічних факторів, та показано доцільність використання детерміновано-ймовірнісних моделей для їх опису. У розділі детально розроблено моделі вихідних сигналів ємнісних сенсорів повітряного проміжку і биття валу з урахуванням нелінійностей, шумових складових, температурних і вологісних впливів, а також характеристик вторинних вимірювальних перетворювачів. Показано особливості формування детермінованих і нестационарних компонент сигналів та їх вплив на формування сигналів на виході ємнісних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів потужних гідрогенераторів. Наведено результати моделювання сигналів сенсора магнітного поля в повітряному проміжку та тахометричного сенсора як елемента синхронізації. Запропоновано методи визначення просторового зміщення валу та розрахунку годографа руху центра ротора на основі даних ортогонально розташованих сенсорів, що забезпечує підвищення інформативності діагностики та достовірності оцінювання технічного стану обертових вузлів гідрогенераторів.

Четвертий розділ присвячено технічній реалізації та експериментальній перевірці компонентів інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів. У розділі описано розробку випробувально-демонстраційного стенду, що забезпечує відтворювану зміну геометричних параметрів обертових вузлів (ексцентриситету, перекосу та радіального биття вала) з одночасною багатоканальною реєстрацією контрольних-діагностичних сигналів у реальному масштабі часу. Наведено результати експериментальної перевірки адекватності запропонованих

математичних моделей і алгоритмів обробки даних, а також досліджено вплив температури та вологості робочого середовища на функцію перетворення ємнісних сенсорів повітряного проміжку. Обґрунтовано та реалізовано алгоритми температурно-вологісної компенсації, що дозволили зменшити сумарну похибку вимірювань. Особливу увагу приділено розробці засобів візуалізації результатів контролю, зокрема годографів, які забезпечують роздільний аналіз статичних і динамічних складових нерівномірності повітряного проміжку. Наведено результати натурних випробувань на діючому гідроагрегаті, що підтверджують практичну придатність і метрологічну доцільність запропонованих технічних рішень. Проведені натурні випробування на діючому гідроагрегаті Київської ГЕС підтвердили практичну придатність запропонованих технічних і програмних рішень (розбіжність із штатними засобами вимірювання становила не більше 0,8 %).

Практичне значення отриманих у роботі результатів полягає у комплексному вирішенні задач підвищення точності та достовірності контролю кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенераторів за рахунок урахування впливу факторів внутрішнього середовища. Розроблено, виготовлено та експериментально апробовано макетні зразки ємнісного сенсора і модуля збору та попередньої обробки даних, що підтвердило працездатність запропонованих технічних рішень. Результати досліджень впроваджено у виробничу практику на об'єктах ПрАТ «Укргідроенерго», зокрема на Філії «Дирекція з будівництва Дністровської ГАЕС», де реалізація алгоритмів попередньої обробки сигналів та застосування інваріантних ємнісних сенсорів дозволили підвищити точність вимірювання повітряного проміжку та достовірність діагностування технічного стану гідрогенераторів.

Ключові слова: гідрогенератор, обробка сигналів, енергетика, кінематичні, сенсори, контроль, моніторинг, енергетичні об'єкти, дослідження, вимірювання, похибки, модель, функціональна залежність.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., **Закусило С.А.**, Антоненко А.В. SMART засоби визначення аварійних станів в розподільних електричних мережах міст. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. №5. С. 3–12. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.1>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробленні принципів побудови структури систем контролю на основі інтеграції сенсорних та інформаційно-комунікаційних технологій та узагальнення отриманих результатів).

2. Шидловська Н. А., Захарченко С. М., Захарченко М. Ф., Куліда М. А., **Закусило С. А.** Спектральний та оптикометричний методи контролю параметрів плазмових каналів, спричинених розрядними струмами між гранулами металів у робочих рідинах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2024. №6. С. 72–83. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.10>. Фахове видання категорії А. *Index in SCOPUS*. (Особистий внесок – брав участь в плануванні експерименту, обробці результатів визначення просторових параметрів обвідних).

3. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Рассовський В. Л., **Закусило С.А.** Розрахунок похибки ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах з системою компланарних електродів, зумовленої перекосом. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. №69. С. 119–125. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.119>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробленні розрахункової схеми для оцінки похибки обумовленою перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора, узагальненні результатів та підготовці статті).

4. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., **Закусило С.А.** Модель для аналізу стаціонарних складових сигналів з ємнісних сенсорів биття валів гідрогенераторів. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. №4. С. 49–55. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-7>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – проводив аналізу факторів, що сприяють дефекти в гідрогенераторах, приймав участь у розробленні моделі вихідного

сигналу ємнісних вимірювачів биття валів).

5. Березниченко В.О., **Закусило С.А.**, Рассовський В.Л. Теоретично-експериментальне дослідження ємнісного сенсору систем контролю повітряного проміжку потужних гідрогенераторів з системою компланарних електродів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. №2. С. 117–124. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-14>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – проведення натурних експериментальних досліджень, узагальнення отриманих результатів).

6. **Закусило С.А.**, Березниченко В.О. Аналіз впливу перекоосу електродів ємнісного сенсора биття системи моніторингу стану гідрогенераторів на його функцію перетворення. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. №4. С. 7–14. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-7-14>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – проведення натурних експериментальних досліджень, обробці результатів визначення функцій ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами).

7. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Куліда М.А., **Закусило С. А.**, Яковенко Р.А. Розподіли об'ємів складових плазмових каналів розрядних струмів між гранулами металів у робочих рідинах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2025. №1. С. 73–85. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.1.10>. Фахове видання категорії А. *Index in SCOPUS*. (Особистий внесок – розрахунок статистичних моментів розподілів та підготовка статті).

8. Левицький А.С., Зайцев Є.О., **Закусило С.М.** Підвищення точності ємнісного вимірювача повітряного проміжку між статором та ротором у гідрогенераторах на основі диференціального методу. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, 2025. №70(2). С. 5–11. [https://doi.org/10.20535/1970.70\(2\).2025.347948](https://doi.org/10.20535/1970.70(2).2025.347948). Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – приймав участь у розрахунку функції перетворення ємнісного сенсора та підготовці статті).

9. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., **Закусило С.А.**, Грицюк В.О. Підвищення експлуатаційної надійності об'єктів інфраструктури електричних

мереж. *Міжнародна конференція «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми “Велике будівництво”»*: Матеріали конф. Київ, 24–25 листопада 2022 р. С. 206–209.

10. Зайцев Є.О., **Закусило С.А.**, Соколов В.В. Інформаційна система моніторингу параметрів об'єктів гідроенергетичних комплексів. *Міжнародна конференція «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми “Велике будівництво”»*: Матеріали конф. Київ, 24–25 листопада 2022 р. С. 210–211.

11. Зайцев Є.О., **Закусило С.А.**, Блінов І.В., Березниченко В.О. Забезпечення енергоефективності інформаційного обміну в системах ідентифікації аварійних станів розподільчих мереж. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'22*: Матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. Київ, 15–17 листопада 2022 р. С. 56–59.

12. Zvaritch V., Zaitsev Ie., Myslovych M., Levytskyi A., **Zakusilo S.** Some features of monitoring and diagnostic systems technical condition of hydro units taking into account smart grid technology. *Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*: Proc. of the 4th Int. Conf. Kryvyi Rih, 22–26 May 2023. Article ID 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012026. **Index in SCOPUS.**

13. Zaitsev I., Levytskyi A., Bereznynchenko V., **Zakusilo S.**, Rassovskyi V. Application of air gap sensor for improved fault detection and diagnostics tools for hydro generators condition monitoring systems. *2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2023)*: Proc. Conf. Kharkiv, 7–10 Oct. 2023. С. 1–6. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312877. **Index in SCOPUS.**

14. **Закусило С.А.**, Зайцев Є.О. Використання технології LoRaWAN в системах інформаційного обміну засобів контролю та діагностування енергетичного обладнання. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та*

технологічними комплексами: Матеріали X Міжнар. наук.-техн. Internet-конф. Київ, 24 листопада 2023 р. С. 183.

15. **Закусило С.А.**, Зайцев Є.О. Розробка математичної моделі руху ротора гідрогенератора з урахуванням його конструкції. *Відкрита наука України: Візійний дискурс в умовах воєнного стану*: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Ужгород, 26–28 квітня 2023 р. С. 25–28.

16. **Закусило С.А.**, Зайцев Є.О. Інформаційно-комунікаційні технології інформаційного обміну в системах контролю енергетичного обладнання на базі технології LoRaWAN. *Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика*: Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. Полтава, 10 листопада 2023 р. С. 62–63.

17. Зайцев Є.О., **Закусило С.А.**, Березниченко В.О. Просторово-розподілена сенсорна мережа контролю експлуатаційних параметрів енергетичних об'єктів в режимі реального часу з розподіленою мікроконтролерною архітектурою. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами*: Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. Internet-конф. Київ, 27 листопада 2024 р. С. 133.

ANNOTATION

Zakusilo S.A. Development of components of information and measuring systems for controlling rotating units of hydrogenerators. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 "Metrology and information and measuring equipment". – Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving a topical scientific and applied problem, which consists in developing new and improving existing components of information and measuring systems for controlling rotating units of hydrogenerators, in particular sensors, mathematical models of their output signals and algorithms for processing in real time, taking into account complex and variable operating modes.

The purpose of the dissertation is to develop components for receiving, processing and transmitting control and diagnostic information, which ensure an increase in the accuracy of information and measuring systems for controlling rotating units of hydrogenerators. Achieving this goal involves taking into account the influence of the working environment (temperature and humidity) on the result of measuring the kinematic characteristics of rotating units of hydrogenerators.

The object of the study is the process of monitoring the technical condition of rotating units of powerful generating equipment of power plants based on the measurement and analysis of control and diagnostic signals, in particular radial runout of the shaft and air gap, which are formed during the operation of powerful hydrogenerators.

The subject of the study is models and technical means of implementing components of information and measuring systems for monitoring the technical condition of low-speed units of powerful hydrogenerators.

The main tasks of the work are to conduct an analytical review of existing information and measuring systems for monitoring rotating units of powerful hydrogenerators to determine ways to improve the characteristics of the components

of these systems in accordance with the requirements of modern standards; to develop designs of primary measuring transducers invariant to the influence of the generator's working environment and algorithms for processing their informative signals; development of mathematical models of output signals of sensors of kinematic characteristics of rotating units of powerful hydrogenerators; development of software and algorithmic support for components of means of receiving, processing and displaying control and diagnostic information in control systems of rotating units of powerful hydrogenerators; creation of mock-up samples of components of means of receiving, processing and displaying control and diagnostic information in information and measuring systems of control of rotating units of powerful hydrogenerators; conducting experimental studies of the developed hardware components and software of control systems of rotating units of generating equipment, which provide a high level of information efficiency and resistance to the influence of parameters of the internal environment of powerful hydrogenerators.

The work consists of an introduction, 4 sections, general conclusions, list of sources used and appendices.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, reveals the essence and state of the scientific and technical problem under study, provides a justification for the feasibility of conducting research, reflects the connection of the work with scientific programs and R&D plans of the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, formulates the goal and objectives of the research, scientific novelty and practical significance of the results obtained, indicates the personal contribution of the applicant, provides approbations of the work and publication of its results in scientific publications.

The *first* section provides an analysis of the current state and issues of control and diagnostics of rotating units of powerful hydrogenerators operated as part of Ukrainian hydroelectric power plants. The relevance of the use of specialized control systems adapted to the individual design and operational features of specific hydrounits, as well as to the conditions of their long-term operation under the influence of variable mechanical, electromagnetic and hydraulic loads is substantiated. The main

methods and means of controlling the actual technical condition of rotating units, their functional capabilities, advantages and limitations are analyzed. Various types of defects in hydrogenerators and their impact on the technical condition of generators are analyzed. The feasibility of using diagnostic systems with measuring components invariant to the influence of the internal environment of the unit is indicated. It is shown that compliance with international standards necessitates the need to increase the informativeness and noise immunity of measuring instruments.

The *second* section of the work considers the development of an improved structure of the information and measurement system for monitoring rotating units of powerful hydrogenerators and substantiates the principles of constructing its main measuring and communication components. The main attention is paid to the formation of a multi-physical sensor infrastructure that combines capacitive, kinematic, vibration, electromagnetic, temperature and hygrometric sensors in order to increase the reliability and informativeness of control and diagnostic measurements. The section describes in detail the structure of the information and measurement channel for monitoring the air gap, the principles of its synchronization with the rotor rotation and the organization of deterministic data exchange in real time. The principle of operation of the converter-integrator is proposed and its time parameters are analyzed, which confirms the possibility of continuous measurement under variable speed operating modes of the hydrogenerator without loss of information. Special attention is paid to the development of a differential capacitive air gap sensor, invariant to the influence of temperature and humidity of the internal environment, which allows to significantly reduce systematic measurement errors. The use of wireless LoRaWAN technology for the organization of information and communication exchange facilities is also justified, which provides interference-resistant and scalable data transmission from spatially dispersed measuring nodes. The results obtained in the section create a hardware and methodological basis for further implementation of algorithms for diagnostics and forecasting the technical condition of rotating units of hydrogenerators.

The *third* section presents mathematical models and algorithms for processing signals from sensors of kinematic characteristics of rotating units of hydrogenerators.

The section is aimed at forming a software-mathematical basis for information-measuring channels of the control system, which provides an adequate reflection of real physical processes in the rotor-stator system. The stochastic nature of signal formation, caused by the interaction of mechanical, magnetic, hydrodynamic and thermomechanical factors, is considered, and the feasibility of using deterministic-probabilistic models for their description is shown. The section develops in detail models of output signals of capacitive sensors of the air gap and shaft runout, taking into account nonlinearities, noise components, temperature and humidity effects, as well as characteristics of secondary measuring transducers. The features of the formation of deterministic and non-stationary signal components and their influence on the formation of signals at the output of capacitive sensors of kinematic characteristics of rotating units of powerful hydrogenerators are shown. The results of modeling the signals of the magnetic field sensor in the air gap and the tachometric sensor as a synchronization element are presented. Methods for determining the spatial displacement of the shaft and calculating the hodograph of the rotor center movement based on data from orthogonally located sensors are proposed, which provides increased diagnostic information and reliability of assessing the technical condition of rotating units of hydrogenerators.

The *fourth* section is devoted to the technical implementation and experimental verification of the components of the information and measuring system for monitoring rotating units of powerful hydrogenerators. The section describes the development of a test and demonstration stand that provides a reproducible change in the geometric parameters of rotating units (eccentricity, skew and radial runout of the shaft) with simultaneous multi-channel registration of control and diagnostic signals in real time. The results of experimental verification of the adequacy of the proposed mathematical models and data processing algorithms are presented, and the influence of temperature and humidity of the working environment on the conversion function of capacitive air gap sensors is also investigated. Temperature-humidity compensation algorithms are substantiated and implemented, which allowed to reduce the total measurement error. Special attention is paid to the development of means of visualization of control results,

in particular hodographs, which provide separate analysis of static and dynamic components of air gap unevenness. The results of field tests on an operating hydropower unit are presented, which confirm the practical suitability and metrological feasibility of the proposed technical solutions. The field tests conducted on the operating hydropower unit of the Kyiv Hydropower Plant confirmed the practical suitability of the proposed technical and software solutions (the discrepancy with standard measuring means was no more than 0.8%).

The practical significance of the results obtained in the work lies in the comprehensive solution of the problems of increasing the accuracy and reliability of control of the kinematic characteristics of the rotating units of hydrogenerators by taking into account the influence of internal environmental factors. Prototypes of a capacitive sensor and a data collection and pre-processing module were developed, manufactured and experimentally tested, which confirmed the operability of the proposed technical solutions. The results of the research were implemented in production practice at the facilities of PrJSC "Ukrhydroenergo", in particular at the Branch "Directorate for the Construction of the Dniester PSP", where the implementation of signal pre-processing algorithms and the use of invariant capacitive sensors allowed to increase the accuracy of air gap measurement and the reliability of diagnosing the technical condition of hydrogenerators.

Keywords: hydrogenerator, signal processing, energy, kinematic, sensors, control, monitoring, energy facilities, research, measurements, errors, model, functional dependence.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ПОТУЖНИХ ГІДРОАГРЕГАТІВ	30
1.1 Контроль технічного стану потужних гідроагрегатів	31
1.2 Типи дефектів обертових вузлів потужних генераторів	35
1.3 Методи контролю та визначення контрольно-діагностичних параметрів обертових вузлів потужних гідрогенераторів	45
1.4 Огляд систем контролю та діагностики вузлів потужних гідрогенераторів	48
1.5 Постановка задачі дослідження	57
Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ.....	60
2.1 Структура інформаційно-вимірjuвальної системи контролю обертових вузлів генеруючого обладнання	61
2.2 Інформаційно-вимірjuвальний канал повітряного проміжку системи контролю.....	67
2.3 Принцип функціонування перетворювача-інтегратора та аналіз його часових параметрів у складі ВВП ІВК повітряного проміжку	76
2.4 Розробка диференційного ємнісного сенсора повітряного проміжку інваріантного до навколишнього середовища	80
2.5 Інформаційно-комунікаційні засоби обміну в системах контролю енергетичного обладнання з використанням LoRaWAN	88
Висновки до розділу 2	90

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ СЕНСОРІВ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ..... 91

- 3.1 Математичні моделі вихідних сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів генеруючого обладнання з урахуванням ймовірнісної природи процесів в гідроагрегатах..... 91
- 3.2 Модель вихідного сигналу сенсору магнітного поля в повітряному проміжку 111
- 3.3 Сенсор мітки кута повороту валу 116
- 3.4 Визначення просторового зміщення валу за даними сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів 118
- 3.5 Розрахунок годографа на основі даних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів..... 121

Висновки до розділу 3 125

РОЗІЛ 4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ..... 126

- 4.1 Технічна реалізація випробувально-демонстраційного стенду інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів гідрогенератора 126
- 4.2 Аналіз впливу температури робочого середовища на функцію перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між ротором і статором..... 130
- 4.3 Аналіз впливу вологості робочого середовища на функцію перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між ротором і статором..... 141

4.4 Розробка засобів візуалізації результатів контролю обертових вузлів гідрогенераторів на основі даних вимірювання повітряного проміжку	143
4.5 Результати натурних випробувань	145
Висновки до розділу 4	148
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	151
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	165
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	169
ДОДАТОК В ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ	174
ДОДАТОК Г МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛУ З ВИХОДУ ВВП.....	180
ДОДАТОК Д АЛГОРИТМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ВВП ТА ЇХ ПРОГРАМНИЙ КОД.....	186

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГАЕС – гідроакумулювальна електростанція;

ГЕС – гідроелектростанція;

ГА – гідроагрегат;

ОЕС – об'єднана енергетична системи;

ПК – персональний комп'ютер;

B – магнітна індукція;

C – електрична ємність;

f – частота;

I – струм;

T – температура;

t – час;

U – напруга;

ε – відносні діелектрична проникність;

$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму;

r – радіус робочої зони електрода сенсора;

h – міжелектродний проміжок;

w_{GND} – ширина заземленого кільця;

d – відстань між пластинами;

H_{foil} – товщина провідного матеріалу (мідної фольги) електродів сенсора;

H_{diel} – товщина базового матеріалу сенсора.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Стабільність функціонування генеруючого обладнання електростанцій є фундаментом надійного та безпечного функціонування енергосистеми, особливо це є актуальним для об'єднаних енергосистем таких як об'єднана енергосистема України (ОЕС України), яка самостійно і повністю забезпечує себе та Україну електроенергією незважаючи на системні обмеження та виклики. Одним із таких викликів є з одного боку значна зношеність основного електроенергетичного обладнання, з іншого світові тренди направлені на глибоку трансформацію, що зумовлено підвищеними вимогами до підвищення експлуатаційних характеристик генеруючого обладнання, його надійності, ефективності та екологічної безпеки під час експлуатації на енергетичних об'єктах.

Особливе значення має забезпечення безперервного і достовірного контролю технічного стану обертових вузлів, зокрема гідроелектростанцій які є критичними складовими забезпечення балансу потужностей в ОЕС України. Адже гідроенергетика, на відміну від атомної та вугільної енергетики використовує відновлювальне джерело енергії, оскільки базується на водному циклі – нескінченному процесі кругообігу води в природі та використовується здебільшого для покриття пікових навантажень в енергосистемі або споживання активної потужності з метою вирівнювання добового графіка навантаження.

Зниження експлуатаційної надійності та ефективності гідроелектрогенераторів у більшості випадків зумовлено виникненням дисбалансів в обертових елементах. Основними факторами, що сприяють формуванню дисбалансу є нерівномірне зношування поверхонь обертових вузлів і підшипникових опор (бабітових вкладишів), технологічні відхилення, а також людський фактор (помилки під час проектування, виготовлення, експлуатації або технічного обслуговування обладнання). Окрім того, на виникнення дисбалансів впливають деформації, що утворюються внаслідок дії фізико-хімічних, термічних та механічних процесів. Ознаки дефектів пов'язані із цими процесами проявляються в умовах тривалої

експлуатації та сприяють поступовому розвитку дефектів як в обертових, так і в суміжних вузлах. Особливо інтенсивно ці явища проявляються під час роботи гідроагрегату під навантаженням та його пуску або запинки, коли динамічні сили досягають максимальних значень. Як наслідок, відбувається зміщення осі обертання ротора відносно його геометричної осі, що є характерною ознакою погіршення технічного стану машини та може свідчити про наявність резонансних явищ, ослаблення кріплень або розвитку дефектів у будь-якій із секцій валопроводу. Одним із наслідків такого дисбалансу є динамічний прогин ротора, який виникає під дією змінних сил, зокрема інерційних, гідродинамічних або електромагнітних, а також експлуатаційних дефектів або їх взаємопов'язаних впливів між собою. Зміщення осі обертання ротора відносно його геометричної осі може свідчити про розвиток пошкоджень у валу, викривлення його лінії, порушення в роботі підшипників або ослаблення вузлів кріплення. Крім того, наявність динамічного прогину та зсуву осі може бути індикатором резонансних явищ, які поглиблюють розбалансування і сприяють прискореному зносу вузлів, знижуючи надійність і довговічність генеруючого обладнання.

Забезпечення надійності, безпеки та динамічної стійкості гідроагрегатів, що працюють у режимах змінного навантаження, характерних для маневрових джерел електроенергії, значною мірою залежить від ефективного контролю динамічного прогину та балансування обертових елементів валопроводу. Застосування систем контролю та технічного діагностування на основі інформаційно-вимірювальних засобів дозволяє забезпечити своєчасне виявлення відхилення контрольних-діагностичних параметрів від їх унормованих значень. Раннє виявлення відхилень яких дозволяє забезпечити оперативне усунення дефектів або запобігти їх подальшому розвитку. При цьому забезпечення точності, оперативності та достовірності вимірюваних даних в системах контролю обертових вузлів гідрогенераторів головним чином залежать від первинних перетворювачів та їх характеристик. На сьогодні в системах контролю обертових вузлів гідрогенераторів енергетичних об'єктів використовуються різноманітні сенсори побудовані на основі ємнісних, резистивних, оптичних, магнітних та інших методів.

Значний вклад у розробку сенсорів, алгоритмів обробки сигналів, побудови систем моніторингу і діагностики енергетичного обладнання внесли ряд вітчизняних та закордонних вчених: І.М. Постніков, А.К. Шидловський, Б.С. Стогній, Г.Г. Счастливий, О.І. Титко, В.П. Бабак, Г.М. Федоренко, Б.Г. Марченко, М.В. Мислович, А.С. Левицький, Ю.В. Зозулін, В.В. Кузьмін, В.І. Мілих, М. Bissonnette, J. Lin, P. Talas, P. Toom, J. Rassmussen, V. Howard та інші.

Однак не зважаючи на велику кількість досліджень, направлених на розвиток сенсорів, алгоритмів обробки сигналів та компонентів систем моніторингу і діагностики енергетичного обладнання багато з них мають обмеження, пов'язані з врахуванням впливу температури, вологості, конструктивної складності вузлів контролю або недостатньою інтегрованістю з сучасними цифровими системами обробки даних.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання, що полягає у розробці нових та удосконаленні існуючих компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів гідрогенераторів, зокрема сенсорів, математичних моделей їх вихідних сигналів і алгоритмів обробки в реальному масштабі часу з урахуванням складних та змінних експлуатаційних режимів.

Реалізація запропонованих у роботі підходів із вдосконалення компонентів інформаційно-вимірювальних засобів систем контролю обертових вузлів гідрогенераторів сприятиме підвищенню надійності та безпечності експлуатації електроенергетичного обладнання, забезпечуючи своєчасне виявлення відхилень у роботі обертових вузлів, зменшення ризику відмов і підвищення ефективності технічного обслуговування енергетичних об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота виконувалась у відділі теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання Інституту електродинаміки Національної академії наук України (ІЕД НАНУ) відповідно до планів Держбюджетних НДР, затверджених Президією НАН України, та пов'язана з наступними НДР:

– "Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці"(шифр "ПАРАМЕТР-Д", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. № 7/7/3-145 від 23.04.2021 р.), 2022 – 2026 рр., №ДР 0122U000136 (виконавець);

– "Створення спеціалізованих інформаційно-вимірювальних засобів для просторово-розподілених систем контролю в електроенергетиці" (шифр "ТОРЕЦЬ-2", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України № 7/7/3-145/1 від 23.04.2021 р.), 2022-2024 рр., ДР РК № 0122U000051 (виконавець).

– «Розроблення нових математичних моделей та методів дослідження електрофізичних процесів і полів в електротехнічному обладнанні для вирішення задач надійної експлуатації та діагностування» (шифр «Комплекс-5», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №7/7/3-138 від 23.04.2020 р.), 2021 – 2025 р.р., №ДР 0121U107443 (виконавець);

– «Створення інформаційно-вимірювальних засобів моніторингу стану стрижнів обмотки статора в пазах осердя та впливу параметрів якості електроенергії на вібрацію валів потужних електричних машин» (шифр «СТРИЖЕНЬ», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №7/7/3-166 від 24.04.2024 р.), 2025 – 2027 р.р., №ДР 0125U000044 (виконавець).

При виконанні цих робіт автором розроблено принципи побудови структури систем контролю на основі інтеграції сенсорних та інформаційно-комунікаційних технологій, розроблено нову структуру диференційного ємнісного сенсора повітряного проміжку інваріантного до навколишнього середовища, розроблено алгоритм визначення просторового зміщення валу за даними сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів, а також проведенні дослідження із удосконалення компонентів обробки та передачі контрольної-діагностичної інформації інформаційно-вимірювальних системи контролю обертових вузлів гідрогенераторів шляхом комп'ютерного моделювання та фізичних випробувань.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка компонентів отримання, обробки та передачі контрольної-діагностичної інформації, які забезпечують підвищення точності інформаційно-вимірювальних системи контролю обертових вузлів гідрогенераторів. Досягнення зазначеної мети передбачає врахування впливу робочого середовища (температури та вологості) на результат вимірювання кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенераторів.

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

– проведення аналітичного огляду існуючих інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів для визначення шляхів покращення характеристик компонентів цих систем відповідно до вимог сучасних стандартів;

– розробка конструкцій первинних вимірювальних перетворювачів інваріантних до впливу робочого середовища генератора та алгоритмів обробки їх інформативних сигналів;

– розробка математичних моделей вихідних сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів потужних гідрогенераторів;

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

– створення макетних зразків компонентів засобів отримання, обробки та відображення контрольної-діагностичної інформації в інформаційно-вимірювальних системах контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів;

– проведення експериментальних досліджень розроблених апаратних компонентів та програмних засобів систем контролю обертових вузлів генеруючого обладнання, що забезпечують високий рівень інформаційної ефективності та стійкості до впливу параметрів внутрішнього середовища потужних гідрогенераторів.

Об'єктом дослідження є процес контролю технічного стану обертових вузлів потужного генеруючого обладнання електростанцій на основі вимірювання і аналізі контрольних-діагностичних сигналів, зокрема радіального биття валу та повітряного проміжку, що формуються під час експлуатації потужних гідрогенераторів.

Предметом дослідження є моделі та технічні засоби реалізації компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю технічного стану низькооборотних вузлів потужних гідрогенераторів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися: методи теорії інформаційно-вимірювальних систем, теорія ймовірностей, теоретичні основи електротехніки, методи статистичного оброблення сигналів, методи комп'ютерного моделювання, теоретичні і експериментальні методи в області ємнісних вимірювачів фізичних величин. Теоретична частина роботи ґрунтується на аналітичних і числових методах дослідження з використанням положень математичного аналізу, електротехніки та інформаційно-вимірювальних систем.

Наукова новизна отриманих результатів:

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

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

– набули подальшого розвитку математичні моделі вихідних сигналів ємнісних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів

гідрогенераторів, що враховують вплив температури та вологості робочого середовища досліджуваного об'єкту на точність та стабільність вимірювань;

– вперше запропоновано структуру диференціального ємнісного сенсора повітряного проміжку, інваріантного до впливу робочого середовища генератора, завдяки додаткового сенсора з електродами, геометрично подібними змінному конденсатору, що дозволило підвищити точність вимірювання повітряного проміжку під час роботи гідроагрегату.

Новизну одержаних технічних рішень захищено заявкою на патент України № а2025 03867, МКІ G01B7/14. Ємнісний вимірювач повітряного проміжку між статором і ротором в гідрогенераторах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

– розроблено та реалізовано підхід до аналізу впливу температури і вологості на вихідні сигнали ємнісних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенераторів, шляхом використання математичних моделей їх вихідних сигналів;

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

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

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

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

– впроваджено в алгоритмах обробки результатів визначення геометричних параметрів іскрових ядер в плазмових каналах в Інституті металофізики ім. В.М. Курдюмова НАН України, що надало змогу забезпечити оперативний контроль технологічного процесу виробництва металевих гранул (Акт впровадження, 2024 р.).

Документи, що підтверджують впровадження, наведено у Додатку Б.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати дослідження, які виносяться на захист, одержані автором самостійно. Безпосередньо автором здійснено:

– аналітичний огляд існуючих інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів для визначення шляхів покращення характеристик компонентів цих систем відповідно до вимог сучасних стандартів;

– удосконалено первинні вимірювальні перетворювачі, за рахунок забезпечення їх інваріантності до впливу робочого середовища конструктивними методами та програмно-алгоритмічними засобами;

– визначення впливу робочого середовища на функцій перетворення ємнісних сенсорів вимірювання кінематичних характеристик обертових вузлів потужних гідрогенераторів;

– розробка програмно-алгоритмічного апарату забезпечення функціонування засобів отримання, обробки та відображення контрольно-діагностичної інформації в системах контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів;

– проведено лабораторні дослідження розроблених апаратних компонентів та програмних засобів для систем контролю обертових вузлів генеруючого обладнання;

– проведено натурні випробування апаратних компонентів та програмних засобів для систем контролю обертових вузлів генеруючого обладнання.

Наукові роботи опубліковані у співавторстві з Зайцев Є.О., Березниченко В.О., Антоненко А.В., Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Куліда М.А., Левицький А.С., Рассовський В. Л., Яковенко Р.А., Грицюк В.О., Соколов В.В., Блінов І.В., Зварич В.М., Мислович М.В.. Співавторами наукових праць є наукові керівники та науковці, спільно з якими проведені дослідження. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

Співавторами наукових праць дисертанта захищені такі дисертації: Зайцев Є.О. «Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів», Київ, 2020. 424 с.; Березниченко В.О. «Ємнісні вимірювачі радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів», Київ, 2023. 167 с.; Рассовський В.Л. «Засоби контролю повітряного проміжку між ротором та статором в капсульних гідрогенераторах на базі ємнісних вимірювачів», Київ, 2025. 161 с.

Постановка мети та завдань, обговорення результатів проведені разом з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня: Міжнародна конференція "Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проєктуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми "Велике будівництво" (Київ, 24–25 листопада 2022 р.); VIII Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'22" (Київ, 15–17 листопада 2022 р.); 4th International Conference "Sustainable Futures:

Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)". (Kryvyi Rih, 22–26 May 2023); 2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2023) International Conference (Kharkiv, 7–10 Oct. 2023 p.); X Міжнародна науково-технічна Internet-конференція "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами" (Київ, 24 листопада 2023 p.); 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (Kremenchuk, 27–30 Sept. 2023 p.); Міжнародна науково-практична конференція "Відкрита наука України: Візійний дискурс в умовах воєнного стану" (Ужгород, 26–28 квітня 2023 p.); Всеукраїнська науково-практична конференція "Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика" (Полтава, 10 листопада 2023 p.); Міжнародна науково-технічна Internet-конференція "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами" (Київ, 27 листопада 2024 p.); 2024 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2024) International Conference (Kharkiv, 7–11 Oct. 2024); 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (Sibenik, Croatia, 17–19 Sept. 2025).

Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідались та обговорювались на: наукових семінарах відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання, а також на літній школі Інституту електродинаміки НАН України.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 192 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 5 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 156 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 3 таблицями та 36 рисунком. Список використаних джерел містить 121 найменування, з них 26 кирилицею та 95 латиницею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ПОТУЖНИХ ГІДРОАГРЕГАТІВ

В Україні експлуатується значна кількість потужних гідрогенераторів, переважно зосереджених на Дніпровському та Дністровському гідроенергетичних каскадах, причому кожен із них є унікальним технічним об'єктом, оскільки проєктується та виготовляється з урахуванням індивідуальних конструктивних і експлуатаційних вимог конкретної гідротехнічної споруди каскаду. Така специфіка зумовлює необхідність створення та впровадження спеціалізованих систем діагностування, адаптованих до особливостей конкретного агрегату.

Забезпечення надійності та безаварійності роботи потужних гідрогенераторів, потребує застосування спеціалізованих систем діагностування, адаптованих до конкретного агрегату, що у свою чергу дозволить проведення ефективного та якісного контролю їхнього фактичного технічного стану під час експлуатації та забезпечення переходу від планового обслуговування до безперервного моніторингу технічного стану. Адже, контроль стану потужних гідрогенераторів є основою надійного та безпечного функціонування як електростанції, так і енергосистеми в цілому.

Контроль параметрів обертового обладнання в реальному часі дозволяє проводити своєчасне виявлення відхилень контрольних-діагностичних показників від їх нормованих значень, пов'язано зі зміною фізичних процесів у генераторі та свідчить про розвиток дефектів, здатних спричинити критичні пошкодження обладнання або призвести до аварійних ситуацій

Тому даний розділ присвячено аналізу існуючих методів та засобів контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів та визначенню шляхів покращення характеристик цих засобів до вимог сучасних стандартів.

1.1 Контроль технічного стану потужних гідроагрегатів

Найбільшого поширення серед потужного генеруючого обладнання набули явнополюсні синхронні генератори. Незважаючи на високий рівень надійності цих машин, ймовірність появи та розвитку в них дефектів досить значна та залежить від цілого ряду фізико-хімічних, термічних і механічних процесів, які мають місце в різних режимах експлуатації машини.

За результатами експлуатаційних досліджень встановлено, що приблизно 50 % від загальної кількості відмов та поломок потужних генераторів пов'язані з механічними дефектами роторно-статорного вузла, які виникають унаслідок перекосів, неспіввісності, розбалансування або розцентрування валу гідроагрегату відносно суміжних елементів конструкції [1, 2]. Такі дефекти призводять до нерівномірного розподілу електромагнітного поля в повітряному проміжку, підвищених вібраційних навантажень, динамічних деформацій підшипникових опор та поступового зносу механічних частин, що у свою чергу призводить до підвищених навантажень на опори та зношування підшипників, в результаті чого відбувається підвищення допустимого рівня биття валу гідроагрегату [3] і як наслідок підвищення вібрації та шуму гідроагрегату й зниження його працездатності та надійності [4].

Контроль вібрації у більшості випадків на гідрогенераторах забезпечується лише системами вібраційного контролю на основі штатних засобів контролю, зазвичай лише акселерометрів. Такий підхід спрямований першочергово на зниження ймовірності відмов та запобігання пошкодженням обертового обладнання, а також на забезпечення своєчасного виявлення та локалізації несправностей. Стан елементів і вузлів гідрогенератора описується сукупністю параметрів, що відображають зміну відповідних фізичних величин у процесі експлуатації. Для ідентифікації поточного технічного стану та оцінювання його відповідності нормованим умовам здійснюється контроль лише визначеного набору найбільш інформативних параметрів, які у системах контролю та діагностування розглядаються як контрольно-діагностичні параметри. Джерелами цих параметрів є параметри інформаційних сигналів отриманих з

первинних вимірювальних перетворювачів, у випадку використання акселерометрів такими параметрами є амплітуди частот вібраційних сигналів, у випадку використання ємнісних сенсорів – амплітуди переміщень.

Використання тільки сигналів вібросенсорів під час оцінки механічних параметрів не дає 100% ефективності та можливості виявлення місця виникнення дефекту. Так, наприклад, якщо найбільша складова вібрації припадає на частоту обертання валу (x_1), то проблема полягає в дисбалансі ротора. Неспіввісність викликає вібрацію на подвоєній частоті обертання валу (x_2). Однак у багатьох випадках вібрація, 1-кратна до частоти обертання, виникає не через дисбаланс ротора. А інші параметри будуть вказувати на зсув валу задовго до того, як виникне подвійна частота вібрації. В [5] описані випадки коли зсув чи биття валу не викликало зміну частотного спектру, такі випадки особливо є характерними для тихохідних гідроагрегатів. До таких випадків відноситься наявність овальності циліндричних ділянок вала, яка може виникати з різних причин у процесі виготовлення та експлуатації ротора.

Тому для підвищення точності визначення причини виникнення або розвитку дефекту гідрогенератора пов'язаного з його обертовими елементами необхідно одночасно та синхронно здійснювати контроль параметрів повітряного проміжку, радіального та торцевого биття поверхні валу з урахуванням сигналів від вібраційних сенсорів і сенсорів кутового положення.

Застосування автоматизованих систем контролю та моніторингу фактичного технічного стану гідроагрегатів забезпечує можливість не лише виявлення відхилень у режимі реального часу, але й прогнозування розвитку потенційних дефектів на основі аналітичних моделей або методів машинного навчання. Такий підхід дозволяє проводити оцінку поточного технічного стану об'єкта контролю за параметрами інформаційних сигналів, отриманих із первинних вимірювальних перетворювачів, зокрема сенсорів повітряного проміжку та сенсорів торцевого биття валу.

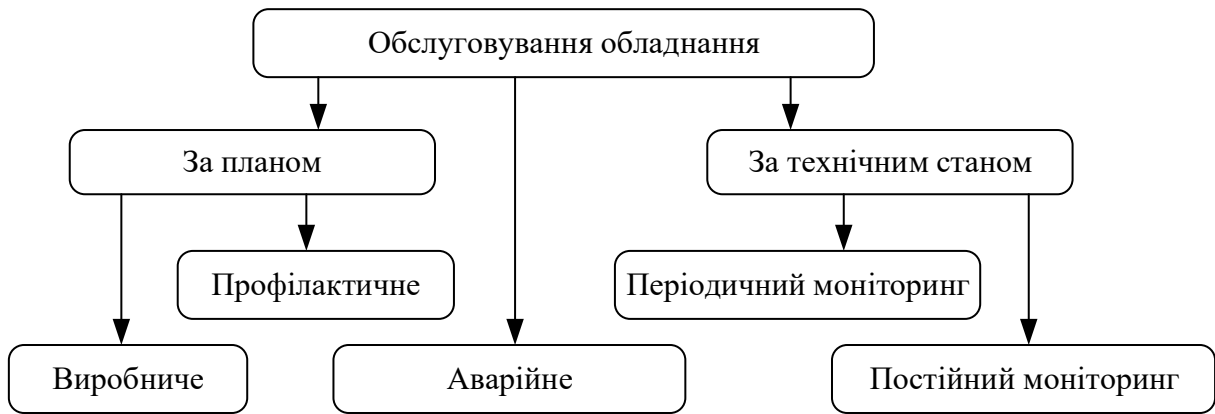
Аналіз вихідних сигналів цих сенсорів відображає зміну фізичних процесів у вузлах генератора та безпосередньо характеризує його технічний стан. Зокрема, сигнал биття валу формується під впливом механічних дефектів – таких

як нерівномірність поверхні, ексцентриситет, розбалансування або розцентрування ротора відносно статора. Водночас, сигнал сенсора повітряного проміжку формується в результаті зміни відстані між активними поверхнями ротора і статора в процесі обертання, що в основному зумовлено магнітними силами, термодформаціями або механічними зсувами конструкційних елементів, пружними коливаннями ротора або осьовими зміщеннями вала.

На рис. 1.1 наведено узагальнену схему основних типів обслуговування обладнання. Відповідно до цієї схеми, збір даних про технічний стан обладнання може здійснюватися у безперервному(постійний моніторинг) або режимах (епізодичний моніторинг) режимах, вибір яких класично визначався критичністю, умовами експлуатації та вимогами до надійності функціонування об'єкта контролю.

Періодичний режим отримання інформації реалізується шляхом виконання комплексу вимірювань, випробувань і діагностичних досліджень за спеціально розробленими програмами та методиками і спрямовані на оцінювання відповідності фактичного технічного стану обладнання нормативним та експлуатаційним вимогам через встановлені інтервали часу або після проведення ремонтних робіт перед введенням обладнання в експлуатацію. Такі роботи виконуються відповідно до регламентованих програм контролю та дозволяють оцінювати технічний стан обладнання на окремих етапах його експлуатації.

Згідно з вимогами міжнародного стандарту ISO 19283:2020 “Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units”, оцінювання технічного стану гідроагрегатів має здійснюватися на основі систематичного і всебічного моніторингу стану обладнання, що включає як інтервальні планові контрольні вимірювання так і безперервний (онлайн) контроль технічного стану гідроагрегатів із застосуванням систем безперервного моніторингу фактичного технічного стану[6].

**Переваги:**

- фіксований графік
- детальне обстеження за необхідності

Недоліки:

- тривалі терміни роботи без контролю
- необхідність зупинки обладнання

Переваги:

- можливість проводити контроль без зупинки обладнання
- короткі інтервали контролю або відсутність таких
- можливість виявити розвиток дефекту на ранній стадії

Рис. 1.1 Види програм технічного обслуговування енергетичного обладнання

Безперервний режим контролю передбачає постійний збір і обробку вимірювальних даних у реальному масштабі часу, що забезпечує оперативне відстеження змін контрольних-діагностичних параметрів, раннє виявлення ознак розвитку дефектів та підвищення рівня надійності й безпеки експлуатації обладнання. Як зазначено в ISO 19283:2020 безперервний режим контролю (online monitoring) має забезпечувати постійний збір і обробку вимірювальних даних у реальному масштабі часу, що дозволяє оперативно відстежувати зміни контрольних-діагностичних параметрів і виявляти тенденції до погіршення стану обладнання. Такий підхід істотно підвищує якість діагностики, забезпечує раннє виявлення відхилень від нормальних режимів і сприяє підвищенню надійності та безпеки експлуатації гідроагрегатів[6].

Стандарт також рекомендує комплексний набір методів та дескрипторів стану, що включають (залежно від конструктивних елементів агрегату):

- моніторинг магнітного потоку в повітряному проміжку та його рівномірність;
- симетрію повітряного проміжку та його рівномірність;

- аналіз часткових розрядів;
- вимірювання вібрації та температури осердя і корпусу;
- аналіз стану валово-підшипникового вузла;
- параметри напірного трубопроводу, гідравлічні коливання, кавітаційні явища, синхронізація робочого колеса (для певних типів турбін);
- контроль робочого колеса (runner) і турбінних компонентів.

В незалежності від режиму контролю найбільш відповідальним етапом контролю технічного стану є оцінювання фактичного стану обладнання на основі контрольних-діагностичних параметрів, яке передбачає не лише порівняння значень із номінальними, попередніми та гранично допустимими рівнями, але і застосування різних методів моніторингу для своєчасного виявлення ознак розвитку дефектів у ключових вузлах агрегату [6]. Крім, того згідно ISO 19283:2020 отримані дані щодо контрольних-діагностичних параметрів використовуються для побудови математичних моделей стану, оцінювання трендів, а також прогнозування потенційних відмов для мінімізації простоїв і витрат на обслуговування[7], що у свою чергу дозволяє визначити стратегічну основу для визначення можливості експлуатації потужних гідрогенераторів.

1.2 Типи дефектів обертових вузлів потужних генераторів

Обертові вузли генеруючого обладнання належать до найбільш навантажених і відповідальних елементів енергетичних машин, оскільки саме вони забезпечують передачу механічної енергії від турбіни до електричного генератора та визначають динамічні характеристики агрегату в цілому. У процесі тривалої експлуатації під дією змінних механічних, електромагнітних і гідравлічних навантажень у валово-підшипниковій системі, муфтових з'єднаннях і роторі поступово формуються дефекти різної природи, що можуть призводити до зростання вібрації, порушення співвісності, збільшення амплітуди биття та, в критичних випадках, до аварійних відмов обладнання.

Специфіка генеруючого обладнання великої потужності, зокрема гідро-генераторів, полягає у значних масо-габаритних параметрах ротора, великій довжині валової лінії та жорстких вимогах до точності взаємного розташування обертових і нерухомих елементів. За таких умов навіть незначні геометричні відхилення або зміни характеристик жорсткості окремих обертових вузлів можуть викликати розвиток складних просторових форм деформації валу, появу перекосів і нерівномірності розподілу навантажень.

Тому з метою забезпечення надійного діагностування та обґрунтованого вибору методів аналізу дефектів в потужних гідрогенераторах доцільно їх класифікувати за кількома ключовими аспектами, які безпосередньо враховуються під час проектування та експлуатації систем.

По-перше, дефекти розрізняють за механізмом деградації або руйнування, зокрема втомні пошкодження елементів ротора і фундаменту, зношування підшипників ковзання, повзучість матеріалів при тривалих статичних навантаженнях, корозійні процеси в зоні фундаменту та температурно зумовлені деформації активних частин. Для гідрогенераторів ці механізми часто поєднуються та мають тривалий латентний період розвитку [8, 9].

По-друге, дефекти класифікують за моментом їх прояву та виявлення: у процесі нормальної роботи агрегату (за даними систем безперервного моніторингу), під час планових оглядів і регламентного технічного обслуговування або лише при розбиранні окремих вузлів під час капітальних ремонтів. Для потужних гідрогенераторів пріоритетним є виявлення дефектів саме в робочих режимах, без виведення агрегату з експлуатації [10, 11].

По-третє, дефекти поділяють за часовим характером прояву, виділяючи дефекти, які поступово розвиваються, раптові відмови, збої та випадкові порушення працездатності. У практиці експлуатації гідрогенераторів домінують поступові дефекти, які супроводжуються повільною еволюцією синхронних і субгармонійних складових вібрації [12, 13].

По-четверте, важливою є класифікація за причинами виникнення дефектів, серед яких розрізняють конструктивні недоліки, технологічні та виробничі

відхилення, помилки монтажу, експлуатаційні чинники, а також дефекти матеріалів. Для гідрогенераторів встановлення першопричини дефекту має особливе значення, оскільки ремонтні заходи є складними й ресурсомісткими [8, 9].

По-п'яте, дефекти систематизують за рівнем небезпеки для агрегату, оцінюючи їхній вплив на надійність, безпечність і безперервність роботи гідроагрегату. Така оцінка лежить в основі прийняття рішень щодо обмеження навантаження, зміни режимів роботи або виведення гідрогенератора в ремонт [10, 13].

До основних причин, які призводять до появи дефектів обертових вузлів генеруючого обладнання, відносять:

1) Механічний дисбаланс. Найбільш поширеним джерелом підвищеної вібрації є механічний дисбаланс роторів [5]. Дисбаланс роторів може виникати на всіх етапах життєвого циклу машини – під час виготовлення, ремонту та експлуатації [10, 9, 14]. Основними причинами його виникнення в більшості випадків є неоднорідність фізико-механічних властивостей матеріалів, а також технологічні відхилення від осьової та масової симетрії ротора [10, 15].

У процесі виготовлення роторів генераторів та інших електричних машин мають місце геометричні відхилення пазів за глибиною та шириною, а також нерівномірність розподілу маси активних і конструктивних елементів [9]. Елементи ротора (полюси, обмотки, тощо), робочі лопатки турбін, лопаті робочих коліс, а також інші насадні деталі роторів машин і механізмів, як правило, мають відмінності за масою, формою та щільністю матеріалу [8, 15]. Навіть за умови виконання балансувальних операцій на етапі виготовлення або складання повна компенсація впливу зазначених відмінностей часто є неможливою, що зумовлює наявність залишкового дисбалансу [10, 14].

У період експлуатації дисбаланс роторів електричних машин додатково формується внаслідок ущільнення неметалічних елементів роторних обмоток, особливо в початковий період роботи агрегату [9]. Вплив також має релаксація внутрішніх технологічних напружень, накопичених у процесі виготовлення, що може спричинити повільний прогин ротора та зміну розподілу маси [15]. Окрему

групу факторів становлять температурні впливи, які призводять до нерівномірного теплового розширення елементів конструкції і, як наслідок, до виникнення або зростання динамічного дисбалансу під час роботи агрегату в змінних теплових режимах [8, 10].

2) Вигин вала. Вигин валу гідрогенератора являє собою стійке просторове відхилення геометричної осі валу від його ідеально прямолінійного положення вздовж осі обертання. Для гідрогенераторів, що характеризуються значною довжиною та масою ротора, наявністю декількох опорних і напрямних підшипників, а також дією змінних електромагнітних і гідродинамічних сил, вигин валу є одним із найбільш небезпечних геометричних дефектів, що безпосередньо впливає на динамічний стан агрегату. Такий дефект може бути виявлений за результатами тривалого або періодичного контролю просторового положення валу шляхом вимірювання радіального та торцевого биття в характерних поперечних перерізах, зокрема в зонах розташування підшипників, муфтових з'єднань і активної частини ротора, із застосуванням спеціалізованих сенсорів контролю переміщень [9, 10, 14].

На відміну від теплового вигину, який має оборотний характер і змінюється залежно від температурного поля та навантажувального режиму, залишковий вигин валу гідрогенератора є квазіпостійним дефектом. Його величина та форма практично не залежать від поточного режиму роботи машини й зумовлені технологічними похибками виготовлення, монтажу, нерівномірними залишковими напруженнями, а також тривалою експлуатацією в умовах змінних механічних і електромагнітних навантажень [8].

Наявність залишкового вигину валу гідрогенератора спричиняє низку характерних динамічних проявів:

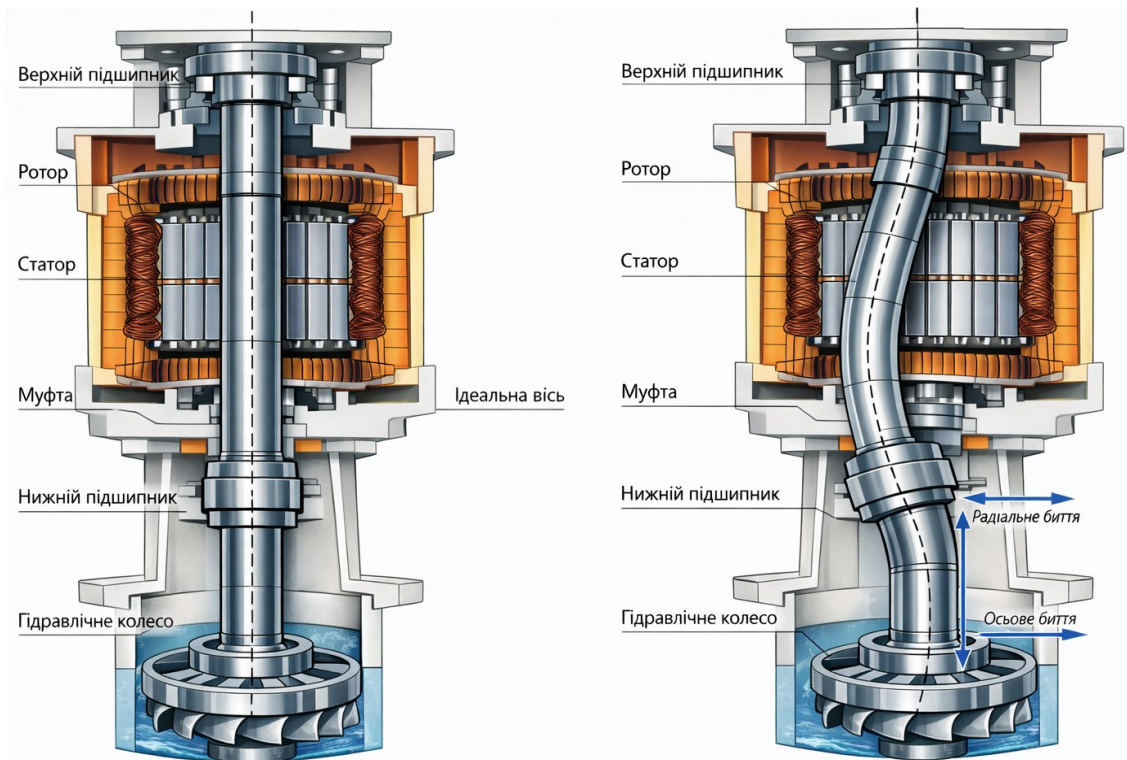
- формування дисбалансу, обумовленого зміщенням центра мас ротора відносно осі обертання, що призводить до появи додаткових відцентрових сил і зростання рівня синхронної вібрації, зокрема на напрямних підшипниках [10, 15];
- порушення взаємного просторового орієнтування шийок валу, яке проявляється у вигляді їх нахилу відносно осі обертання та зумовлює

кінематичне збудження підшипникових опор, зростання змінних навантажень і прискорений знос елементів системи «ротор–опори» [9, 16];

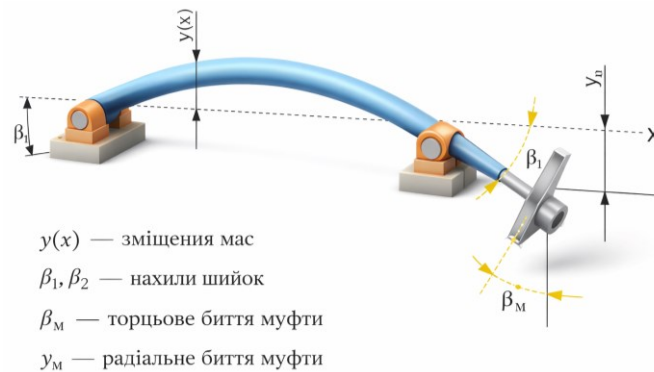
– виникнення радіальних і осьових зміщень у муфтових з'єднаннях між ротором гідрогенератора та суміжними елементами агрегату, що призводить до появи періодичних збурювальних сил із частотою обертання не лише на дефектному валу, але й на кінематично пов'язаних із ним елементах гідроагрегату [8, 17]. Схематичне зображення вигину валу ротора гідрогенератора наведено на рис. 1.2.

3) Відхилення геометричної форми шийок валів роторів у підшипникових вузлах. Відхилення поверхні шийок підшипників ковзання не чинять прямого збуджувального впливу на вібраційний стан роторної машини [8, 10]. Їхній вплив має опосередкований характер і проявляється через інтенсифікацію зношування антифрикційного шару (бабіту) вкладишів підшипників. Унаслідок цього з часом відбувається деградація геометрії розточування вкладиша, що вже безпосередньо впливає на умови формування гідродинамічного мастильного шару та рівень вібрації агрегату [15, 17].

Конусність шийок ротора за відсутності інших дефектів також не є самостійним джерелом вібраційного збудження. Водночас вона передбачає формування відповідної конічної геометрії розточування вкладиша підшипника, що може впливати на розподіл тиску в мастильному клині та чутливість системи до зношування [8, 18]. З позицій кінематики обертального руху очевидно, що гармонійні складові вібрації, обумовлені макрогеометричними нерівностями поверхні шийки, мають кратність, яка відповідає числу граней профілю. Сучасні технології виготовлення роторів забезпечують достатньо малу величину гранності, яка, як правило, не призводить до помітного зростання вібрації [10, 16].



а)



б)

Рис. 1.2 Вигин валу: а) схематичне зображення ідеальної лінії валу та вигину валу, б) схема розрахунку вигону валу

Еліпсність поверхні шийки призводить до збудження вібраційних коливань із подвійною частотою обертання ротора, що безпосередньо впливає з кінематичних закономірностей періодичної зміни зазору в підшипнику ковзання протягом одного оберту [8, 16]. За даними експериментальних і експлуатаційних досліджень, помітний вплив еліпсності на рівень вібрації, як правило, проявляється у разі перевищення її значення приблизно 20 мкм, хоча граничні

допустимі величини можуть залежати від діаметра шийки, режиму навантаження та типу підшипникового вузла [9, 17, 19].

4) Дефекти муфт. За наявності дефектів муфтових з'єднань в роторних агрегатах формуються два взаємопов'язані механізми збурення. З одного боку, виникає механічний дисбаланс, обумовлений зміщенням осей центрів мас з'єднаних роторів. З іншого боку, геометричні осі поверхонь шийок валів роторів виявляються зміщеними відносно спільної осі обертання агрегату [8, 10, 17]. Останній чинник зумовлює круговий (орбітальний) рух шийок усередині вкладишів підшипників, тобто формування так званого кінематичного збудження, яке проявляється незалежно від наявності та величини встановлених балансувальних вантажів. Особливо інтенсивно цей ефект проявляється у випадку наявності колінчастості валопроводу [9].

Типові приклади дефектів сполучення муфт ілюстровано на рис. 1.3.



Рис. 1.3 Дефекти сполучення жорстких (напівжорстких) муфт

5) Зміщення осей муфт. Взаємне просторове положення осей суміжних валів у разі розібраних муфт є кількісною характеристикою їхнього зміщення (порушення центрування). Під зміщенням розуміють відхилення осей підшипникових опор від такого положення, за якого геометричні осі роторів, що на них спираються, є співвісними [8, 10, 17]. Порушення центрування є однією з поширених причин виникнення додаткових збурювальних сил у роторних агрегатах і негативно впливає на вібраційний стан, ресурс підшипників та муфтових з'єднань [9]. Усунення зміщення виконують, як правило, шляхом регулювання положення підшипникових опор, зокрема переміщенням або підкладанням регулювальних прокладок під опорні вкладиші [15, 17]. Залежно від характеру відносного положення осей роторів розрізняють два основні види зміщення в муфтових з'єднаннях: радіальне та торцеве, причому їх одночасна

наявність є найбільш поширеним і загальним випадком [8, 15]. Радіальне зміщення визначається як лінійна відстань між осями сусідніх роторів у площині муфти. Торцеве зміщення характеризується кутом між цими осями та відображає їхню взаємну непаралельність (рис. 1.4).

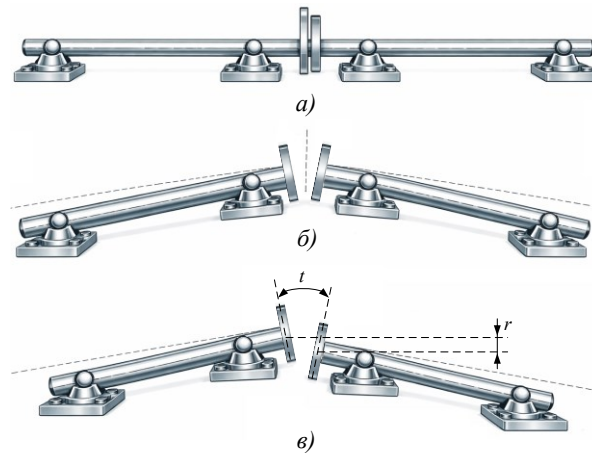


Рис. 1.4 Різні типи зміщення осей муфт: а) радіальне зміщення; б) торцеве зміщення; в) загальний випадок (r - величина радіального зміщення; t - величина торцевого зміщення)

Обидва види зміщення призводять до появи періодичних сил і моментів, що зумовлюють зростання синхронної вібрації, нерівномірне навантаження підшипників і прискорене зношування елементів муфти, особливо за тривалої експлуатації агрегату без повторного центрування [9, 14].

б) Зниження жорсткості опорної системи. Зниження жорсткості опор у потужних гідрогенераторах у процесі тривалої експлуатації є одним із критичних факторів, що визначає динамічний стан системи «ротор – підшипникові вузли – фундамент». Для вертикальних гідрогенераторів великої одиничної потужності ця проблема має особливу актуальність через значну масу ротора, дію змінних електромагнітних сил і складні тепломеханічні умови роботи [8, 10, 20]. Ослаблення жорсткості опор гідрогенератора може бути зумовлене низкою характерних причин. Однією з найбільш поширених є частковий відрив фундаментної плити від бетонного масиву фундаменту, що призводить до втрати проектної жорсткості опорної системи та появи додаткових низькочастотних форм коливань. Такий дефект особливо небезпечний для агрегатів із масивними

верхніми та нижніми напрямними підшипниками [11, 20]. У результаті змінюється ефективна жорсткість опори та з'являються нелінійні складові у вібраційному сигналі [8, 16].

Важливу роль відіграє місцевий відрив опорної поверхні корпусу підшипника, що може бути спричинений дією розвантажувального або перекидаючого моменту, який формується внаслідок асиметрії електромагнітного поля статора або нерівномірного повітряного проміжку. У цьому випадку контакт між корпусом підшипника і фундаментною плитою зберігається лише на частині площі, що істотно знижує еквівалентну жорсткість опори [10, 15]. В умовах тривалих вібраційних навантажень і циклічних теплових деформацій втрата попереднього натягу в різьбових з'єднаннях є типовим механізмом деградації жорсткості опор у гідрогенераторах [9, 11]. Суттєвий вплив на жорсткість опор має утворення тріщин у бетонному фундаменті, зокрема в зоні анкерування або в місцях концентрації напружень. Такі дефекти змінюють умови передавання динамічних навантажень від агрегату до фундаменту та можуть призводити до прогресуючого зростання вібрації [20, 21]. Окрему групу причин становлять деформації фундаменту під дією осьових зусиль, що виникають унаслідок теплових переміщень статора і ротора, а також змін гідравлічного навантаження турбіни. Такі деформації можуть призводити до повільної деградації жорсткості опор і накопичення перекосів у підшипникових вузлах [10, 16].

Характерні випадки зниження жорсткості опор у потужних гідрогенераторах наведено на рис. 1.5.

7) Тепловий дисбаланс ротора. Тепловий дисбаланс у потужних гідрогенераторах є одним із характерних дефектів роторної частини, що виникає внаслідок формування несиметричного температурного поля в роторі та призводить до нерівномірного теплового розширення його елементів. Для гідрогенераторів великої одиничної потужності цей дефект є особливо небезпечним через значні маси ротора, малу робочу частоту обертання та підвищену чутливість агрегату до змін геометрії і розподілу мас [8, 10, 11, 9, 17, 20].

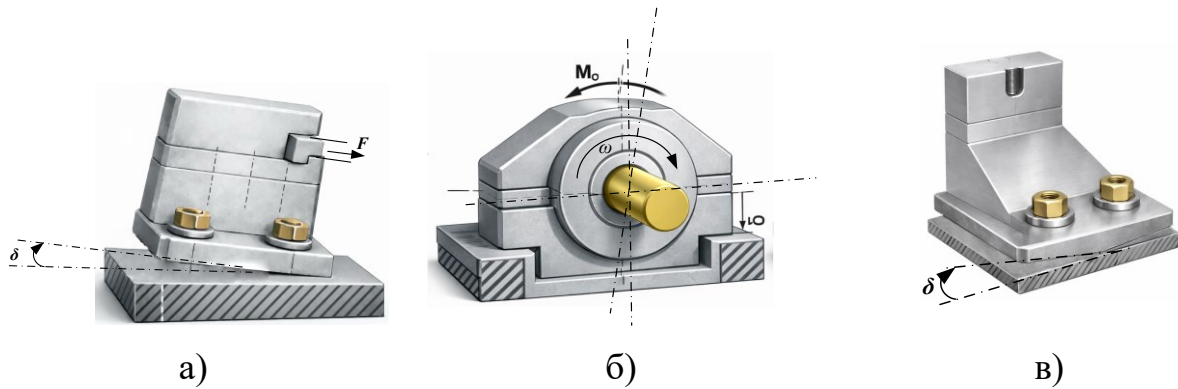


Рис. 1.5 Зниження жорсткості опорної системи:

- а) через "перевертання" корпусу; б) внаслідок відриву опорної поверхні з одного з боків; в) через деформацію опорної поверхні.

Для гідрогенераторів характерною особливістю є те, що тепловий дисбаланс може розвиватися повільно і накопичувально, проявляючись лише після тривалих пусків, зупинок або роботи в несиметричних навантажувальних режимах. У таких випадках дефект супроводжується зміною амплітуди синхронної ($1\times$) складової вібрації та її залежністю від температурних перехідних процесів у роторі [11, 17].

Профілактика теплового дисбалансу в роторах потужних гідрогенераторів передбачає комплекс конструктивних і експлуатаційних заходів. До них належать високоточне виготовлення та регулярний контроль стану охолоджувальних каналів ротора і їх продувності, забезпечення симетрії системи вентиляції, обов'язкове заглушення різбових отворів, розташованих навпроти балансувальних пробок, дюралюмінієвими заглушками (особливо у випадках використання більше ніж двох повних пазів для балансування), а також контроль і дотримання нормативних теплових зазорів у зоні пазових клинів на всіх етапах виготовлення, ремонту та експлуатації гідрогенератора [9, 16, 20, 21].

8) Підвищений рівень вібрації основних вузлів. Одним із основних джерел вібрацій у потужних генераторах є магнітне тяжіння, зумовлене взаємодією магнітних полів ротора і статора. Нерівномірність повітряного проміжку або асиметрія електромагнітного поля призводять до магнітних вібрацій, які викликають зміну механічних характеристик елементів статора, зокрема порушення умов його пружної підвіски та деградацію ізоляційних

покриттів активного заліза [9, 10]. У зв'язку з цим для підвищення достовірності діагностування потужні гідрогенератори доцільно оснащувати комплексними системами моніторингу, що поєднують вібраційний контроль із додатковими інформаційно-вимірювальними каналами. Найбільш інформативними серед них є вимірювання повітряного проміжку, радіального биття вала та інших параметрів, безпосередньо пов'язаних із механічним станом його ключових вузлів [10, 12, 21].

1.3 Методи контролю та визначення контрольно-діагностичних параметрів обертових вузлів потужних гідрогенераторів

Контроль технічного стану обертових вузлів потужних гідрогенераторів є складовою системи забезпечення їх експлуатаційної надійності та безпеки. Значні масо-інерційні характеристики роторів, наявність інтенсивних електромагнітних, механічних і гідродинамічних навантажень під час експлуатації обумовлюють необхідність застосування комплексу взаємодоповнювальних методів контролю [13, 22, 23] для забезпечення надійної та безаварійної експлуатації потужних гідрогенераторів.

З урахуванням функціонального призначення та умов застосування методи контролю поділяються на наступні основні групи:

- методи оцінювання технічного стану (неруйнівний контроль);
- методи моніторингу (вимірювальні та реєстраційні).

Такий підхід відповідає сучасній концепції стано-орієнтованої експлуатації потужних електричних машин [10, 24, 25].

Методи неруйнівного контролю спрямовані на виявлення дефектів матеріалу та конструктивних елементів обертових вузлів без порушення їх цілісності. Вони, як правило, застосовуються під час зупинок гідроагрегату та в визначені регламентом обслуговування періоди проведення планово-попереджувальних ремонтів. Найбільш поширеними на сьогодні є наступні:

- метод ультразвукового контролю, який дозволяє виявляти внутрішні дефекти валів, зварних з'єднань і масивних елементів ротора (втомні тріщини, несучільності, розшарування) [26];

- метод магнітопорошкового контролю, ефективний метод для виявлення поздовжніх та поперечних втомних тріщин, надривів, мікротріщин після перевантажень або термічних впливів [27];

- метод візуального та візуально-оптичного контролю, що використовується для оцінювання стану поверхонь, геометричних відхилень, зносу та корозійних пошкоджень [28].

Методи візуального та візуально-оптичного контролю є найбільш класичними методами контролю та на сьогодні та доповнюють інші інструментальні засоби контролю та діагностуванню потужних генераторів. До цих методів візуального контролю відносять:

- регламентні технічні огляди, що виконуються відповідно до нормативних документів і результатів попереднього моніторингу;

- органолептичні методи контролю, засновані на аналізі акустичних, теплових і вібраційних проявів роботи обладнання;

- аналіз експлуатаційних трендів, який дозволяє виявляти поступову деградацію вузлів і своєчасно коригувати режими роботи [10, 28].

Хоча наведені методи та заходи, що їх реалізують не забезпечують прямого кількісного визначення контрольно-діагностичних параметрів, вони відіграють важливу роль у прийнятті експлуатаційних рішень та запобіганні аварійним ситуаціям.

При цьому методи неруйнівного контролю забезпечують високу достовірність локальної оцінки технічного стану, однак не дають інформації про зміну контрольно-діагностичних параметрів під час роботи вузлів у реальних експлуатаційних режимах, тобто в динамічних режимах. Для вимірювання контрольно-діагностичних параметрів у динамічних режимах застосовуються методи безперервного або квазібезперервного моніторингу [23, 24, 29], у більшості випадків засоби вимірювання, які знайшли використання під час реалізації методів неруйнівного контролю використовуються і в методах моніторингу. До групи методів моніторингу відносять наступні:

- вимірювальні методи, що реалізуються з використанням безконтактних вимірювальних перетворювачів (ємнісних, індуктивних, вихрострумівих) для

визначення радіальних та осьових переміщень валу, радіального і торцевого биття, ексцентриситету ротора та величини повітряного проміжку «ротор–статор» [22, 30, 31] та тощо[32];

– реєстраційні методи, які передбачають накопичення часових реалізацій сигналів та їх подальший аналіз у часовій, частотній і часово-частотній областях з метою виділення інформативних діагностичних ознак [13, 33].

Контроль повітряного проміжку відображає вплив електромагнітних сил і теплових деформацій та є чутливим до наявності ексцентриситету ротора та зміщення опор [30, 34, 35]. Сенсори биття валу[36] за їх використання в різних перерізах дозволяють оцінити величину вигину, ексцентриситету та дисбалансу, та використовуючи відповідні програмні та технічно-організаційні заходи провести роботи із відновленням форми валу[37].

Особливого значення в останні роки набувають методи багатоточкового вимірювання, які дають змогу відокремлювати квазістатичні складові, зумовлені залишковими деформаціями, від динамічних складових, пов'язаних з обертанням і навантаженням, що підвищує достовірність проведення контролю та формуванню діагностичних висновків [22, 33].

Кожен із методів знаходить своє використання в системах контролю та діагностування технічного стану потужних гідрогенераторів. При цьому завдяки адаптації передових методів обробки даних та нових сенсорних технологій удосконалюються існуючі методи та створюються нові. В останні роки особливу увагу приділяють розвитку методу неперервного моніторингу та прогнозній діагностиці[37, 38]. Це обумовлено, тим що аналіз даних контролю стану з прогнозними моделями дозволяє оцінити залишковий ресурс вузлів й оптимізувати технічне обслуговування гідроагрегату, що у свою чергу дозволяє зменшити витрати на обслуговування та повністю перейти від планового обслуговування до обслуговування за фактичним технічним станом гідроагрегату.

1.4 Огляд систем контролю та діагностики вузлів потужних гідрогенераторів

Системи контролю та діагностики вузлів потужних гідрогенераторів призначені для безперервного або періодичного оцінювання фактичного технічного стану обладнання, своєчасного виявлення дефектів і формування інформаційної бази для прийняття експлуатаційних та ремонтних рішень. Функціонально такі системи забезпечують вимірювання, реєстрацію, обробку та інтерпретацію контрольних-діагностичних параметрів. У сучасній практиці експлуатації гідроелектростанцій знайшли застосування, як спеціалізовані системи, орієнтовані на контроль окремих параметрів, так і інтегровані платформи моніторингу, що поєднують декілька каналів діагностики, серед яких VM600 компанії Vibro-Meter, SKF Multilog компанії SKF, AGTrac™ виробництва Iris Power, Vimos компанії ABB та інші.

1.4.1 Система безперервного контролю стану гідроагрегату типу "SUPER"

Система типу «SUPER»(System for Unit Performance & Evaluation & Reliability) була новаторською системою моніторингу стану, розробленою McGill University впровадженою канадською енергокомпанією Hydro Quebec (Канада) на ГЕС Rapid Blanck (Канада) [39, 40]. Система належить до комплексних систем безперервного моніторингу технічного стану великих гідроагрегатів і призначена для контролю основних обертових вузлів у процесі експлуатації з метою раннього виявлення відхилень від нормального режиму роботи [5]. Перевагою вібраційної підсистеми системи «SUPER» є можливість спектрального аналізу вібраційних сигналів та оцінювання проміжку між сенсором і валом, що підвищує достовірність вимірювань [5, 24].

Основними обмеженнями є відсутність визначення фазових характеристик биття вала, неможливість аналізу спектра в реальному масштабі часу та відсутність автоматизованих алгоритмів ідентифікації дефектів, що зумовлює необхідність участі кваліфікованого персоналу [5, 41].

1.4.2 Система моніторингу PRUFTECHNIK VibGuard

Система безперервного контролю технічного стану гідроагрегату на базі апаратно-програмних засобів PRUFTECHNIK розробки компанії «PRUFTECHNIK Condition Monitoring GmbH», Германия є комплексною системою моніторингу, призначеною для оцінювання динамічного стану обертових вузлів гідрогенератора в режимі реального або квазіреального часу[42]. Система реалізує сучасний підхід до технічної діагностики, орієнтований на безперервний аналіз сигналів і автоматизоване виявлення дефектів. Структуру системи наведено на рис. 1.6.

До основних переваг системи контролю на базі PRUFTECHNIK належать:

- безперервний контроль параметрів у реальному масштабі часу, на відміну від періодичних систем;
- можливість спектрального та фазового аналізу вібрацій і переміщень вала;
- автоматизоване виявлення та ідентифікація дефектів, зокрема дефектів підшипників, дисбалансу, перекоосу ротора;
- інтеграція з SCADA/DCS/PLC, що дозволяє використовувати результати моніторингу в системах експлуатаційного керування;
- масштабованість і модульність, які забезпечують адаптацію до гідроагрегатів різної потужності;
- підтримка концепцій condition-based та predictive maintenance.

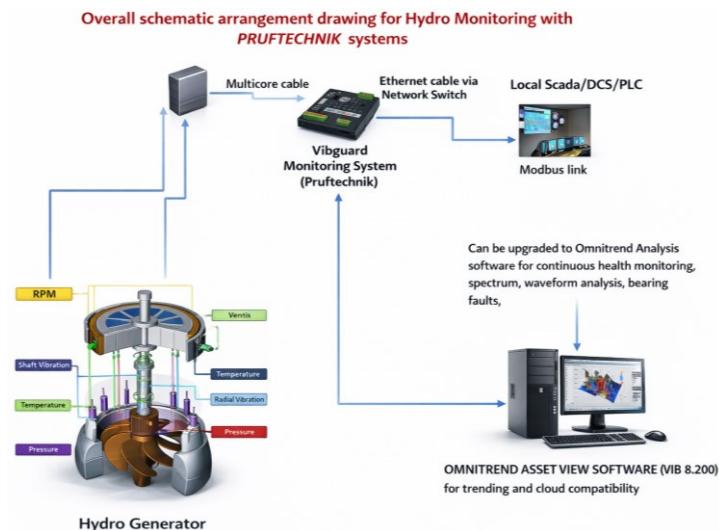


Рис. 1.6 Структура системи PRUFTECHNIK

Основними недоліками та обмеженнями системи є:

- залежність точності діагностики від коректності встановлення та калібрування сенсорів;
- обмежена адаптивність стандартних діагностичних алгоритмів до специфічних конструктивних особливостей окремих типів гідрогенераторів без додаткового налаштування.

1.4.3 Система безперервного контролю технічного стану машин Bently Nevada 3500 Series

Система Bently Nevada 3500 Series є модульною промисловою системою безперервного моніторингу та захисту обертових машин, яка широко застосовується для контролю технічного стану потужних гідроагрегатів, турбін, генераторів і компресорів [43]. Система призначена для безперервного вимірювання динамічних параметрів, формування аварійної сигналізації та захисних впливів, а також для діагностичного аналізу стану основних вузлів агрегату. Універсальний блок реєстрації інформації системи наведено на рис. 1.7.



Рис. 1.7 Блок реєстрації інформації системи Bently Nevada 3500

До основних переваг системи належать:

- висока надійність і промислова сертифікація, що дозволяє використовувати систему як засіб протиаварійного захисту;
- безперервний контроль у реальному масштабі часу з апаратною реалізацією сигналізації;

Основними недоліками та обмеженнями системи є:

- обмежені можливості поглибленої автоматизованої діагностики без застосування додаткового програмного забезпечення верхнього рівня;
- значна орієнтація на захисні функції, що зменшує гнучкість системи як інструмента науково-дослідного аналізу сигналів;
- складність адаптації стандартних алгоритмів до специфічних конструктивних особливостей окремих типів гідрогенераторів без індивідуального налаштування.

1.4.4 Система безперервного контролю технічного стану обертових машин Bently Nevada Orbit 60

Система Bently Nevada Orbit 60 [44] є сучасною цифровою платформою безперервного моніторингу та діагностики обертових машин, зокрема гідроагрегатів, турбін і генераторів. Вона розроблена як еволюційний розвиток класичних систем типу 3500 Series і орієнтована на високорозрядний збір даних, розширену аналітику та інтеграцію з цифровими системами керування електростанцій (рис.1.8.).



Рис. 1.8 Модуль системи Bently Nevada Orbit 60

До основних переваг системи належать:

- безперервний багатоканальний контроль у реальному масштабі часу з високою часовою та амплітудною роздільною здатністю;
- гнучка інтеграція з цифровими системами керування та платформами – прогнозного обслуговування;
- придатність як для експлуатаційного моніторингу, так і для науково-дослідного аналізу.

Поряд із суттєвими перевагами система Orbit 60 має низку обмежень:

- висока вартість апаратного та програмного забезпечення, характерна для систем преміум-класу;
- обмежена універсальність стандартних діагностичних моделей без додаткової адаптації до конкретних конструктивних особливостей гідроагрегатів.

1.4.5 Система безперервного контролю технічного стану Machinery Health Management на базі CSI 6500

Система Machinery Health Management компанії Emerson Electric на базі апаратної платформи CSI 6500 Machinery Health Monitor є сучасною промисловою системою безперервного моніторингу та діагностики обертового обладнання, зокрема турбін, генераторів і гідроагрегатів[45]. Система орієнтована на поєднання функцій оперативного контролю, діагностики та інтеграції з корпоративними системами керування активами.

До основних переваг системи належать:

- поєднання функцій захисного моніторингу та діагностики в єдиній апаратній платформі;
- модульність і масштабованість, які дозволяють адаптувати систему до агрегатів різної потужності.

Поряд із перевагами система CSI 6500 має низку обмежень:

- залежність повної функціональності від екосистеми програмного забезпечення Emerson, що може ускладнювати інтеграцію з альтернативними платформами;
- обмежена адаптивність стандартних діагностичних алгоритмів до специфічних конструктивних особливостей окремих типів гідрогенераторів без додаткового конфігурування.

1.4.6 Система безперервного контролю технічного стану гідроагрегату «ZOOM» компанії VibroSystM

Система «ZOOM» компанії VibroSystM є спеціалізованою системою безперервного моніторингу технічного стану гідрогенераторів і турбоагрегатів, орієнтованою насамперед на контроль кінематичних параметрів ротора, повітряного проміжку та підшипникових вузлів[36]. Система розроблена з урахуванням конструктивних особливостей потужних гідроагрегатів і широко застосовується на гідроелектростанціях у складі систем діагностики та прогнозного обслуговування. Структуру системи наведено на рис. 1.9.

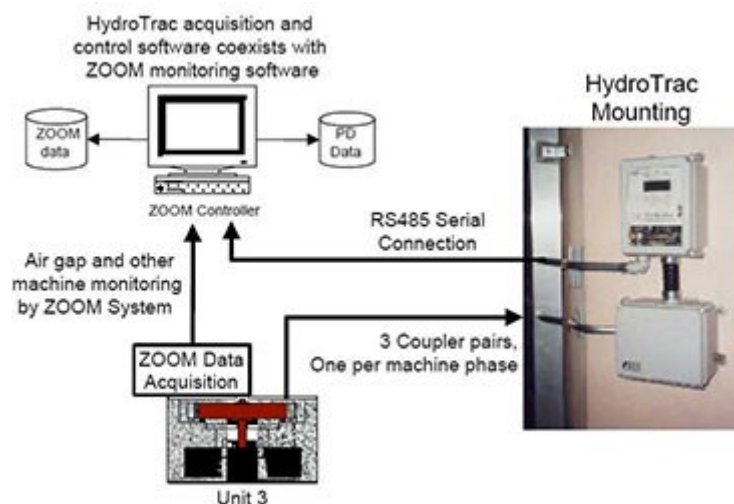


Рис. 1.9 Структура системи «ZOOM» компанії VibroSystM

До основних переваг системи «ZOOM» належать:

- орієнтація на контроль повітряного проміжку та переміщень ротора, що є критично важливим для гідрогенераторів великої потужності;

- розвинені засоби фазового та орбітального аналізу, які дозволяють виявляти дисбаланс, перекіс і ексцентриситет ротора;
- можливість інтеграції з системами прогнозного обслуговування (condition-based та predictive maintenance).

Разом із тим система «ZOOM» має низку обмежень:

- обмежена універсальність, оскільки система оптимізована насамперед для гідроагрегатів і менш придатна для іншого типу машин;
- висока вартість спеціалізованих сенсорів і програмного забезпечення.

1.4.7 Система безперервного контролю повітряного проміжку та механічного стану гідрогенератора «Iris Power AGTracII»

Система Iris Power AGTracII компанії Iris Power є спеціалізованою системою безперервного моніторингу, призначеною для контролю повітряного проміжку між ротором і статором гідрогенератора, а також для оцінювання механічного стану обертових і нерухомих елементів агрегату[46]. Система орієнтована на раннє виявлення ексцентриситету ротора, деформацій конструкції та зміщень опорних вузлів. Архітектура системи Iris Power AGTracII представлена на рис. 1.10.

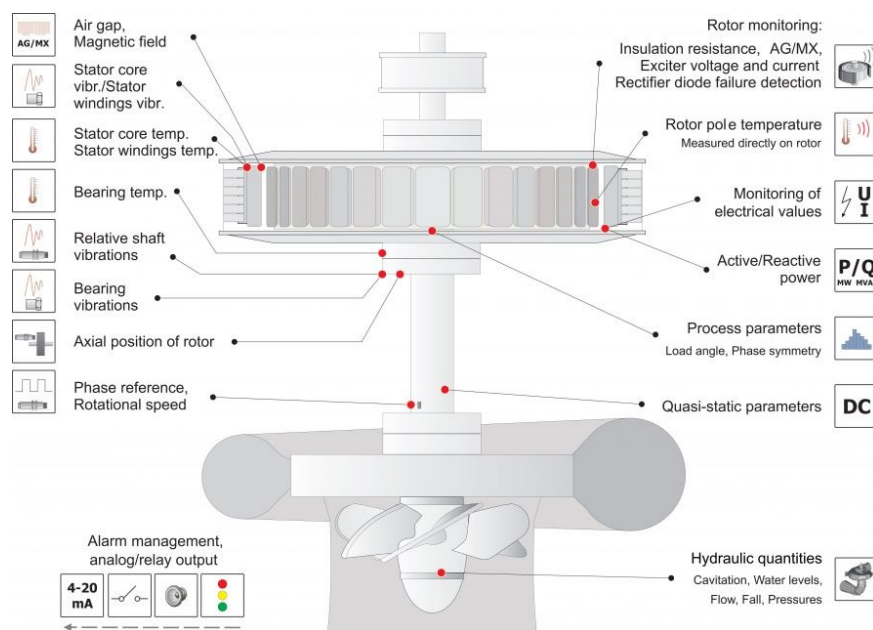


Рис.1.10 Точки контролю в системі Iris Power AGTracII

AGTracII належить до класу вузькоспеціалізованих систем і, як правило, застосовується у складі комплексних систем діагностики гідроагрегатів разом із вібраційними та кінематичними підсистемами.

До основних переваг системи належать:

- безпосередній і безперервний контроль повітряного проміжку, що є одним з найкритичніших параметрів для гідрогенераторів великої потужності;
- висока чутливість до ексцентриситету ротора та деформацій статора, які не завжди проявляються у вібраційних сигналах;
- можливість раннього виявлення механічних і електромагнітних проблем, зокрема перекоосу ротора та осідання опор;
- доповнення традиційних систем вібромоніторингу, підвищуючи загальну інформативність діагностики;
- простота інтерпретації трендів повітряного проміжку для експлуатаційного персоналу.

Основними недоліками та обмеженнями системи є:

- вузька спеціалізація, оскільки система контролює переважно повітряний проміжок і не замінює повноцінну систему вібраційної діагностики;
- обмежені можливості частотного та фазового аналізу, порівняно з універсальними системами моніторингу;
- залежність точності вимірювань від коректності монтажу та калібрування сенсорів;
- необхідність інтеграції з іншими системами для комплексної оцінки технічного стану гідроагрегату.

1.4.8 Узагальнююча оцінка систем контролю та моніторингу гідроагрегатів

В таблиці 1.1 представлені основні технічні характеристики розглянутих в розділах 1.4.1-1.4.7. систем

Таблиця 1.1

Основні характеристики систем контролю та моніторингу

Критерій	Iris Power AGTracII	VibroSyst M ZOOM	Bently Nevada 3500	Bently Nevada Orbit 60	VIMOS	SUPER	PRUFTEC HNIK
Тип системи	Спеціалізована	Спеціалізована	Універсальна захисна	Універсальна цифрова	Спеціалізована	Комплексна (попер. покоління)	Універсальна сучасна
Основне призначення	Контроль повітряного проміжку	Кінематика ротора, повітряний проміжок	Захист і базовий моніторинг	Поглиблена діагностика	Моніторинг підшипників і статора	Періодичний моніторинг	Повний condition & diagnostic monitoring
Контроль повітряного проміжку	Так (основна функція)	Так	Опосередковано	Так	Так (обмежено)	Ні	Так
Контроль биття/переміщення вала	Ні (непрямо)	Так	Так	Так	Так	Так	Так
Фазовий аналіз	Ні	Так	Так	Так	Ні	Ні	Так
Орбіти руху вала	Ні	Так	Так	Так	Ні	Ні	Так
Спектральний аналіз (FFT)	Обмежено	Так	Так	Так (реальний час)	Так	Так (1 раз/год)	Так
Автоматична діагностика дефектів	Ні	Частково	Обмежено	Так	Ні	Ні	Так
Кількість каналів	Обмежена	Середня	Висока	Дуже висока	До 32	Обмежена	Висока
Інтеграція з SCADA/DCS	Так	Так	Так	Так	Обмежена	Обмежена	Так
Орієнтація на гідрогенератори	Висока	Дуже висока	Середня	Середня	Висока	Висока	Середня
Рівень автоматизації	Низький	Середній	Середній	Високий	Низький	Низький	Високий
Ключові переваги	Прямий контроль повітряного проміжку	Спеціалізація під ГГ	Надійний захист	Максимальна аналітика	Безперервність	Простота	Гнучкість і повнота
Основні недоліки	Вузька спеціалізація	Вартість	Обмежена аналітика	Складність і вартість	Немає фаз/діагностики	Немає real-time і діагностики	Висока вартість

Порівняльний аналіз наведений в таблиці 1.1 показує, що спеціалізовані системи (Iris Power AGTracII, VibroSystM ZOOM, VIMOS) забезпечують високу інформативність у вузькому класі задач, насамперед пов'язаних із геометрією та кінематикою гідрогенераторів. Універсальні платформи нового покоління (Bently Nevada Orbit 60, PRUFTECHNIK) реалізують повний цикл безперервного моніторингу, фазово-спектрального аналізу та автоматизованої діагностики, але характеризуються значною складністю й вартістю. Системи попередніх поколінь (SUPER, VIMOS) поступаються за рівнем автоматизації та оперативності аналізу, що обґрунтовує необхідність подальших досліджень і розроблення адаптивних сенсорних та алгоритмічних рішень для засобів контролю обертових вузлів гідроагрегатів інваріантних до впливу внутрішнього середовища гідрогенератора на результат контролю.

1.5 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз методів контролю та систем контролю та моніторингу гідроагрегатів показав, що переважна частина відомих технічних рішень мають велику вартість та у більшості випадків потребують значних налаштувань та доопрацювання для використання на гідрогенераторах України. Це істотно знижує інформативність діагностичних даних та ускладнює застосування таких систем для задач раннього виявлення змін технічного стану потужних гідрогенераторів та виявлення дефектів. Також, з урахуванням підвищення міжнародних вимог стандартом ISO 19283:2020 “Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units” (Моніторинг та діагностика стану машин – гідроагрегати) до генеруючого обладнання ГЕС і ГАЕС обумовлює необхідність покращення характеристик систем контролю та діагностування, шляхом розширення кола доступних контрольно-діагностичних параметрів, що характеризують фактичний технічний стан гідроагрегату. Це обумовлює до розроблення нових підходів до формування та реалізації

компонентів систем контролю обертових вузлів гідроагрегатів інваріантних до впливу внутрішнього середовища гідрогенератора на результат контролю.

Виходячи з цього, у дисертаційній роботі сформульовано та розв'язується комплекс взаємопов'язаних науково-прикладних завдань, спрямованих на підвищення інформативності, точності та завадостійкості засобів отримання, передавання та відображення контрольних-діагностичних параметрів в системах контролю фактичного технічного стану гідрогенераторів, а саме:

- проведення аналітичного огляду існуючих інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів з метою визначення шляхів удосконалення характеристик їх сенсорних, алгоритмічних і програмних компонентів відповідно до вимог сучасних стандартів;

- розроблення конструкцій первинних вимірювальних перетворювачів, інваріантних до впливу параметрів внутрішнього середовища генератора, а також алгоритмів обробки їх інформативних сигналів;

- побудова математичних моделей вихідних сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів потужних гідрогенераторів, з урахуванням амплітудних і фазових параметрів биття вала та зазорів;

- розроблення програмно-алгоритмічного забезпечення для компонентів засобів отримання, обробки та відображення контрольних-діагностичної інформації в системах контролю обертових вузлів гідрогенераторів;

- створення макетних зразків апаратних і програмних компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів;

- проведення експериментальних досліджень розроблених технічних і програмних засобів з метою перевірки достовірності визначення амплітуд і фаз гармонік биття вала, а також оцінювання ефективності діагностування за результатами вимірювань в умовах дії факторів внутрішнього середовища гідрогенератора.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. За результатами аналізу визначено напрями розв'язання завдання підвищення інформативності, точності й завадостійкості систем контролю технічного стану гідрогенераторів у реальному часі.

2. Показано, що для забезпечення вирішення завдання та забезпечення своєчасного виявлення дисбалансів, резонансних явищ і початкових стадій розвитку дефектів обертових вузлів гідрогенераторів є важливим створення засобів отримання контрольних-діагностичних параметрів інваріантних до впливу внутрішнього середовища гідрогенератора.

3. Показано, що вимірювання та оцінювання технічного стану гідроагрегатів мають здійснюватися з урахуванням міжнародних вимог до надійності й безпеки обладнання ГЕС і ГАЕС, визначених, зокрема, стандартом ISO 19283:2020, який регламентує принципи, методи та параметри моніторингу і діагностики гідроагрегатів у процесі експлуатації.

4. Показано, що дефекти обертових вузлів гідрогенераторів мають багатофакторну природу, розвиваються поступово та проявляються через зміни кінематичних і вібраційних характеристик агрегату. Проведена класифікація дефектів за механізмами виникнення, характером прояву та рівнем небезпеки обґрунтовує необхідність застосування багатопараметричних систем технічної діагностики для раннього виявлення і прогнозування їх розвитку без виведення агрегатів з експлуатації.

5. Проведено огляд і аналіз систем контролю технічного стану гідроагрегатів, який показав, що наявні рішення не забезпечують повної реалізації розширених функцій контролю та діагностування, що зумовлює необхідність розроблення нових, більш інформативних, точних і завадостійких засобів вимірювання та оцінювання контрольних-діагностичних параметрів.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

У другому розділі роботи представлено удосконалену структуру системи контролю обертових вузлів генеруючого обладнання, що ґрунтується на застосуванні в її складі кінематичних SMART-сенсорів, здатних функціонувати в реальному масштабі часу в умовах агресивного робочого середовища та складних експлуатаційних режимів. Використання адаптивних інформаційно-вимірювальних кінематичних сенсорів забезпечує можливість безперервного оцінювання поточного технічного стану обертових вузлів і виявлення ознак потенційних аварійних процесів на ранніх стадіях їх розвитку.

Актуальність удосконалення систем контролю зумовлена зростанням вимог до надійності та безпеки експлуатації потужних гідрогенераторів, а також необхідністю підвищення достовірності діагностичної інформації в умовах дії механічних, електромагнітних, термічних і гігрометричних впливів. Традиційні підходи до вимірювання параметрів обертових вузлів не забезпечують достатньої інваріантності результатів вимірювань до впливу внутрішнього середовища генератора, що обмежує точність оцінювання технічного стану та ускладнює реалізацію інтелектуальних алгоритмів діагностики.

Тому даний розділ присвячений розробці удосконаленої структури системи контролю обертових вузлів, а також створенню вимірювальних перетворювачів, інваріантних до дії параметрів внутрішнього середовища, що забезпечують підвищення точності, надійності та інформативності контрольної-діагностичних вимірювань

2.1 Структура інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів генеруючого обладнання

На рис. 2.1 наведено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи обертових вузлів генеруючого обладнання[47-49], яка містить наступні функціональні групи сенсорів:

- кінематичні сенсори, які призначені для вимірювання параметрів повітряного проміжку та торцевого биття валу, визначення швидкості обертання, синхронізації роботи системи, а також компенсації впливу вібраційних складових на результати вимірювання;

- електромагнітні сенсори, які призначені для контролю симетричності розподілу магнітного поля в повітряному проміжку та компенсації похибок, зумовлених електромагнітними збуренням, під час попередньої обробки даних від кінематичних сенсорів;

- термогігрометричні сенсори, які призначені для контролю параметрів внутрішнього середовища (вимірювання температури та вологості в зоні генератора) та компенсації його впливу на результати вимірювання кінематичних сенсорів.

Система, відрізняється від існуючих, тим що для підвищення ефективності та достовірності збору даних в ній разом із стандартними засобами збору, обробки та відображення даних, додатково застосовано додатковий комплекс мультифізичних сенсорів для компенсації впливу робочого середовища на результат отримання контрольно-діагностичної інформації, щодо поточного технічного стану низькообертових вузлів генеруючого обладнання.

Сенсори контролю повітряного проміжку розташовуються на обох торцевих частинах ротора(верхньому та нижньому б'єфу), утворюючи просторово розподілену систему вимірювання[50]. Кожен вимірювальний модуль містить мінімум дві пари ємнісних сенсорів, орієнтованих взаємно перпендикулярно під кутом 90° , що дозволяє одночасно реєструвати радіальні зміщення у двох ортогональних координатних осях:

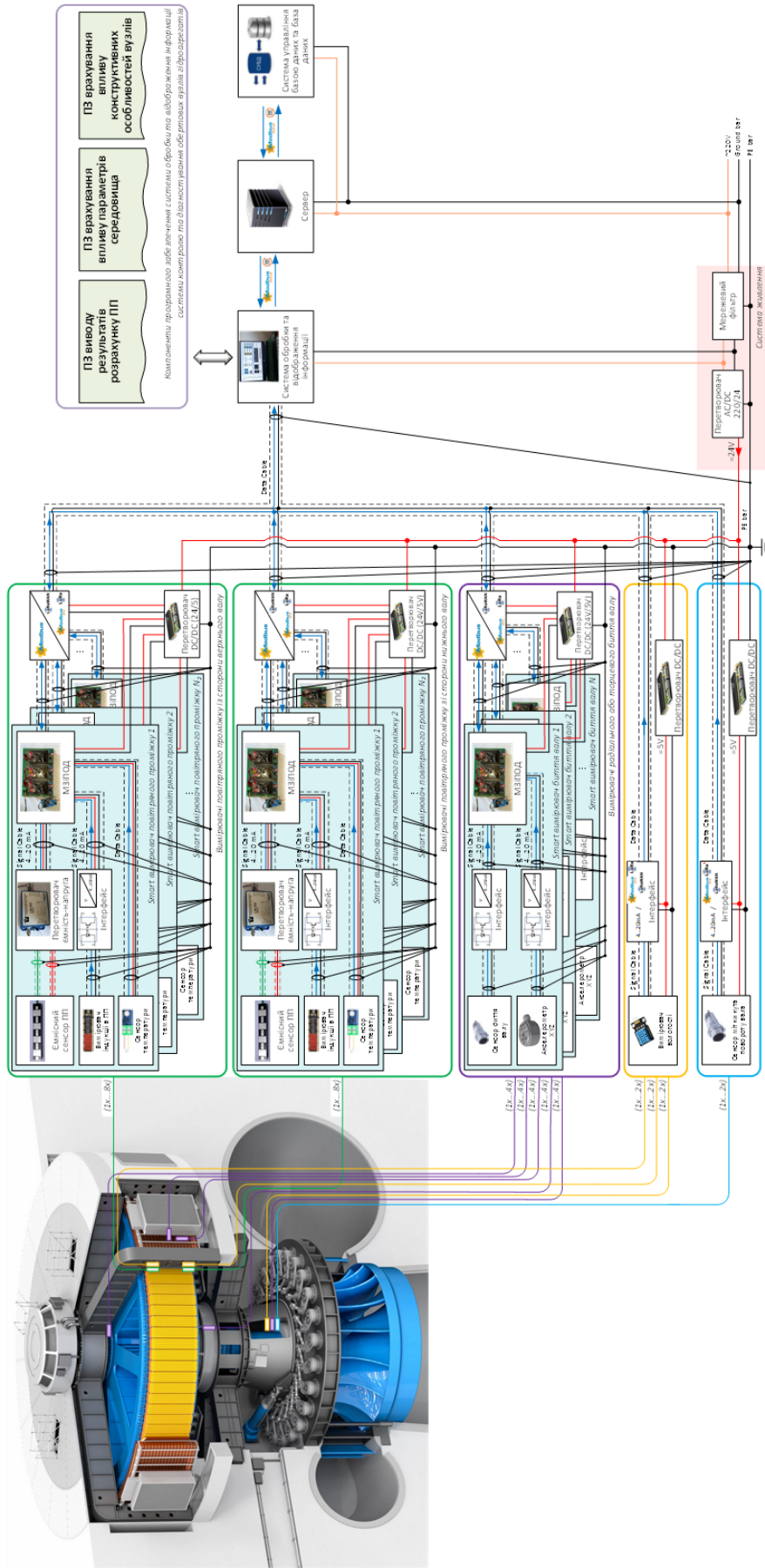


Рис. 2.1 Загальна структура інформаційно-вимірювальної системи

$$\begin{cases} x = f_x(t) \\ y = f_y(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

де x та y – миттєві значення повітряного проміжку в ортогональних напрямках; t – час.

Така конфігурація забезпечує підвищену інформативність щодо положення ротора відносно статора, а також дає можливість точно відтворювати його траєкторію руху в динаміці.

Завдяки встановленню аналогічних пар сенсорів на протилежних торцях ротора забезпечується аксіальна кореляція вимірювань, що дозволяє визначати не лише радіальні, але й кутові та просторові відхилення ротора. Для цього для кожного торця формуються вектори вимірюваного зміщення:

$$\vec{r}_1(t) = [y_1(t)]', \quad \vec{r}_2(t) = [y_2(t)]' \quad (2.2)$$

де індекси 1 та 2 відповідають верхньому та нижньому б'єфу ротора.

Використання векторів (2.2) дозволяє не лише фіксувати статичні похибки виготовлення та монтажу, але й аналізувати динамічні деформації під час експлуатації, включно з впливом навантаження, термомеханічних напружень і процесів розбалансування. В отриманих багатовимірних сигналах міститься достатньо інформації для високоточних алгоритмів обробки, що застосовуються у діагностичній підсистемі. На основі цих даних здійснюється ідентифікація технічного стану обертового вузла, локалізація механічних дефектів, визначення рівня деградації та формування прогнозів щодо ресурсних характеристик гідрогенератора на основі визначення параметрів еліптичності, ексцентриситету, динамічних вібрацій і кутових деформацій, та тощо.

Таким чином, система вимірювань забезпечує можливість визначення просторову траєкторію руху ротора та валу:

$$\vec{r}(t) = \{x_1(t), y_1(t), x_2(t), y_2(t)\}, \quad (2.3)$$

При цьому ексцентриситет ротора у площині перерізу встановлення сенсорів визначається як:

$$e(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}, \quad (2.4)$$

а кут орієнтації еліпса обертання:

$$\varphi(t) = \arctan(y(t)/x(t)), \quad (2.5)$$

Для оцінювання кутового перекосу ротора відносно осі обертання використовується різниця між радіальними зміщеннями на верхньому та нижньому б'єфу ротора, становитиме:

$$\Delta \vec{r}(t) = \vec{r}_2(t) - \vec{r}_1(t), \quad (2.6)$$

а кут нахилу осі (при малих відхиленнях):

$$\theta(t) \approx \|\Delta \vec{r}(t)\| / L, \quad (2.7)$$

де L – аксіальна відстань між сенсорними площинами.

У поєднанні з іншими сенсорними каналами (вібраційними, температурними, електромагнітними та ін.) система контролю повітряного проміжку формує інтегровану діагностичну платформу, що забезпечує багатофакторний аналіз, підвищує достовірність розпізнавання причинно-наслідкових зв'язків та сприяє впровадженню інтелектуальних методів технічного моніторингу. У такій структурі ємнісні сенсори повітряного проміжку виступають первинним джерелом інформації про миттєві радіальні переміщення ротора та зміни геометричних параметрів у зоні зазору. Водночас, для підвищення точності оцінювання та компенсації впливу динамічних процесів застосовуються сенсори биття валу та акселерометри, що

встановлюються поблизу напрямних підшипників. Дані цих сенсорів дозволяють реєструвати вібраційний стан ротора, визначати складові вимушених і власних коливань, а також розділяти геометричні дефекти (ексцентриситет, овальність, зміщення осі) від динамічних ефектів, зумовлених дисбалансом, турбулентністю повітря чи особливостями електромагнітного збудження. Для мінімізації впливу електромагнітного збудження на результати вимірювання повітряного проміжку та одночасного визначення кореляційних зв'язків значення його величини з величиною індукції в повітряному проміжку в системі використані електромагнітні сенсори у вигляді котушок.

У цьому разі використання додаткових сенсорів відіграє ключову роль у формуванні комплексної картини технічного стану генератора, забезпечуючи синхронізацію даних та уточнення моделей переміщення ротора.

В якості сенсорів биття валу застосовані ємнісні сенсори биття, які розташовані під кутом 90° один до одного в одній площині попарно. Сенсори розташовуються щонайменше в площинах гідрогенератора (див. рис. 2.1: в області кришки, над опорним підшипником та під ним). Ортогональне розміщення сенсорів вздовж осей на нерухомих частинах підшипника безпосередньо над поверхнею вала покращує діагностичні можливості, оскільки за допомогою відповідного програмного забезпечення та математичних засобів моніторингу, наприклад: вони можуть візуально спостерігати орбіту вала в радіальній площині, дисбаланс ротора або кутовий ексцентриситет.

Не менш важливими елементами інтегрованої системи є сенсори вологості та температури, які встановлюються безпосередньо біля ємнісних сенсорів. Сенсор вологості повітря у просторі повітряного проміжку дозволяє враховувати вплив зміни діелектричної проникності середовища на показники ємнісних сенсорів і здійснювати їх корекцію у реальному часі. Сенсори температури встановлюються поблизу ємнісних сенсорів, оскільки температура також впливає на чутливість ємнісних елементів. Під час роботи генератора можливі локальні підвищення температури, і саме тому місця встановлення сенсорів температури повинні максимально наближатися до місць встановлення ємнісних

сенсорів. Разом сенсори вологості та температури забезпечують компенсацію зовнішніх факторів і підвищують точність вимірювань радіальних переміщень ротора, як за сигналами ємнісних сенсорів, так і за допоміжними каналами биття валу. Таким чином, взаємодія основних інформаційних підсистем – ємнісних сенсорів повітряного проміжку, каналів контролю вібраційного стану та сенсорів вологості і температури – забезпечує узгоджену, самокореговану та високоточну діагностичну інфраструктуру. Її функціонування дає можливість формувати стабільні інформативні ознаки, підвищувати стійкість алгоритмів розпізнавання дефектів та підтримувати побудову інтелектуальних розв’язуючих правил для оцінювання технічного стану ротора й генератора в цілому.

Застосування мультифізичної вимірювальної інфраструктури, яка об’єднує ємнісні сенсори повітряного проміжку, канали контролю биття валу, акселерометри, кінематичні сенсори, а також сенсори вологості та температури, забезпечує комплексний та багатofакторний аналіз стану електроенергетичного обладнання. Кінематичні сенсори дозволяють безпосередньо оцінювати швидкісні та кутові характеристики руху ротора, що підвищує точність відтворення траєкторії його переміщення та дозволяє диференціювати геометричні дефекти від динамічних ефектів. Інтеграція різних сенсорних каналів забезпечує одночасне оцінювання геометричних параметрів ротора, динамічних коливань, локальних температурних та гігromетричних умов, підвищуючи достовірність і точність діагностики.

Така мультиканальна система формує повну та узгоджену картину технічного стану генератора, створюючи передумови для впровадження інтелектуальних алгоритмів прогнозного обслуговування на основі реальних експлуатаційних даних. Це дозволяє оптимізувати використання ресурсу обладнання, своєчасно виявляти початкові стадії дефектів і зменшувати ризики аварійних відмов, підвищуючи надійність та ефективність роботи електроенергетичних систем.

2.2 Інформаційно-вимірювальний канал повітряного проміжку системи контролю

Інформаційно-вимірювальний канал контролю повітряного проміжку (рис. 2.2) є складовою інформаційно-вимірювальної системи (рис. 2.1) та призначений для формування, обробки й передавання контрольно-діагностичних сигналів, що відображають параметри корельовані з радіальними зміщеннями ротора відносно статора. Структурно канал реалізовано за модульним принципом і включає первинні сенсори, вторинні вимірювальні перетворювачі, блоки керування, збору та обробки даних, а також засоби передавання інформації на верхній рівень системи для подальшої обробки та відображення контрольно-діагностичної інформації на ПК в зрозумілій для оператора формі. Блок-схема інформаційно-вимірювального каналу на базі ємнісного сенсору наведено на рис. 2.2 на якому прийняті наступні умовні позначення:

- 1 – блок синхронізації та керування;
- 2 – блок перетворювача-інтегратора каналу ємнісного сенсора;
- 3 – блок збору та попередньої обробки даних, який враховує сигнали сенсорів температури та вологості для визначення значення повітряного проміжку за показником ємнісного сенсору;
- 4 – персональний комп'ютер інформаційно-вимірювальної системи з прикладним програмним забезпеченням;
- 5 – ємнісний сенсор (повітряного проміжку, биття валу або мітки валу);
- 6 – вторинний вимірювальний перетворювач типу «ємність–напруга» з струмовим виходом 4...20 мА;
- 7 – сенсор температури;
- 8 – сенсор вологості;
- 9 – шина інтерфейсу 4...20 мА;
- 10 – шина інтерфейсу RS-485.

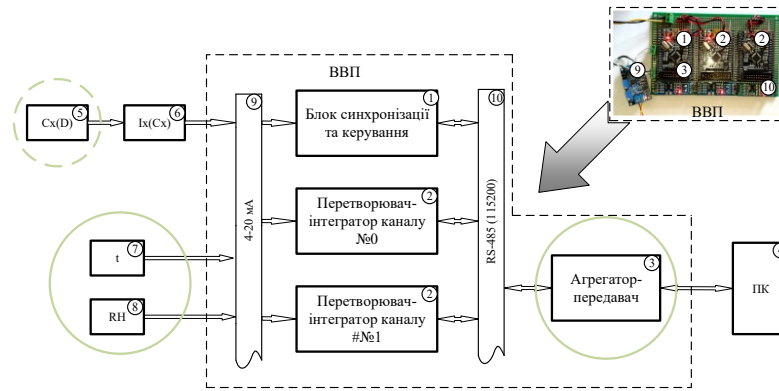


Рис. 2.2 Блок-схема інформаційно-вимірювального каналу на базі ємнісного сенсора

Первинним вимірювальним елементом каналу є ємнісний сенсор (5), який перетворює зміну повітряного проміжку між ротором і статором у відповідну зміну електричної ємності. Сигнал з ємнісного сенсора надходить на один із входів вторинного вимірювального перетворювача типу «ємність–напруга» зі струмовим виходом 4...20 мА (6), що забезпечує уніфікацію сигналу та його стійкість до завад під час передаванні на відстань. На інший вхід передбачено можливість подання сигналу від сенсора мітки валу, який використовується для прив'язки вимірювань повітряного проміжку до кутового положення ротора та формування просторово-часових характеристик повітряного проміжку та синхронізації роботи всієї системи. Блок-схема алгоритму опрацювання умови проходження ротором сенсора початкового кута повороту вала наведена в Додатку Д.

Замість сигналу від сенсора мітки валу для синхронізації роботи системи було використано сигнал ємнісного сенсора повітряного проміжку. Адже у працюючому генераторі, під час обертання ротора повз активний електрод ємнісного сенсора послідовно проходять полюси ротора під час кожного оберту формуючи сигнал форму якого наведено на рис 2.3. При цьому вихідний сигнал вимірювача, пропорційний зворотній величині ємності, а отже прямо пропорційний миттєвому значенню повітряного проміжку, змінюється в часі практично за тим самим законом, що й миттєве значення повітряного проміжку між точкою огинаючої полюса ротора та статора. Незначне згладжування форми сигналу зумовлене кінцевою шириною активного електрода ємнісного сенсора, як показано на рис. 2.3.

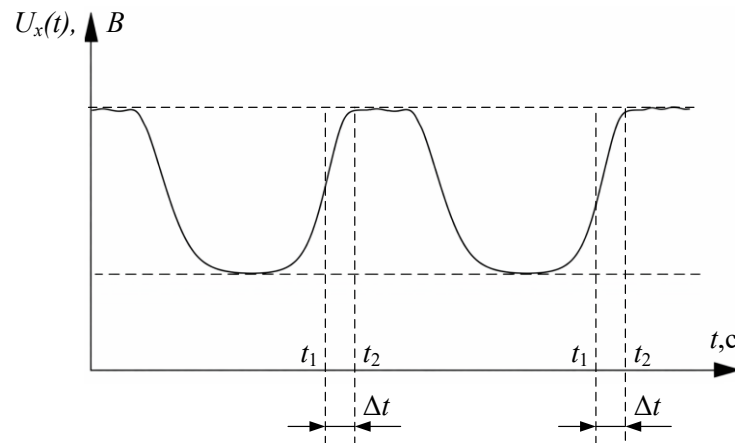


Рис. 2.3 Зміна вихідного сигналу вимірювача повітряного проміжку під час проходження полюсів ротора повз активний електрод сенсора

У такому разі для формування синхроімпульсу інтервалом Δt системи використовується характерний фронт сигналу, що виникає в початковий момент часу t_1 проходження полюса ротора над активною зоною ємнісного сенсора повітряного проміжку до моменту t_2 входу вершини полюса у зону вимірювання за ознакою зменшення швидкості зміни величини повітряного проміжку до встановленого рівня шуму вимірювання. Кількість імпульсів у цьому разі буде дорівнювати кількості полюсів. Такий підхід забезпечує синхронізацію вимірювального процесу без застосування додаткового сенсора положення вала та дозволяє здійснювати прив'язку вимірювань повітряного проміжку до кутового положення ротора, а також дозволяє забезпечити контроль рівномірності обертання ротору.

Передавання аналогового уніфікованого сигналу від ємнісного сенсора повітряного проміжку здійснюється по шині інтерфейсу 4...20 мА (9) до блоку перетворювача-інтегратора каналу ємнісного сенсора (2). У зазначеному блоці виконується інтегрування вхідного сигналу, його оцифрування та формування цифрового представлення контрольно-діагностичної інформації. В блоці перетворювача-інтегратора реалізовано наступні процедури обробки сигналу:

- врахування параметрів внутрішнього середовища (температури та вологості) шляхом корекції показників ємнісного сенсора із використанням коригуючих коефіцієнтів;

– розрахунок моменту повного заходу полюса ротора в зону дії сенсора, що фіксується за умови зменшення швидкості зміни величини повітряного проміжку до встановленого рівня шуму вимірювання та його перебування нижче заданого порогового рівня, який визначається як сума мінімального значення та однієї п'ятої різниці між максимальним і мінімальним значеннями за період спостереження(див. рис. Д.2 Додатку Д);

– визначається значення повітряного проміжку у часовому інтервалі перебування полюса ротора в зоні дії сенсора для поточного полюса, як середнє арифметичне множини отриманих значень;

– розрахунок моменту виходу полюса ротора із зони дії сенсора, який визначається за умови стабільної максимізації значення повітряного проміжку та його перевищення встановленого порогового рівня, що відповідає різниці між максимальним значенням і однією п'ятою амплітуди коливань, або у разі переповнення буфера збереження значень вимірювань, або за наявності керування сигналу від блоку(1);

– результати обробки та оцінені значення повітряного проміжку передаються до блоку керування за відповідним запитом для подальшої синхронізації, накопичення та аналізу на верхньому рівні інформаційно-вимірювальної системи.

Робота блока перетворювача-інтегратора (2) здійснюється під керуванням блока синхронізації та керування (1), який забезпечує узгодження часових параметрів, керування режимами вимірювання та синхронізацію функціонування всіх вузлів вимірювального каналу. Після ініціації циклу вимірювання здійснюється приймання та обробка контрольно-діагностичних даних протягом усього часу перебування полюса ротора в зоні чутливості сенсора. Обробка даних завершується після виходу полюса із зони вимірювання або після досягнення максимально допустимої кількості вимірювань, визначеної для одного полюса. Сформовані блоком-інтегратором значення відповідають величині повітряного проміжку між полюсом ротора та статором для кожного окремого полюса ротора. Таким чином за результатами обробки формується

пакет відповідних даних, після чого блок-інтегратор переходить у режим очікування запиту від блока-диспетчера. Після надходження запиту сформований пакет передається до блока агрегатора-передавача (3), а блок-інтегратора переходить в режим очікування виконання наступного циклу вимірювання.

Сформовані у блоці перетворювача-інтегратора (3) цифрові дані передаються по шині інтерфейсу RS-485 (10) до персонального комп'ютера інформаційно-вимірювальної системи з прикладним програмним забезпеченням (4), де здійснюється їх централізоване збереження, візуалізація в реальному масштабі часу та подальший аналіз з використанням.

Організація інформаційного обміну між усіма функціональними блоками вторинного перетворювача реалізується під керуванням блока синхронізації та керування (1), який виконує роль центрального координатора вимірювального процесу. Зазначений блок забезпечує формування часової структури обміну, узгодження роботи вимірювальних каналів із кінематикою обертання ротора, а також керування режимами вимірювання та передавання даних.

Обмін інформацією між блоками здійснюється по шині RS-485 зі швидкістю передавання 115200 бод у півдуплексному режимі. Такий режим роботи обрано з урахуванням вимог до електромагнітної завадостійкості, можливості використання ліній зв'язку та необхідності об'єднання декількох пристроїв у межах одного вимірювального каналу, а також уніфікацією з безпроводним протоколом передачі даних LORA [51-53].

Безконфліктне передавання інформаційних пакетів забезпечується використанням детермінованого механізму доступу до шини, що ґрунтується на системі часових вікон. Формування та розподіл часових вікон здійснюється блоком синхронізації та керування (1) синхронно з обертанням ротора, що дозволяє жорстко прив'язати обмін даними до фізичних подій, які відбуваються в об'єкті контролю.

У межах кожного часового вікна допускається передавання визначеного інформаційного пакета від блока до блока, що виключає можливість колізій у

шині та забезпечує гарантований час доступу до каналу зв'язку. Така організація обміну є особливо важливою за умов роботи вторинного вимірювального перетворювача в реальному масштабі часу в незалежності від зміни швидкісних режимів роботи гідрогенератора.

Блок синхронізації та керування (1) є єдиним активним передавачем первинних інформаційних пакетів у шині RS-485. Він формує та передає пакети, що відповідають ключовим подіям вимірювального процесу, а саме:

- початку оберту ротора; значенню швидкості обертання у попередньому оберті;
- моменту початку проходження чергового полюса ротора під ємнісним сенсором повітряного проміжку;
- запиту на отримання вимірювальних даних для відповідного полюса.

Блоки перетворювача-інтегратора функціонують у режимі пасивних вузлів обміну та формують виключно пакети-відповіді на запити, ініційовані блоком синхронізації та керування. Такі пакети містять узагальнені результати обробки вимірювальних даних для конкретного полюса ротора, зокрема значення повітряного проміжку та супровідну службову інформацію.

Часову діаграму обміну інформаційними пакетами по шині RS-485, що ілюструє послідовність формування часових вікон та взаємодію блока синхронізації та керування з блоками перетворювача-інтегратора, наведено на рис. 2.4

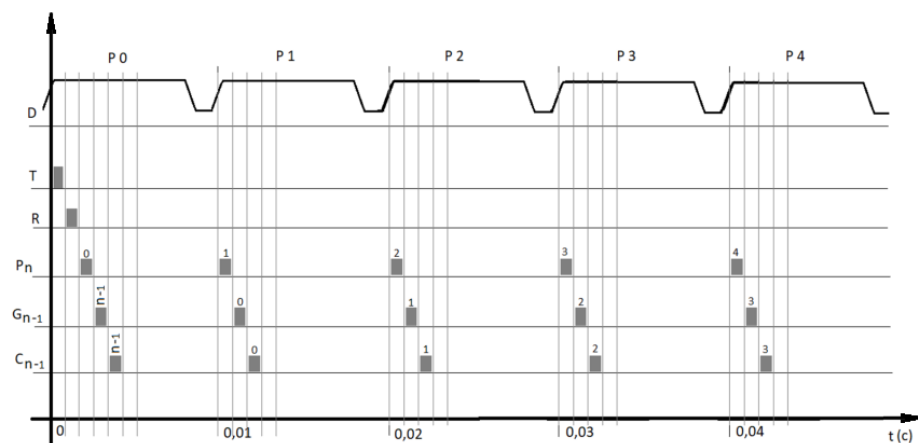


Рис. 2.4 Часова діаграма передачі інформаційних пакетів по внутрішнім шинам (9) та (10) між блоками вторинного перетворювача

Інтегруючий перетворювач здійснює обробку наступних пакетів даних(рис.2.4): Т-пакета, R-пакета, PR-пакета, PF-пакета, G-пакета та С-пакета.

Т-пакет містить дані, які відповідають моменту проходження ротором початкового положення відліку оберту. Після його отримання інтегруючий перетворювач виконує скидання лічильника таймера відліків у нуль.

R-пакет містить дані, які характеризують кутову швидкість обертання ротора. На основі цієї інформації інтегруючий перетворювач розраховує робочі коефіцієнти, що визначають режим його функціонування та забезпечують формування від 10 до 50 вимірювань на один полюс ротора залежно від швидкості обертання.

PR-пакет містить дані, які відповідають моменту входу полюса ротора в активну зону ємнісного сенсора вимірювання повітряного проміжку. Після отримання цього пакета інтегруючий перетворювач розпочинає приймання, накопичення та обробку сигналів, що надходять від вторинного вимірювального перетворювача.

PF-пакет містить дані, які відповідають моменту виходу полюса ротора з активної зони сенсора вимірювання повітряного проміжку. Отримання PF-пакета призводить до припинення приймання вхідних даних, завершення обчислювальних процедур та збереження результатів вимірювання до моменту отримання команди на передачу даних або початок нового вимірювального циклу.

G-пакет містить дані, які ініціюють формування інтегруючим перетворювачем пакета результатних вимірювальних даних та їх подальшу передачу на контролер.

С-пакет містить дані, які визначають службові або конфігураційні параметри роботи інтегруючого перетворювача та використовуються для налаштування режимів його функціонування.

Алгоритмом роботи інтегруючого перетворювача передбачено виконання приблизно 100 одиничних вимірювань у межах одного полюса ротора. У зв'язку

з цим обробка даних припиняється також у випадку досягнення максимально допустимої кількості вимірювань за відсутності PF-пакета, що є характерним для режимів малих швидкостей обертання ротора.

У разі, якщо полюс ротора залишає активну зону сенсора раніше, ніж інтегруючий перетворювач отримає PF-пакет, наприклад при різкому збільшенні величини повітряного проміжку, інтегруючий перетворювач виконує дії, еквівалентні тим, що передбачені при обробці PF-пакета. Подальше надходження PF-пакета в такому випадку не призводить до порушення алгоритму роботи каналу, а перетворювач переходить у відповідний стан очікування команди на передачу даних або запуск нового вимірювального циклу.

З метою визначення параметрів, що забезпечують безконфліктний інформаційний обмін по шині RS-485, а також перевірки коректності формування часових вікон, було виконано розрахунок часових характеристик передавання інформаційних пакетів.

Вхідними параметрами для розрахунку є:

- швидкість передавання даних середовищем зв'язку;
- максимальний обсяг інформації в одному пакеті.

Максимальна довжина інформаційного пакета становить 15 байт. Пакети такої довжини формуються виключно на початку оберту ротора та містять службову інформацію, необхідну для синхронізації вимірювального процесу. Пакети-запити та пакети-відповіді, що використовуються під час обміну даними для окремих полюсів ротора, мають максимальну довжину 8 байт.

Передавання даних по шині RS-485 здійснюється в асинхронному режимі, при якому один байт інформації передається за 10 тактів фізичного сигналу (1 стартовий біт, 8 біт даних і 1 стоповий біт). За швидкості передавання 115200 бод ефективна швидкість обміну становить 11520 байт/с. У цьому разі час

передавання одного пакета довжиною 8 байт становить: $t_{(8)} = \frac{8}{11520} = \frac{1}{1440}$ с, а

пакета довжиною 15 байт відповідно: $t_{(15)} = \frac{15}{11520} = \frac{1}{720}$.

З урахуванням того, що часове вікно, у межах якого має відбутися передавання та приймання інформаційних пакетів, що відповідають одному полюсу ротора, становить не більше ніж $1/100$ с, а враховуючи час існування фронтів наростання та спадання (рис. 4.4.), буде становити не більше ніж $t_{Cal} = 1/120 \approx 0,0083$ с. Це значення визначається кінематикою обертання ротора та відповідає часу проходження одного полюса над ємнісним сенсором повітряного проміжку. Тому, сумарний час, необхідний для обміну інформацією в межах одного полюса, складається з часу передавання пакета-запиту, пакета-відповіді та час внутрішньої обробки даних перетворювачем-інтегратором та становить $t_{\Sigma} = 2 \cdot \frac{1}{1440} + \frac{1}{7200} = \frac{11}{7200} \approx 0,0015$ с, (де $1/7200$ с — час обробки пакета блоком-інтегратором).

Отримане значення є меншим за тривалість відповідного часового вікна $t_{\Sigma} < t_{Cal}$, що підтверджує коректність обраної структури обміну.

За результатами розрахунків заповненість інформаційного каналу RS-485 за швидкості передавання 115200 бод становить до 30%, що забезпечує надійну роботу системи в реальному масштабі часу та залишає запас пропускну здатності для розширення функціональних можливостей каналу інформаційно-вимірювальної системи на забезпечення реалізації інших функцій у майбутньому.

На верхньому рівні здійснюється накопичення, візуалізація та подальший аналіз інформації з метою оцінювання рівномірності повітряного проміжку, виявлення ексцентриситету та інших дефектів обертових вузлів гідрогенератора.

Для компенсації впливу зовнішніх факторів на результат вимірювання до структури каналу введено сенсор температури (7) та сенсор вологості (8). Сигнали з цих сенсорів надходять до блоку збору та попередньої обробки даних (3), у якому здійснюється корекція показів ємнісного сенсора з урахуванням температурно-вологісних умов експлуатації та визначення скоригованого значення повітряного проміжку.

2.3 Принцип функціонування перетворювача-інтегратора та аналіз його часових параметрів у складі ВВП ІВК повітряного проміжку

Робота інформаційно-вимірювального каналу контролю повітряного проміжку у складі вторинного вимірювального перетворювача розглядається за припущенням, що кожному полюсу ротора відповідає одне узагальнене значення повітряного проміжку. У цьому випадку вимірювальну інформацію, що надходить від ємнісного сенсора, можна подати у вигляді залежності: для i -го полюса ротора при кутовому положенні ротора φ значення повітряного проміжку визначається як $D_i(\varphi)$. Зчитування та обробка даних вимірювання здійснюються лише в ті часові інтервали, коли полюс ротора перебуває в зоні дії активного елемента ємнісного сенсора. Протягом часу проходження одного полюса через цю зону перетворювач-інтегратор виконує серію дискретних вимірювань повітряного проміжку, кількість яких залежить від швидкості обертання ротора і, як правило, становить від 10 до 100 відділків для одного полюса.

Формування масиву вимірювань для поточного полюса припиняється за однією з таких умов: фіксація моменту виходу полюса із зони дії сенсора, досягнення граничної кількості відліків для даного полюса або надходження керувального сигналу від майстер-контролера. Останній випадок є характерним для режимів малої швидкості обертання або зупинки ротора. Отриманий масив даних підлягає інтегральній обробці, за результатами якої формується середнє арифметичне значення, що приймається за значення повітряного проміжку для відповідного полюса. Це значення передається перетворювачем-інтегратором через внутрішню шину інформаційно-вимірювального каналу за запитом майстер-контролера, після чого зберігається у буфері та передається до зовнішньої мережі.

Часові параметри роботи аналого-цифрового перетворювача, інтегрованого в перетворювач-інтегратор, конфігуруються динамічно залежно від швидкості обертання ротора з метою забезпечення необхідної кількості відділків на один полюс. Коригування параметрів дискретизації виконується у разі, якщо кількість вимірювань для одного полюса зменшується нижче 30 або перевищує 100.

Нижня межа обрана з урахуванням необхідності зменшення розкиду результатів, пов'язаного з випадковими складовими похибки вимірювання, тоді як верхня межа введена з метою обмеження обчислювального навантаження, оскільки система функціонує в режимі реального часу.

Слід також враховувати, що в більшості сучасних потужних гідрогенераторів поверхня ротора має нерівномірну структуру, за якої основну площу займають полюсні площадки, тоді як проміжки між полюсами є значно меншими. Така геометрія накладає додаткові обмеження на часові режими роботи перетворювача-інтегратора. Зокрема, у разі використання одного АЦП-інтегратора для обробки сигналу виникає ситуація, коли часовий інтервал, що відповідає переходу від одного полюса до наступного, може виявитися недостатнім для завершення операцій інтегральної обробки даних і передавання результатів, що необхідно враховувати при виборі архітектури вторинного вимірювального перетворювача та параметрів його часової синхронізації.

Для усунення зазначеного обмеження застосовується архітектура сенсора, у якій передбачено використання двох або більше АЦП-інтеграторів. У такій структурі один із АЦП-інтеграторів виконує безпосереднє вимірювання повітряного проміжку, тоді як інші здійснюють інтегральну обробку раніше отриманих даних, передавання результатів або перебувають у стані очікування. Після завершення вимірювання поточного полюса АЦП-інтегратор переходить до етапу обробки результатів, тоді як вимірювання наступного полюса виконується іншим АЦП-інтегратором. Керування режимами роботи всіх АЦП-інтеграторів здійснюється централізовано майстер-контролером, який формує відповідні сигнали керування та забезпечує їх синхронізацію з обертанням ротора. Така організація вимірювального процесу реалізує конвеєрний принцип обробки даних і дозволяє відокремити у часі операції зняття вимірювальних відділків та їх подальшої обробки. На рис. 2.5 наведено часову діаграму процесу вимірювання повітряного проміжку в інформаційно-вимірювальному каналі за багатоканальної реалізації вторинного вимірювального перетворювача з двома АЦП-інтеграторами.

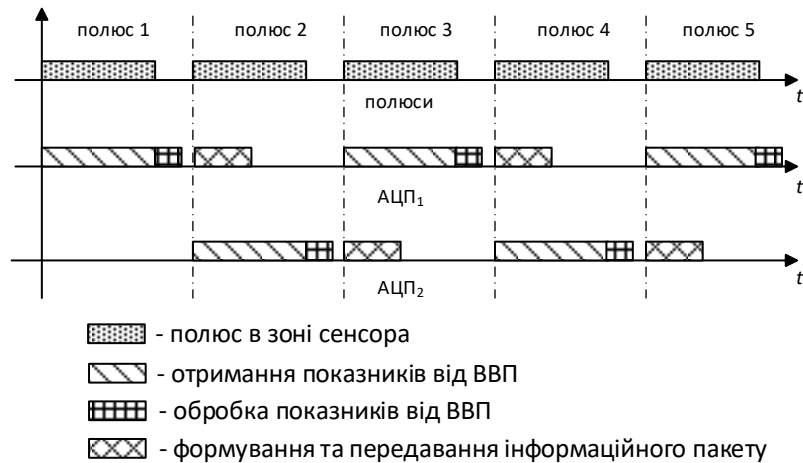


Рис. 2.5 Часова діаграма вимірювального процесу

Діаграма ілюструє розподіл у часі операцій зняття вимірювальних відліків, інтегральної обробки та передавання результатів для послідовних полюсів ротора. Показано, що за умови, коли час інтегрування та постобробки менший за часовий інтервал переходу між сусідніми полюсами, забезпечується безперервність вимірювального процесу без втрати інформації. У момент, коли один АЦП-інтегратор виконує обробку та передавання результатів для поточного полюса, інший АЦП-інтегратор здійснює вимірювання повітряного проміжку для наступного полюса.

Запропонована інформаційна структура вторинного вимірювального перетворювача забезпечує можливість виконання складних алгоритмів обробки, тривалість яких може перевищувати час перебування полюса ротора в активній зоні сенсора, без втрати вимірювальної інформації. Зокрема, у разі використання двох АЦП-інтеграторів часовий інтервал, доступний для обробки результатів вимірювання та передавання сформованого значення до буфера, стає рівним часу перебування полюса в зоні зняття показників. Це справедливо навіть у випадках, коли міжполюсний проміжок є значно меншим за ширину полюсної площадки, що є характерним для більшості потужних гідрогенераторів.

Зазначений часовий розподіл роботи блоків оцифрування сигналу вторинного вимірювального перетворювача сенсора повітряного проміжку є коректним за умови, що час інтегрування вимірювального сигналу є меншим за

часовий інтервал, який відповідає розриву між проходженням сусідніх полюсів ротора. У випадку, коли час інтегрування перекриває момент входу наступного полюса в активну зону сенсора, виникає ситуація, за якої блок-диспетчер формує запит на передавання результатів у момент, коли відповідний АЦП-інтегратор ще не завершив обробку даних. Оскільки команда передавання ініціюється синхронно з подією входу наступного полюса в зону дії сенсора, це призводить до неможливості її виконання або до некоректного передавання частково оброблених результатів.

Нормалізація функціонування системи в таких умовах може бути досягнута двома принципово різними підходами. Перший підхід полягає в реалізації в АЦП-інтеграторах механізму відкладеного виконання команд-запитів на передавання даних, за якого запит зберігається до моменту завершення інтегрування та обробки вимірювальної інформації. Другий підхід передбачає збільшення кількості АЦП-інтеграторів до такого значення, за якого надходження запиту на передавання результатів гарантовано відбувається після завершення інтегрування для відповідного полюса.

Слід зазначити, що перший підхід, хоча й спрощує апаратну структуру, накладає обмеження на максимально допустимий час інтегрування, який у цьому випадку не може перевищувати сумарний час проходження полюса та міжполюсного розриву в активній зоні сенсора. Натомість другий підхід позбавлений зазначеного недоліку, оскільки збільшення кількості АЦП-інтеграторів забезпечує достатній часовий резерв для завершення інтегральної обробки незалежно від геометричних особливостей поверхні ротора та швидкості його обертання.

На рис. 2.6 та рис. 2.7 наведено часові діаграми, що ілюструють функціонування системи для випадку використання чотирьох АЦП-інтеграторів із негайним передаванням результатів, а також для конфігурації з двома АЦП-інтеграторами з реалізацією механізму відкладеного передавання даних.

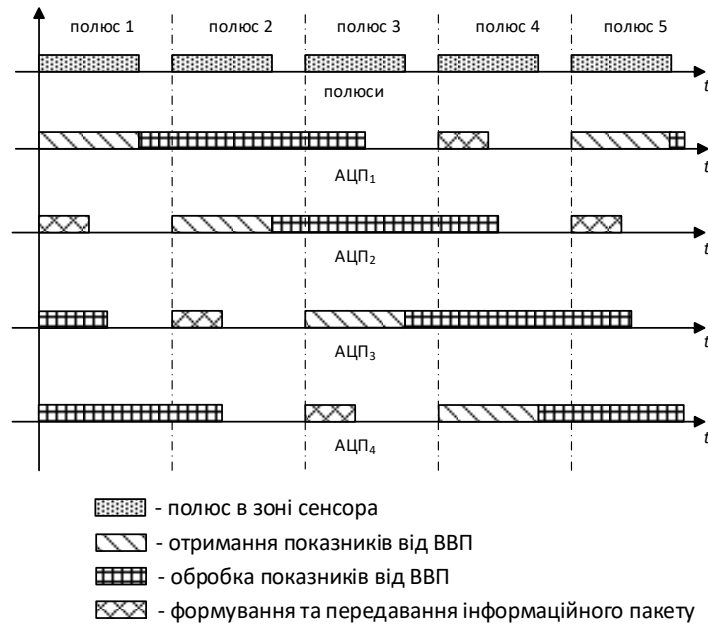


Рис. 2.6 Часова діаграма вимірювань: чотири АЦП

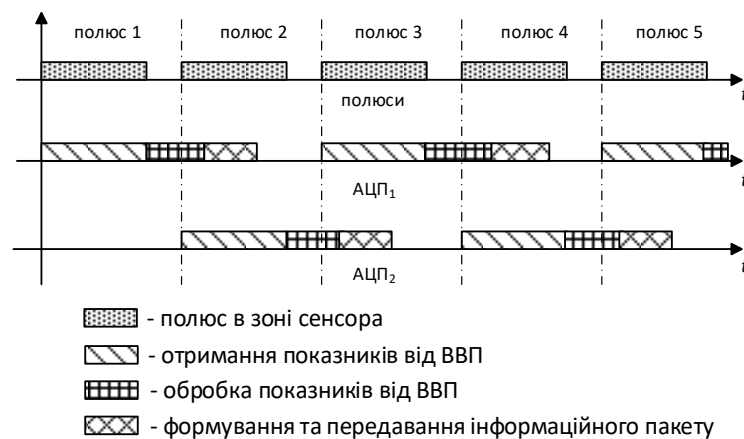


Рис. 2.7 Часова діаграма вимірювань: два АЦП, відкладена передача

2.4 Розробка диференційного ємнісного сенсора повітряного проміжку інваріантного до навколишнього середовища

Під час вимірювання ємнісними вимірювачами повітряного проміжку в потужних гідрогенераторах важливо зменшити вплив неінформативних параметрів на результати вимірювань, а саме: температурних змін геометричних розмірів електродів ємнісних сенсорів, змін відносної вологості повітряного середовища в робочому середовищі сенсорів, які впливають на діелектричну

проникність середовища, що у свою чергу призводить до зміни функції перетворення.

Оптимальним та ефективним зменшення впливу є застосування диференційної схеми вимірювання [54-56]. В цьому випадку ємнісний сенсор складається з двох частин, причому ємність однієї частини зі збільшенням вимірювального параметра збільшується, а іншої – зменшується і навпаки. Інформативним параметром диференціального сенсора є відношення ємностей складових частин. Така схема вимірювання ємностей сенсора зменшує вплив на результати вимірювань зовнішніх факторів, таких як коливання температури або відносної вологості, оскільки ці фактори впливають на обидві вимірювальні ємності однаково. Але для перспективного вимірювача повітряного проміжку, описаного в [30, 57], класичну диференціальну схему вимірювання через конструктивні складності застосувати неможливо. Тому пропонується удосконалити вимірювач, застосувавши модифікований диференціальний метод вимірювання [54-58], додавши в конструкцію сенсора наряду зі змінним робочим вимірювальним конденсатором постійний вимірювальний конденсатор з електродами, геометрично подібними змінному конденсатору з подальшим обчисленням відношення ємностей зазначених конденсаторів, яке при цьому є інформативним параметром. В результаті практично виключається вплив на функцію перетворення вимірювача температури і відносної вологості повітряного середовища, що оточує сенсор в гідрогенераторі, бо вони однаково впливають як на ємність змінного конденсатора, яка функціонально залежить від величини вимірюваного повітряного проміжку, так і на ємність постійного конденсатора.

Схему вимірювання ПП змінним конденсатором ємнісного сенсора, наведеним в [30, 57], показано на рис. 2, де 1 – розточення осердя статора ГГ; 2 – полюс ротора ГГ; 3 – ємнісний сенсор ПП; d_{VAR} – відстань між поверхнею електродів сенсора 3 і полюсом ротора. Зі зміною відстані d_{VAR} змінюється електрична ємність C_{VAR} між ними, тобто $C_{VAR} = f(d_{VAR})$.

Побудова та принцип роботи запропонованого ємнісного вимірювача повітряного проміжку[59] наведено на рис. 2.9 структурну схему ЄВ, а рис. 2.10 – конструктивну схему ємнісного сенсора зі змінним і постійним вимірювальним конденсаторами.

Для вимірювання ПП між статором 1 і ротором 2 в ГГ застосовано ємнісний сенсор (ЄС) 3, закріплений на розточенні осердя статора 1. Конструктивно цей ЄС є багатошаровою друкованою платою, в якій чергуються тонкі провідні і діелектричні ізолюючі шари: провідний шар 3.1 з електродами змінного вимірювального конденсатора; ізоляційний діелектричний шар 3.2; провідний заземлений шар 3.3; ізоляційний діелектричний шар 3.4; тонкий провідний шар 3.5 з електродами постійного вимірювального конденсатора; дистанційний ізоляційний діелектричний шар 3.6; провідний заземлений шар 3.7.

В провідному шарі 3.1 сформовано електроди змінного вимірювального конденсатора (рис. 2.11 – рис 2.12): активний електрод 3.1.1, охоронний електрод 3.1.2, екранний заземлений електрод 3.1.3.

Охоронний електрод 3.1.2 розміщений по периметру активного електрода 3.1.1 і відокремлений від нього тонкими діелектричними проміжками 3.1.4. На електроди 3.1.1 і 3.1.2 подається однаковий потенціал, але вони не з'єднані між собою гальванічно. Така геометрія електродів і рівність потенціалів забезпечують в робочому проміжку змінного вимірювального конденсатора практично рівномірне електричне поле, що усуває вплив крайових ефектів на точність вимірювання. Активний електрод 3.5.1 і заземлений електрод 3.5.2 постійного вимірювального конденсатора сформовано в тонкому провідному шарі 3.5 (рис. 2.12).

Змінний конденсатор з'єднаний з блоком вимірювання 4 кабелем з подвійним екраном 5, в якому центральна жила 5.1 під'єднує активний електрод 3.1.1, внутрішній екран 5.2 – охоронний електрод 3.1.2, а зовнішній екран 5.3 – екранний електрод 3.1.3.

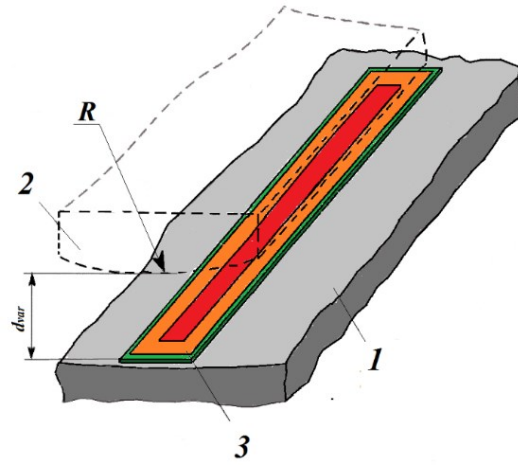


Рис. 2.8 Схема розміщення

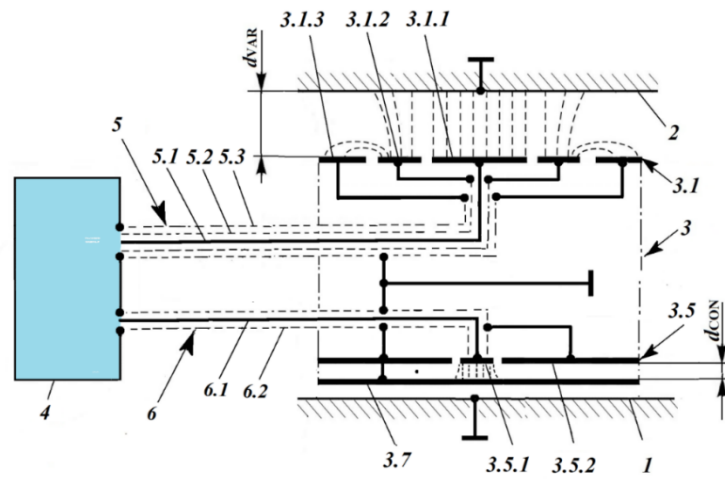


Рис. 2.9 Схема під'єднання до вторинного вимірювального перетворювача

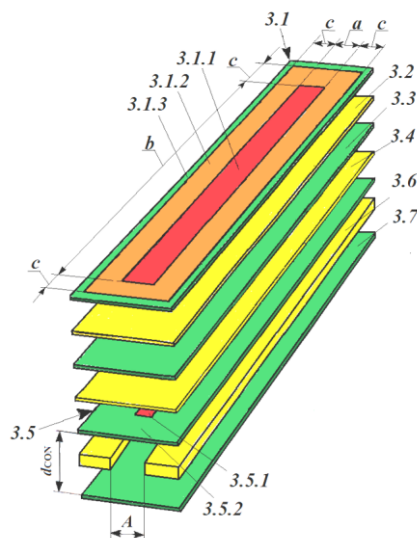


Рис. 2.10 Конструктивна схему ємнісного сенсора

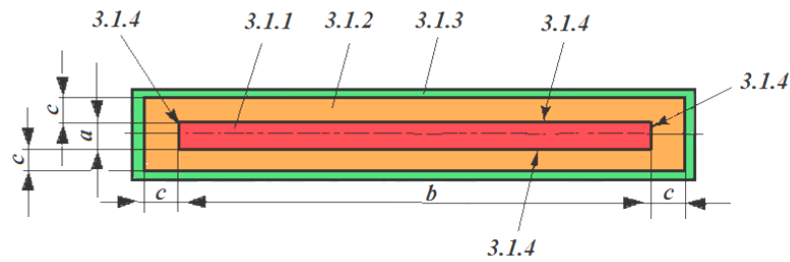


Рис. 2.11 Топологія електродів вимірювального конденсатора

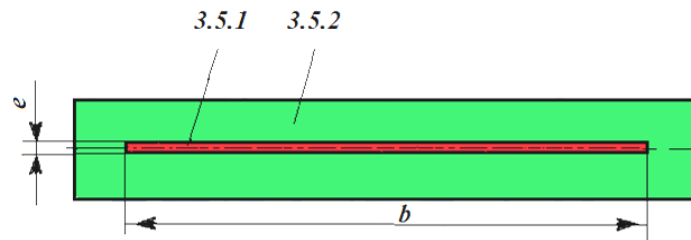


Рис. 2.12 Топологія електродів постійного конденсатора

Постійний конденсатор в свою чергу з'єднаний з блоком 4 звичайним екранованим кабелем 6, в якому центральна жила 6.1 під'єднує активний електрод 3.1.1, екран 6.2 – заземлений електрод 3.5.2.

Під час зміни значення ПП d_{VAR} (відстані між загальною площиною електродів 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 сенсора 3 і полюсом ротора 2 рис. 2.8) буде змінюватись електрична ємність $C_{VAR} = f(d_{VAR})$ змінного вимірювального конденсатора ємнісного сенсора, яка буде складати[30]

$$\begin{aligned}
 C_{VAR} &= \varepsilon\varepsilon_0 b \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \varphi \\
 &= 2\varepsilon\varepsilon_0 b \left\{ \frac{(d_{VAR} + R)}{\sqrt{d_{VAR}^2 + 2Rd_{VAR}}} \operatorname{arctg} \frac{\frac{a}{2}}{\sqrt{d_{VAR}^2 + 2Rd_{VAR}}} + \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{a^2 + b^2} [F(\varphi, k) - E(\varphi, k)] + \sqrt{\frac{b^2 - y^2}{y^2 + b^2}} \right\}, \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

де $y^2 = d_{VAR}^2 + 2Rd_{VAR} + x^2$, $F(\varphi, k)$ – еліптичний інтеграл першого роду з кутом φ і модулем k ; $E(\varphi, k)$ – еліптичний інтеграл другого роду з кутом φ і модулем k ;

$$\varphi = \arcsin \frac{y}{b} \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{y^2 + a^2}}; \quad k = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}; \quad 0 \leq x \leq a/2; \quad \varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} -$$

діелектрична проникність вакууму; $\varepsilon_r = 1,00056$ – відносна діелектрична проникність повітря; a – ширина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1 (рис. 5); b – довжина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1 (рис. 2.11); d_{VAR} – відстань між загальною площиною електродів 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 і полюсом ротора 2 (рис. 2.8, рис.2.9); R – радіус кривизни поверхні полюса ротора.

Ширина h діелектричних проміжків 3.1.4 між електродами 3.1.1 і 3.1.2 для усунення впливу крайових ефектів вибирається мінімальною з урахуванням можливостей технології виготовлення електродів. Сучасні технології виготовлення плівкових провідних поверхонь дають змогу виконувати діелектричні проміжки шириною $h = 50 \div 100$ мкм. При цьому вплив крайових ефектів, зумовлених кінцевою шириною h , буде мінімальним, і під час розрахунків C_{VAR} за формулою (1) величина h не враховується.

Ємність постійного конденсатора C_{CON} в сенсорі без урахування крайового ефекту визначиться як [30]

$$C_{\text{CON}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{e \cdot b}{d_{\text{CON}}}, \quad (2.9)$$

де e – ширина активного електрода постійного конденсатора 3.5.1 (рис.2.12); b – довжина активного електрода постійного конденсатора 3.5.1 (рис. 2.12); – відстань між загальною площиною електродів 3.5 і заземленим провідним шаром 3.7 (рис. 2.11, рис.2.12).

Товщина діелектричного шару 3.6 визначає величину d_{CON} . Через виріз A в шарі 3.6 повітря, що оточує сенсор, поступає до електродів постійного конденсатора. Ширина A прорізу в шарі 3.6 вибрана з урахуванням необхідності забезпечити механічну міцність сенсора та можливість вільної вентиляції

сенсора (проходження охолоджуючого повітря), визначається технологією виготовлення сенсора і застосовуваними матеріалами.

В роботі [54] показано, що під час використання диференціальної схеми для забезпечення оптимальної функції перетворення ємність постійного конденсатора вибирається рівною ємності змінного вимірювального конденсатора в середині його діапазону вимірювання. В процесі виконання досліджень було створено ємнісний сенсор ПП для використання на ГГ типу СВ 1230/140-56 із номінальним значенням ПП 30 мм. На рис. 2.13 показано графік зміни ємності $C_{VAR} = f(d_{VAR})$ змінного конденсатора сенсора в діапазоні $10 \text{ мм} < d_{VAR} \leq 50 \text{ мм}$. Для розрахунку використані наступні значення: $a = 30 \text{ мм}$ – ширина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1; $b = 200 \text{ мм}$ – довжина активного електрода змінного конденсатора 3.1.1; $R = 1230 \text{ мм}$ – радіус кривизни поверхні полюса ротора ГГ.

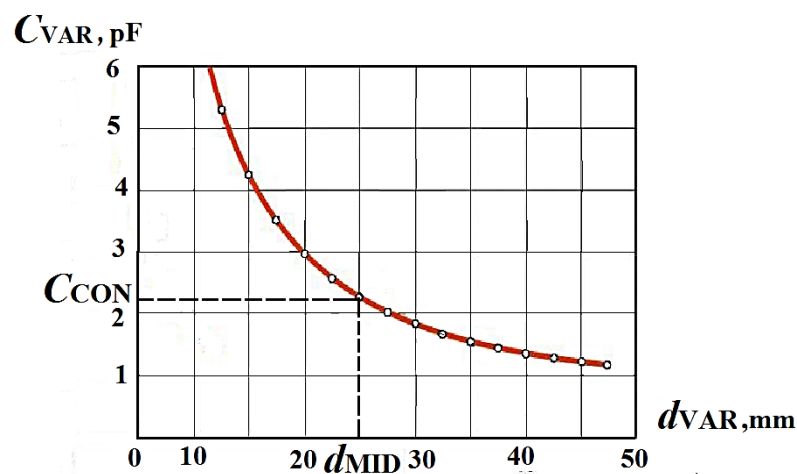


Рис. 2.13 Графік $C_{VAR} = f(d_{VAR})$

Як видно з рис. 2.13 ємність C_{VAR} змінного конденсатора змінюється в межах $1 \text{ пФ} \leq C_{VAR} \leq 6 \text{ пФ}$, а для середини діапазону вимірювання змінного конденсатора ($d_{MID} = 25 \text{ мм}$) ємність постійного конденсатора C_{CON} складе 2,25 пФ.

Як відомо з [54, 55] у випадку застосування модифікованої диференціальної схеми вимірювання фізичних величин для усунення впливу температури і вологості повітряного середовища, що оточує сенсор, в якості інформативного параметра сенсора P використаємо відношення $P_1 = \frac{C_{VAR}}{C_{CON}}$, або $P_2 = \frac{C_{VAR} - C_{CON}}{C_{CON}}$, де C_{VAR} – змінна електрична ємність, величина якої залежить від вимірюваного параметру, C_{CON} – постійна електрична ємність. Враховуючи формули (2.8) і (2.9), визначимо P_1 і P_2 , як

$$P_1 = \frac{C_{VAR}}{C_{CON}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 b \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}}}{\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{e \cdot b}{d_{CON}}}, \quad (2.10)$$

$$= \frac{d_{CON} \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}}}{e}.$$

$$P_2 = \frac{C_{VAR} - C_{CON}}{C_{CON}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 b \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}} - \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{eb}{d_{CON}}}{\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{e \cdot b}{d_{CON}}} =$$

$$= \frac{d_{CON} \int_0^a \frac{dx}{d_{VAR} + R - \sqrt{R^2 - x^2}}}{e} - 1.$$

З аналізу формул (2.10) і (2.11) видно, що на інформативні параметри P_1 і P_2 не впливає:

- 1) відносна діелектрична проникність повітря ε_r , яка залежить від зміни відносної вологості;
- 2) температура повітря, бо зі зміною температури розміри змінного і постійного конденсаторів змінюються однаково.

Тобто в такому сенсорі зміна параметрів повітряного середовища, що оточує ємнісний сенсор, не впливає на точність вимірювання.

2.5 Інформаційно-комунікаційні засоби обміну в системах контролю енергетичного обладнання з використанням LoRaWAN

Для забезпечення інформаційного обміну в системі контролю обортових вузлів потужних гідрогенераторів необхідним є використання надійного та завадостійкого каналу передавання вимірювальної інформації між вимірювальними модулями та системою обробки інформації інформаційно-вимірювальної системи. З урахуванням умов експлуатації енергетичного обладнання, зокрема наявності інтенсивних електромагнітних завад промислової частоти, просторової розосередженості вимірювальних вузлів, що накладає обмеження на прокладання значної кількості кабельних ліній у зоні обортових елементів можливим є для оптимізації роботи та реалізації інформаційно-комунікаційних засобів застосування безпроводу технологію LoRaWAN для передачі даних[51, 52]. У цьому разі архітектура інформаційно-комунікаційних засобів(рис. 2. 14) є побудованою за ієрархічним принципом та забезпечує повний цикл формування, оброблення, передавання й візуалізації вимірювальної інформації.

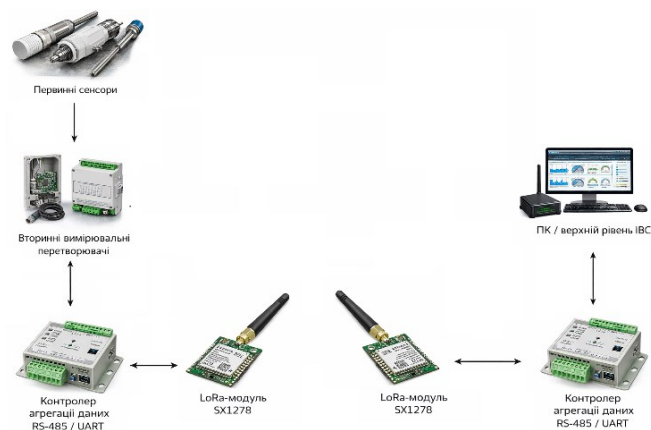


Рис. 2.14 Архітектура інформаційно-комунікаційних засобів з використанням LoRaWAN

В архітектурі, наведені на рис. 2.14 виділяється декілька рівнів для передачі даних. На польовому рівні розміщені первинні сенсори (ємнісні, температури,

вологості, вібрації), які безпосередньо перетворюють контрольовані фізичні величини у електричні сигнали. Сигнали надходять до вторинних вимірювальних перетворювачів, де виконуються нормалізація, лінеаризація та первинна цифрова обробка.

На локальному рівні збору даних контролер агрегації через інтерфейси RS-485 / UART здійснює опитування вторинних перетворювачів, синхронізацію даних, їх пакетування та підготовку до безпроводного передавання. Далі інформація передається до LoRa-модуля SX1278, який забезпечує енергоефективний дальній радіоканал зв'язку між віддаленими вузлами системи. Фотографію під'єднання модуля показано на рис. 2.15. Радіомодулі LoRa типу SX1278, що працюють у діапазоні 433 МГц і забезпечують стійке передавання вимірювальної інформації в умовах дії електромагнітних завад.



Рис. 2.14 Модулі LoRa SX1278 433 МГц

На каналному рівні реалізується безпроводний обмін даними між LoRa-модулями за принципом «вузол – шлюз». Приймальний контролер агрегації виконує демодуляцію, перевірку цілісності та передавання даних до верхнього рівня.

На верхньому рівні ІВС дані надходять на персональний комп'ютер, де реалізуються функції збереження, візуалізації, аналітичної обробки та інтеграції з інформаційно-вимірювальною системою контролю технічного стану об'єкта.

Запропонована архітектура забезпечує масштабованість, завадостійкість і можливість віддаленого моніторингу об'єктів з просторово розосередженими вимірювальними вузлами.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Розроблено удосконалену структуру інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів, в якій забезпечено інваріантність вимірювальних перетворювачів кінематичних характеристик до дії внутрішнього середовища.

2. Сформовано інформаційно-вимірювальний канал контролю повітряного проміжку, реалізований за модульним принципом із використанням ємнісних сенсорів, вторинних вимірювальних перетворювачів та детермінованого обміну по шині RS-485.

3. Розроблено принцип функціонування перетворювача-інтегратора та виконано аналіз його часових параметрів, що підтвердив можливість реалізації вимірювального процесу без втрати інформації в умовах змінних швидкісних режимів роботи гідрогенератора.

4. Запропоновано та обґрунтовано конструкцію диференційного ємнісного сенсора повітряного проміжку, інваріантного до впливу температури та вологості навколишнього середовища.

5. Розроблено архітектуру інформаційно-комунікаційних засобів обміну з використанням безпроводної технології LoRaWAN, яка забезпечує завадостійке, енергоефективне та масштабоване передавання вимірювальної інформації від просторово розосереджених вимірювальних вузлів до верхнього рівня інформаційно-вимірювальної системи.

6. Отримані в розділі результати, формують методичну й апаратну основу для подальшої розробки алгоритмів обробки, діагностики та прогнозування технічного стану обертових вузлів потужних гідрогенераторів на застосування в системах контролю високоточних та інваріантних вимірювальних засобів.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ СЕНСОРІВ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

Удосконалення системи контролю обертових вузлів генеруючого обладнання потребує не лише застосування нових та удосконалених засобів отримання та обробки контрольно-діагностичної інформації для систем контролю кінематичних характеристик обертового обладнання, а й створення відповідних математичних моделей інформаційних сигналів та алгоритмів їх обробки. Такі моделі формують основу програмно-математичного забезпечення вимірювальних каналів, які у реальному часі здійснюють перетворення, фільтрацію й попередню обробку отриманої контрольно-діагностичної інформації, а також забезпечують компенсацію впливу робочого середовища. Крім того застосування моделей дозволяє адаптувати існуючі сенсори до вимог наявних засобів моніторингу технічного стану обертового обладнання, враховувати конструктивні особливості вузлів і динаміку процесів, а також забезпечує модернізацію й надійну роботу існуючих систем контролю та їх інформаційно-вимірювальних засобів.

Тому даний розділ присвячений розробці математичних моделей вихідних сигналів сенсорів кінематичних характеристик системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів та алгоритмів їх обробки.

3.1 Математичні моделі вихідних сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів генеруючого обладнання з урахуванням ймовірнісної природи процесів в гідроагрегатах

Форма, структура та частотний склад сигналів, що формуються на виході сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенератора,

зумовлені комплексною взаємодією механічних, магнітних, гідродинамічних і термомеханічних процесів, що мають як детерміновані, так і випадкові складові. До сенсорів, що забезпечують реєстрацію таких параметрів, належать ємнісний сенсор повітряного проміжку, розташований попарно на торцях ротора під кутом 90° , та ємнісний сенсор биття валу, встановлений у зоні напрямних підшипників. Ці сенсори забезпечують спостереження за миттєвим радіальним положенням ротора, змінами кривини траєкторії руху валу, а також за локальними збуреннями кінематичного характеру, що виникають у процесі експлуатації.

Отже у загальному випадку вихідний сигнал кінематичного сенсора є суперпозицією детермінованих складових (гармоніки, синхронізовані з частотою обертання та її кратними) і випадкових компонент (шумові флуктуації, стохастичні деформації, ефекти турбулентності). Така структура сигналу обумовлює необхідність опису поведінки сенсорної системи за допомогою стохастичних математичних моделей. При цьому випадкові впливи трактуються як процеси типу «білий» або «кольоровий» шум, що моделюються за допомогою диференціальних рівнянь з випадковими збуреннями.

У загальному вигляді динаміку зміщень ротора, які фіксуються кінематичними сенсорами, можна описати системою стохастичних диференціальних рівнянь другого порядку [8]:

$$\begin{aligned} m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) &= F_{det}(t) + F_{stoch}(t), \\ m \ddot{y}(t) + c \dot{y}(t) + ky(t) &= G_{det}(t) + G_{stoch}(t), \end{aligned} \quad (3.1)$$

де $x(t), y(t)$ – радіальні зміщення ротора; m – приведена маса ротора; c – коефіцієнт демпфування; k – твердість фундаменту; $F_{det}(t), G_{det}(t)$ – детерміновані сили (магнітні, масові, гідравлічні гармонічні впливи); $F_{stoch}(t), G_{stoch}(t)$ – випадкові флуктуаційні впливи, які моделюються випадковими процесами типу Вінера, Орнштейна–Уленбека або іншими.

Таким чином, математичні моделі дозволяють описати кінематичні зміщення як реакцію складної електромеханічної системи на дію детермінованих та випадкових факторів, що є принциповим для побудови коректних

діагностичних ознак. Сформовані моделі забезпечують можливість прогнозування зміни характеристик сигналів у часі, оцінювання розвитку дефектів (ексцентриситету, порушення жорсткості підшипників, дисбалансу, деформацій статора тощо), визначення тенденцій зміни технічного стану та оцінювання ймовірності виникнення критичних ситуацій. Урахування стохастичної природи фізичних процесів дає змогу підвищити достовірність контролю, зменшити кількість хибних діагностичних рішень та забезпечити більш глибоке розуміння механізмів взаємодії складових гідрогенератора на всіх етапах його життєвого циклу.

3.1.1 Модель вихідного сигналу сенсору повітряного проміжку

З урахуванням (3.1) миттєве значення ємності $C(t)$ вихідного сигналу плоскопаралельного ємнісного сенсора повітряного проміжку у випадку відсутності руху, електрична ємність між електродом сенсора та ротором описується рівнянням[30]:

$$C(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d(t)}, \quad (3.2)$$

де ε_r – електрична стала; ε_0 – відносна діелектрична проникність повітря в проміжку; S – ефективна площа електрода; $d(t)$ – відстань між електродом та поверхнею ротора у момент часу t .

Величина $d(t)$ залежить від номінального повітряного проміжку d_0 та радіальних переміщень ротора $x(t)$ і $y(t)$. Для сенсора розташованого під кутом θ відносно осі ротора[60], маємо:

$$d(t) = d_0 + \Delta d(t) = d_0 - x(t) \cos \theta - y(t) \sin \theta \quad (3.3)$$

З урахуванням (3.2) (3.3) будемо мати:

$$C(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_0 + \Delta d(t)} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_0 - x(t) \cos \theta - y(t) \sin \theta}, \quad (3.4)$$

Отримана модель (3.4) зміни повітряного проміжку містить нелінійну залежність від переміщень ротора $x(t)$ і $y(t)$, які можуть містити детерміновану складову, яка описує профіль ротора (полюсів та міжполюсного проміжку), нестационарна та шумову складову (детально описані в наступному підрозділі на прикладі сигналу із ємнісного сенсора биття). Для лінеаризації моделі скористаємося тим, що величина повітряного проміжку є невеликою порівняно з діаметром розточення статора і значення повітряного проміжку між ротором та статором генератора в діаметрально протилежних точках мають відрізнятися один від одного не більше, ніж на $\pm 20\%$ їх середнього значення (рівного їх напівсумі) для ГГ, якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми [61], то величина максимальне зміщення ротора буде меншою за значення номінального проміжку, тобто:

$$\begin{aligned} |x(t)| &< d_0, \\ |y(t)| &< d_0, \end{aligned} \quad (3.5)$$

Враховуючи (3.5) розкид $\Delta d(t)$ значень радіальних зміщень ротора $x(t)$ і $y(t)$ значення $C(d_0 + \Delta d)$ використовуючи розкладу в ряд Тейлора в області нульових зміщень, визначається як:

$$C(d_0 + \Delta d) = C_0 + \left. \frac{\partial C}{\partial d} \right|_{d=d_0} \cdot \Delta d + O(\Delta d^2), \quad (3.6)$$

де $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_0}$ – початкове або номінальне значення ємності сенсора;

$\Delta d(t) = -x(t) \cos \theta - y(t) \sin \theta$; $O(\Delta d^2) \sim$ – члени вищих порядків малості, які виникають за розкладання функції в ряд Тейлора та є величинами другого порядку малості в формуванні $\Delta d(t)$.

З урахуванням того, що в (3.6):

$$\left. \frac{\partial C}{\partial d} \right|_{d=d_0} = \varepsilon_0 \varepsilon_r S \cdot \frac{\partial}{\partial d} \left(\frac{1}{d} \right) = -\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d^2} = -\frac{C_0}{d_0}. \quad (3.7)$$

або за відомих початкових значень C_0 та d_0 з урахуванням (3.7) вираз (3.2) для лінеаризованої моделі визначення $C(t)$ від зміни $\Delta d(t)$ отримаємо:

$$\begin{aligned}
C(t) &\approx C_0 - \frac{C_0}{d_0} \Delta d(t) = C_0 \left(1 - \frac{\Delta d(t)}{d_0} \right) = C_0 \left(1 + \frac{x(t) \cos \theta + y(t) \sin \theta}{d_0} \right) = \\
&= \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_0} \left(1 + \frac{x(t) \cos \theta + y(t) \sin \theta}{d_0} \right)
\end{aligned} \tag{3.8}$$

У випадку використання в якості вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) на основі мостових зрівноважених або напівзрівноважених кіл, перетворювач забезпечує реалізацію функції перетворення значення ємності від зміни відстані до заземленої поверхні контрольованого об'єкту у вихідну напругу у вигляді:

$$U(t) = k \cdot f(C(t)) \approx k \cdot f \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_0} \left(1 + \frac{x(t) \cos \theta + y(t) \sin \theta}{d_0} \right) \right) \tag{3.9}$$

де $f(\cdot)$ — характеристика вторинного вимірювального перетворювача; k — коефіцієнт перетворення вторинного вимірювального перетворювача.

З урахуванням, що для реалізації ВВП використовуються реальні аналогові та цифрові компоненти, то вихідний сигнал (3.9) на виході ВВП з урахуванням шумів $f_{noise}(t)$ ВВП запишеться, як:

$$\begin{aligned}
U_{out}(t) &= f(C(t)) + f_{noise}(t) = \\
&= k \cdot f \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d_0} \left(1 + \frac{x(t) \cos \theta + y(t) \sin \theta}{d_0} \right) \right) + f_{noise}(t)
\end{aligned} \tag{3.10}$$

В реальних умовах експлуатації на гідрогенераторах, як вже зазначалось раніше, на вихідний сигнал сенсорів впливає температура та вологість. Зміна температури впливає на показники ємнісного сенсора повітряного проміжку через зміну діелектричної проникності середовища (повітря із водяною парою) та термічна деформація конструктивних елементів (зміна номінального проміжку через теплове розширення сенсора). Для забезпечення високої точності вимірювань ці ефекти потрібно враховувати та компенсувати в реальному часі, тобто для виразу (3.5) отримаємо

$$C(t, T) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r(T) S(T)}{d_0(T) - \Delta d(t)}. \quad (3.11)$$

де $\varepsilon_r(T)$ – зміна діелектричної проникності повітря; $S(T) = S_0(1 + \alpha_s \Delta T)$ – ефективна площа електродів сенсора за температури T °C (температура калібрування або стандартні умови (наприклад, 20 °C)). Ця площа визначає величину електричного поля між електродами та безпосередньо впливає на ємність сенсора; S_0 – початкова або номінальна площа електродів за температури T °C.; $\Delta T = T - T_0$ – відхилення температури від номінального значення. Додатне значення означає нагрів, від’ємне – охолодження конструкції та/або охолоджуючого середовища; α_s – ефективний температурний коефіцієнт теплового розширення матеріалу електродів сенсору (враховує теплове розширення матеріалу електродів у двох ортогональних напрямках), тобто збільшення їх площі).

Зміна діелектричної проникності газового охолоджуючого середовища гідрогенератора залежить від міни діелектричної проникності суміші «повітря + водяна пара». У цьому разі, оскільки ємнісний сенсор повітряного проміжку формує вимірювальний сигнал за рахунок зміни електричної ємності, то будь-які зміни діелектричних властивостей середовища безпосередньо впливають на результат вимірювання. З цієї причини в математичній моделі сенсора необхідно враховувати залежність миттєвого значення відносної діелектричної проникності повітря ε_r від вологості в охолоджуючому газовому середовищі. Ця залежність описується, як [62]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^{\text{dry}} + \alpha_H(t), \quad (3.12)$$

де $\varepsilon_r^{\text{dry}}$ – діелектрична проникність сухого повітря за відносної вологості газового середовища близького до нуля (базове значення, що відповідає стандартним умовам та використовується як параметр калібрування сенсора. Для сухого повітря воно становить приблизно 1.0005–1.005 залежно від тиску та температури); α_H – коефіцієнт чутливості діелектричної проникності до

вологості, відображає швидкість зміни ε_r із збільшенням вологості на одиницю[63], тобто:

$$\alpha_H(t) = 1 + \frac{211}{T(t)} \left(P + \frac{48P_X(t)}{T(t)} H(t) \right) 10^{-6} \quad (3.13)$$

де $T(t)$ – абсолютна температура (в Кельвінах); P – тиск вологого повітря (в мм рт.ст.) за температури $T(t)$; $P_X(t)$ – тиск насиченої водяної пари при температурі T (в мм рт.ст.); $H(t)$ – миттєве значення відносної вологості повітря (у відсотках або частках одиниці), що визначається допоміжним сенсором вологості, встановленим у робочому об’ємі повітряного проміжку.

У реальних умовах роботи гідрогенератора циркуляція повітря в повітряному проміжку достатньо інтенсивна, що призводить до вирівнювання вологості в об’ємі. Завдяки цьому сенсор вологості можна встановлювати в довільному місці, і його покази будуть репрезентативними для всього об’єму газового середовища в повітряному проміжку між ротором та статором в гідрогенераторі.

Отримане за результатами експериментальних лабораторних досліджень або розрахунковий обчислень значення $H(t)$ використовується в моделі ємнісного сенсора задля корекції поточного значення ε_r , що дає змогу зменшити похибку вимірювання значення повітряного проміжку, а значить і визначення положення ротора, ексцентриситету або зміни радіального повітряного проміжку. Таким чином, урахування вологості є критичним елементом забезпечення високої точності та стабільності роботи системи контролю обертових вузлів генеруючого обладнання.

Враховуючи формули (3.10)-(3.12), отримаємо:

$$U_{out}(t, T, H) = k \cdot f \left[\begin{aligned} & \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r(T, H) C_0(T, H) \times \right. \\ & \left. \times \left(1 + \frac{x(t, T) \cos \theta + y(t, T) \sin \theta}{d_0} \right) + \right) + \\ & \left. + f_{noise_in}(t, T) \right] + \\ & + f_{noise_out}(t, T) \end{aligned} \quad (3.14)$$

або

$$U_{out}(t, T, H) = k \cdot f \left(\begin{array}{l} \varepsilon_0 \varepsilon_r (T, H) C_0 \times \\ \times \left(1 + \frac{x(t, T) \cos \theta + y(t, T) \sin \theta}{d_0} \right) + \\ + C_0 \alpha_S \Delta T(t) + C_0 \alpha_H \Delta H(t) + f_{noise_in}(t, T) \end{array} \right) + f_{noise_out}(t, T) \quad (3.15)$$

Програми для моделювання за отриманими формулами сигналу на виході ВВП сенсору повітряного проміжку представлено у Додатку Г.

3.1.2 Модель вихідного сигналу сенсору биття

В загальному вигляді сигнал з виходу ємнісного сенсору биття $C_X(d, t)$ є пропорційним зміні відстані $d(t)$ між поверхнею електродів сенсора та заземленою поверхнею валу у визначений момент часу t , тобто [64]:

$$C_X(d, t) = f(d(t)) \quad (3.16)$$

Для перетворення ємності $C_X(d, t)$ у відповідне значення електричної величини, наприклад напруги, використовують різні типи вторинних вимірювальних перетворювачів (ВВП). З метою зменшення дії зовнішніх факторів та зменшення масогабаритних параметрів вимірювачів їх ВВП, розмішують в безпосередній близькості до чутливих елементів сенсорів в спільному корпусі утворюючи таким чином ємнісний вимірювач [36, 65].

У ідеальному випадку ВВП забезпечує лінійне перетворення значення ємності у вихідну напругу:

$$U(d, t) = k \cdot (C_X(d, t) + C_{offset}) \quad (3.17)$$

де C_{offset} – константа, що залежить від схеми вторинного вимірювального перетворювача, k – коефіцієнт перетворення ВВП.

В реальності інформаційний сигнал на виході ВВП ємнісного вимірювача має нестаціонарний характер, тобто є поліперіодичним нестаціонарним випадковим процесом. Цей процес формується гармонічними складовими, які

мають пряму залежність від періоду обертання гідроагрегату, а також від наявних дефектів валу та його поверхні. Тому сигнал на виході ВВП крім основної гармоніки обертової частоти та кратній їй гармоніки, а також може містити інші гармонійні складові, які залежать від режиму роботи генератору[66] та додаткові імпульсні компоненти, що можуть виникати через дефекти та шуми різної природи походження. Приклад сигналу з виходу ВВП вимірювача биття валу з обертовою частотою 85,7 об/хв, наведено на рис.3.1.

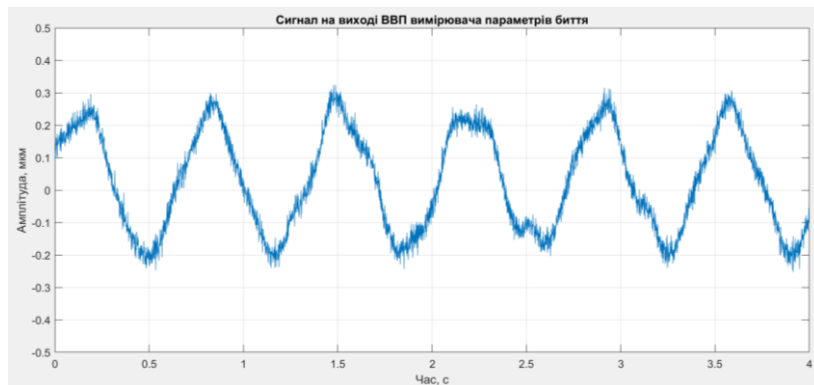


Рис.3.1 Приклад сигналу на виході ВВП вимірювача параметрів биття

У загальному випадку модель отриманого сигналу із виходу ВВП вимірювача биття валу може бути представлено наступною функцією:

$$C_X(t, d) = s(t, d) + \xi(t, d) + \varepsilon_{noise}(t) \quad (3.18)$$

де s - детермінована складова сигналу биття; ξ - нестационарна складова процесу сигналу биття; ε_{noise} - шумова складова сигналу биття.

Тоді вираз (3.17) з урахуванням (3.18) буде мати вигляд (рис.2.2):

$$U(d, t) = k \cdot (s(t, d) + \xi(t, d) + \varepsilon_{noise}(t) + C_{offset}) \quad (3.19)$$

Як видно із виразу (3.19) сигнал на виході ВВП ємнісного вимірювача параметрів биття валів потужних генераторів має детерміновані $s(t)$, нестационарні $\xi(t)$, а також шумові компоненти, які характеризують стан об'єкту [67, 68]. Детерміновані $s(t)$ та нестационарні $\xi(t)$ компоненти в такій моделі є незалежними, тобто їхній коефіцієнт кореляції Пірсона дорівнює 0. У цьому разі

детермінована складова $s(t)$ є періодичною функцією математична модель, якої має вигляд:

$$s(t) = s(t \pm nT) \quad (3.20)$$

де T – період; n - загальна кількість гармонійних складових, $n \in \mathbb{N} \dots$.

Періодичний сигнал (3.20) може бути представлений шляхом розкладання в ряд Фур'є у вигляді ряду елементарних гармонійних складових, які формують детерміновану гармонійну складову сигнал процесу биття валу, наступним чином:

$$\begin{aligned} s(t, d) &= \frac{d_0}{2} + d_1 \cos(j\omega_1 t + \varphi_1) + d_2 \cos(j\omega_2 t + \varphi_2) + \dots \quad z(j\omega_n + \varphi_n) = \\ &= \frac{d_0}{2} + \sum_{i_s=1}^n d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t + \varphi_{i_s}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

де $i_s = 1 \dots n_s$ - номер гармонійної складової сигналу биття, $i_s, n_s \in \mathbb{N} \dots$ };

d_0 - постійна складова, яка пропорційна постійній складовій відстані від електродів сенсора до поверхні валу; d_{i_s} – амплітуда i -ї гармонічної складової, є пропорційна відстані від електродів сенсора до поверхні валу, яка виникає у результаті наявності періодичних процесів, які призводять до зміни просторового положення поверхні валу відносно поверхні електродів сенсору; $\omega_{i_s} = 2\pi f_{i_s}$ – кутова частота (рад/с) i -ї гармонічної складової; φ – початкова фаза i_s -ї складової сигналу биття.

Сигнал $s(t, d)$ може бути амплітудно модульованим через наявність низькочастотної, високочастотної або іншої гармоніки, кутова частота якої ω_m відповідає частоті детермінованого коливання, спричиненого наявністю дефекта у конструктивному елементі генератора на відрізку часу спостереження $t > 0$:

$$s(t, d) = (1 + k_m \sin(\omega_m t)) \left(\frac{d_0}{2} + \sum_{i_s=1}^n d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t + \varphi_{i_s}) \right) \quad (3.22)$$

де k_m – коефіцієнт модуляції.

У разі наявності множини дефектів вираз (3.22) буде мати вигляд:

$$s(t, d) = \left(1 + \sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m} \sin(\omega_{i_m} t) \right) \left(\frac{d_0}{2} + \sum_{i_s=1}^{n_s} d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t + \varphi_{i_s}) \right) \quad (3.23)$$

де k_{i_m} – коефіцієнт модуляції i_m -го коливання; $i_m = 1 \dots$ – номер модуляційного коливання, $i_m, n_m \in \mathbb{N} \dots$.

Нестационарна складова $\xi(t)$ є періодично корельованим випадковим процесом, яка в залежності від випадків виникнення та розвитку дефектів у обладнанні може бути обумовлена:

– одиночним короткотривалим імпульсом форма якого визначається детермінованою функцією $u(t)$ дія якої в системі призводить до виникнення випадкового процесу $y(t)$ (виникнення тріщини, обрив кріплення, одиночний удар, тощо);

– набором із $m \in \mathbb{N}$ періодично корельованих реалізацій короткотривалих імпульсів $\sum_{k=0}^m u_k(t)$ з визначними інтервалами між імпульсами або інтервалами між імпульсами із незалежними один від одного випадковими значеннями часу, дія яких призводить до виникнення періодично корельованих випадкових коливань у вигляді алгебраїчної суми $\xi(t) = \sum_{k=0}^m y_k(t)$ (періодичний контакт елементів конструктивних вузлів з іншими поверхнями);

– одночасним набором із одиночних та періодично корельованих імпульсів.

У більшості випадків форма одиночного короткотривалого імпульсу або окремої реалізації k -го короткотривалого імпульсу $u_k(t_{2n,k}, t_{2n+1,k})$ є відомою ($n, k \in \mathbb{N}$), а момент його початку $t_{2n,k}$ ($k, n \in \mathbb{N}$, закінчення $t_{2n+1,k} = t_{2n,k} + \Delta t_k$ та Δt_k тривалість, а також амплітуда є випадковими величинами. (використання непарних індексів необхідно для опису випадків, коли відбувається перекриття k -ї реалізації одиночного короткотривалого імпульсу з деякими або усіма наступними або попередніми імпульсами).

У загальному випадку детермінована функція $g(t)$, яка визначає час існування вхідного процесу породженим одиночним короткотривалим імпульсом, який поза межами інтервалу (t_{2n}, t_{2n+1}) не існує, тобто тотожно дорівнює нулю:

$$g(t) = \begin{cases} g(t) & \text{за умови, } t_{2n} \leq t \leq t_{2n+1} \\ 0 & \text{за умови, } 0 < t < t_{2n}, t_{2n+1} < t < \infty \end{cases} \quad (3.24)$$

При цьому будь-який одиночний короткотривалий імпульс нестационарної складової $\xi(t)$ отримуються множенням детермінованої функції $g_k(t)$ на її випадкове значення $\zeta_k(t)$ із одночасним зсувом в часі на значення $t_{2n,k}$ і діленням на Δt_k :

$$u_k(t) = \zeta_k(t) g\left(\frac{t - t_{2n,k}}{\Delta t_k}\right) \quad (3.25)$$

де $\zeta_k(t)$ - є вагомим коефіцієнтом, який визначає характеристики одиночного короткотривалого імпульсу або окремої реалізації k -го короткотривалого імпульсу та його статистичні характеристики повторюваності, які визначаються режимом роботи, характеристиками дефекту та геометричними розмірами вузла в якому він виник.

З урахуванням принципу суперпозиції нестационарна складову $\xi(t)$ на виході ВВП у випадку одиночного короткотривалого імпульсу визначається, як:

$$y_k(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_k(\tau) h_k(t, \tau) dt \quad (3.26)$$

де $h_k(t, \tau)$ - реакція системи на вхідний сигнал $u_k(t)$ в момент часу t ; τ - момент часу виникнення сигналу $u_k(t)$ (для одиночного імпульсу $\tau = t_{2n}$).

У фізичній системі з постійними параметрами на інтервалі часу існування сигналу $y_k(t)$, породженого реакцією на вхідний процес $u_k(t)$, сигнал на виході ВВП буде дорівнювати нулю до початку дії вхідного сигналу $u_k(t)$ на систему в момент часу $t < \tau$, тобто:

$$h(t, \tau) = 0 \quad (3.27)$$

у момент часу $t \geq \tau$, реакція $h_k(t, \tau)$ системи на вхідний сигнал $u_k(t)$ залежить тільки від часу існування сигналу реакції в системі, тобто від значення $t - \tau$:

$$h(t, \tau) = h(t - \tau) \quad (3.28)$$

З урахуванням (3.27) та (3.28) для системи з постійними параметрами рівняння (3.26) буде мати наступний вигляд:

$$y_k(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_k(\tau) h_k(t - \tau) dt \quad (3.29)$$

Враховуючи, те що для моменту часу $t < 0$, коли система знаходиться в спокої $h_k(t) = 0$ рівняння (3.29) запишеться як:

$$y(t) = 0 \quad (3.30)$$

для часу $t > 0$ існування сигналу, рівняння (2.29) для випадку одиночного короткотривалого імпульсу або окремої реалізації k -го короткотривалого імпульсу буде мати наступний вигляд:

$$y_k(t) = \int_0^t u_k(\tau) h_k(t - \tau) dt \quad (3.31)$$

Підставляючи (3.32) в (3.38) отримаємо:

$$y_k(t) = \int_0^t \zeta_k(t) g\left(\frac{t - t_{2n,k}}{\Delta t_k}\right) h_k(t - \tau) dt \quad (3.32)$$

Для визначеної послідовності імпульсів рівняння нестационарна складову $\xi(t)$ на виході ВВП з урахуванням (3.26) та (3.32) буде представляти аналітичну суму у вигляді:

$$\xi^{(\Sigma)}(t) = \sum_{k=1}^m y_k(t) = \sum_{k=1}^m \left(\int_0^t \zeta_k(t) g\left(\frac{t - t_{2n,k}}{\Delta t_k}\right) h_k(t - \tau) dt \right) \quad (3.33)$$

Так, як функція є криволінійною $u_k(t)$, а реакція $h_k(t, \tau)$ системи на її дію також є криволінійною функцією, то для обчислення інтегралу в виразі (3.40) в гільбертовому просторі, скористаємося розкладом для інтегралів Рімана:

$$\xi^{(\Sigma)}(t) = \sum_{k=1}^m \left(\lim_{n_i \rightarrow \infty} \sum_{n_i=0}^s (\zeta_{n_i,k} \cdot g_{n_i} \cdot h_{n_i,k} \cdot \Delta t_{n_i}) \right) \quad (3.34)$$

Враховуючі (3.23) та (3.34) вираз (3.18) може бути записаний, як:

$$U(d, t) = k \cdot \left(\begin{aligned} & \left(1 + \sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m} \sin(\omega_{i_m} t_{i_t}) \right) \sum_{i_s=1}^{n_s} d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t_{i_t} + \varphi_{i_s}) + \\ & + \sum_{k=1}^m \left(\lim_{n_t \rightarrow \infty} \sum_{n_i=0}^s (\zeta_{n_i, k} \cdot g_{n_i} \cdot h_{n_i, k} \cdot \Delta t_{n_i}) \right) + \varepsilon_{noise}(t) + C_{offset} \end{aligned} \right) \quad (3.35)$$

У разі використання в структурі вимірювача параметрів биття валів ВВП з дискретним виходом [66], сигнал з виходу ємнісного вимірювача буде задаватися послідовністю відстаней d_0, d_1, \dots, d_i між поверхнями електродів сенсора биття і валом, які існують у момент часу t_0, t_1, \dots, t_i . У цьому разі задля реалізації перетворення за виразом (3.35), на виході ВВП встановлюється АЦП. Частота дискретизації f_d АЦП зазвичай обирається використовуючи теорему Котельникова, як подвійне значення максимальної граничної частоти f_{\max} інформаційної складової сигналу биття, що контролюється системою контролю та моніторингу гідроагрегату. Однак застосування теореми Котельникова задля визначення максимальної граничної частоти f_{\max} в даному випадку може призводити до виникнення похибок в оцінці складових виразу (3.42) сигналу биття через необмеженість спектрів реальних сигналів та неможливість створення ідеального фільтра [69-75]. Також застосування теореми не дозволяє визначати стохастичні характеристики інформаційних сигналів дискретизації за наявності ширококугових перешкод, крім того, вносяться додаткові похибки через обмеження часу спостереження інформаційного сигналу. Інтервал між дискретними відділками $\epsilon \Delta t_d$ в деякій мірі ϵ невизначеним, оскільки гранична частота f_{\max} визначається наближено, що у свою чергу за підвищеного значення $f_d > f_{\max}$ може призвести до надмірної надлишковості даних та високих вимог до апаратури. Зниження частоти дискретизації $f_d < f_{\max}$ призводить до метрологічної недостовірності результатів вимірювання, тобто до втрати метрологічної інформації про об'єкт спостереження. Для визначення оптимального значення f_d , як показано в [76] використовується кореляційний метод. Цей метод заснований на тому, що автокореляційна функція сигналу та його спектр пов'язані між собою формулою Віннера-Хінчина [73]. Перевага методу у тому, що він поширюється на

сигнали з необмеженим спектром [77], а значення f_d визначається за величиною максимальної частоти автокореляційної функції сигналу. У цьому разі значення тривалості для автокореляційної функції сигналу, тобто ширина частотного спектру сигналу биття валу з виходу первинного вимірювального перетворювача (ємнісного сенсору) на вході АЦП модуля збору і передачі даних (рис.3.2) визначається частотними характеристиками аналогових перетворювальних ланок ВВП, в якості якого найбільш доцільним для вимірювання швидкозмінних процесів таких, як параметри биття є застосування перетворювачів ємність-напруга (ємність-струм) компенсаційно-мостового типу. У цьому разі система автоматичного зрівноважування компенсаційно-мостового вимірювача, утворена послідовно включеним підсилювачем ОУ, фазочутливим детектором ФД та інтегратором Інт, зводить сигнал на вході підсилювача ОУ до нуля. Основною перетворювальною ланкою, яка має найменшу швидкодію і таким чином відповідає за динамічні характеристики вимірювача є інтегратор Інт. Тому для визначення АКФ сигналу на вході АЦП модуля збору і передачі даних необхідно враховувати τ_{int} інтегратора.

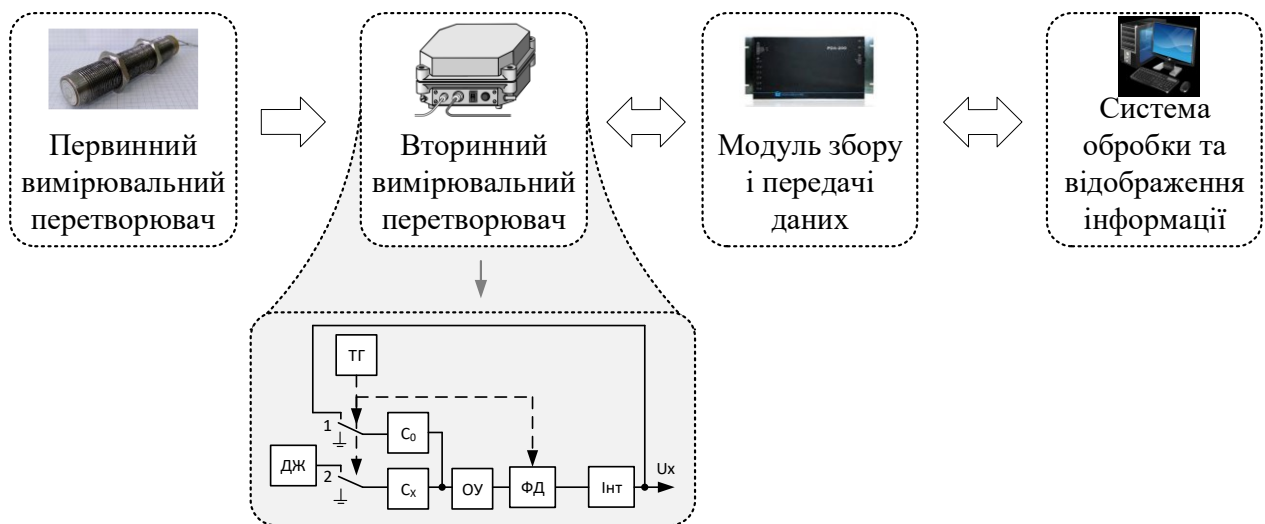


Рис.3.2 Схема інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів биття валів: C_x – ємнісний сенсор; C_0 – зразковий конденсатор; 1, 2 – комутатори; ДЖ – джерело напруги; ОУ – підсилювач; ФД – фазочутливий детектор; Інт – інтегратор; ТГ – тактовий генератор імпульсів

З урахуванням наведеного вираз (3.35) у дискретній формі запишеться як:

$$U(t_i, d_i) = k \cdot \left[\left(1 + \sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m} \sin(\omega_{i_m} t_i) \right) \sum_{i_s=1}^{n_s} d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t_i + \varphi_{i_s}) + \sum_{k=1}^m \left(\sum_{n_i=0}^s (\zeta_{n_i, k} \cdot g_{n_i} \cdot h_{n_i, k} \cdot \Delta t_{n_i}) \right) + \varepsilon_{noise, i_i} + C_{offset} \right] + \varepsilon_{d, i_i} \quad (3.36)$$

де $\varepsilon_d = 2^{-n_{ADC}-1} \cdot 100\%$ – похибка квантування; n_{ADC} - розрядність АЦП.

Якщо в якості мікроконтролера використати мікросхему сімейства STM32F10x, а саме STM32F103, який забезпечує кращу в класі 32-бітних МК продуктивність та містить 12 розрядний АЦП, то $\varepsilon_d = 2^{-13} \cdot 100\% = 1,22 \cdot 10^{-3}\%$. З урахуванням того, що весь діапазон вимірювання становить від 0,3 до 2,3 мм, що на виході ВВП відповідає зміні рівня сигналі від 0 до 3,3 В, то будемо мати, що $\varepsilon_d = 0.0004026$ В або в значеннях одиниць відстані $\varepsilon_d = 0.000244 = 2,4 \cdot 10^{-6}$ мм. З урахуванням того, що у відповідності з вимогами до точності вимірювання параметрів биття валів 10% для нижньої межі 0,3 мм будемо мати, що похибка вимірювання не повинна перевищувати значення $\delta_{roundout} = 0.03$. У цьому разі маємо, що $\varepsilon_d \ll$, тобто враховуючі величину малості ε_d , можна в першому наближенні стверджувати, що вплив на результуючий сигнал похибки АЦП є незначним, тобто:

$$\varepsilon_d \rightarrow 0 \quad (3.37)$$

Шумова складова сигналу биття $\varepsilon_{noise}(t)$ обумовлюється багатьма параметрами, головними серед яких є завадостійкість по відношенню до електромагнітних наведень робочого середовища генератора на чутливі елементи сенсора в залежності від режиму роботи, флікер та тепловими шумами електронних компонентів первинних та вторинних вимірювальних перетворювачів інформаційно-вимірювального каналу та тощо. Існує кілька моделей шумів, які дозволяють врахувати різні аспекти впливів і нерегулярностей, що виникають у реальних обертових механізмах механічних систем генераторів.

Найбільш поширеною моделлю для імітації загального випадкового шуму, викликаного такими факторами, як незначні квазістаціонарні вібрації та електромагнітні перешкоди, є білий шум. Це зумовлено тим, що для білого шуму характерний рівномірний розподіл спектральної густини потужності по всьому частотному спектру сигналу із середнім математичним очікуванням:

$$\overline{M}(\eta(t)) = 0 \quad (3.38)$$

де $\eta(t)$ – значення білого шуму в момент часу t .

У випадку, коли спектральна густина потужності шумової складової $\varepsilon_{noise}(t)$ сигналу $U(t, d)$ залежить від частоти, наприклад, через нерівномірний знос викликаний силами тертя або структурні зміни вузлу, такий шумовий процес найбільш повно описується кольоровим стохастичним шумом. Кольоровий шум характеризується нескінченно розділеними законами розподілу, включаючи закони Гауса та Пуассона. Для виділення певного типу кольорового шуму (рожевий або фліккер) шум із спектральною щільністю потужності $1/f$, броунівський (червоний, «коричневий») шум із спектральною щільністю потужності $1/f^2$ та інші) із шумового сигналу $\varepsilon_{noise}(t)$ застосовують лінійні фільтри, що дозволяє оцінити залежність ймовірнісних характеристик сигналу від наявності дефектів в вузлах генератора.

З урахуванням, того що в якості вторинного вимірювального перетворювача для ємнісного сенсора найбільш оптимальним є використання компенсаційно-мостових вимірювачів, то інформаційний сигнал визначається спектральною полозою вимірювального сигналу, забезпечуючи тим самим високе співвідношення сигнал/завада. Результати експериментальних досліджень підтвердили, що вплив зовнішніх та внутрішніх шумів на вихідний сигнал ВВП є незначним[54], тобто:

$$\varepsilon_{noise} \rightarrow 0 \quad (3.39)$$

Тому для визначення змін ймовірнісних характеристик шумової складової сигналу $\varepsilon_{noise}(t)$ є необхідним застосовувати інші типи сенсорів та відповідних вимірювальних перетворювачів, наприклад акустичні, які розміщуються в різних

точках генератора для збору даних про рівень шуму, який може бути викликаний, наприклад, вібрацією, механічними несправностями або іншими гідравлічними проблемами.

Додаткові складові C_{offset} та d_0 є адитивними складовими виразу (3.36), які компенсуються під час початкового налаштування інформаційно-вимірювального каналу із використанням тарувальних поставок товщиною d_{cal} та $2 \cdot d_{cal}$ під час юстування вимірювальних перетворювачів разом із ємнісними сенсорами, тобто:

$$C_{offset} \rightarrow 0 \quad (3.40)$$

$$d_0 \rightarrow 0 \quad (3.41)$$

З урахуванням (2.37)-(2.38) інформаційна складова виразу (2.31) запишеться як:

$$U(t_i, d_i) = k \cdot \left[\left(1 + \sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m} \sin(\omega_{i_m} t_i) \right) \sum_{i_s=1}^{n_s} d_{i_s} \cos(j\omega_{i_s} t_i + \varphi_{i_s}) + \sum_{k=1}^m \left(\sum_{n_i=0}^s (\zeta_{n_i,k} \cdot g_{n_i} \cdot h_{n_i,k} \cdot \Delta t_{n_i}) \right) \right] \quad (3.42)$$

Для подальшого аналізу та деталізації структури інформаційного сигналу параметрів биття поверхонь валів потужних генераторів, як показано в [68] їх можливо розділити на детерміновану та стохастичну складову визначивши період нестаціонарності (базової частоти) детермінованих коливань. Розділення сигналу на детерміновану та стохастичну складову за допомогою визначення періоду нестаціонарності є складним процесом, який включає аналіз часових рядів або сигналів для виявлення їх характерних компонентів. Детермінована складова зазвичай відповідає регулярним або передбачуваним компонентам сигналу, тоді як стохастична складова представляє випадкові або непередбачувані флуктуації.

Детерміновані складові вібрацій генератора залежать від конструкції та типу генератора, можуть впливати на вібраційний стан валу та можуть бути присутніми у вихідних сигналах сенсорів параметрів биття. У більшості випадків

детерміновані складові сигналу $U(t, d)$ визначаються гідравлічними, механічними, а також силами магнітного тяжіння. Кожна з цих сил викликає в генераторі детерміновані або квазидетерміновані коливання основні частоти яких кратні частоті обертання.

Тому, для ефективного визначення періоду нестационарності, як показано в [78] найбільш ефективним є використання тригонометричної інтерполяція на основі методу найменших квадратів (МНК), яка розраховує базові точки для даних інформаційного часового ряду на основі пошуку максимуму правдоподібності із застосуванням тригонометричних функцій. Це підхід, дозволяє знайти гармонійні компоненти сигналу, які найкраще його описують у сенсі мінімізації середньоквадратичної похибки.

Для звуження кількості ймовірних частот гармонійних компонентів, які формують детерміновану складову сигналу, необхідно детально проаналізувати природу виникнення вібрацій, що спричиняються гідравлічними, механічними силами та силами магнітного тяжіння. Адже, у генераторі в процесі його роботи можуть відбуватися коливання не тільки на основній частоті, але й на кратних частотах, тобто на гармоніках, а також на частотах, пов'язаних із механічними резонансами конструкції, дією електромагнітних сил та динамічними невідповідностями. Такі коливання можуть виникати внаслідок різних факторів, таких як механічні дефекти конструкції, невідповідність ротора, зношені підшипники, або ж особливості роботи системи збудження. Крім того, можливі вібрації, що виникають в результаті нерівномірного зносу елементів механізму або через структурні особливості конструкції. Ці фактори можуть значно впливати на спектральний склад сигналу, збільшуючи його складність та утруднюючи точність вимірювань. Тому розуміння природи цих коливань і врахування всіх можливих джерел вібрацій є ключовими для забезпечення коректного аналізу та інтерпретації отриманих даних.

Колівання, викликані гідравлічними силами, передбачувано призводять до виникнення коливань з частотами, кратними частоті:

$$f_z = n_{GA} \cdot z / 60 \quad (3.43)$$

де n_{GA} – частота обертання генератора; z – кількість лопатей робочого колеса або лопаток.

Основними причинами механічних коливань є відцентрові сили, які виникають через невірноваження обертових мас, а також пружних сил, що виникають через порушення геометрії конструктивних елементів (викривлення валу, деформації ротора, розточення статора та інше).

Відцентрова сила невірноваження обертових мас визначається наступним чином

$$F_{UB} = m \cdot \omega_R^2 \cdot d_O = m \cdot d_O \cdot (2\pi f_R)^2 \quad (3.44)$$

де m – невірноважена маса; $\omega_R = 2\pi f_R$ – кутова частота обертання; d_O – відстань від центру вісі невірноваження до вісі обертання.

Частота обертання вектора відцентрової сили невірноваження F_{UB} є рівною частоті обертання:

$$f_R = n_{GA} / 60 \quad (3.45)$$

Пружні сили, у свою чергу, під час порушенні геометрії валопроводів можуть містити змінні складові коливань з частотами f_R та $2f_R$.

Для гідрогенераторів вертикальної конструкції, в яких використовується опорного багато-сегментний підшипник, в наслідок нерівності поверхні сегментів, виходу з ладу системи змащування, перекоосу валу та тощо призводять до появи коливань з частотами, кратними частоті:

$$f_{Foot} = n_{GA} \cdot k / 60 \quad (3.46)$$

де k – кількість сегментів підшипника.

На основі проведеного аналізу процесів, які виникають під впливом гідравлічних, механічних та магнітних сил у гідрогенераторах, можна зробити висновок, що основні коливання зосереджуються на обертовій та полюсній частотах, а також на кратних їм гармоніках. Отже, у синхронному генераторі полюсна частота збігається з частотою електричної мережі, що робить її визначальним чинником у спектральному складі вібраційних процесів для

врахування дії яких на сенсори кінематичних характеристик обертових вузлів генеруючого обладнання в системі використовуються вібраційні сенсори.

Програми для моделювання за отриманими формулами сигналу на виході ВВП сенсору биття представлено у Додатку Г.

3.2 Модель вихідного сигналу сенсору магнітного поля в повітряному проміжку

В робочих режимах експлуатації гідрогенераторів на його коливальні процеси, окрім механічних та гідравлічних сил, впливають сили магнітного тяжіння, що виникають між конструктивними елементами ротора та статора. При цьому на вихідні характеристики безпосередньо впливає не саме значення величини нерівномірності повітряного зазору, а саме асиметричний розподіл магнітного поля на різних полюсах ротора внаслідок виникнення дефекту. Природа виникнення дефекту може мати різне походження і бути пов'язаною з факторами механічного [79-92] (дефект підшипників, небаланс ротора), гідравлічного [93-101] (несиметричні сили на робочому колесі турбіни) та електромагнітного [102-108] (тангенціальні складові сил магнітної взаємодії, які деформують осердя статора, перегрів осердя та обмотки статора, тощо) походження, а також може виникнути в результаті несиметричності роботи генератора на несиметричне навантаження. Тому для ідентифікації дефекту і природи його походження є необхідним окрім контролю повітряного зазору, ще здійснення контролю величин магнітних потокочеплень між полюсами ротора та статора.

У загальному виді сила магнітного тяжіння в будь-якій точці φ повітряного проміжку між ротором та статором генератора розраховується, як [109]:

$$F_{Mag}(\varphi, t) = \frac{S}{2\mu_0} B^2(\varphi, t) \quad (3.47)$$

де B – індукція в точці повітряного проміжку між ротором та статором з кутовою координатою φ відносно нерухомої осі (вісь лівий берег-правий берег або вісь

верхній б'єф-нижній б'єф) на статорі; S – площа перерізу повітряного проміжку; μ_0 – магнітна проникність вакууму.

Значення індукції $B(\varphi, t)$ для синхронного багатополісного гідрогенератора в гладкому повітряному проміжку шириною d_{vz} (за умови відсутності або незначного значення асиметрії, а також без врахування магнітного опору заліза ротора та статора), в якому магніторушійна сила полюсів дорівнює F_{MPC} у відповідності із законом повного току у довільній точці φ буде дорівнювати:

$$B(\varphi, t) = \frac{F_{MPC}(\varphi, t)}{d_{vz}(\varphi, t)} \quad (3.48)$$

В обертовій системі координат, через час t' ротор зміститься в точку φ' кутова координата, якої дорівнює:

$$\varphi' = \varphi - \omega_R t \quad (3.49)$$

Тоді значення повітряного проміжку $d_{vz}(\varphi)$ між полюсом в точці φ розраховується, як:

$$d_{vz}(\varphi) = R(\varphi) - R'(\varphi) \quad (3.50)$$

де $R(\varphi)$ – радіус статора в точці з координатою φ ; $R'(\varphi)$ – радіус ротора в точці з координатою φ .

В реальних конструкціях індукції B вздовж повітряного проміжку є нерівномірною для забезпечення гармонійної зміни ЕРС в обмотці статора. Це забезпечується застосування меншого діаметру для полюсів ротора чим для розточення осердя. В цьому разі величина повітряного проміжку поступово збільшується від середини башмака полюса до його країв [110], а проникність магнітного поля змінюється, як показано на рис. 3.3.

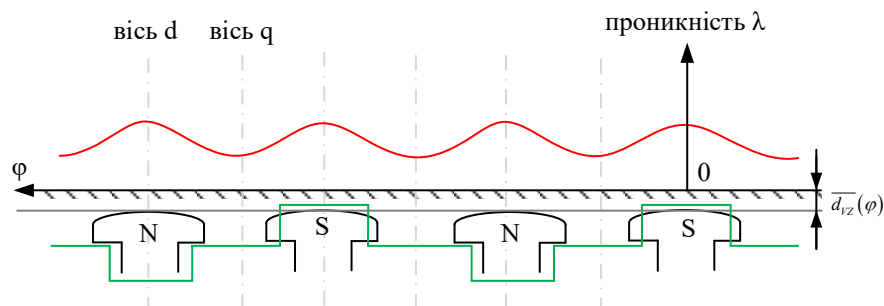


Рис. 3.3 Розподіл магнітного поля в повітряному проміжку

Потенціал магнітного поля в повітряному проміжку при використанні тих же опорних координат може бути виражений як:

$$f(\varphi, t) = \sum_i^{\infty} F_{MPC} \cos k \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \varphi - \varphi_k \right) \quad (3.51)$$

де φ_k – k -та гармоніка фази магнітного потенціалу; k – непарне число.

У нормальних умовах, без урахування тангенційної щільності магнітного потоку, радіальна щільність магнітного потоку в повітряному проміжку можна виразити формулою:

$$\begin{aligned} B(\varphi, t) &= f(\varphi, t) \cdot \lambda_0(\varphi, t) = \\ &= \frac{\Lambda_d + \Lambda_q}{2} \sum_i^{\infty} F_{MPC} \cos k \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \varphi - \varphi_k \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_k^{\infty} \sum_i^{\infty} F_{MPC} \Lambda_{2i} \left\{ \begin{array}{l} \cos \left[(k + 2i) \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \varphi \right) - k \varphi_k \right] + \\ \cos \left[(k - 2i) \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \varphi \right) - k \varphi_k \right] \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (3.53)$$

З (3.53) видно, що за нормальних умов густина магнітного потоку в повітряному проміжку містить лише непарні гармоніки, а саме фундаментальну частоту та кратні ($k \pm 2i$), саме тому досягти повністю гармонійного розподілу B такими конструктивними методами не вдається, тому в осерді статора індуються основні та вищі гармоніки ЕРС відповідно. Враховуючі, що ЕРС утворене вищими гармонійками становить величину другого порядку малості, то в подальших розрахунках будемо враховувати лише основну гармоніку ЕРС. Відмінність реального розподілу B від прийнятого для розрахунків розподілу основної гармоніки поля збудження B_{fm1} до дійсного максимального значення поля збудження B_{fm} позначають коефіцієнтом форми поля збудження k_f та розраховують за наступним співвідношенням

$$k_f = \frac{B_{fm1}}{B_{fm}} \quad (3.54)$$

Величина коефіцієнта k_f залежить від значень максимального та мінімального повітряних проміжків та конструктивних параметрів полюса, які

впливають на форму поля. За замовчуванням значення коефіцієнта k_f обирається в діапазоні значень від 0,95 до 1,15.

Якщо через \overline{R}_{rot} та \overline{R}'_{st} визначити середні значення радіусу розточення статора та поверхні огинаючої полюсів ротора, а через r_m та r'_n деякі малі девіації значень \overline{R}_{rot} та \overline{R}'_{st} (викликаних конструктивними параметрами полюсів ротора та розточення статора) в залежності від кутової координати φ' , то отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} R(\varphi) = \overline{R}_{rot} + \sum_1^{\infty} r_m \cos(m\varphi + \psi_m) \\ R'(\varphi) = \overline{R}'_{st} + \sum_1^{\infty} r'_n \cos(n\varphi + \psi'_n) \end{cases} \quad (3.55)$$

де ψ_m та ψ'_n випадкові величини.

Якщо магніторушійну силу полюсів ротора F_{MPC} представити через періодичну послідовність:

$$F_{MPC}(\varphi) = \sum_1^{\infty} F_{MPC,l} \cos(l\varphi + \psi_l) \quad (3.56)$$

то з урахуванням співвідношень (3.48), (3.50) та (3.53) вираз (3.47) прийме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} F_{Mag}(\varphi, t) &= \frac{S}{2\mu_0} \left(\frac{F_{MPC}(\varphi, t)}{R(\varphi) - R'(\varphi)} \right)^2 = \\ &= \frac{S}{2\mu_0} \left(\frac{\sum_1^{\infty} F_{MPC,l} \cos(l\varphi + \psi_l)}{\overline{R}_{rot} + \sum_1^{\infty} r_m \cos(m\varphi + \psi_m) - \overline{R}'_{st} - \sum_1^{\infty} r'_n \cos(n\varphi + \psi'_n)} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.57)$$

де $F_{MPC,l}$ – амплітуда $F_{MPC,l}$ гармонічної складової магніторушійну силу полюсів ротора; m та n – коефіцієнти, які визначають просторову кратність гармонійних складових форм статора та ротора.

З урахуванням того, що середнє значення повітряного проміжку може бути отримане, як

$$d_{VZ,0} = \overline{R_{rot}} - \overline{R'_{st}} \quad (3.58)$$

то співвідношення (2.55) з урахуванням (2.56) буде мати наступний вигляд:

$$F_{Mag}(\varphi, t) = \frac{S}{2\mu_0} \left(\frac{\sum_1^{\infty} F_{MPC,l} \cos(l\varphi + \psi_l)}{d_{VZ,0} + \sum_1^{\infty} r_m \cos(m\varphi + \psi_m) - \sum_1^{\infty} r'_n \cos(n\varphi + \psi'_n)} \right)^2 \quad (3.59)$$

В ідеальному випадку, коли статор та ротор мають правильні геометричні форми, магніторушійні сили всіх полюсів однакові і дорівнюють $F_{MPC,p}$, а у повітряному проміжку між статором та ротором присутня тільки основна складова магніторушійної сили, частота якої залежить від кутової частоти обертання ω_R та кількості пар полюсів, тобто $p=l$, то вираз (3.59) після нескладних тригонометричних перетворень буде мати вигляд:

$$F_{Mag}(\varphi, t) = \frac{S}{2\mu_0} \left(\frac{F_{MPC,p} \cos(p\varphi - \omega t)}{d_{VZ,0}} \right)^2 = \frac{S}{2\mu_0 d_{VZ,0}^2} (1 - \cos(2p\varphi - 2\omega t)) \quad (3.60)$$

Як видно з формули (3.58) вона містить змінну складову основної полюсної частоти 2ω .

З урахуванням (3.60), індуковану напругу на виході індукційний перетворювача розташованого в повітряному проміжку для довільної n -ї гармоніки магнітного поля розраховується, як:

$$\Delta e_n = 4f_n \tau_n l \cdot \sin \frac{yn\alpha}{2} F_{Mag}(\varphi, t) \quad (3.61)$$

де l – ефективна довжина шпильки, τ_n – відстань між двома магнітними полюсами вздовж дуги розташування шпильок, y – крок сенсорної котушки, а α – електричний кут кроку пази.

Підставивши (3.53) в (3.61) будемо мати вираз для визначення наведеної напруги на котушці сенсора для n -ї гармоніки магнітного поля:

$$\Delta e_n = 4f_n \tau_n l \sin \frac{yn\alpha}{2} \times (b_{0n}(x,t) + \left. \begin{aligned} & \left[\sin \left[\left(k + \frac{v}{p} \right) \omega t - \left(k + \frac{v}{p} \right) \frac{\pi}{\tau} x - k\varphi_k \right] - \right. \\ & \left. \left[\sin \left[\left(k - \frac{v}{p} \right) \omega t - \left(k - \frac{v}{p} \right) \frac{\pi}{\tau} x - k\varphi_k \right] \right] \right\} \quad (3.62) \end{aligned} \right)$$

Формула (3.62) демонструє, що за наявності дефектів асиметрії магнітного поля в повітряному проміжку між статором та ротором індукована напруга сенсорної котушки буде містити $n(k \pm v/p)$ -ті часткові гармоніки. Амплітуди цих гармонік залежать від умов роботи генератора, кроку сенсорної котушки у та додаткової проникності Λ_{sv} .

Проведення кореляційного аналізу інформаційних сигналів, сформованих ємнісними сенсорами повітряного проміжку та додатковим сенсором у вигляді витка, дозволяє підвищити достовірність і точність ідентифікації дефектів механічної й електромагнітної природи, що спричиняють зміну механічних і магнітних характеристик повітряного проміжку та параметрів вигину вала.

3.3 Сенсор мітки кута повороту валу

Сенсор мітки кута повороту валу (тахометр) виконує ключову функцію синхронізації у системі контролю кінематичних характеристик. Конструктивне виконання сенсора кутової мітки може реалізовуватися на основі різних фізичних принципів, зокрема ємнісного, магніторезистивного, індукційного та оптичного. У задачах високоточного вимірювання кінематичних параметрів генераторного обладнання доцільним є застосування сенсорів, що забезпечують підвищену роздільну здатність та мінімальну похибку синхронізації. Найбільш відповідними цим вимогам є оптичні та ємнісні перетворювачі. Останні за рахунок їх більш низької вартості знаходять більш широке застосування в системах контролю. Основне призначення тахометрів полягає в генерації опорного імпульсу (мітка), який використовується в системі контролю для:

– запуск циклу вимірювань (фронт вихідного сигналу сенсора мітки кута використовується для тригерування (запуску) циклу синхронізації збору даних та вимірювань інших сенсорів в системі контролю. Це гарантує, що кожне наступне вимірювання буде проводитися в інтервалі одного повного оберту валу ротора, забезпечуючи точну прив'язку даних до кутового положення);

– визначення частоти обертання (інтервал часу T між послідовними фронтами опорного імпульсу прямо відповідає періоду обертання валу. Це дозволяє точно визначити частоту (або кутову швидкість ω) обертання ротора за формулою $f=1/T$, де f – частота обертання(рис. 3.4)).

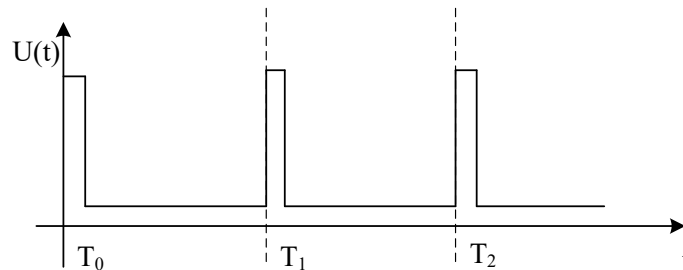


Рис. 3.4 Сигнал на виході тахометра

В загальному вигляді сигнал з виходу тахометру, як імпульсного сигналу розраховується як

$$S(t) = A \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t - k \cdot T / 2}{\tau}\right) \quad (3.63)$$

На практиці вихідний сигнал, що генерується тахометричним сенсором є аналоговим та має низьку амплітуду, високий рівень шумів та спотворену форму, через високочастотні перешкоди та можливі флуктуації рівня напруги, зумовлені умовами експлуатації та конструктивними особливостями вимірювального каналу. Для забезпечення надійної роботи ІВС контролю та точної синхронізації вимірювальних блоків, цей сигнал потребує обов'язкового формування в сигнал із стабільними фронтами.

Для формування сигналу від сенсора тахометра для системи контролю обортових параметрів енергетичного обладнання використовується схема на основі тригера Шмітта. Одним з найбільш поширених та технологічно доступних рішень є використання інвертора з тригером Шмітта типу 74НС14, який

забезпечує надійне відсікання шумових складових та перетворення аналогового сигналу у цифровий імпульсний сигнал стандартизованої форми. Наявність гістерезису у вхідній характеристиці елемента дозволяє уникнути багаторазового перемикання на межі порогових рівнів, що є критично важливим для підвищення достовірності подальших вимірювань. У сформованому цифровому імпульсі ключовим параметром є фронт сигналу – момент різкої зміни рівня напруги, який використовується як синхронізуючий імпульс для синхронізації роботи інших функціональних блоків ІВС.

3.4 Визначення просторового зміщення валу за даними сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів

Під час вирішення задач контролю поточного технічного стану гідрогенераторів особливе значення має оцінювання радіальних зміщень ротора та геометричної відповідності заданій формі та просторовому розміщенню його валу. Це обумовлено, тим що наявність вигину, зміщень фланцевих з'єднань чи інших дефектів, як статичного, так і динамічного характеру, призводить до підвищених механічних навантажень, зростання вібрацій і прискореній знос підшипникових вузлів, нерівномірності повітряного проміжку, тощо.

Високу інформативність щодо виявлення таких деформацій забезпечує порівняльний аналіз траєкторій руху центра ротора, отриманих у кількох осьових перетинах валу (рис. 3.5) уздовж агрегату – від генератора до турбіни. Відмінності у формі, амплітуді або фазовій структурі годографів (орбіт ротора) вздовж довжини валу є діагностичними ознаками просторового вигину валу, локальних похибок монтажу або інших конструктивно-механічних дефектів. Безпосереднє визначення годографа, який відображає радіальний рух центра валу, у гідрогенераторі є технічно складним завданням; однак його можна з високою точністю реконструювати на основі сигналів сенсорів повітряного проміжку та сенсорів торцевого биття, що забезпечують неперервний моніторинг кінематичного стану ротора. Таким чином, аналіз комплексних даних від сенсорів

кінематичних характеристик дозволяє достовірно визначати наявність перекосу, вигину та ексцентриситету у площинах встановлення сенсорів. У цьому випадку для кожної осьової площини формується відповідний годограф, який після обчислення може бути поданий у зручній для сприйняття візуальній формі та використаний у системах контролю, орієнтованих на оператора. Типові приклади годографів наведені в таблиці 2.1 для різних типів дефектів, які можуть мати місце обертових вузлах генератора.

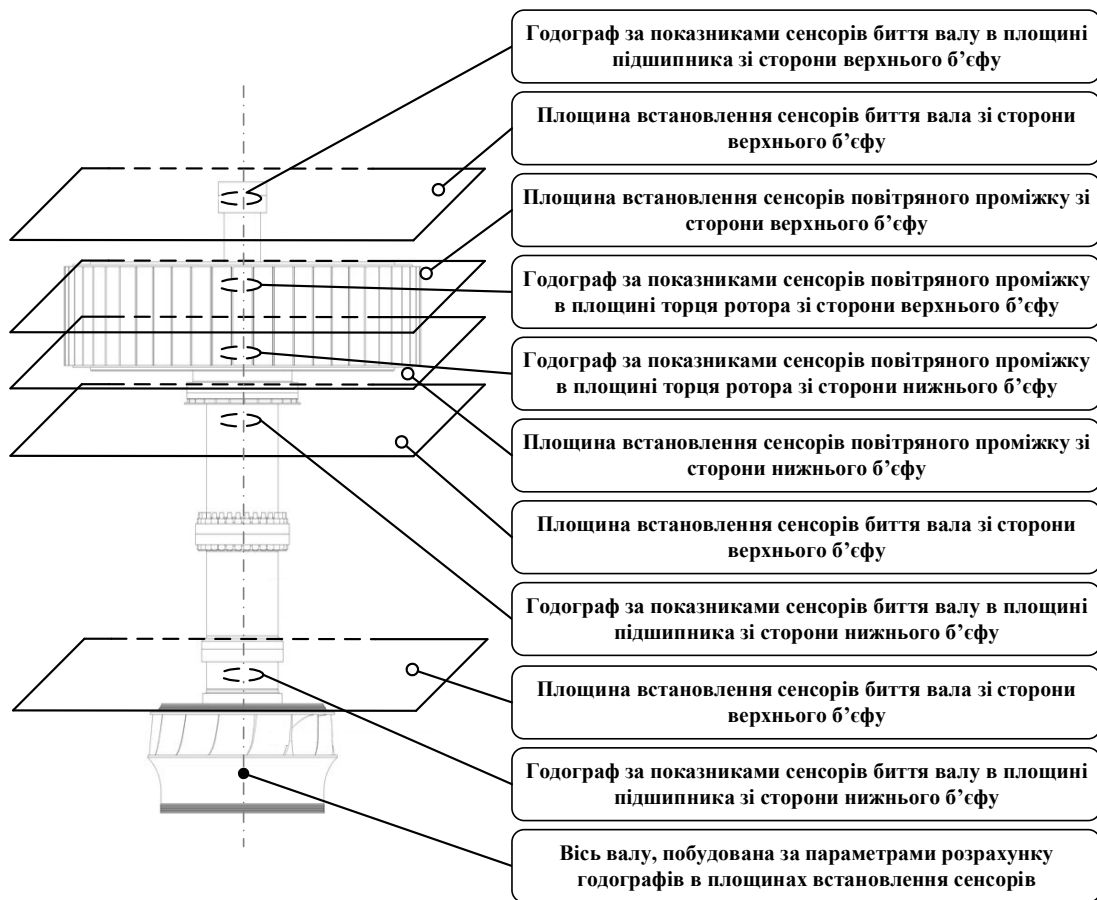

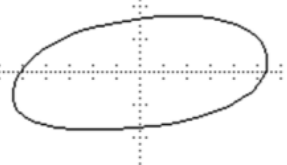
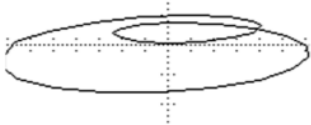
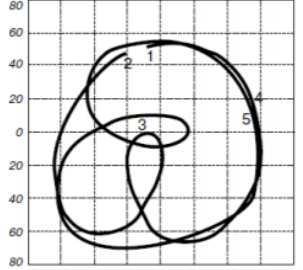
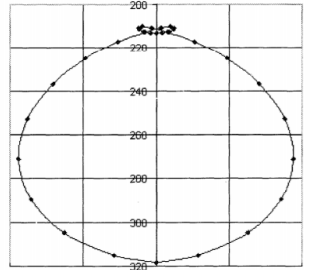


Рис.3.5. Схема визначення просторового зміщення валу

З огляду на те, що інформативність годографів значною мірою залежить від коректності математичного опису процесу формування радіальних зміщень, постає необхідність розроблення формалізованої моделі, здатної адекватно відтворити геометричні та динамічні особливості руху валу. Така модель не лише забезпечує коректне трактування характерних форм годографів, наведених у таблиці 3.1, але й дозволяє уніфікувати процедури їх подальшої інтерпретації в системах технічного контролю.

Таблиця 3.1

Типів дефектів обертових вузлах генератора

Годограф	Опис дефекту
	Зачіпання окремих полюсом ротора за статор, скорочення повітряного проміжку до критичного значення [111]
	Дисбаланс [112]
	Розцентрування [112]
	Орбіта руху центру перерізу валу у результаті втрати динамічної стійкості підшипника [113]
	Наявність поперечної тріщини в валу [114]

Визначення просторового зміщення відбувається за наступних припущень:

1. розточення статора та обвідна поверхні по центрам полюсів ротора є ідеальними колами;

2. сенсори повітряного проміжку або сенсори биття валу встановлені попарно під кутом 90° в одній поперечній площині.

Наведені припущення дозволяють забезпечити можливість двовимірної реконструкції радіальних зміщень ротора та побудови орбіти руху ротора, тобто годографа, на основі даних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів.

3.5 Розрахунок годографа на основі даних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів

Як зазначалось в попередніх розділах, розрахунок годографа на основі даних сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів є одним із ключових етапів визначення наявності дефектів викликаних зміною динамічного стану обертових вузлів. Застосування годографу дозволяє отримати інтегральне уявлення про характер вібраційного процесу, виявити асиметрії[115], локалізувати дефекти та оцінити ступінь деградації вузлів та тощо (див. табл.2.1).

На сьогодні існують різні способи визначення годографа, серед яких найбільш поширеними набули:

- обчислення за координатними сигналами, отриманими з ортогонально розташованих сенсорів;
- реконструкція траєкторії на основі комплексного представлення вібраційних сигналів;
- використання спектрального й фазового аналізу гармонік, що визначають форму орбіти.

З урахуванням специфіки досліджуваного об'єкта та наявності ортогонально розташованих сенсорів (рис. 3.6) доцільним є застосування методу обчислення годографа за координатними сигналами. Для цього використовується декартова система координат, у якій початок відліку співпадає з центром ротора і статора. Представлення сигналів у декартовій системі відліку забезпечує можливість спрощення процедури побудови годографа та дозволяє пов'язувати отримані сигнали з геометрією обертової системи, а також безпосереднє формування просторової траєкторії радіальних зміщень ротора та застосування графічної моделі, яку наведено на рис. 3.6.

В такій моделі центр обвідної[116] ротора розглядається як геометричний центр кола, що проходить через усі полюси ротора, що дозволяє формалізувати просторове розташування полюсів у вигляді аналітичного рівняння кола

$$(X_n - X'_0)^2 + (Y_n - Y'_0)^2 = d_{vz}^2 \quad (3.64)$$

де X'_0, Y'_0 - координати центра обвідної ротора, X_n, Y_n - координати окремої точки обвідної ротора, d_{vz} - значення величини повітряного проміжку.

З метою спрощення математичного опису, далі розглядається ідеальний випадок з наступними припущеннями:

- обвідна ротора є ідеальним колом;
- розточка статора є ідеальним колом;
- центр розточки статора співпадає з центром обвідної;
- всі полюси ротора однакові і мають відстань від центру ротора рівну r ;
- сенсори розташовані до осі x під кутами 45 та 135 градусів.

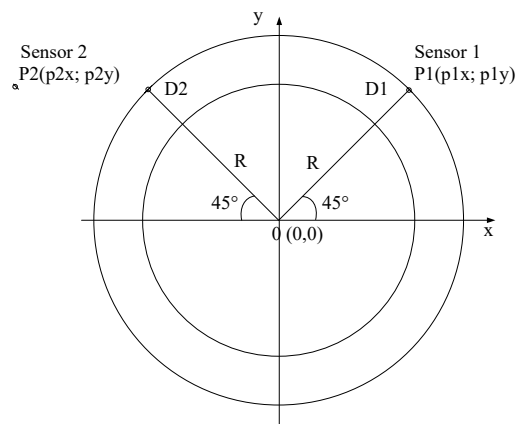


Рис. 3.6 Графічна модель годографа в ідеальному випадку

У цьому разі для визначення координат першого сенсора (Sensor1):

$$\begin{aligned} p_{1x} &= (r + D_{max} / 2) \cos 45^\circ \\ p_{1y} &= (r + D_{max} / 2) \sin 45^\circ \end{aligned} \quad (3.65)$$

а для координати другого сенсора (Sensor2):

$$\begin{aligned} p_{2x} &= (r + D_{max} / 2) \cos 135^\circ \\ p_{2y} &= (r + D_{max} / 2) \sin 135^\circ \end{aligned} \quad (3.66)$$

В обох формулах D_{max} максимальне допустиме значення повітряного проміжку. Під час побудови годографа в межах запропонованої моделі

координати центра ротора обчислюються за результатами вимірювання двох сенсорів двома сенсорами та відомого кута повороту вала ротора, при цьому приймається припущення про інваріантність геометричних параметрів ротора і статора під час процесу вимірювання, що дозволяє забезпечити коректність математичного опису руху ротора.

Використовуючи формули (3.64) та (3.65) визначивши значення координат c_x , c_y координати миттєвого значення центру годографа в точці $C(c_x, c_y)$, розраховується як точка, яка віддалена від положення сенсора 1 на відстань $r + d_1$, а від положення сенсора 2 на відстань $r + d_2$ та визначається із наступної системи рівнянь

$$\begin{cases} |p_1, c| = r + d_1 \\ |p_2, c| = r + d_2 \end{cases} \quad (3.67)$$

Для визначення миттєвих значень координат c_x , c_y точки годографа за системою (2.67) будемо мати

$$\begin{cases} (p1_x - c_x)^2 + (p1_y - c_y)^2 = (r + d_1)^2 \\ (p2_x - c_x)^2 + (p2_y - c_y)^2 = (r + d_2)^2 \end{cases} \quad (3.68)$$

Розв'язуючи цю систему методом послідовного виключення невідомих, отримуємо рівність для вираження невідомої c_x через c_y

$$c_x = c_y \frac{2 \cdot p1_y - 2 \cdot p2_y}{-2 \cdot p1_x + 2 \cdot p2_x} + \frac{(r + d_1)^2 - (r + d_2)^2 - (p1_x^2 - p2_x^2) - (p1_y^2 - p2_y^2)}{-2 \cdot p1_x + 2 \cdot p2_x} \quad (3.69)$$

З метою спрощення запису рівняння (3.75) введемо наступні змінні

$$(CC_x) = \frac{(r + d_1)^2 - (r + d_2)^2 - (p1_x^2 - p2_x^2) - (p1_y^2 - p2_y^2)}{-2 \cdot p1_x + 2 \cdot p2_x} \quad (3.70)$$

$$(KC_x) = \frac{2 \cdot p1_y - 2 \cdot p2_y}{-2 \cdot p1_x + 2 \cdot p2_x} \quad (3.71)$$

З урахуванням (3.70) та (3.71) рівняння (3.69) запишеться як

$$c_x = (KC_x)c_y + (CC_x) \quad (3.72)$$

Підставивши (3.72) в верхнє рівняння системи (3.68), отримаємо квадратне рівняння відносно c_y наступного виду

$$\begin{aligned} & \left((KC_x)^2 + 1 \right) c_y^2 + \\ & + \left(-2 \cdot p1_x \cdot (KC_x) + 2(KC_x)(CC_x) - 2 \cdot p1_y \right) c_y + \\ & + \left(p1_x^2 - 2 \cdot p1_x (CC_x) + (CC_x)^2 + p1_y^2 - (r + d_1)^2 \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.73)$$

Рівняння (2.73) є квадратичним рівнянням відносно шуканої величини та має два алгебраїчні корені. З фізичної точки зору інформативною складовою процесу є корінь із меншим за модулем значенням, оскільки саме він відповідає реальному положенню центра ротора в поперечному перерізі машини. Тому цей корінь використовується для обчислення координати за виразом (3.72).

На основі отриманих значень для дискретного набору кутів повороту вала ротора, які відповідають моментам проходження середини полюса ротора над вимірювальним сенсором, здійснюється поетапне визначення координат центра ротора. У результаті формується впорядкований масив точок годографа, що описує траєкторію руху центра ротора протягом повного оберту. Для забезпечення інтерпретованості та зручності аналізу результатів оперативним персоналом за сформованим масивом даних будується графічне представлення годографа, яке використовується для подальшої оцінки стану обертового обладнання та виявлення можливих дефектів динамічного характеру.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено аналіз форми, структури та частотного складу сигналів сенсорів кінематичних характеристик обертових вузлів гідрогенератора, який показав, що вони формуються внаслідок комплексної взаємодії механічних, магнітних, гідродинамічних і термомеханічних процесів та відображають сумарну динамічну реакцію з урахуванням дисбалансів, ексцентриситету, магнітного тяжіння, змін жорсткості опор і коливальних процесів..

2. Запропоновано схему визначення просторового зміщення валу гідрогенератора на основі порівняльного аналізу годографів руху центра ротора, реконструйованих за даними сенсорів кінематичних характеристик у кількох осьових перетинах валу, яка дозволяє достовірно виявляти перекося, вигини та ексцентриситети, що виникають внаслідок масових дисбалансів, монтажних похибок або конструктивно-механічних дефектів

3. Показано, що точність інтерпретації годографів суттєво визначається коректністю математичної моделі формування радіальних зміщень, яка адекватно відтворює геометричні та динамічні особливості руху ротора в повітряному проміжку з урахуванням дисбалансів, ексцентриситетів і коливань, забезпечує уніфікацію та стандартизацію обробки сигналів сенсорів і підвищує інформативність та достовірність контролю технічного стану обертових вузлів гідрогенератора.

4. Запропоновано метод розрахунку годографа за даними сенсорів кінематичних характеристик, що передбачає поетапне визначення координат центра ротора для дискретних кутів повороту вала та формування впорядкованої траєкторії його руху за повний оберт, графічне подання якої забезпечує наочну оцінку технічного стану обладнання і виявлення дефектів динамічного та статичного характеру.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

В четвертому розділі роботи представлено результати технічної реалізації та експериментальних досліджень компонентів інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів. Розглянуто розробку випробувально-демонстраційного стенду, перевірку адекватності запропонованих моделей і алгоритмів обробки контрольно-діагностичних сигналів, а також результати досліджень впливу температури та вологості робочого середовища на функцію перетворення ємнісних сенсорів і методи компенсації відповідних похибок. Наведено результати візуалізації та натурних випробувань в умовах промислової експлуатації. Дослідження, викладені в розділі, виконані за безпосередньої участі автора, результати відображено в протоколах випробувань і звітних матеріалах фундаментальних та прикладних НДР, виконаних в Інституті електродинаміки НАН України.

4.1 Технічна реалізація випробувально-демонстраційного стенду інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів гідрогенератора

Для проведення експериментальної перевірки теоретичних положень, результатів математичного моделювання та засобів отримання й попередньої обробки контрольно-діагностичної інформації отриманих у межах дисертаційного дослідження, було використано експериментальний випробувально-демонстраційний стенд інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) контролю обертових вузлів гідрогенератора, фотографія якого приведена на рис. 4.1. Стенд забезпечує задання зміни геометричних параметрів в

механічній частині стенду, притаманних деяким реальним умовам експлуатації обертових вузлів потужних гідрогенераторів, зокрема ексцентриситету та радіального биття вала, а також не симетрії повітряного проміжку між ротором та статором.

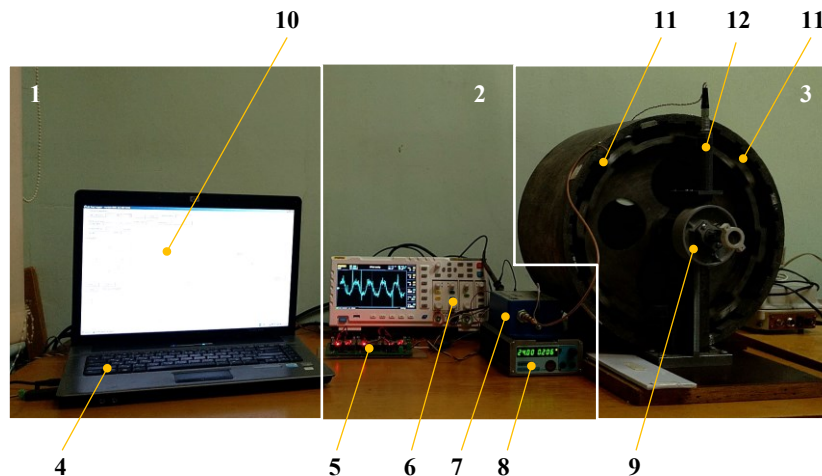


Рис. 4.1 Фото загального вигляду випробувально-демонстраційного стенду для дослідження компонентів інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів

Проведення експериментальних досліджень на створеному стенді дало змогу здійснити кількісну оцінку адекватності запропонованих математичних моделей, алгоритмів обробки контрольно-діагностичних сигналів та технічних рішень, покладених в основу інформаційно-вимірювальної системи. Отримані результати є підґрунтям для уточнення параметрів моделей, аналізу похибок вимірювання та обґрунтування практичної придатності розроблених компонентів ІВС.

Експериментальний стенд є модульною апаратно-програмною системою, що об'єднує механічну частину, вимірювальні перетворювачі, засоби збору й попередньої обробки даних, а також програмне забезпечення для реєстрації, візуалізації та аналізу сигналів. До складу стенду входять такі основні елементи:

1 – персональний комп'ютер інформаційно-вимірювальної системи з прикладним програмним забезпеченням;

2 – засоби попередньої обробки та передачі контрольно-діагностичних даних;

- 3 – механічна частина макета системи обертових вузлів генеруючого обладнання;
- 4 – персональний комп'ютер для обробки та аналізу експериментальних даних;
- 5 – модуль збору і попередньої обробки даних (МЗіПОД) інформаційно-вимірювальної системи;
- 6 – цифровий осцилограф для контролю форм сигналів у часовій області;
- 7 – вторинний вимірювальний перетворювач типу «ємність–напруга»;
- 8 – стабілізоване джерело живлення засобів отримання та перетворення інформації;
- 9 – механічні засоби завдання та регулювання параметрів биття вала;
- 10 – спеціалізоване програмне забезпечення;
- 11 – ємнісні сенсори контролю повітряного проміжку;
- 12 – ємнісний сенсор радіального биття вала та тахометр.

Функціонування експериментального стенду (рис.4.2) організовано відповідно до ієрархічної модульної структури інформаційно-вимірювальної системи(див. рис. 2.1).

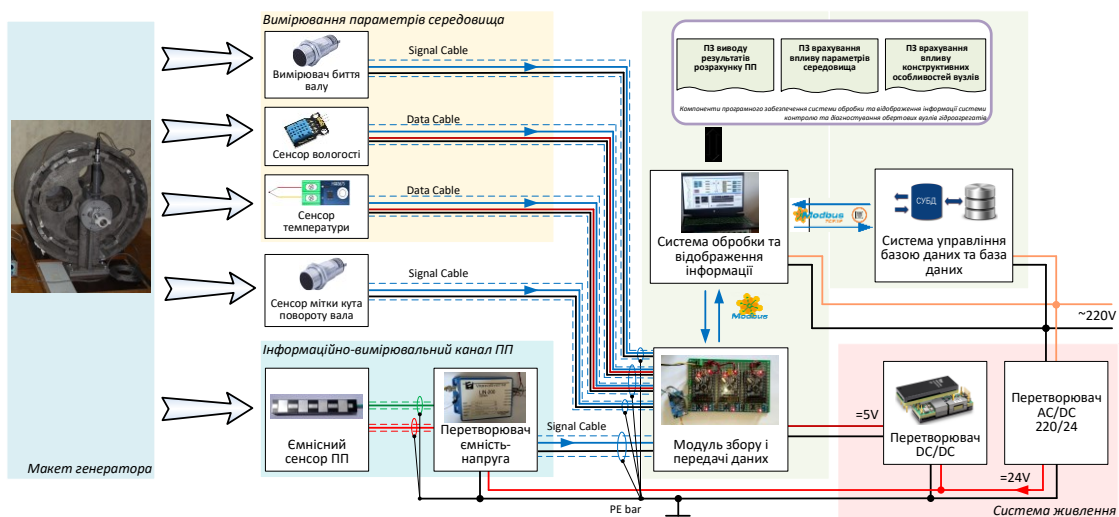


Рис. 4.2 Функціональна схема випробувально-демонстраційного стенду для дослідження компонентів інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів

Функціональна схема (рис.4.2) визначає послідовність отримання, перетворення, передачі й обробки контрольно-діагностичної інформації. Первинним об'єктом контролю є процес контролю технічного стану обертових вузлів потужних гідрогенераторів у межах якого відтворюються характерні для реальних гідрогенераторів зміни геометрії обертових вузлів на імітаційному макеті генератора.

Ці зміни призводять до зміни контрольно-діагностичних параметрів, які фіксуються ємнісними сенсорами, встановленими в характерних точках контрольованої зони, як варіація відстані до контрольованої поверхні. Вихідна зміна ємності сенсорів перетворювалася вторинним вимірювальним перетворювачем типу «ємність–напруга» у пропорційні електричні сигнали. Отримані аналогові сигнали подавалися на вхід модуля збору і попередньої обробки даних (МЗіПОД), який виконує ключову функцію узгодження вимірювальних перетворювачів із цифровою частиною інформаційно-вимірювальної системи.

У МЗіПОД здійснюється комплекс операцій обробки, зокрема підсилення та масштабування сигналів, аналогова фільтрація для зменшення впливу високочастотних завад, аналого-цифрове перетворення з наперед заданими параметрами розрядності та частоти дискретизації, а також компенсація впливу параметрів навколишнього середовища на результати вимірювання. Для врахування та компенсації впливу параметрів навколишнього середовища використовуються сенсори температури та вологості. Для вимірювання температури використовується резистивний сенсор типу РТ100, принцип дії якого ґрунтується на залежності електричного опору платиногового чутливого елемента від температури. Висока відтворюваність і стабільність метрологічних характеристик РТ100 забезпечують можливість коректного врахування температурних впливів на параметри вимірювальних трактів і чутливих елементів ємнісних сенсорів. Контроль вологості повітря реалізовано з використанням сенсора DHT11, що конструктивно поєднує ємнісний сенсор вологості та вбудований термістор. Отримані дані про температуру та відносну

вологість використовуються в алгоритмах обробки для корекції результатів вимірювання, зменшення систематичних похибок і підвищення достовірності оцінювання параметрів повітряного проміжку та биття вала в умовах змінних гігротемпературних факторів.

Використана архітектура МЗіПОД забезпечує синхронний збір даних з декількох вимірювальних каналів, що є принципово важливим для коректного аналізу просторової нерівномірності повітряного проміжку та оцінювання перекосу вала. Сигнал тахометра використовується для часової та кутової прив'язки вимірювань, що дозволяє реалізувати алгоритми обробки даних із прив'язкою до кутової швидкості та синхронізацією функціонування всієї системи. Далі попередньо оброблені та оцифровані дані передаються з МЗіПОД до персонального комп'ютера інформаційно-вимірювальної системи по цифровому інтерфейсу, де виконуються алгоритми подальшої обробки, статистичного аналізу та візуалізації результатів у реальному масштабі часу.

Для оперативного візуального контролю форм аналогових сигналів на виході вторинних вимірювальних перетворювачів використовується цифровий осцилограф, що дозволяє оцінити коректність налаштування режимів роботи та своєчасно виявляти впливи паразитних факторів

Таким чином, розроблений експериментальний стенд забезпечує можливість задання заданих значень повітряного проміжку між ротором та статором, перекіс вала та його биття із одночасною високоточною реєстрацією відповідних контрольно-діагностичних сигналів у реальному масштабі часу.

4.2 Аналіз впливу температури робочого середовища на функцію перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між ротором і статором

Ефективність контролю повітряного проміжку між ротором і статором потужних гідрогенераторів значною мірою визначається стабільністю метрологічних характеристик ємнісних сенсорів за реальних умов експлуатації.

Для гідрогенераторів Київської ГЕС робота агрегату супроводжується істотними коливаннями температури охолоджуючого повітря, які становлять 35–55 °С у режимі холодного повітря та 60–75 °С у режимі гарячого повітря. Крім того, з урахуванням пусків агрегатів у зимовий період і нагріву заліза осердя статора, можливий діапазон експлуатаційних температур розширюється до 0–120 °С. Такі температурні зміни призводять до варіацій електрофізичних властивостей матеріалів сенсора, геометрії електродної системи та параметрів ізоляційних прошарків, що безпосередньо впливає на функцію перетворення ємнісного сенсора. Відсутність кількісної оцінки цього впливу знижує точність визначення повітряного проміжку та достовірність діагностичних ознак, тому є необхідним проведення досліджень для врахування та компенсації впливу температури на функцію перетворення ємнісного сенсора.

Зміна температури в означеному діапазоні насамперед призводить до зміни геометричних параметрів матеріалів, з яких виготовлено електроди та підкладку сенсора, що безпосередньо впливає на функцію перетворення сенсора.

Для міді в структурі сенсора коефіцієнт теплового лінійного розширення становить $\alpha_{(Cu)} \approx 17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [117, 118].

Для матеріалу FR-4, який є основою активного елемента сенсора, значення коефіцієнта теплового лінійного розширення лежить у межах: $\alpha_{(FR-4)} = (13 \dots 18) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [119, 120]. Для подальших розрахунків використовується середнє значення: $\alpha_{(FR-4)} \approx 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, що є близьким до коефіцієнта теплового розширення міді та зменшує вплив механічних деформацій на цілісність структури сенсора.

Окрім геометричних факторів, зміна температури призводить до варіації діелектричної проникності середовища в якому знаходиться сенсор. Для повітря температурний коефіцієнт діелектричної проникності має від'ємне значення і становить: $\alpha_{(d\epsilon/dT)} \approx -2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [117, 121]. Зазначені фактори інтегрально визначають температурну складову похибки вимірювання ємнісним сенсором.

Ємність досліджуваного ємнісного сенсора повітряного проміжку визначається наступним співвідношенням[30]:

$$C_{INF} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} N L_1 \ln \frac{\left(th \frac{\pi s}{4d} + th \frac{\pi (s+2b)}{4d} \right)^2}{4 th \frac{\pi (s+2b)}{4d} th \frac{\pi s}{4d}} \quad (4.1)$$

де L_1 – довжина низькопотенціального електрода; ε_0 – діелектрична проникність вакууму; ε_r – відносна діелектрична проникність середовища між електродами сенсору; s – проміжок між електродами сенсору; b – ширина високопотенціального та низькопотенціального електродів, s – відстань між високопотенціального та низькопотенціального електродами; d – відстань від сенсору до полюсу; N – кількість елементарних сенсорів, утворених електродами високопотенціального та низькопотенціального за паралельного їх з'єднання.

У межах подальшого аналізу впливу температури на C_{INF} здійснено за наступних припущень: відстань від розточення статора до полюсу в місті встановлення сенсору не змінюється; паразитна ємність C_{12II} між будь якими із високопотенціальним та низькопотенціальним електродами дорівнює нулю; діапазон температур від 35 до 75 °С, що обумовлено тим, що температура охолоджувального повітря для гідрогенераторів Київської ГЕС змінюється в межах 35–55 °С у режимі холодного та 60–75 °С у режимі гарячого повітря; товщина t металевої плівки, з якої утворені електроди є нескінченно малою; лінійні розміри елементів ємнісного сенсора змінюються відповідно до температурних деформацій матеріалів; діелектрична проникність середовища між електродами сенсора є температурозалежною та змінюється зі зміною температури.

З урахуванням припущень вираз (4.1) для аналіз впливу температури робочого середовища на функцію перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між ротором і статором $\Delta C_{INF} = f(\Delta T)$ визначиться як:

$$\Delta C_{INF} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \Delta \varepsilon_r}{\pi} N \Delta L_1 \ln \frac{\left(th \frac{\pi s}{4 \cdot \Delta d} + th \frac{\pi (\Delta s + 2 \cdot \Delta b)}{4 \cdot \Delta d} \right)^2}{4 \cdot th \frac{\pi (\Delta s + 2 \cdot \Delta b)}{4 \cdot \Delta d} \cdot th \frac{\pi s}{4 \cdot \Delta d}} \quad (4.2)$$

Максимальний вплив на зміну C_{INF} визначається всіма складовими, які входять до виразу (4.2), тобто відносна зміна $\Delta C_{INF} = f(\Delta T)$ сенсора визначиться як:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_d - \delta_{st} - \delta_{\varepsilon} \quad (4.3)$$

Відносна зміна початкового повітряного проміжку δ_d , яка є складовою для виразу (4.3), під дією зміни температури ΔT визначається сумарним ефектом теплового лінійного розширення матеріалів, що формують геометрію зазору. Зокрема, температурна деформація повітряного проміжку Δl_g з коефіцієнтом теплового лінійного розширення α_g призводить до його збільшення, тоді як температурне розширення електродних елементів сенсора довжиною l_e з коефіцієнтом α_e зумовлює зменшення ефективного зазору з двох протилежних сторін. У результаті сумарна температурна зміна зазору Δd_t , віднесена до номінального значення повітряного проміжку d_n , описується виразом:

$$\delta_d = \frac{\Delta d_t}{d_n} = \Delta T \frac{\Delta l_g \alpha_g - 2l_e \alpha_e}{d_n}. \quad (4.4)$$

Під дією температури, також відбувається зміна площі електродних пластин унаслідок теплового лінійного розширення матеріалу електродів. Зазначене розширення призводить до зміни ємності конденсатора та відповідного ємнісного опору, що з погляду вимірювального процесу є еквівалентним додатковій зміні ефективного повітряного проміжку. При цьому припускається, що електроди мають плоску прямокутну форму, а їх температурне розширення є ізотропним і відбувається однаково в обох лінійних напрямках площини електрода. За таких припущень відносна зміна площі електродів пропорційна подвійному коефіцієнту теплового лінійного розширення матеріалу електродів α_e та приросту температури Δt . Відповідна відносна складова температурної похибки, зумовлена зміною площі електродних пластин, описується виразом:

$$\delta_{st} = 2\alpha_e \Delta t, \quad (4.5)$$

Діелектрична проникність середовища, що заповнює повітряний проміжок між електродами ємнісного сенсора змінюється зі зміною температури робочого середовища. Для повітря температурний коефіцієнт зміни діелектричної проникності має від'ємне значення і, за довідковими даними, становить приблизно $\alpha_{(d\epsilon/dT)} \approx -2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [117, 121]. Отже зі зростанням температури це призводить до зменшення діелектричної проникності повітря, а отже до відповідної зміни ємності сенсора.

Оскільки ємність конденсатора зі змінним повітряним проміжком прямо пропорційна діелектричній проникності середовища між електродами, температурна зміна цієї величини може бути інтерпретована як окрема складова температурної похибки вимірювання. За умови лінійної залежності в досліджуваному температурному діапазоні відносна похибка, зумовлена зміною діелектричної проникності повітря, визначається виразом:

$$\delta_\epsilon = -2 \cdot 10^{-6} \Delta t, \quad (4.6)$$

Після підстановки у (4.3) співвідношень (4.4)–(4.6) отримуємо:

$$\delta_d = \left[\frac{\Delta l_g \alpha_g - 2l_e \alpha_e}{d_n} - 2\alpha_e + 2 \cdot 10^{-6} \right] \Delta t, \quad (4.6)$$

Слід зазначити, що отримані аналітичні вирази (4.2) та (4.6) мають тільки наближений характер і відображають лише основні зміни від температури, не охоплюючи впливу низки конструктивних елементів ємнісного сенсора, зокрема температурних змін клеїв в діелектричній підкладці, захисних покриттів та допоміжних шарів, а також прийнятих спрощень. У зв'язку з цим для повнішого урахування реальних умов функціонування сенсора доцільним є проведення додаткових натурних експериментальних досліджень. З цією метою було виконано серію лабораторних експериментальних досліджень, спрямованих на аналіз зміни характеристик ємнісного сенсора в температурних діапазонах охолоджувального повітря, характерних для гідрогенераторів Київської ГЕС.

Для проведення експериментальних досліджень було використано стенд фотографія, якого представлено на рис. 4.3. На рис. 4.3 прийняті наступні позначення: 1 – термоізоляційна камера низької теплопровідності; 2 – керований

нагрівальний елемент зі стабілізацією температури; 3 – термосенсор активного елемента ємнісного сенсора; 4 – прецизійний вимірювальний міст EUCOL U2638; 5 – ПК для контролю та збору даних; 6 – ємнісний сенсор.

Прилади, що входять до складу експериментального стенду(рис. 4.3), підтримують програмну взаємодію та мають засоби для автоматизованого керування режимами роботи і зчитування результатів вимірювань. Наявність відповідних інтерфейсів обміну даними та керувальних команд забезпечила можливість реалізації повністю автоматизованого циклу вимірювань, який включає задання температурних режимів, стабілізацію параметрів робочого середовища, реєстрацію вимірювальних даних та їх передавання на верхній рівень системи.

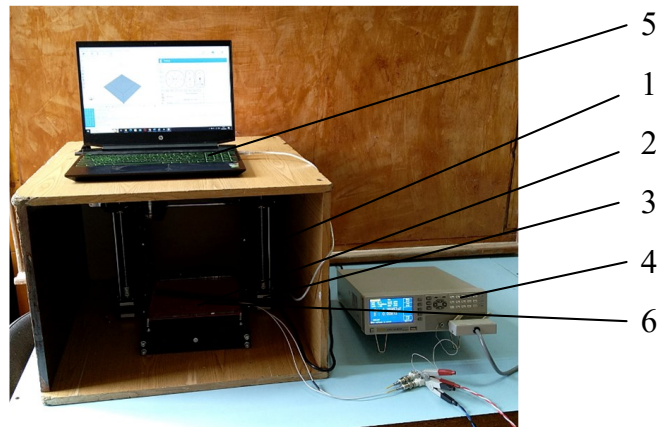


Рис. 4.3 Стенд для вимірювання впливу температури на функцію перетворення ємнісних сенсорів

Автоматизація процесу вимірювань на експериментальному стенді реалізована за ієрархічним принципом із виділенням керувального, вимірювального та виконавчого рівнів. Центральною ланкою системи є персональний комп'ютер, який виконує функції верхнього рівня керування, синхронізації та збереження експериментальних даних.

На верхньому рівні персональний комп'ютер із прикладним програмним забезпеченням формує керувальні команди, задає сценарії експерименту та здійснює опитування вимірювальних приладів. Обмін даними з вимірювальним мостом EUCOL U2638 здійснюється через інтерфейс зв'язку з використанням

протоколу FIDO, що забезпечує дистанційне керування режимами вимірювання та передачу результатів у цифровому вигляді. Керування терморегулюючим елементом стенду здійснюється за допомогою вбудованої системи керування, яка використовує власний комунікаційний протокол з ієрархічною структурою обміну типу «запит–відповідь». Такий підхід забезпечує детермінований обмін інформацією, контроль коректності виконання команд та можливість програмного моніторингу стану терморегулюючого пристрою. На нижньому рівні розміщені виконавчі та вимірювальні елементи стенду: ємнісний сенсор, вимірювальний міст, терморегулюючий елемент і допоміжні датчики. Їх спільна робота забезпечує синхронізоване формування вимірювальних даних за заданих температурних умов.

Функціонально структурну схему автоматизації експериментального стенду наведено на рис. 4.4. Для реалізації протоколів керування експериментальним стендом у процесі проведення вимірювань було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення на мові Python. Формування графічного інтерфейсу користувача здійснено з використанням бібліотеки PyQt, що забезпечило інтерактивне задання параметрів експерименту та візуальний контроль ходу вимірювань. Обмін даними з приладами стенду через послідовні інтерфейси RS-232 реалізовано за допомогою інструментів модуля QSerial, що дозволило забезпечити синхронізоване керування та реєстрацію вимірювальних даних.

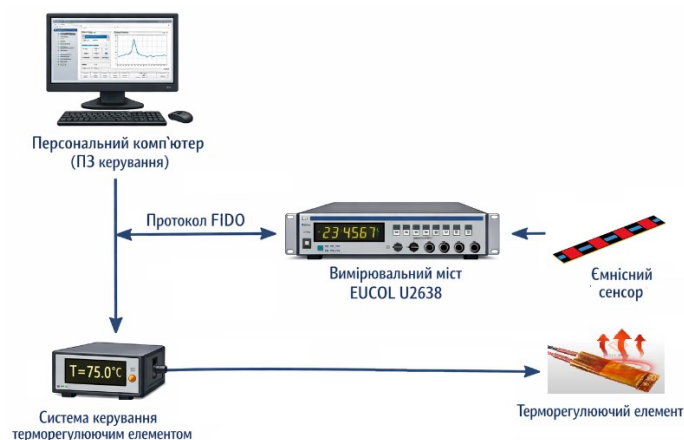


Рис. 4.4 Структурна схема апаратно-програмного взаємодії компонентів стенду для дослідження температурного впливу на ємнісні вимірювання

Автоматизована процедура вимірювань передбачала виконання циклу операцій. Блок-схему загального алгоритму вимірювань наведено на рис. 4.5, а для проведення одного вимірювання на рис. 4.6. На першому етапі програмно задавалося значення температури нагрівального елемента. Далі забезпечувався часовий інтервал, необхідний для стабілізації температурного режиму в робочій камері. Після досягнення стаціонарного стану здійснювалася реєстрація температури та відповідних значень ємності сенсора. Зазначений цикл повторювався для наступного встановленого рівня температури.

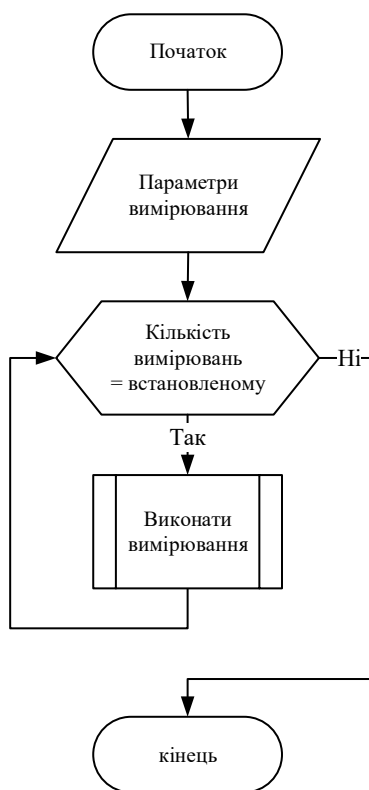


Рис. 4.5 Загальна блок-схема алгоритму контролю вимірювання

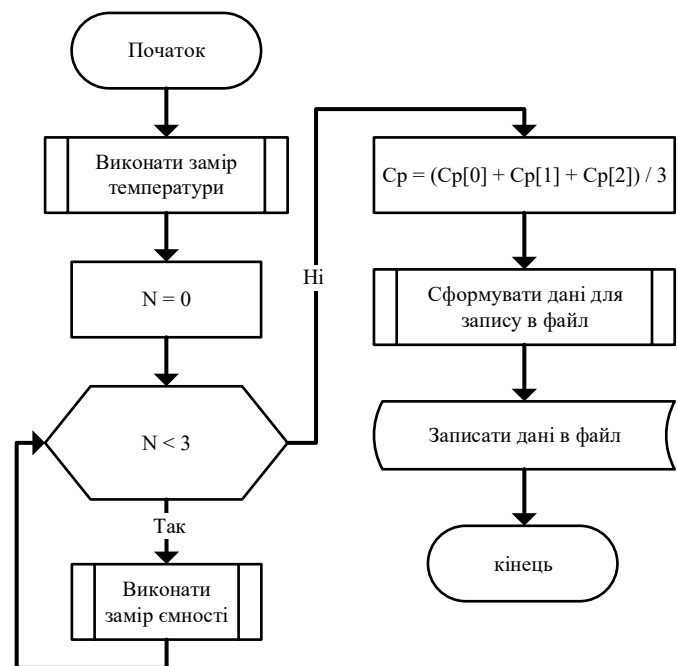


Рис. 4.6 Блок-схема алгоритму проведення одного вимірювання

Протягом одного повного вимірювального циклу температура послідовно змінювалася від мінімального до максимального значення, після чого виконувалося зворотне зниження температури до початкового рівня, що дало змогу оцінити можливі гістерезисні ефекти температурного впливу на характеристики ємнісного сенсора.

Значення температури в ході експериментальних досліджень поетапно встановлювалися в діапазоні від 30 до 70 °С, з кроком в 5°С. Час витримки, необхідний для стабілізації температурного режиму в робочій камері після кожної зміни заданого значення, як було встановлено експериментально мав становити не менше 15 хв. Реєстрація температури та ємності сенсора виконувалася через 20 хв після встановлення нового температурного рівня, що забезпечувало досягнення стаціонарних умов вимірювання.

В таблиці 4.1 наведено результати вимірювань ємності $C_{12\Pi}$ в випадку зміни температури T від меншої до більшої, а також ємності C_{123} в випадку зміни температури T від більшої до меншої. Графіки залежностей $C_{12\Pi} = f(T)$ і $C_{123} = f(T)$ показані на рис. 4.7. Графіки залежності $C_{12\Pi}$ та C_{123} з суміщеними точками температур показані на рис. 4.8. Графіки залежностей $\Delta C_{12\Pi} = C_{12\Pi} - C_H$ і $\Delta C_{123} = C_{123} - C_H$ ($C_H = 2,89047 \cdot 10^{-12} \Phi$ – ємність сенсора за температури $T = 25$ °С в приміщенні до початку випробувань) показано на рис. 4.9.

Таблиця 4.1

Експериментальні дані

$T, ^\circ\text{C}$	$C_{12}, 10^{-12} \Phi$	$\Delta C_{12}, 10^{-15} \Phi$
$C_{12\Pi} = f(T)$		
30	2,89148	1,01
35	2,89368	3,21
40	2,89596	5,49
45	2,89798	7,51
50	2,89966	9,19
55	2,90118	10,71
60	2,90229	11,82
65	2,90336	12,89
70	2,90454	14,07
$C_{123} = f(T)$		
70	2.90454	14,07
65	2.90250	12,03
60	2.90078	10,31
55	2.89894	8,47
50	2.89710	6,63
45	2.89534	4,87
40	2.89390	3,43
35	2.89227	1,80
30	2.89145	0,98

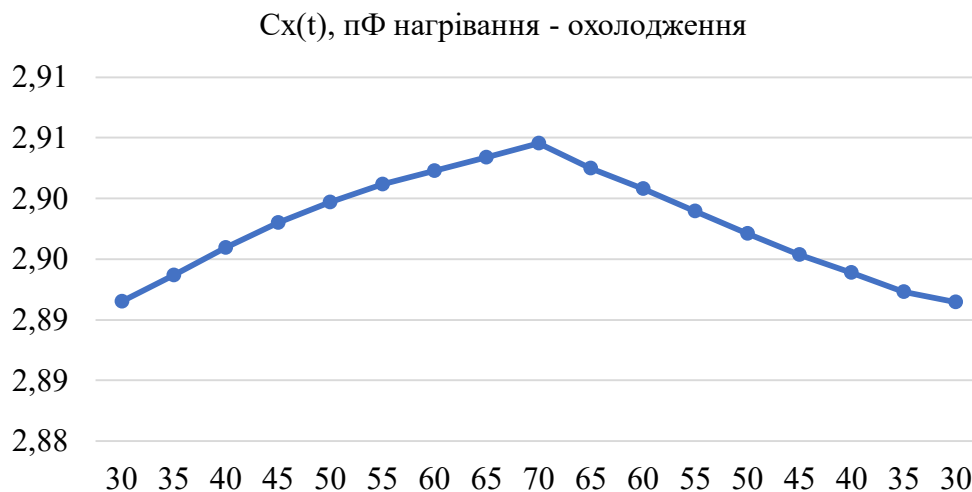


Рис. 4.7 Експериментальна залежність зміни інформативної складової ємності сенсора від зміни температури оточуючого середовища

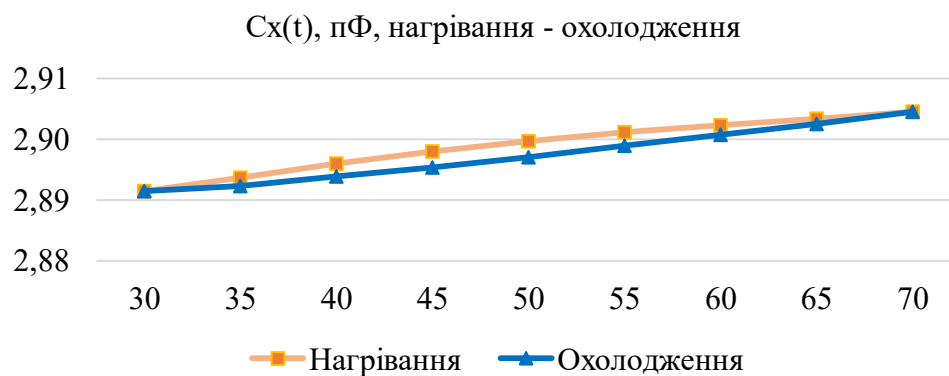


Рис. 4.8 Експериментальна залежність зміни інформативної складової ємності сенсора від зміни температури оточуючого середовища з суміщеними точками температур

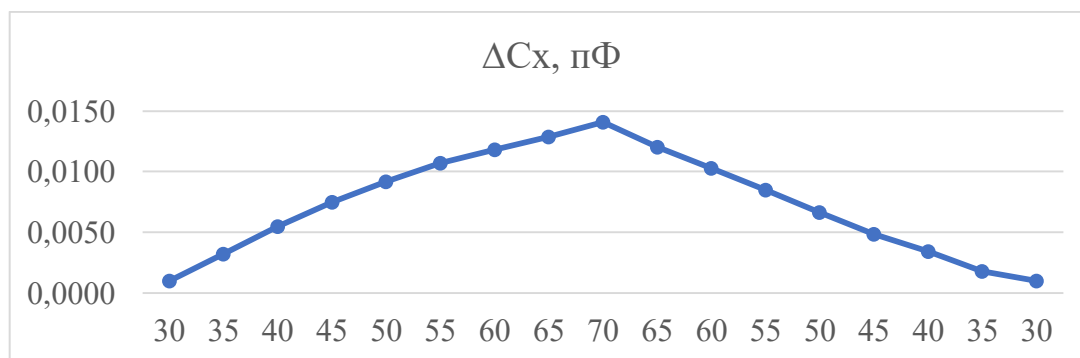


Рис. 4.9 Графік абсолютного значення ємності сенсора від зміни температури оточуючого середовища

Проведені експериментальні дослідження показали, що вихідна ємність ємнісного сенсора з розробленою системою електродів демонструє стійку та відтворювану температурну залежність у діапазоні від +30 до +70 °С. Характер цієї залежності є визначальним для оцінювання температурного впливу на результати вимірювання повітряного проміжку та може бути формалізований у вигляді коригувальної функції.

Отримані експериментальні дані підтверджують доцільність застосування запропонованого ємнісного сенсора для контролю повітряного зазору між статором і ротором капсульного гідрогенератора типу СГК 538/160-70М у зазначеному температурному інтервалі.

На основі отриманих експериментальних даних побудовано математичну модель температурного впливу на вихідний сигнал ємнісного сенсора повітряного проміжку. Аналіз результатів показав, що залежність вимірної ємності від температури має виражений нелінійний характер і відрізняється для режимів нагрівання та охолодження, що свідчить про наявність температурного гістерезису. У зв'язку з цим для опису температурної залежності використано кусочно-лінійну апроксимаційну модель, параметри якої визначено методом найменших квадратів за експериментальними даними.

Для наведеного графіка температурна залежність вихідної ємності описується наступною лінійною моделлю:

$$C(T) = \begin{cases} C_{30} + k_{1\uparrow}(T - 30), & 30 \leq T \leq 50 \\ C_{50} - k_{2\uparrow}(T - 50), & 50 < T \leq 70, \\ C_{70} - k_{\downarrow}(70 - T), & 30 \leq T \leq 70 \end{cases} \quad (4.7)$$

де C_{30} – значення ємності за $T=30$ С; C_{50} – максимальне значення ємності за $T=50$ С; C_{70} – значення ємності за $T=70$ С;

За даними графіка прийнято:

$$\begin{aligned}
 k_{1\uparrow} &\approx \frac{2,89966 - 2,89148}{50 - 30} = \frac{0,00188}{20} = 0,000409 \approx 409 \cdot 10^{-6} \text{ unit/}^\circ\text{C}, \\
 k_{2\uparrow} &\approx \frac{2,90454 - 2,89966}{70 - 50} = \frac{0,00488}{20} = 0,000244 \approx 244 \cdot 10^{-6} \text{ unit/}^\circ\text{C} \\
 k_{\downarrow} &\approx \frac{2,90454 - 2,89145}{70 - 30} = \frac{0,01309}{40} = 0,00032725 \approx 327,25 \cdot 10^{-6} \text{ unit/}^\circ\text{C},
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Таким чином, чисельна модель (4.7) з урахуванням (4.8) буде мати наступний вигляд:

$$C(T) = \begin{cases} 2,891 + 409 \cdot 10^{-6} (T - 30), & 30 \leq T \leq 50 \\ 2,899 - 244 \cdot 10^{-6} (T - 50), & 50 < T \leq 70 \\ 2,904 - 327,25 \cdot 10^{-6} (70 - T), & 30 \leq T \leq 70 \end{cases}, \tag{4.9}$$

Апроксимація за функцією (4.9) дозволяє відтворити загальний характер залежності зміни інформативної складової ємності сенсора від зміни температури оточуючого середовища в досліджуваному температурному діапазоні, включаючи ділянки зростання та спадання температури використовуючи кусочно-лінійна модель.

Отримана кусочно-лінійна модель реалізована в програмному забезпеченні інформаційно-виміральної системи як коригувальна функція температурної компенсації. За поточним значенням температури автоматично визначається відповідна ділянка моделі та обчислюється поправка до вимірної ємності, що забезпечує зменшення температурної складової похибки і підвищує точність визначення повітряного проміжку в реальних умовах експлуатації.

4.3 Аналіз впливу вологості робочого середовища на функцію перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між ротором і статором

Функція перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку між ротором і статором визначається не лише геометричними параметрами та температурним станом елементів вимірального каналу, але й властивостями робочого середовища, що заповнює зазор. Вологість повітря є одним із факторів, здатних впливати на діелектричну проникність середовища та електричні параметри сенсора, особливо за умов змінних режимів роботи гідрогенератора.

Коливання вологості можуть спричиняти систематичні відхилення функції перетворення та повільні дрейфи вихідного сигналу, що знижує точність визначення повітряного проміжку.

У зв'язку з цим аналіз впливу вологості робочого середовища є актуальним з огляду можливість використання отриманих співвідношень для реалізації алгоритмів компенсації впливу вологості, що підвищує достовірність і відтворюваність результатів контролю за реальних умов експлуатації.

З метою кількісного опису впливу вологості та використання відповідних вимірювань для корекції результатів контролю повітряного проміжку доцільно застосувати аналітичну модель температурно незалежної зміни функції перетворення ємнісного сенсора. Теоретична модель впливу вологості повітря на функцію перетворення ємнісного сенсора описано в [63] та ґрунтується на таких початкових припущеннях:

- температура робочого середовища в процесі аналізу є постійною;
- геометричні розміри конструктивних елементів сенсора не змінюються;
- зміна вологості зумовлена виключно варіацією концентрації водяної пари в оточуючому середовищі;
- діелектричне середовище між електродами сенсора розглядається як двокомпонентна суміш повітря (або вакууму) та водяної пари.

З урахуванням наведених припущень залежність діелектричної проникності повітря від відносної вологості була експериментально досліджена в роботі [63], як:

$$e_r = e_0 \cdot \left[1 + \frac{211}{T} \cdot \left(P + \frac{48 \cdot P_s}{T} \cdot RH \right) \cdot 10^{-6} \right] \quad (4.10)$$

де e_r – діелектрична проникність повітря; e_0 – діелектрична проникність вакууму; T – температура (К); P – тиск повітря (мм рт. ст.); P_s – тиск насиченої водяної пари; RH – відносна вологість повітря.

Використовуючи вираз (4.9) отримаємо поправку до вимірної ємності, що забезпечує зменшення впливу вологості похибку вимірювання, що дозволить підвищити точність визначення повітряного проміжку в реальних умовах експлуатації.

4.4 Розробка засобів візуалізації результатів контролю обертових вузлів гідрогенераторів на основі даних вимірювання повітряного проміжку

Для представлення результатів контролю повітряного проміжку в процесі експериментальних досліджень було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує реєстрацію вимірювальних даних, їх обробку та візуалізацію у вигляді годографів. Такий підхід дозволяє наочно відобразити як статичні, так і динамічні складові відхилення ротора відносно осі статора.

На рис. 4.10 наведено годограф без урахування обвідної ротора. У цьому режимі обробки даних при формуванні годографа використовуються безпосередні значення повітряного проміжку, отримані для окремих полюсів ротора, без компенсації їх геометричного профілю. Відповідний годограф відображає нерівномірність висоти полюсів і відхилення їх вершин від ідеального концентричного кола, що характеризує статичну складову нерівномірності ротора. Така форма годографа є інформативною з погляду оцінювання технологічних та експлуатаційних відхилень геометрії полюсів, однак не дозволяє безпосередньо виділити динамічний рух ротора як тіла.

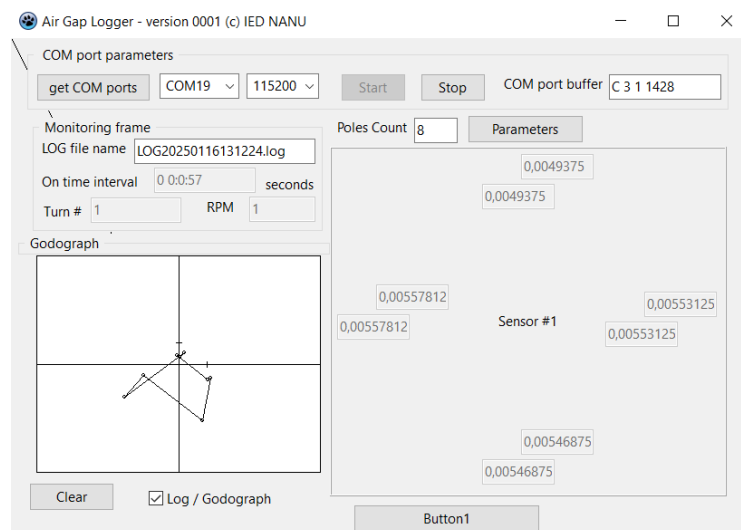


Рис. 4.10. Годограф без врахування обвідної ротора

На рис. 4.11 подано годограф з урахуванням обвідної ротора, отриманий після застосування моделі профілю ротора та відповідної корекції

вимірювальних даних. У цьому випадку статична нерівномірність висоти полюсів елімінується, а годограф відображає динамічне відхилення центра ротора від початкового (номінального) положення. Аналіз отриманих траєкторій свідчить про наявність незначних одиничних відхилень, зумовлених впливом приводу ротора та особливостями його кінематичного збудження. Таким чином, даний режим візуалізації дозволяє оцінювати динамічний стан ротора незалежно від його статичних геометричних похибок.

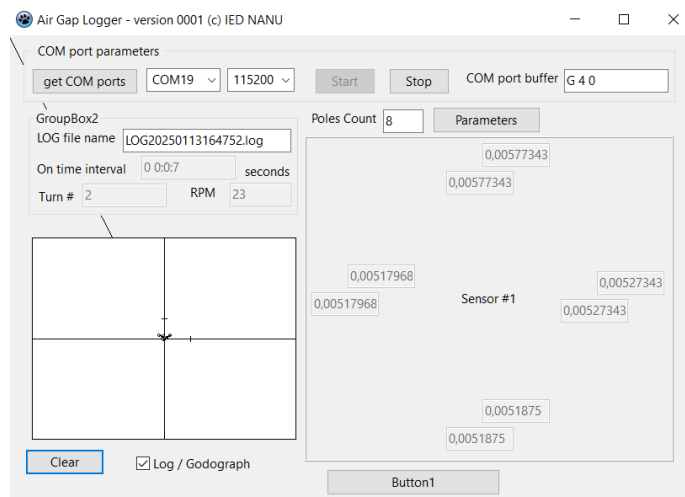


Рис. 4.11 Годограф з врахуванням обвідної ротора

На рис. 4.12 показано режим контролю рівномірності повітряного проміжку, у якому програмне забезпечення відображає розподіл значень проміжку для окремих полюсів у числовій та графічній формі. Даний режим призначений для оперативного контролю симетрії повітряного проміжку та виявлення локальних відхилень, що можуть свідчити про наявність ексцентриситету ротора, деформації або інших змін (див. таб. 2.1).

Проведені експериментальні дослідження та результати візуалізації підтвердили коректність і адекватність запропонованих моделей обробки вимірювальних даних. Застосування різних режимів формування годографів дозволяє роздільно аналізувати статичні та динамічні складові нерівномірності повітряного проміжку, що істотно підвищує інформативність системи контролю та її діагностичні можливості.

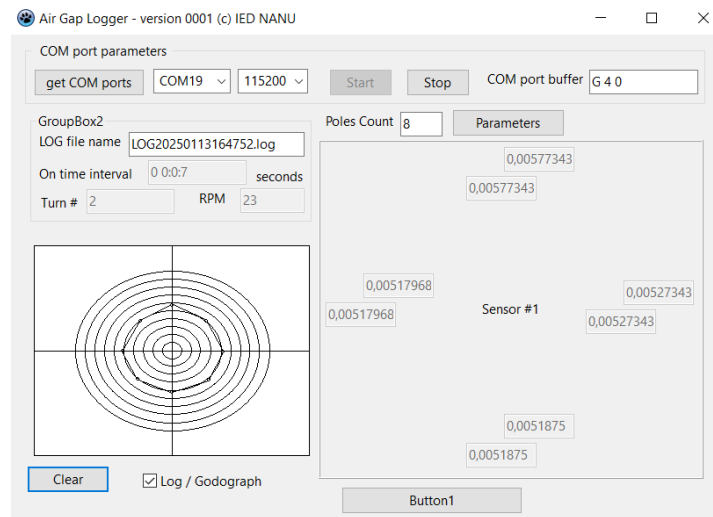


Рис. 4.12 Контроль рівномірності величини повітряного проміжку

4.5 Результати натурних випробувань

Розроблені компоненти в складі системи контролю було експериментально перевірено в умовах промислової експлуатації на Київській ГЕС. В основі вимірювального каналу використано ємнісний сенсор, розроблений вторинний вимірювальний перетворювач, а також розроблені засоби візуалізації контрольних-діагностичних даних. Проведення випробувань здійснювалося за погодженням та за безпосередньої участі фахівців ПрАТ «Укргідроенерго».

У межах експериментальних досліджень було отримано масив первинних вимірювальних даних, що відображають зміну величини повітряного проміжку по колу обертання ротора. Зазначені результати використано для відновлення просторової форми зовнішньої поверхні ротора капсульного гідрогенератора типу СГК 538/160-70М. Методика проведення випробувань відповідала технологічним процедурам контролю та центрування гідроагрегатів, прийнятим в експлуатуючій організації, і враховувала вплив реальних експлуатаційних факторів. Експерименти виконувалися під час планового технічного обслуговування агрегату.

Отримані результати забезпечили формування профілю поверхні ротора в режимі реального часу з безпосереднім представленням вимірюваних значень у мікрометрах, без застосування додаткових розрахункових перетворень. Такий

підхід підвищує достовірність і аналітичну цінність вимірювальної інформації та створює передумови для подальшого технічного аналізу стану гідрогенератора. Графічне подання результатів контролю форми ротора наведено на рис. 4.13 та рис. 4.14 у полярній системі координат, де відхилення від середнього значення подано в міліметрах, а на рис. 4.15, а фото розміщення ємнісного сенсору.

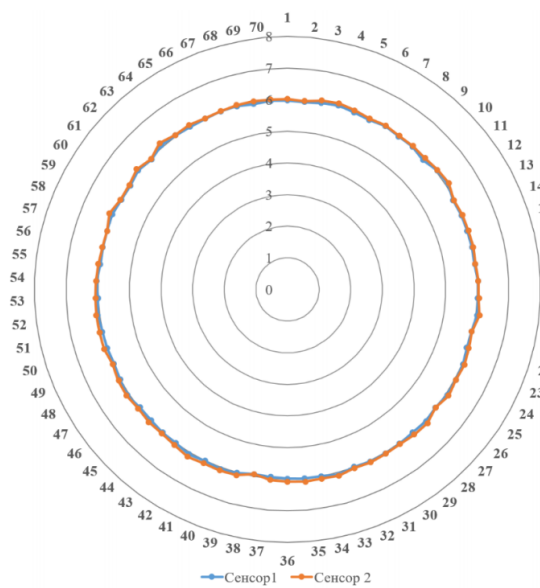


Рис. 4.13 Форма ротора. Сенсор верхнього б'єфу

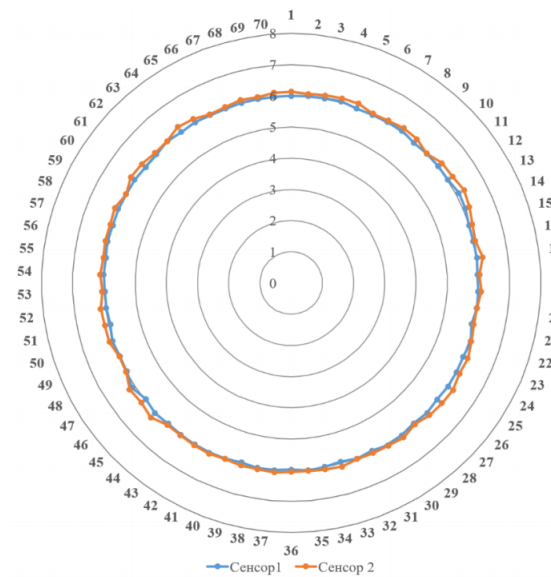


Рис. 4.14 Форма ротора. Сенсор нижнього б'єфу



а)



б)

Рис. 4.15 Процес вимірювання: а) запропоновані; б) штатні засоби

Аналіз результатів, отриманих у процесі центрування гідроагрегату, засвідчив, що максимальні значення відхилень повітряного проміжку перебували в межах від +0,29 мм до -0,07 мм, що є істотно меншим за гранично допустимі значення, встановлені на рівні $\pm 10\%$ від номінального значення проміжку 6 мм, тобто $\pm 0,6$ мм. При цьому усереднена величина повітряного проміжку за результатами вимірювань становила 6,04 мм. Реєстрація значень виконувалася у фіксованих кутових положеннях, що відповідали геометричним центрам полюсів ротора, що забезпечувало відтворюваність результатів та коректність їх подальшого аналізу.

Паралельно з експериментальними вимірюваннями здійснювався контроль повітряного проміжку із застосуванням штатних вимірювальних засобів, фото якого наведено на рис. 4.15,б. Порівняльна оцінка результатів показала, що розбіжність між показами розробленого ємнісного сенсора та штатних засобів вимірювання не перевищувала 1 %, що підтверджує коректність реалізації вимірювального каналу та достатню точність запропонованого технічного рішення. Застосування розроблених алгоритмів компенсації забезпечило зменшення похибки до 0,8 %. Це підтверджує ефективність запропонованого підходу, його метрологічну доцільність та можливість практичного використання в системах контролю повітряного проміжку потужних гідрогенераторів систем контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів.

Для контролю температурних параметрів використовувався резистивний сенсор типу RT100, що забезпечує високу стабільність і відтворюваність вимірювань у широкому діапазоні робочих температур. Вимірювання відносної вологості здійснювалося за допомогою сенсора DHT11. Отримані значення температури та вологості застосовувалися як вхідні змінні для коригування результатів вимірювання повітряного проміжку з урахуванням реальних умов експлуатації гідроагрегату.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Розроблено та реалізовано експериментальний випробувально-демонстраційний стенд інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів, який забезпечує відтворювану зміну ексцентриситету, перекосу та радіального биття вала з одночасною високоточною багатоканальною реєстрацією контрольних-діагностичних сигналів у реальному масштабі часу.

2. Експериментально підтверджено адекватність розробленого вимірювального каналу на основі ємнісних сенсорів, вторинного перетворювача типу «ємність–напруга» та модуля збору і попередньої обробки даних, що забезпечує синхронний збір, цифрову обробку та корекцію вимірювальної інформації з урахуванням впливу зовнішніх факторів.

3. Досліджено та кількісно оцінено вплив температури і вологості робочого середовища на функцію перетворення ємнісного сенсора повітряного проміжку, встановлено нелінійний характер температурної залежності та обґрунтовано доцільність застосування коригувальних моделей для компенсації гіротермічних впливів.

4. Розроблено та впроваджено програмні алгоритми температурно-вологісної компенсації, зокрема кусочно-лінійну модель температурної корекції, що дозволило зменшити сумарну похибку вимірювання повітряного проміжку до 0,8 % та підвищити достовірність результатів контролю в реальних умовах експлуатації.

5. Проведені натурні випробування на діючому гідроагрегаті Київської ГЕС підтвердили практичну придатність запропонованих технічних і програмних рішень (розбіжність із штатними засобами вимірювання становила не більше 0,8 %).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у розробці компонентів інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів з урахуванням впливу параметрів внутрішнього робочого середовища. Основні отримані наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На основі проведеного аналітичного огляду сучасних інформаційно-вимірювальних систем контролю обертових вузлів гідрогенераторів встановлено, що більшість існуючих технічних рішень не забезпечує необхідної інваріантності результатів вимірювання до впливу температурних, вологісних, електромагнітних і вібраційних факторів. Показано доцільність переходу до мультифізичних сенсорних структур та інтегрованих інформаційно-вимірювальних каналів, орієнтованих на підвищення інформативності та метрологічної достовірності контролю відповідно до вимог сучасних стандартів і експлуатаційних умов.

2. Розроблено удосконалену структуру інформаційно-вимірювальної системи контролю обертових вузлів потужних гідрогенераторів, що базується на використанні ємнісних сенсорів кінематичних характеристик у поєднанні з електромагнітними, вібраційними та термогігрометричними каналами. Запропоновані конструкції первинних вимірювальних перетворювачів та принципи їх інтеграції забезпечують підвищену стійкість до впливу параметрів внутрішнього середовища генератора та формують основу для реалізації алгоритмів компенсації систематичних похибок.

3. Розроблено математичні моделі вихідних сигналів сенсорів повітряного проміжку та радіального биття валу з урахуванням стохастичної природи процесів у гідроагрегатах, нелінійностей функцій перетворення, шумових складових, а також температурних і вологісних впливів. Отримані моделі дозволяють адекватно описувати формування контрольно-діагностичних

сигналів у реальних умовах експлуатації та є основою для синтезу ефективних алгоритмів обробки і діагностики.

4. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для компонентів засобів отримання, обробки та відображення контрольної-діагностичної інформації, яке забезпечує синхронний багатоканальний збір даних, фільтрацію, масштабування, аналого-цифрове перетворення та компенсацію впливу температури й вологості у реальному масштабі часу. Запропоновані алгоритми дозволяють формувати інформативні діагностичні ознаки, зокрема просторові траєкторії руху ротора та годографи, що підвищує достовірність оцінювання технічного стану обертових вузлів.

5. Створено макетні зразки основних компонентів інформаційно-вимірювальної системи, зокрема ємнісних сенсорів, вторинних вимірювальних перетворювачів та модуля збору і попередньої обробки даних. Розроблено випробувально-демонстраційний стенд, який забезпечує відтворювану зміну ексцентриситету, перекоосу та радіального биття валу з одночасною високоточною реєстрацією відповідних контрольних-діагностичних сигналів.

6. Проведено комплекс експериментальних досліджень розроблених апаратних і програмних компонентів системи контролю. Експериментально підтверджено адекватність запропонованих математичних моделей та ефективність алгоритмів температурно-вологісної компенсації. Результати натурних випробувань на діючому гідроагрегаті засвідчили, що розбіжність показів розробленої системи зі штатними засобами вимірювання не перевищує 0,8 %, що підтверджує високий рівень інформаційної ефективності та практичну придатність запропонованих технічних рішень.

Таким чином, сукупність отриманих у дисертаційній роботі наукових і практичних результатів повністю забезпечує виконання поставлених завдань та досягнення мети дослідження, а розроблені компоненти інформаційно-вимірювальних систем можуть бути рекомендовані для впровадження у системи контролю технічного стану потужних гідрогенераторів в умовах промислової експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рубаненко О. О., Янович В. П., Гунько І. О. Дослідження причин пошкодження синхронних генераторів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 5 (277). С. 176–179.
2. Adams M. L. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*. 2-е вид. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 476 с.
3. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Відносна та абсолютна радіальна вібрація вала вертикального гідроагрегата. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3-4. С. 36–39
4. Закусило С.А., Березниченко В.О. Аналіз впливу перекосу електродів ємнісного сенсора биття системи моніторингу стану гідрогенераторів на його функцію перетворення. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. №4, С.7-14 DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-7-14>
5. Mottershead G., Bomben S., Kerszenbaum I., Klempner G. *Handbook of Large Hydro Generators: Operation and Maintenance*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons / Wiley-IEEE Press, 2020. 672 с.
6. ISO 19283:2020. *Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units*. ISO copyright. Office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
7. Hastings M. New ISO standard released for condition monitoring of hydro units. *RenewableEnergyWorld.com*. 23 Apr. 2020. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/hydro-power/technology-equipment/new-iso-standard-released-for-condition-monitoring-of-hydro-units> (дата звернення: 24.01.2026).
8. Muszynska A. *Rotordynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 1128 с. ISBN 978-0824723996. DOI: 10.1201/9781420027792.
9. Ehrich F. F. *Handbook of Rotordynamics*. 3ed, FL: Krieger Publishing Company, 2004. 474 p.
10. ISO 20816-1:2016. *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration*. ISO copyright. Office: Geneva, Switzerland, 2016. 34 p.

11. Bently D. E., Hatch C. T., Grissom B. *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*. Minden, NV: Bently Pressurized Bearing Press, 2002. 726 p.
12. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. ISO copyright. Office: Geneva, Switzerland, 2023. 80 p.
13. Randall R. B. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2011. 289 p. DOI: 10.1002/9780470977668.
14. ISO 21940-11:2016. Mechanical vibration – Rotor balancing – Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour. Office: Geneva, Switzerland, 2023. 28 p.
15. Childs D. W. *Turbomachinery Rotordynamics: Phenomena, Modeling, and Analysis*. New York: Wiley-Interscience, 1993. 496 p.
16. Lalanne M., Ferraris G. *Rotordynamics Prediction in Engineering*. 2-e vyd. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. 272 c.
17. Vance J. M., Zeidan F. Y., Murphy B. *Machinery Vibration and Rotordynamics*. Wiley, 2010. 416 p.
18. Pinkus O., Sternlicht B. *Theory of Hydrodynamic Lubrication*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1961. 465 p.
19. ISO 7919-1:2009. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. Office: Geneva, Switzerland, 2009. 7 p.
20. IEC 60034-14:2018. Rotating electrical machines – Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity. Office: Geneva, Switzerland, 2018. 37 p.
21. CIGRÉ. *Monitoring and diagnostic expert systems for hydro-generators*. Electra. Ref. ELT_163_2. 1995. 11 p.
22. Zaitsev I., Berezhnychenko V., Bajaj M., Taha I. B. M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 4. DOI: 10.3390/s22041634.

23. Junior G. C. B., Machado R. D., Neto A. C., Martini M. F. Experimental aspects in the vibration-based condition monitoring of large hydrogenerators. *International Journal of Rotating Machinery*. 2017; Article ID: 1805051, Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2017/1805051.
24. Tavner P. J., Ran L., Penman J., Sedding H. *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. 2ed. Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology (IET), 2008. 304 p.
25. García M.F.P., Peinado G.A., Papaelias M. *A comprehensive review of condition monitoring systems for hydropower stations: Technologies, applications, and future trends*. *Electric Power Systems Research*. 2026. Vol. 251. Paper ID: 112339. 21 p. DOI: 10.1016/j.epsr.2025.112339.
26. Hellier C.J. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. 2ed. New York: McGraw-Hill Education, 2013. 720 p.
27. ASM International Handbook Committee. *ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control*. Vol. 17. Metals Park, OH: ASM International, 2009. 795 p.
28. Mobley R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2ed. Oxford etc.: Elsevier Science & Technology / Butterworth-Heinemann, 2002. 437 p.
29. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., Закусило С.А., Грицюк В.О. Підвищення експлуатаційної надійності об'єктів інфраструктури електричних мереж. *Міжнародна конференція «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми “Велике будівництво”»*: Матеріали конф. Київ, 24–25 листопада 2022 р. С. 206–209.
30. 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.
31. Iris Power LP. *On-line air gap monitoring systems for hydro generators: Technical Guide*. Mississauga, ON, Canada: Iris Power LP (Qualitrol Corp.). 20 p.

32. Рассовський В.Л. Засоби контролю повітряного проміжку між ротором та статором в капсульних гідрогенераторах на базі ємнісних вимірювачів: дис. ... док. філософії: спец. 175 – Інформаційно-вимірювальні технології. Київ, 2025. 161 с.
33. Antoni J. *Cyclostationarity by examples. Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23, № 4. Pp. 987–1036. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.10.010.
34. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2013/2014. 616 p.
35. Zaitsev I., Levytskyi A., Bereznychenko V., Zakusilo S., Rassovskyi V. Application of air gap sensor for improved fault detection and diagnostics tools for hydro generators condition monitoring systems. *2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2023)*: Proc. Conf. Kharkiv, 7–10 Oct. 2023. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312877.
36. Березниченко В. О. Ємнісні вимірювачі радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів: дис. ... док. філософії: спец. 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. Київ, 2023. 167 с.
37. Geraldo Carvalho Brito Junior, Roberto Dalledone Machado, Anselmo Chaves Neto, Mateus Feiertag Martini. Experimental Aspects in the Vibration-Based Condition Monitoring of Large Hydrogenerators. *International Journal of Rotating Machinery*. Volume 2017, Article ID 1805051, 14 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/1805051>.
38. Sipek J. System use case: thermodynamic performance monitoring. *Bently Nevada Orbit Article*. 2020 [Electronic resource]. URL: <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/orbit-home/orbit-article/system-1-use-case-thermodynamic-performance-monitoring> (accessed 2026-01-19).
39. Mossoba Y. Super System: A Hydroelectric Unit Condition Monitoring System in Operation at Hydro-Quebec. In: Cabrera E., Espert V., Martínez F. (eds) *Hydraulic Machinery and Cavitation*. Dordrecht: Springer, 1996. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-010-9385-9_117.

40. Technologie ET IREQ. URL: <https://digital.library.mcgill.ca/images/hrcorpreports/pdfs/6/639960.pdf> (accessed 2025-01-19).
41. CIGRÉ. *Survey on hydro generator instrumentation and monitoring*. Technical Brochure No. 682. Paris: CIGRÉ, 2017. 88 p.
42. Online Condition Monitoring. *PRÜFTECHNIK Products and Services*. PRÜFTECHNIK Condition Monitoring Systems [Electronic resource]. Available at: <https://www.pruftechnik.com/products-and-services/condition-monitoring-systems/online-condition-monitoring/> (accessed 2025-01-19).
43. Bently Nevada LLC. *3500 Series Monitoring System: EU Declaration of Conformity – 283641*. Minden, NV, USA: Bently Nevada LLC (Baker Hughes Company), 2020 [Electronic resource]. 10 p. Available at: <https://www.plcdcsmodule.com/uploads/allimg/20250326/1-2503262119321Q.pdf> (accessed 2025-01-19).
44. Bently Nevada. *Orbit 60 Series Machinery Monitoring and Protection System*. PRÜFTECHNIK/Bently Nevada product page [Electronic resource]. Available at: <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/monitoring-systems/machinery-protection/orbit-60-series> (accessed 2025-01-19).
45. Emerson Process Management. *CSI 6500 Machinery Health™ Monitor*. Technical Bulletin [Electronic resource]. 12 p. Available at: <https://mb.cision.com/Public/18753/3063760/9bdf088fcb4ab2dc.pdf> (accessed 2025-01-19).
46. Iris Power. *AGTracII – Air Gap Monitoring*. Iris Power products [Electronic resource]. Available at: <https://irispower.com/products/agtracii/> (accessed 2025-01-19).
47. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., Закусило С.А., Антоненко А.В. SMART засоби визначення аварійних станів в розподільних електричних мережах міст. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. №5. С. 3–12. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.1>.

48. Зайцев Є.О., Закусило С.А., Соколов В.В. Інформаційна система моніторингу параметрів об'єктів гідроенергетичних комплексів. *Міжнародна конференція «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми “Велике будівництво”»*: Матеріали конф. Київ, 24–25 листопада 2022 р. С. 210–211.

49. Zvaritch V., Zaitsev Ie., Myslovych M., Levytskyi A., Zakusilo S. Some features of monitoring and diagnostic systems technical condition of hydro units taking into account smart grid technology. *Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*: Proc. of the 4th Int. Conf. Kyvyi Rih, 22–26 May 2023. Article ID: 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012026.

50. Зайцев Є.О., Закусило С.А., Березниченко В.О. Просторово-розподілена сенсорна мережа контролю експлуатаційних параметрів енергетичних об'єктів в режимі реального часу з розподіленою мікроконтролерною архітектурою. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами*: Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. Internet-конф. Київ, 27 листопада 2024 р. С. 133.

51. Закусило С.А., Зайцев Є.О. Інформаційно-комунікаційні технології інформаційного обміну в системах контролю енергетичного обладнання на базі технології LoRaWAN. *Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика*: Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. Полтава, 10 листопада 2023 р. С. 62–63.

52. Закусило С.А., Зайцев Є.О. Використання технології LoRaWAN в системах інформаційного обміну засобів контролю та діагностування енергетичного обладнання. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами*: Матеріали X Міжнар. наук.-техн. Internet-конф. Київ, 24 листопада 2023 р. С. 183.

53. Зайцев Є.О., Закусило С.А., Блінов І.В., Березниченко В.О. Забезпечення енергоефективності інформаційного обміну в системах ідентифікації аварійних станів розподільчих мереж. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'22*: Матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. Київ, 15–17 листопада 2022 р. С. 56–59.

54. Гриневич Ф.Б., Новик А.І. *Вимірювальні компенсаційно-мостові пристрої з ємнісними сенсорами*. Київ: Наук. думка, 1987. 112 с.

55. Неболюбов Е.Ю., Новік А.І. Електронні перетворювачі для роботи з ємнісними датчиками (аналогові та цифрові). *Техн. електродинаміки*. 2015. № 3. С.67-74.

56. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Рассовський В.Л., Закусило С.А. Розрахунок похибки ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах з системою компланарних електродів, зумовленої перекосом. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. №69. С. 119–125. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.119>.

57. Пат. 86524 Україна, МПК G01B 7/14, G01R 27/26. Спосіб вимірювання повітряного зазору між статором і ротором в гідрогенераторі та пристрій для його реалізації / С. І. Поташник, К. В. Воцинський, О. П. Грубой, А. С. Левицький, Є. Ю. Неболюбов, А. І. Новік, Г. М. Федоренко, А. К. Шофул; заявник і патентовласник ВАТ «Укргідроенерго» (Україна). № а 2007 12431; заявл. 09.11.2007; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

58. Березниченко В.О., Закусило С.А., Рассовський В.Л. Теоретично-експериментальне дослідження ємнісного сенсору систем контролю повітряного проміжку потужних гідрогенераторів з системою компланарних електродів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. №2. С. 117–124. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-14>.

59. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Закусило С.М. Підвищення точності ємнісного вимірювача повітряного проміжку між статором та ротором у гідрогенераторах на основі диференціального методу. *Вісник Київського*

політехнічного інституту. Серія Приладобудування, 2025. №70(2). С. 5–11. [https://doi.org/10.20535/1970.70\(2\).2025.347948](https://doi.org/10.20535/1970.70(2).2025.347948).

60. Закусило С.А., Березниченко В.О. Аналіз впливу перекосу електродів ємнісного сенсора биття системи моніторингу стану гідрогенераторів на його функцію перетворення. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. №4. С. 7–14. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-7-14>.

61. IEEE Std 492-1999(R2011). *Guide for operation and maintenance of hydro-generators*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999. 70 p.

62. Ramo S., Whinnery J. R., Van Duzer T. *Fields and Waves in Communication Electronics*. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 1994. 864 p.

63. Santo Zarnik M., Belavic D. An experimental and numerical study of the humidity effect on the stability of a capacitive ceramic pressure sensor. *Radioengineering*. 2012. Vol. 21, № 1. P. 201–206. URL: https://www.radioeng.cz/fulltexts/2012/12_01_0201_0206.pdf.

64. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., Закусило С.А. Модель для аналізу стаціонарних складових сигналів з ємнісних сенсорів биття валів гідрогенераторів. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. №4. С. 49–55. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-7>.

65. Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 57. С. 81–88. DOI: 10.15407/publishing2020.57.081.

66. García Márquez F. P., Gonzalo A. P., Papaelias M. A comprehensive review of condition monitoring systems for hydropower stations: Technologies, applications, and future trends. *Electric Power Systems Research*. 2026. Vol. 251, Paper ID: 112339. DOI: 10.1016/j.epsr.2025.112339.

67. Srbulov M. *Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples*. Dordrecht: Springer, 2010. 233 с. ISBN 978-90-481-9081-2. DOI: 10.1007/978-90-481-9082-9.

68. Яворський І. М., Юзефович Р. М., Личак О. В., Семенов П. О. Методи та засоби ранньої вібродіагностики обертових вузлів механізмів причальних контейнерних перевантажувачів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2021. № 4. С. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.03>.
69. Cover T.M., Thomas J.A. *Elements of Information Theory*. 2ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons / Wiley-Interscience, 2006. 784 p.
70. Bentley J.P. *Principles of Measurement Systems*. 4ed. Harlow: Pearson Education / Pearson Prentice Hall, 2005. 528 p.
71. Carden F., Jedlicka R.P., Henry R. *Telemetry Systems Engineering*. Norwood, MA: Artech House, 2002. 596 p.
72. Sklar B., Harris F. J. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 3ed. Harlow: Pearson Education, 2021. 1136 p.
73. Oppenheim A. V., Willsky A. S., Nawab S. H. *Signals and Systems*. 2 ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall / Pearson Education, 1996. 957 p.
74. Kharkevich, A.A., 1958. On Kotelnikov's theorem. *Radiotekhnika*, 13, Pp. 3–10.
75. Зайцев Є.О. Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.05/ Ін-т. електродинаміки НАН України. Київ, 2021. 424 с.
76. Zhelezov, N.A., 1957. Study of orthogonal expansions of stochastic signals with a bounded spectrum. *Proceedings of LKVVA*, (6), Pp. 83–92.
77. Shannon C. E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949. 144 p.
78. Cox D. R., Hinkley D. V. A note on the efficiency of least squares estimation. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1968. Vol. 30, № 2. Pp. 284–289. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1968.tb00727.x.

79. . Roda-Casanova V., Sanchez-Marin F. Contribution of the deflection of tapered roller bearings to the misalignment of the pinion in a pinion-rack transmission. *Mech. Mach. Theory*. 2017. Vol.109. Pp. 78-94.
80. Chouksey M., Dutt J.K., Modak S.V. Modal analysis of rotor-shaft system under the influence of rotor-shaft material damping and fluid film forces. *Mech. Mach. Theory*. 2012. Vol.48(1). Pp.81-93.
81. Kishor N., Singh S.P., Raghuvanshi A.S. Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control. *Energ. Convers. Manage.* 2006. Vol.47(18–19). Pp.3119-3137.
82. Halanay A., Safta C.A., Dragoi C., Piraianu V.F. Stability analysis for a delay differential equations model of a hydraulic turbine speed governor. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Pp. 020134-1020139. DOI: 10.1063/1.4972726.
83. Al-Nimr M.D.A., Tashtoush B.M., Jaradat A.A. Modeling and simulation of thermoelectric device working as a heat pump and an electric generator under Mediterranean climate. *Energy*. 2015. Vol.90. Pp.1239-1250.
84. Halanay A., Murea C.M., Dan T. Existence of a steady flow of stokes fluid past a linear elastic structure using fictitious domain. *J. Math. Fluid Mech.* 2016. Vol.18(2). Pp.397-413.
85. Badralexi I., Halanay A., Radulescu I. R. A lyapunov-krasovskii functional for a complex system of delay-differential equations. *U. Politeh. Buch. Ser. A*. 2015. Vol.77(2). Pp.9-18.
86. Li S. Effects of misalignment error, tooth modifications and transmitted torque on tooth engagements of a pair of spur gears. *Mech. Mach. Theory*. 2015. Vol.83(83). Pp.125–136.
87. Pierre L., Teissandier D., Nadeau J. P. Variational tolerancing analysis taking thermomechanical strains into account: Application to a high pressure turbine. *Mech. Mach. Theory*. 2013. Vol.74(6). Pp.82-101.
88. Group W. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. *IEEE T. Power Syst.* 1992. Vol.7(1). Pp.167-179.

89. Gustavsson R. K., Aidanpää J. O. The influence of nonlinear magnetic pull on hydropower generator rotors. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol.297 (3). Pp.551-562.
90. Moradi H., Abbasi M.H., Moradian H. Improving the performance of a nonlinear boiler–turbine unit via bifurcation control of external disturbances: a comparison between sliding mode and feedback linearization control approaches. *Nonlinear Dynam*. 2016. Vol. 1. Pp.1-15.
91. Xu B.B., Chen D.Y., Zhang H., Zhou R. Dynamic analysis and modeling of a novel fractional-order hydro-turbine-generator unit. *Nonlinear Dynam*. 2015. Vol.81(3). Pp.1263-1274.
92. Martínez-Lucas G., Sarasúa J.I., Sánchez-Fernández J.Á., Wilhelmi J.R. Frequency control support of a wind-solar isolated system by a hydropower plant with long tail-race tunnel. *Renew. Energ*. 2016. Vol.90. Pp.362-376.
93. Kishor N. Nonlinear predictive control to track deviated power of an identified NNARX model of a hydro plant. *Expert. Syst. Appl*. 2008. Vol.35(4). Pp.1741-1751.
94. Xu B.B., Chen D.Y., Tolo S. Model validation and stochastic stability of a hydro-turbine governing system under hydraulic excitations. *Int. J. Elec. Power*. 2018. Vol.95. Pp.156-165.
95. Zeng Y., Zhang L., Guo Y., Qian J., Zhang C. The generalized Hamiltonian model for the shafting transient analysis of the hydro turbine generating sets. *Nonlinear Dynam*. 2014.Vol.76(4). Pp.1921-1933.
96. Trivedi C., Cervantes M.J., Gandhi B.K., Dahlhaug O.G. Transient pressure measurements on a high head model francis turbine during emergency shutdown, total load rejection, and runaway. *J. Fluid. Eng.- T. ASME*. 2014. Vol.136(12). Pp. 121107-12118. DOI: 10.1115/1.4027794
97. Sarasúa J.I., Pérez-Díaz J.I., Wilhelmi J.R., Sánchez-Fernández J.Á. Dynamic response and governor tuning of a long penstock pumped-storage hydropower plant equipped with a pump-turbine and a doubly fed induction generator. *Energ. Convers. Manage*. 2015. Vol.106. Pp.151-164.

98. Pico H.V., Mccalley J.D., Angel A., Leon R. Analysis of very low frequency oscillations in hydro-dominant power systems using multi-unit modeling. *IEEE T. Power Syst.* 2012. Vol.27(4) Pp.1906-1915.
99. Guo Y., Lambert S., Wallen R., Errichello R., Keller J. Theoretical and experimental study on gear-coupling contact and loads considering misalignment, torque, and friction influences. *Mech. Mach. Theory.* 2016. Vol.98(8) Pp.242-262.
100. Antar Y. Boundary layer approximation and nonlinear waves in elastic tubes. *Int. J. Eng. Sci.* 2000. Vol.38(13) Pp.1441-1457.
101. Xu B.B., Wang F.F., Chen D.Y., Zhang H. Hamiltonian modeling of multi-hydro-turbine governing systems with sharing common penstock and dynamic analyses under shock load. *Energ. Convers. Manage.* 2016. Vol.108 Pp.478-487
102. Srivastava K.N., Srivastava S.C. Application of Hopf bifurcation theory for determining critical value of a generator control or load paramete. *Int. J. Elec. Power.* 1995. Vol.17(5) Pp.347-354.
103. Li H.H., Chen D.Y., Zhang H., Wu C.Z., Wang X.Y. Hamiltonian analysis of a hydro-energy generation system in the transient of sudden load increasing. *App. Energ.* 2017. Vol.185 Pp. 244-53.
104. Roda-Casanova V., Sanchez-Marin F. Contribution of the deflection of tapered roller bearings to the misalignment of the pinion in a pinion-rack transmission. *Mech. Mach. Theory.* 2017. Vol.109 Pp.78-94.
105. Kishor N. Nonlinear predictive control to track deviated power of an identified NNARX model of a hydro plant. *Expert. Syst. Appl.* 2008. Vol.35(4) Pp.1741-1751.
106. Gustavsson R.K., Aidanpää J.O. Evaluation of impact dynamics and contact forces in a hydropower rotor due to variations in damping and lateral fluid forces. *Int. J. Mech. Sci.* 2009. Vol.51(9–10) Pp.653-661
107. Patel T.H., Zuo M.J., Zhao X. Nonlinear lateral-torsional coupled motion of a rotor contacting a viscoelastically suspended stator. *Nonlinear Dynam.* 2012. Vol.69(1-2) Pp.325-339.

108. Moradi H., Alasty A., Vossoughi G. Nonlinear dynamics and control of bifurcation to regulate the performance of a boiler–turbine unit. *Energ. Convers. Manage.* 2013. Vol.68(4) Pp.105-113
109. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. *Electric Machinery*. 7ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2013. 721 p.
110. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2 ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2013. 616 p. DOI: 10.1002/9781118701591.
111. Boueri B. F. Identifying a guide bearing rub using vibration analysis. *HydroWorld*. May 20, 2014. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/hydro-power/technology-equipment/identifying-a-guide-bearing-rub-using-vibration-analysis/>.
112. Diagnostics of equipment using orbit plots, 2006. *Vibrational Diagnostics*, Vol.2, Pp. 34–35.
113. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 3-e vyd. New York: Academic Press, 2008. 832 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>.
114. Kistoychev A.V. Causes, diagnostic features, prevention and elimination of shaft-line defects in turbomachinery, 2011. 224 p.
115. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Куліда М.А., Закусило С.А. Спектральний та оптикометричний методи контролю параметрів плазмових каналів, спричинених розрядними струмами між гранулами металів у робочих рідинах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2024. №6. С. 72–83. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.10>.
116. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Куліда М.А., Закусило С.А., Яковенко Р.А. Розподіли об'ємів складових плазмових каналів розрядних струмів між гранулами металів у робочих рідинах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2025. №1. С. 73–85. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.1.10>.

117. Rumble J. R., Bruno T. J., Doa M. J. *Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2023. 1580 p.
118. ASM International (Handbook Committee). *ASM Handbook. Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Vol. 2. ASM International, 1990. 1328 p.
119. Mark J. E. *Polymer Data Handbook*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2009. 1250 p. ISBN 978-0195181012. DOI: 10.1093/oso/9780195181012.001.0001.
120. IEC 61249-2-7. Materials for printed boards and other interconnecting structures - Part 2-7: Reinforced base materials clad and unclad - Epoxide woven E-glass laminated sheet of defined flammability (vertical burning test), copper-clad. Office: Geneva, Switzerland, 2002. 41 p.
121. Von Hippel A. R. *Dielectric Materials and Applications*. Cambridge, MA: MIT Press, 1954.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., **Закусило С.А.**, Антоненко А.В. SMART засоби визначення аварійних станів в розподільних електричних мережах міст. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. №5. С. 3–12. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.1>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробленні принципів побудови структуру систем контролю на основі інтеграції сенсорних та інформаційно-комунікаційних технологій, узагальнення отриманих результатів).
2. Шидловська Н. А., Захарченко С. М., Захарченко М. Ф., Куліда М. А., **Закусило С. А.** Спектральний та оптикометричний методи контролю параметрів плазмових каналів, спричинених розрядними струмами між гранулами металів у робочих рідинах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2024. №6. С. 72–83. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.10>. Фахове видання категорії А. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – брав участь в плануванні експерименту, обробці результатів визначення просторових параметрів обвідних).
3. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Рассовський В. Л., **Закусило С.А.** Розрахунок похибки ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах з системою компланарних електродів, зумовленої перекосом. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. №69. С. 119–125. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.119>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробленні розрахункової схеми для оцінки похибки обумовленою перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора, узагальненні результатів та підготовці статті).
4. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., **Закусило С.А.** Модель для аналізу стаціонарних складових сигналів з ємнісних сенсорів биття валів гідрогенераторів. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. №4. С. 49–55. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-7>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – проводив аналізу факторів, що сприяють

дефекти в гідрогенераторах, приймав участь у розробленні моделі вихідного сигналу ємнісних вимірювачів биття валів).

5. Березниченко В.О., **Закусило С.А.**, Рассовський В.Л. Теоретично-експериментальне дослідження ємнісного сенсору систем контролю повітряного проміжку потужних гідрогенераторів з системою компланарних електродів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. №2. С. 117–124. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-14>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – проведення натурних експериментальних досліджень, узагальнення отриманих результатів).

6. **Закусило С.А.**, Березниченко В.О. Аналіз впливу перекосу електродів ємнісного сенсора биття системи моніторингу стану гідрогенераторів на його функцію перетворення. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. №4. С. 7–14. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-7-14>. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – проведення натурних експериментальних досліджень, обробці результатів визначення функцій ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами).

7. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Куліда М.А., **Закусило С. А.**, Яковенко Р.А. Розподіли об'ємів складових плазмових каналів розрядних струмів між гранулами металів у робочих рідинах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2025. №1. С. 73–85. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.1.10>. Фахове видання категорії А. *Index in SCOPUS*. (Особистий внесок – розрахунок статистичних моментів розподілів вибірок та підготовка статті).

8. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Закусило С.М. Підвищення точності ємнісного вимірювача повітряного проміжку між статором та ротором у гідрогенераторах на основі диференціального методу. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, 2025. №70(2). С. 5–11. [https://doi.org/10.20535/1970.70\(2\).2025.347948](https://doi.org/10.20535/1970.70(2).2025.347948). Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – приймав участь у розрахунку функції перетворення ємнісного сенсора та підготовці статті).

ПРОДОВЖ. ДОД. А
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня:

1. Міжнародна конференція: "Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми "Велике будівництво" (Київ, 24–25 листопада 2022 р., форма участі – публікація тез).
2. VIII Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція: "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'22". (Київ, 15–17 листопада 2022 р., форма участі – публікація тез).
3. 4th International Conference "Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)". (Kryvyi Rih, 22–26 May 2023, форма участі – публікація тез).
4. 2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2023) International Conference. (Kharkiv, 7–10 Oct. 2023 р., форма участі – публікація тез).
5. X Міжнародна науково-технічна Internet-конференція: "Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами" (Київ, 24 листопада 2023 р., форма участі – публікація тез).
6. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System. (Kremenchuk, 27–30 Sept. 2023 р., форма участі – публікація тез).
7. Міжнародна науково-практична конференція: "Відкрита наука України: Візійний дискурс в умовах воєнного стану". (Ужгород, 26–28 квітня 2023 р., форма участі – публікація тез).
8. Всеукраїнська науково-практична конференція: "Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика". (Полтава, 10 листопада 2023 р., форма участі – публікація тез).
9. Міжнародна науково-технічна Internet-конференція: "Сучасні методи,

інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами". (Київ, 27 листопада 2024 р., форма участі – публікація тез).

10. 2024 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek-2024) International Conference. (Kharkiv, 7–11 Oct. 2024 р., форма участі – публікація тез).

11. 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies. (Sibenik, Croatia, 17–19 Sept. 2025 р., форма участі – публікація тез).

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер філії
«Дирекція з будівництва
Дністровської ГАЕС»
Анатолій ЖУК



2024
р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Філія «Дирекція з будівництва Дністровської ГАЕС» ПрАТ «Укргідроенерго» цим актом підтверджує, що науково-практичні результати досліджень отримані під час виконання роботи "Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці", шифр теми "ПАРАМЕТР-Д" (№ ДР 0122U000051) мають практичну значимість та спрямовані на вирішення актуальної проблеми підвищення надійності експлуатації потужних гідрогенераторів.

За результатами науково-дослідницьких робіт за участі докт. техн. наук Є.О. Зайцева, докт. техн. наук А.С. Левицького, В.Л. Рассовського, С.А. Закусила на Філії «Дирекція з будівництва Дністровської ГАЕС» ПрАТ «Укргідроенерго» розглянуто до впровадження наступні результати:

- експериментальні зразки та технічну документацію ємнісних сенсорів повітряного проміжку між статором і ротором з системою компланарних електродів, які забезпечують стійкість до впливу робочого середовища гідрогенератора та мають підвищену точність вимірювання;
- наукові та практичні результати дослідження ємнісних сенсорів повітряного проміжку з системою компланарних електродів, для систем застосування яких в системах контролю та діагностування поточного технічного стану гідрогенераторів, які дозволяють підвищити точність вимірювання за рахунок врахування похибок викликаних технологічними дефектами та конструктивними особливостями вузла контролю;
- алгоритм попередньої обробки вихідних сигналів ємнісних сенсорів повітряного проміжку, який забезпечує можливість роботи сенсорів у штатних системах контролю та діагностування поточного технічного стану гідрогенераторів.

Впровадження отриманих теоретичних та експериментальних результатів, сприятиме підвищенню надійності роботи потужних гідрогенераторів, що у свою чергу сприятиме підвищенню стабільності електропостачання в умовах особливих обмежень під час воєнних дій та подальшої післявоєнної відбудови ОЕС України.

Начальник
Цеху технологічної автоматики,
захистів та зв'язку
Ігор ЖУК

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер філії
Каскад Київських ГЕС-ГАЕС

Олег ХРМАНОВ

«27» червня 2024 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складено про те, що на Філії Каскад Київських ГЕС-ГАЕС ПрАТ «Укргідроенерго» під час модернізації та відновлені існуючих капсульних гідрогенераторів типу SGK 538/160-70M використовуються науково-практичні результати, які отримані за безпосередньої участі докт. техн. наук Є.О. Зайцева, докт. техн. наук А.С. Левицького, В.Л. Рассовського, С.А. Закусила в рамках виконання науково-дослідної роботи *"Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці"*, шифр теми "ПАРАМЕТР-Д", номер держреєстрації 0122U000051, а саме:

– наукові та практичні результати дослідження ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором та ротором, утвореного системою стрічкових компланарних електродів, який дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок усунення похибки, зумовленої кривизною полюса ротора;

– наукові та практичні результати дослідження диференціальний ємнісного сенсора повітряного проміжку, який в порівнянні з іншими сенсорами має більш високу точність вимірювання завдяки усуненню впливів температури і відносної вологості навколишнього середовища;

– теоретичні результати з розробки математичних моделей сигналів ємнісних сенсорів, застосування яких дозволяє підвищити точність визначення параметрів повітряного проміжку (ексцентриситет, асиметрія та інші);

– алгоритм попередньої обробки та збору даних вихідних сигналів із вимірювальних перетворювачів ємнісних сенсорів повітряного проміжку, який забезпечує можливість роботи сенсорів у штатних системах контролю та діагностування поточного технічного стану гідрогенераторів використовуючи протокол ModBus RTU;

– макетний зразок ємнісного сенсора повітряного проміжку з системою стрічкових компланарних електродів.

Нач. Турбінного цеху
Полянський В.В.



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор Інституту електродинаміки
НАН України,
академік НАН України, д.т.н., проф.



 Олександр КИРИЛЕНКО

10 грудня 2024 р.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор Інституту металофізики
ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
чл.-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф.



 Валентин ТАТАРЕНКО

АКТ**впровадження науково-технічної продукції**

У відділі фізики дисперсних систем Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України в рамках Угоди про двосторонню творчу співпрацю та спільну наукову діяльність між ІЕД НАН України та ІМФ ім. Г.В. Курдюмова НАН України від 9 грудня 2024 р. впроваджено метод оперативного контролю приблизного елементного складу збуджених атомів за результирующим відтінком їх випромінювання в процесах об'ємного електроіскрового диспергування гранул металів і сплавів в робочих рідинах. Метод засновано на попередньому спектральному аналізі кольорових гало плазмових каналів, зумовлених релаксацийним випромінюванням присутніх в них атомів, збуджених електронними лавинами або ультрафіолетовим випромінюванням іскрових ядер плазмових каналів для кожного поєднання сплавів гранул і робочих рідин в конкретних технологічних процесах.

Застосування методу дозволяє без використання дорогого спеціалізованого спектрометричного обладнання здійснювати оперативний контроль іскро- та плазмоерозійних процесів виробництва порошків металів і сплавів та підвищити точність прогнозів їх властивостей та хімічного складу.

Метод розроблено вченими відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання Інституту електродинаміки НАН України чл.-кор. НАН України Шидловською Н.А., д.т.н. Захарченко С.М., д.т.н. Зайцевим Є.О., асп. Закусило С.А. в рамках науково-дослідної роботи «Комплексе-5» №ДР 0121U107443 у співпраці з вченими відділу електрохімії та технології неорганічних матеріалів Інституту загальної та неорганічної хімії НАН України чл.-кор. НАН України Омельчуком А.О. та м.н.с. Захарченко М.Ф., а також Національного університету біоресурсів і природокористування України доц. Кулідою М.А.

Наукове обґрунтування основних положень методу опубліковано у спільній статті: Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Захарченко М.Ф., Куліда М.А., Закусило С.А. Спектральний та оптикометричний методи контролю параметрів плазмових каналів, спричинених розрядними струмами між гранулами металів у робочих рідинах. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2024. № 6. С. 72–83. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.10>.

Від ІЕД НАН України

Головний наук. співробітник відділу
теоретичної електротехніки та діагностики
електротехнічного обладнання,
чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф.

 Наталія ШИДЛОВСЬКА

Провідний наук. співробітник відділу
теоретичної електротехніки та діагностики
електротехнічного обладнання, д.т.н., с.н.с.

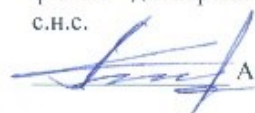
 Сергій ЗАХАРЧЕНКО

**Від ІМФ ім. Г.В. Курдюмова
НАН України**

Завідувач відділу фізики дисперсних
систем, д.ф.-м.н., проф.

 Олександр РУДЬ

Старший наук. співробітник відділу
фізики дисперсних систем, к.ф.-м.н.,
с.н.с.

 Анатолій ПЕРЕКОС

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник директора з наукової роботи
Інституту електродинаміки НАН України,
академік НАН України



Андрій ЖАРКІН
« » 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник генерального директора зі
стратегії та інвестицій
ПрАТ «Укргідроенерго»



Володимир РУДЕНКО
« » 2024 р.

ПРОТОКОЛ

технічної наради фахівців ПрАТ «Укргідроенерго» та
Інституту електродинаміки Національної академії наук України

20 серпня 2024 р.
м. Вишгород

ПРИСУТНІ:

1. Від ПрАТ «Укргідроенерго»:

Рассовський Вадим Леонідович, головний інженер;

Торжевський Павло Костянтинович, заступник директора департаменту з ремонтів.

2. Від Інституту електродинаміки НАН України:

Зайцев Євген Олександрович, завідувач відділу, д.т.н.; **Левицький** Анатолій Станіславович, провідний науковий співробітник, д.т.н.; **Березниченко** Вікторія Олександрівна, науковий співробітник, Ph.D.; **Закусило** Сергій Анатольович, аспірант.

СЛУХАЛИ:

1. Інформацію Зайцева Є. О. стосовно технічних особливостей *ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором у капсульних гідрогенераторах з системою паралельних компланарних електродів*, розробленого в ІЕД НАН України під час виконання досліджень за НДР «Параметр-Д» (№ держреєстрації 0119U001215) та проектом Національного фонду досліджень України «Моделі і засоби підвищення ефективності роботи гідро- та гідроакумуючих електростанцій для балансування ОЕС України в умовах ринку електричної енергії та особливих технологічних обмежень» з виконання наукових досліджень і розробок «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (номер 2022.01/0069).

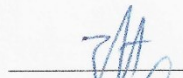
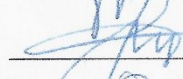


2. Інформацію Рассовського В.Л. та Торжевського П.К. стосовно результатів випробувань експериментального зразка *ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором у капсульних гідрогенераторах з системою паралельних компланарних електродів* під час проведення планового ремонту синхронного горизонтального капсульного гідрогенератору типу SGK-538/160-70.

УХВАЛИЛИ:


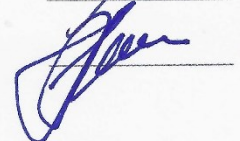
1. Схвалити технічну пропозицію. Запропонований *ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором у капсульних гідрогенераторах з системою паралельних компланарних електродів*, відповідає рівню сучасних приладів контролю, українським і міжнародним стандартам, є корисним і може бути рекомендований до застосування на ГЕС України.

2. Випробування експериментального зразку ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором у капсульних гідрогенераторах з системою паралельних компланарних електродів в основному підтвердили технічні характеристики сенсора та можливість його застосування для вимірювання повітряного зазору в діапазоні від 2 до 10 мм.
3. Провести доробку конструкції ємнісного сенсора з урахуванням зауважень та пропозицій за результатами випробувань, а саме вжити заходів щодо зменшення впливу дії температури та вологості робочого середовища на результати вимірювання повітряного проміжку.
4. Рекомендувати силами ІЕД НАН України у творчій співпраці із фахівцями ПрАТ «Укргідроенерго» провести роботи зі створення автоматизованого програмно-апаратного комплексу контролю повітряного проміжку, в якому застосувати розроблений сенсор.
5. Опублікувати результати розробки в науково-технічній періодиці, доповісти на конференціях та подати спільні заявки на патенти України на ємнісні сенсори для вимірювання повітряного проміжку в гідрогенераторах. По закінченню досліджень підготувати монографію за напрямком «Методи та засоби контролю повітряного проміжку між статором і ротором в потужних гідрогенераторах».

Від ІЕД НАНУ:

 Євген ЗАЙЦЕВ
 Анатолій ЛЕВИЦЬКИЙ
 Сергій ЗАКУСИЛЮ
 Вікторія БЕРЕЗНИЧЕНКО

Від ПрАТ «Укргідроенерго»:

 Вадим РАССОВСЬКИЙ
 Павло ТОРЖЕВСЬКИЙ

ДОДАТОК В

Протокол випробувань

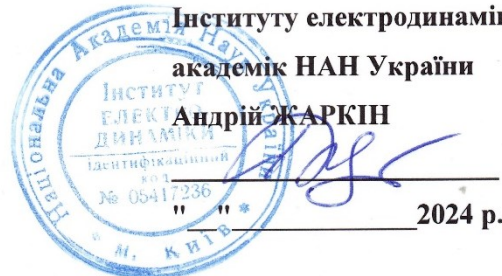
ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукової роботи

Інституту електродинаміки НАН України,

академік НАН України

Андрій ЖАРКІН



Протокол

лабораторних випробувань макетного зразка ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором у капсульних гідрогенераторах з системою паралельних компланарних електродів

20 березня 2024 р., м. Київ

1. ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ

Об'єктом випробувань є макет ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором у капсульних гідрогенераторах з системою паралельних компланарних електродів.

2. ЦІЛЬ ВИПРОБУВАНЬ

Визначення функції перетворення ємнісного сенсора.

3. ПРОГРАМА ВИПРОБУВАНЬ

Визначити залежність електричної ємності C_{12} сенсора від зміни відстані d між загальною площиною електродів сенсора та заземленою плоскою металевою поверхнею, яка імітує поверхню полюса ротора гідрогенератора: $C_{12} = f(d)$.

4. ПРИЛАДИ І УСТАТКУВАННЯ

Під час проведення випробувань використовувався вимірювально-випробувальний стенд, який складається з наступних приладів і устаткування:

1) Макет ємнісного сенсора, який встановлюється на стенд.

Конструктивна схема сенсора наведена на рис.1. Сенсор складається із паралельних між собою і перпендикулярних твірній розточення осердя статора системи високопотенціальних електродів 1, низькопотенціальних електродів 2 та додаткового заземленого

електроду 3. Додатковий електрод 3 розташований навколо системи високопотенціальних і низькопотенціальних електродів та між ними. Всі високопотенціальні електроди 1 та низькопотенціальні електроди 2 з'єднані між собою, таким чином, що утворюють єдину систему електродів ємнісного сенсора. Розміри електродів: L_1 – довжина високопотенціального електрода 1; L_2 – довжина низькопотенціального електрода 2; $2b$ – ширина високопотенціального електрода 1; b – ширина низькопотенціального електрода 2; s – ширина додаткового електрода 3 між електродами 1 і 2; 5,7 – металеві шари; 6 – діелектрична підкладка. Електроди 1, 2 і 3 сформовані в мідному шарі 5 пластини із двостороннього склотекстоліту FR4 і відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4 шириною h .

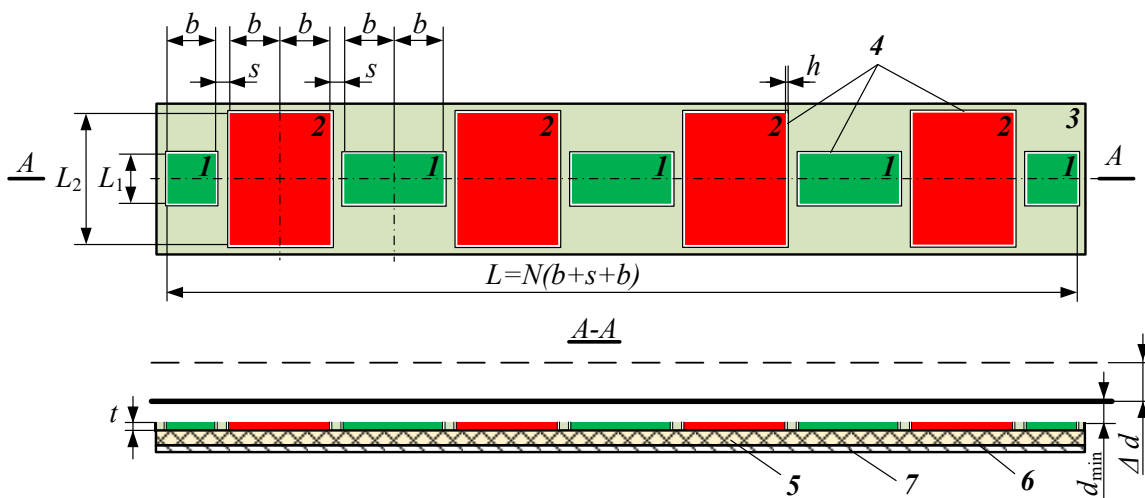


Рис. 1 – Конструктивна схема ємнісного сенсора повітряного проміжку з системою паралельних компланарних електродів

- 2) Пристрій для задавання за допомогою мікрометричної головки зміни величини d (переміщення металевої поверхні).
- 3) Вимірювальний міст EUCOL 2836 LCR METER з похибкою вимірювання 0.05%, рік випуску 2024.

5. МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Випробування проводилося методом прямих вимірювань мостом EUCOL 2836 LCR METER електричної ємності C_{12} між системою електродів 1 і 2 в процесі зміни відстані d до заземленої поверхні за допомогою мікрометричної головки стенду в діапазоні від 0,1 до 12,0 мм і зняттям відповідних показів з моста EUCOL 2836 LCR METER. Функціональна схема стенду для проведення випробувань наведена на рис. 3. Фото ємнісного сенсора, встановленого на пристрої для задавання зміни величини d наведено на рис.3. На рис.4.

представлено фото вимірювально-випробувального стенду, де до вимірювального моста EUCOL 2836 LCR METER підключений сенсор повітряного проміжку.

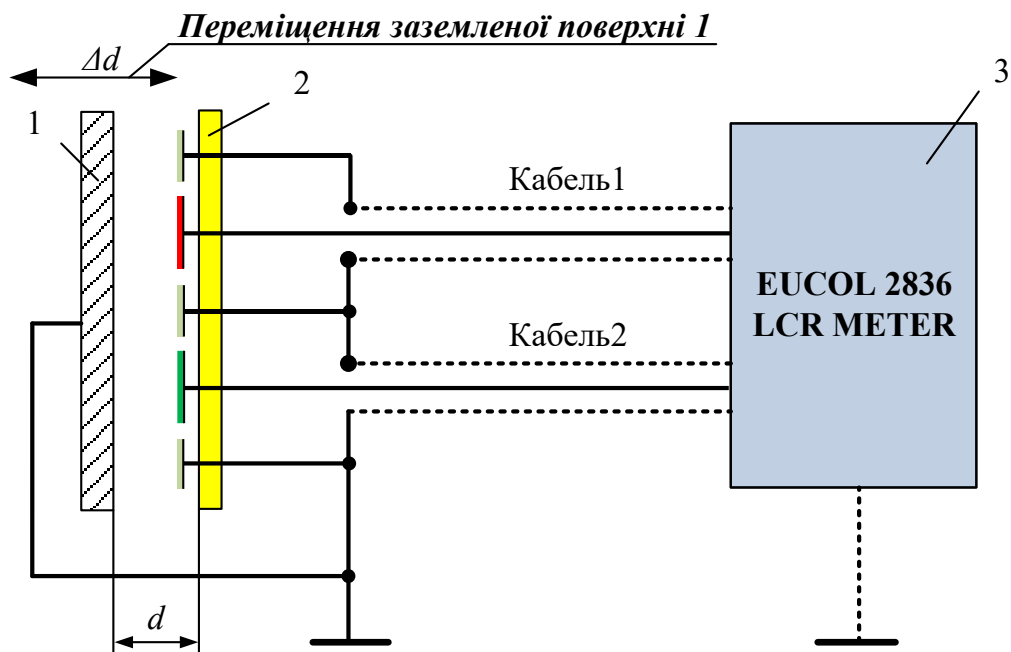
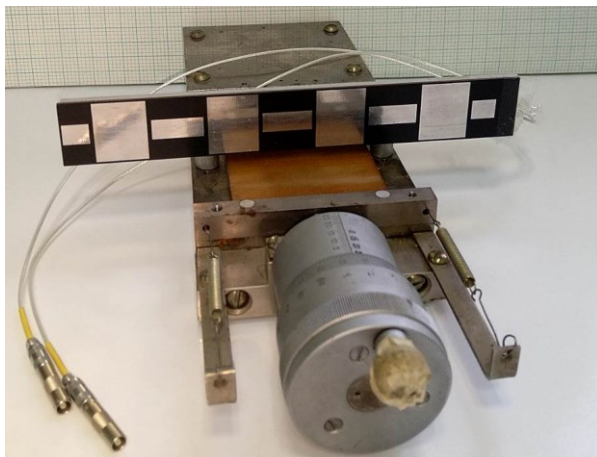
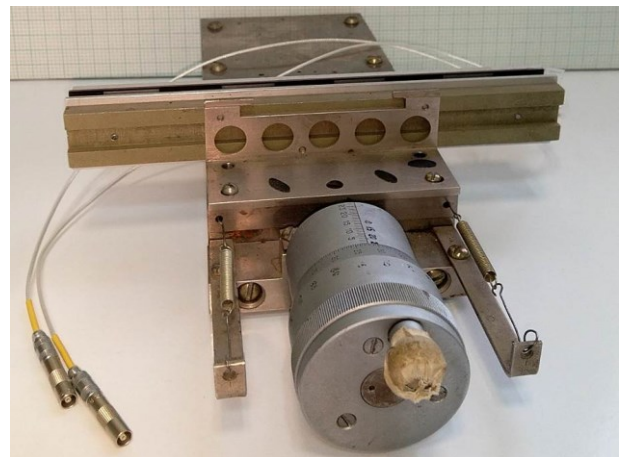


Рис. 2 – Функціональна схема вимірювально-випробувального стенду



а) без імітації поверхні ротора



б) з імітацією поверхні ротора у вигляді металевієї пластини

Рис. 3 – Макет ємнісного сенсора повітряного проміжку встановлений на пристрої для задавання зміни величини d

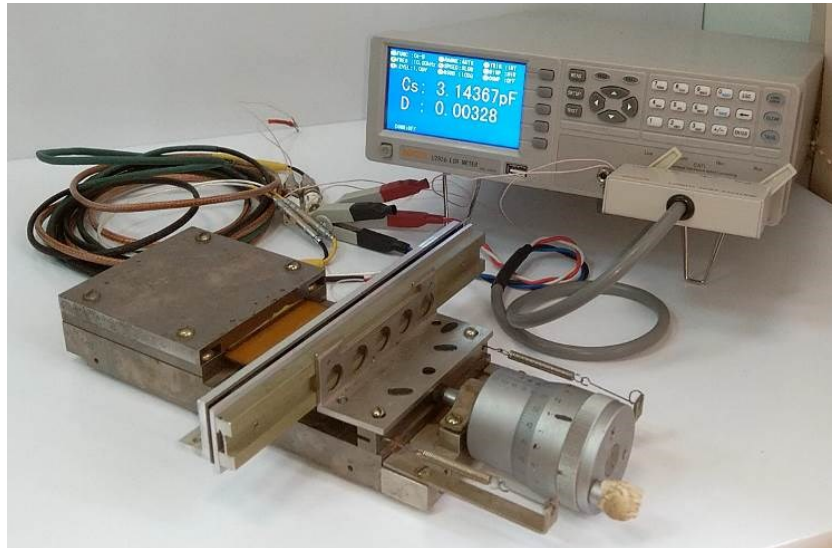


Рис. 4 – Макет ємнісного сенсора повітряного проміжку на вимірювально-випробувальному стенді під час випробувань

6. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Результати вимірювань ємності C_{12D} при прямій зміні відстані d , ємності C_{12R} при зворотній зміні відстані d та розрахована середня величина ємності $C_{12C} = (C_{12D} + C_{12R})/2$ показані в таблиці 1.

Таблиця 1

d , мм	C_{12D} , пФ	C_{12Z} , пФ	C_{12C} , пФ	d , мм	C_{12D} , пФ	C_{12Z} , пФ	C_{12C} , пФ
0,1	3,126	3,125	3,1255	4,0	3,19	3,19	3,19
0,2	3,126	3,125	3,1255	4,2	3,195	3,194	3,1945
0,4	3,1265	3,125	3,12575	4,4	3,2	3,2	3,2
0,6	3,126	3,125	3,1255	4,6	3,205	3,204	3,2045
0,8	3,1275	3,126	3,12675	4,8	3,21	3,209	3,2095
1,0	3,128	3,128	3,128	5,0	3,214	3,214	3,214
1,2	3,13	3,13	3,13	5,2	3,22	3,218	3,219
1,4	3,133	3,132	3,1325	5,4	3,224	3,223	3,2235
1,6	3,136	3,135	3,1355	5,6	3,228	3,227	3,2275
1,8	3,139	3,139	3,139	5,8	3,232	3,232	3,232
2,0	3,143	3,143	3,143	6,0	3,237	3,236	3,2365
2,2	3,148	3,147	3,1475	6,2	3,241	3,24	3,2405
2,4	3,152	3,151	3,1515	6,4	3,245	3,245	3,245
2,6	3,157	3,156	3,1565	6,6	3,249	3,249	3,249
2,8	3,161	3,16	3,1605	6,8	3,253	3,252	3,2525
3,0	3,166	3,165	3,1655	7,0	3,257	3,257	3,257
3,2	3,17	3,17	3,17	7,2	3,261	3,26	3,2605
3,4	3,175	3,176	3,1755	7,4	3,264	3,265	3,2645
3,6	3,181	3,18	3,1805	7,6	3,268	3,267	3,2675
3,8	3,185	3,186	3,1855	7,8	3,272	3,272	3,272

Продовження Таблиця 1

d , мм	C_{12D} , пФ	C_{12Z} , пФ	C_{12C} , пФ
8,0	3,276	3,275	3,2755
8,2	3,279	3,279	3,279
8,4	3,282	3,283	3,2825
8,6	3,287	3,286	3,2865
8,8	3,289	3,29	3,2895
9,0	3,292	3,292	3,292
9,2	3,296	3,295	3,2955
9,4	3,299	3,3	3,2995
9,6	3,301	3,302	3,3015
9,8	3,305	3,305	3,305
10,0	3,308	3,307	3,3075

d , мм	C_{12D} , пФ	C_{12Z} , пФ	C_{12C} , пФ
10,2	3,311	3,311	3,311
10,4	3,314	3,314	3,314
10,6	3,316	3,316	3,316
10,8	3,319	3,32	3,3195
11,0	3,321	3,321	3,321
11,2	3,321	3,323	3,322
11,4	3,323	3,323	3,323
11,6	3,323	3,323	3,323
11,8	3,323	3,323	3,323
12,0	3,323	3,323	3,323

На рис.5 наведено графіки теоретично $C_{12} = f(d)$ та експериментально $C_{12C} = f(d)$ отриманих залежностей. Залежність $C_{12C} = f(d)$ розраховано з компенсацією початкової ємності $C_{12S}=3,1255\text{пФ}$, яка значним чином обумовлена паразитною ємністю C_{12P} між електродами 1 і 2 через діелектричну підкладку 4 та ємністю з'єднувальних провідників.

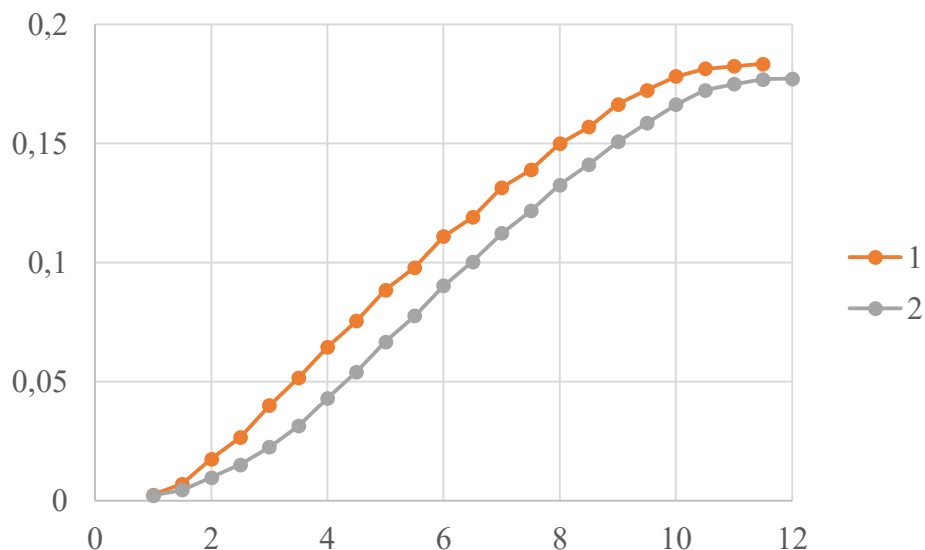


Рис. 5 – Графіки залежностей: 1 – експериментальна залежність $C_{12C} = f(d)$; 2 – розрахункова залежність $C_{12} = f(d)$.

7. ВИСНОВКИ ПО ВИПРОБУВАННЯМ

7.1. Отримані результати лабораторних досліджень макетного зразка сенсору підтверджують роботоздатність сенсора та правильність застосованої розрахункової моделі для аналітичного визначення функції перетворення. Різниця в графіках теоретичної залежності та експериментальної залежності зумовлена наявністю паразитної ємності C_{12p} між електродами 1 і 2 через діелектричну підкладку 4 та ємності з'єднувальних провідників. Точно розрахувати C_{12p} неможливо через неоднорідність прошарків підкладки.

7.2. Отримані результати підтверджують можливість застосування ємнісного сенсора з запропонованою системою паралельних компланарних електродів для вимірювання повітряного проміжку між статором та ротором в капсульному гідрогенераторі типу SGK 538/160-70M в діапазоні від 2 до 10 мм.

7.3. Продовжити роботи зі створення експериментального зразка ємнісного сенсора повітряного проміжку між статором і ротором у капсульних гідрогенераторах з системою паралельних компланарних електродів та відповідного програмно-апаратного комплексу з метою його застосування в системах контролю технічного стану гідрогенераторів.

7.4. Рекомендувати після доробки конструкції ємнісного сенсора (з урахуванням зауважень за результатами лабораторних випробувань) провести випробування ємнісного сенсора на гідрогенераторах типу SGK 538/160-70M Київської ГЕС ПрАТ «Укргідроенерго».

Випробування проводили:

від ІЕД НАНУ:

Завідувач відділу №12, д.т.н., с.н.с.



Євген ЗАЙЦЕВ

Провідний науковий співробітник
відділу №12, д.т.н., с.н.с.



Анатолій ЛЕВИЦЬКИЙ

Науковий співробітник відділу №12, Ph.D.



Вікторія БЕРЕЗНИЧЕНКО

Пров. інженер відділу №12



Сергій ЗАКУСИЛО

від ПрАТ «Укргідроенерго»:

Головний інженер



Вадим РАССОВСЬКИЙ

Заступник директора департаменту з ремонтів

Павло ТОРЖЕВСЬКИЙ

ДОДАТОК Г

Математичне моделювання сигналу з виходу ВВП

MATLAB-код для моделювання сигналу з виходу ВВП сенсора повітряного проміжку

```

% Моделювання вихідного сигналу ємнісного сенсора повітряного проміжку
% (дві ортогональні пари сенсорів, компенсація температури та вологості,
% Модель із рівняннями 1-го порядку
%
clear; close all; clc;
%% 1. Час та основні параметри моделювання
Fs = 2000; % частота дискретизації, Hz
Tsim = 10; % час моделювання, s
t = (0:1/Fs:Tsim-1/Fs)'; % часова вісь
%% 2. Параметри сенсора та геометрія
eps0 = 8.854187817e-12; % вакуумна діелектрична стала, Ф/м
S0 = 1e-4; % ефективна площа електрода, м^2
d0_0 = 1e-3; % номінальний зазор, м
C0 = eps0 * 1.0006 * S0 / d0_0; % опорна ємність при сухому повітрі
theta1 = 0; % сенсор 1 (0 deg)
theta2 = pi/2; % сенсор 2 (90 deg)
%% 3. Температура та вологість
T0 = 20; H0 = 0.3;
T = T0 + 5sin(2pi0.01t) + 0.5randn(size(t))0.02;
H = H0 + 0.05sin(2pi0.02t + 1) + 0.01*randn(size(t));
%% 4. Відносна діелектрична проникність
epsr_dry = 1.0006; k_H = 0.2;
eps_r = epsr_dry + k_H .* H;
%% 5. Температурні коефіцієнти для d0 та S
alpha_eff = 1e-5; alpha_S = 22.2e-5;
d0_T = d0_0 . (1 + alpha_eff.(T - T0));
S_T = S0 . (1 + alpha_S.*(T - T0));
%% 6. Модель руху ротора
Omega = 2pi10; A_unbalance = 50e-6; phi1 = 0.2;
A_mode = 20e-6; f_mode = 1.2; phi2 = 1.0;
x = A_unbalance*cos(Omegat + phi1) + A_modesin(2pif_modet + phi2) + 5e-6randn(size(t));
y = A_unbalancesin(Omegat + phi1) + 0.5A_modesin(2pif_modet + phi2 + 0.3) + 5e-
6*randn(size(t));
%% 7. Нелінійна модель ємності
p1 = x.*cos(theta1) + y.*sin(theta1);
p2 = x.*cos(theta2) + y.*sin(theta2);
C1 = eps0 .* eps_r .* S_T ./ (d0_T - p1);
C2 = eps0 .* eps_r .* S_T ./ (d0_T - p2);
if any(d0_T - p1 <= 0) || any(d0_T - p2 <= 0)
warning('Декілька значень d0 - p <= 0');
end
%% 8. Складова від профілю ротора (70 полюсів)
num_poles = 70; f_rot = Omega/(2pi); f_poles = f_rot * num_poles;

```

```

pulse_width = 0.5; t_pole = mod(f_polest,1);
rotor_profile = double(t_pole < pulse_width);
A_profile = 1e-12;
C1 = C1 + A_profile*rotor_profile;
C2 = C2 + A_profile*rotor_profile;
%% 8a. Візуалізація профілю ротора та його впливу на U
figure('Units','normalized','Position',[0.05 0.05 0.9 0.5]);
subplot(2,1,1);
plot(t, rotor_profile); grid on;
xlabel('t (s)'); ylabel('Полюсний сигнал'); title('Профіль ротора (70 полюсів)');
subplot(2,1,2);
plot(t, C1e12, t, C2e12); grid on;
xlabel('t (s)'); ylabel('pF'); title('Ємність C1, C2 з впливом профілю ротора');
legend('C1','C2');
%% 9. Стохастичні складові
sigma_sensor = 1e-14; sigma_el = 1e-3;
nC1 = sigma_sensor * randn(size(t));
nC2 = sigma_sensor * randn(size(t));
%% 10. Модель перетворення ємність -> напруга
kC = 1e9; tau = 0.01; alpha = 1/(1 + 1/(F*tau));
k_drel = 1e-4; d_el = k_drel * (T - T0);
Uraw1 = kC .* (C1 - C0) + d_el + nC1 * kC;
Uraw2 = kC .* (C2 - C0) + d_el + nC2 * kC;
U1 = filter(alpha, [1 -(1-alpha)], Uraw1) + sigma_el*randn(size(Uraw1));
U2 = filter(alpha, [1 -(1-alpha)], Uraw2) + sigma_el*randn(size(Uraw2));
%% 11. Лінійна інверсія для відновлення p та x,y
kT = mean((eps_r - epsr_dry)./(T - T0 + eps(1)));
kH = k_H;
Cmeas1 = (U1 - d_el);
p_hat1 = d0_0 * ((Cmeas1./kC)./C0 - 1) - d0_0 * (kT.*(T - T0) + kH.(H - H0));
p_hat2 = d0_0 * ((U2 - d_el)./kC./C0 - 1) - d0_0 * (kT.*(T - T0) + kH.(H - H0));
A_mat = [cos(theta1) sin(theta1); cos(theta2) sin(theta2)];
xy_hat = A_mat \ [p_hat1'; p_hat2'];
x_hat = xy_hat(1,:); y_hat = xy_hat(2,:);
%% 12. Візуалізація основних результатів
figure('Units','normalized','Position',[0.05 0.05 0.9 0.8]);
subplot(3,2,1); plot(t, x1e6, t, y1e6); grid on; xlabel('t (s)'); ylabel('\mu m');
title('Істинні x(t), y(t)'); legend('x','y');
subplot(3,2,2); plot(t, eps_r); grid on; xlabel('t (s)'); ylabel('\epsilon_r');
title('Діелектрична проникність');
subplot(3,2,3); plot(t, C1e12, t, C2e12); grid on; xlabel('t (s)'); ylabel('pF');
title('Нелінійна ємність'); legend('C1','C2');
subplot(3,2,4); plot(t, U1, t, U2); grid on; xlabel('t (s)'); ylabel('V');
title('Вихідна напруга'); legend('U1','U2');
subplot(3,2,5); plot(t, (C1-C0)./C0, t, (C2-C0)./C0); grid on; xlabel('t (s)');
ylabel('\Delta C/C0'); title('Відносні зміни ємності');
subplot(3,2,6); plot(t, x1e6, t, x_hat1e6); grid on; xlabel('t (s)'); ylabel('\mu m');
title('Відновлене x(t)'); legend('x','x_hat');
sgtitle('Результат моделювання сигналу на виході ВВП');

```

MATLAB-код для моделювання сигналу з виходу ВВП сенсору биття вала із заданням нерівностей та ексцентриситету вала

```

% Параметри сигналу
fs = 10000; % Частота дискретизації, Гц
T = 1; % Тривалість сигналу, сек
t = 0:1/fs:T-1/fs; % Часова шкала

% Основні параметри вала
f_rot = 50; % Частота обертання вала, Гц
A_rot = 1; % Амплітуда основного сигналу биття

% Нерівності на валу
n_irregularities = 5; % Кількість нерівностей
irreg_positions = linspace(0, T, n_irregularities); % Позиції нерівностей
irreg_amplitudes = 0.2 * rand(1, n_irregularities); % Амплітуди нерівностей

% Ексцентриситет
eccentricity = 0.1; % Ексцентриситет вала
eccentric_signal = eccentricity * cos(2*pi*f_rot*t);

% Формування основного гармонічного сигналу
main_signal = A_rot * sin(2*pi*f_rot*t);

% Формування сигналу нерівностей
irregular_signal = zeros(size(t));
for i = 1:n_irregularities
    irregular_signal = irregular_signal + irreg_amplitudes(i) * exp(-((t-
irreg_positions(i)).^2)/(2*(T/(n_irregularities*5))^2));
end

% Додавання ексцентриситету
total_signal = main_signal + eccentric_signal + irregular_signal;

% Додавання шуму
noise_amplitude = 0.05; % Амплітуда шуму
noise_signal = noise_amplitude * randn(size(t));
total_signal = total_signal + noise_signal;

% Візуалізація сигналів
figure;
plot(t, total_signal);
title('Загальний сигнал биття з нерівностями та ексцентриситетом');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Амплітуда');

```

Основні співвідношення використані під час моделювання зміни величини повітряного проміжку в зоні дії давача ємнісного сенсору в гідрогенераторі в залежності від типу дефекту ексцентриситету

Параметри моделі дефекту ексцентриситету:

Комбінований тип ексцентриситету з ідеальним випадком динамічної складової.

Статичний ексцентриситет з параметрами, наведеними в таблиці Г.1.

Таблиця Г.1

Параметри моделі статичного ексцентриситету

Параметр	Величина	Од.вимірювання	Опис
$e_s (e_s)$	$0,3 \in (0; 3)$	мм	величина ексцентриситету
Кут (β)	$57 \in (0; 360)$	градуси	кут ексцентриситету

Динамічний ексцентриситет (фіксована величина зміщення, що обертається синхронно з ротором / кругова траєкторія годографа) з параметрами, наведеними в таблиці Г.2

Таблиця Г.2

Параметри моделі динамічного ексцентриситету

Параметр	Величина	Од.вимірювання	Опис
$e_d (e_d)$	$0,5 \in (0; 3)$	мм	величина ексцентриситету
Фаза (γ)	$23 \in (0; 360)$	градуси	фаза початкового кута ексцентриситету

Параметри моделі ротора:

тип генератора: вертикальний;

– осі відліку:

– початок координат співпадає з центром розточення статора;

– вісь ОХ співпадає з напрямком на перший сенсор, зростає в цьому ж напрямку;

– вісь ОУ перпендикулярна до осі ОХ, співпадає з напрямком на другий сенсор, зростає в цьому ж напрямку;

– кути встановлення сенсорів: 0^0 ; 90^0 ; 180^0 ; 270^0 ;

– форма заокруглення полюса: рівномірний проміжок на всій ширині полюса;

– секторна структура полюсу: фронт - полюс - спад - проміжок між полюсами.

– зміна величини повітряного проміжку на фронті і спаді прийнято лінійною;

– інтервал моделювання: $[0 .. t]$ секунд відповідно $[0 .. t * 7200]$ відділків;

– частота дискретизації сигналу 7200 Гц. 72 відділки на полюс: розподіл зон полюсу: 5 відділків – фронт; 50 відділків – полюс; 5 відділків – спад; 12 відділків

– проміжок до наступного полюсу.

Модель форми профілю полюса в перерізі площиною, що паралельна площині обертання ротора див. рис. Г.1. Величини значень елементів визначені в % відносно загальної величини профілю;

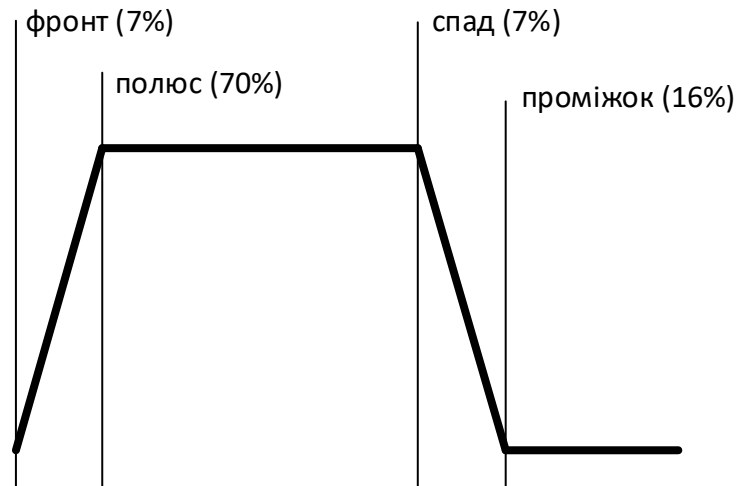


Рис. Г.1 Модель форми профілю полюса.

Визначення параметрів та розрахунок похідних від них величин наведено в таблиці Г.3

Таблиця Г.3

Формули розрахунку

Кількість полюсів ротора (N):	$N = 40$
Кутова величина полюсу (φ_P) /з проміжком включно/	$\varphi_P = 2\pi/N$
Частота дискретизації (f_d)	$f_d = 7200$ Гц
Період дискретизації (t_d)	$t_d = 1/7200$ с
Частота обертання (f)	$f = 150$ об./хв. = 2,5 об./с
Кутова частота обертання (ω)	$\omega = 2\pi \cdot f$ 15,707963 рад./с. (f в 1/с)
Кут дискретизації (ω_d)	$\varphi_d = \omega t_d$
Зона полюса «фронт»	5 дискрет (7%)
Зона полюса «полюс»	50 дискрет (70%)
Зона полюса «спад»	5 дискрет (7%)
Зона полюса «проміжок»	12 дискрет (16%)
% від всього полюсу зони полюса «фронт»	$\varphi_{p0} = 7$
% від всього полюсу зони полюса «полюс»	$\varphi_{p1} = 70$
% від всього полюсу зони полюса «спад»	$\varphi_{p2} = 7$
% від всього полюсу зони полюса «проміжок»	$\varphi_{p3} = 16$
Кут початку зони полюса «фронт»	$P_{i\varphi 0} = P_i \varphi_P$ для полюса P_i
Кут початку зони полюса «полюс» для полюса P_i	$P_{i\varphi 1} = P_{i\varphi 0} + P_\omega(\varphi_{p1})/100$

Кут початку зони полюса «спад» для полюса P_i	$P_{i\varphi 2} = P_{i\varphi 0} + P_{\omega}(\varphi_{p1} + \varphi_{p2})/100$
Кут початку зони полюса «проміжок» для полюса P_i	$P_{i\varphi 3} = P_{i\varphi 0} + P_{\omega}(\varphi_{p1} + \varphi_{p2} + \varphi_{p3})/100$

Розрахунок величини повітряного проміжку для кожного відліку часу наведено в таблиці Г.4

Таблиця Г.4

Формули розрахунку значення повітряного проміжку

Номер дискрети (i)	$i \in [0..7200 \cdot t_{finish}]$
Час події дискрети (t_i)	$t_i = it_d$
Кут дискрети ($\varphi_{i,s}$), s - номер сенсору	$\varphi_{i,s} = i\varphi_d + \varphi_s; s \in [1..4];$
Зона полюсу (P_{part}), (варіант з переліку)	$P_{part} = \begin{cases} 1 & ; \text{зона "фронт"} \\ 2 & ; \text{зона "полюс"} \\ 3 & ; \text{зона "спад"} \\ 4 & ; \text{зона "проміжок"} \end{cases}$
Зона полюсу (P_{part}), (визначення)	$P_{part} = \begin{cases} 1 & ; P_l\varphi_P + 0 \leq \varphi_{i,s} \leq P_l\varphi_P + P_{i\varphi 1} \\ 2 & ; P_l\varphi_P + P_{i\varphi 1} \leq \varphi_{i,s} \leq P_l\varphi_P + P_{i\varphi 2} \\ 3 & ; P_l\varphi_P + P_{i\varphi 2} \leq \varphi_{i,s} \leq P_l\varphi_P + P_{i\varphi 3} \\ 4 & ; P_l\varphi_P + P_{i\varphi 3} \leq \varphi_{i,s} \leq P_l\varphi_P + P_{i\varphi 4} \end{cases}$
індекс в зоні полюсу k_i	$k_i = \begin{cases} i = 0 \\ 0; & k_{i-1} = \{1; 3\} \\ 0; & k_{i-1} = \{2; 4\} \\ k_{i-1} + 1; & \begin{cases} k_{i-1} = \{1; 3\} \\ k_i = k_{i-1} \end{cases} \end{cases}$
повітряний проміжок (без дефекту)	$D_i = \begin{cases} D_{P_l,low} + (D_{P_l,high} - D_{P_l,low})/5 * k_i & ; P_{part} = \\ D_{P_l,high} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots & ; P_{part} = \\ D_{P_l,high} - (D_{P_l,high} - D_{P_l,low})/5 * k_i & ; P_{part} = \\ D_{P_l,low} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots & ; P_{part} = \end{cases}$
Вплив ексцентриситету на повітряний проміжок (формула залежить від сенсору)	$D_{i,e,1} = D_{i,1} - e_s \cos(\beta) - e_d \cos(\varphi_{i,1} + \gamma)$ $D_{i,e,2} = D_{i,2} - e_s \sin(\beta) - e_d \cos(\varphi_{i,2} + \gamma)$ $D_{i,e,3} = D_{i,3} + e_s \cos(\beta) - e_d \cos(\varphi_{i,3} + \gamma)$ $D_{i,e,4} = D_{i,4} + e_s \sin(\beta) - e_d \cos(\varphi_{i,4} + \gamma)$

ДОДАТОК Д

Алгоритми функціонування компонентів ВВП та їх програмний код

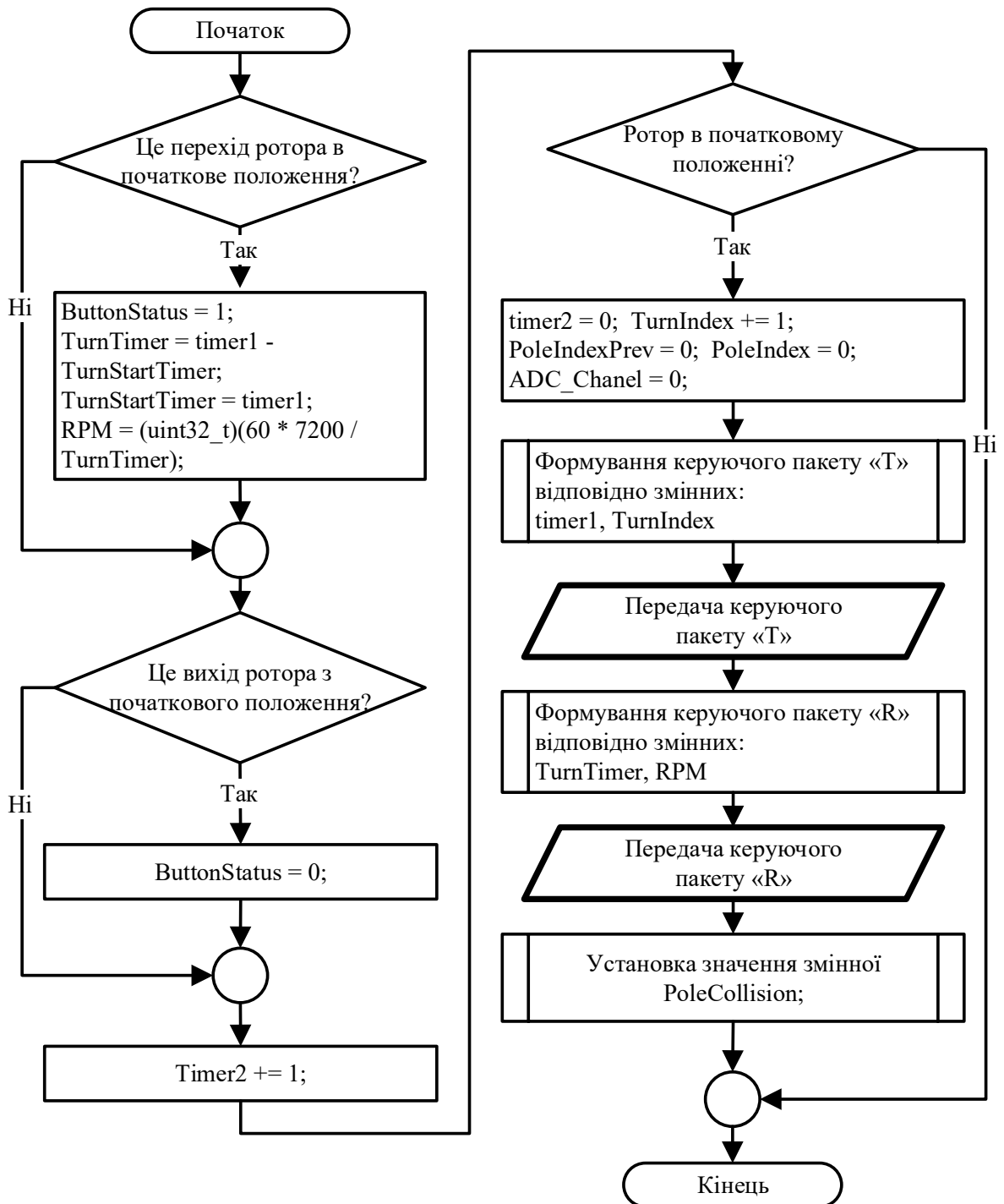


Рис. Д.1 Блок-схема алгоритму опрацювання умови проходження ротором сенсора початкового кута повороту вала

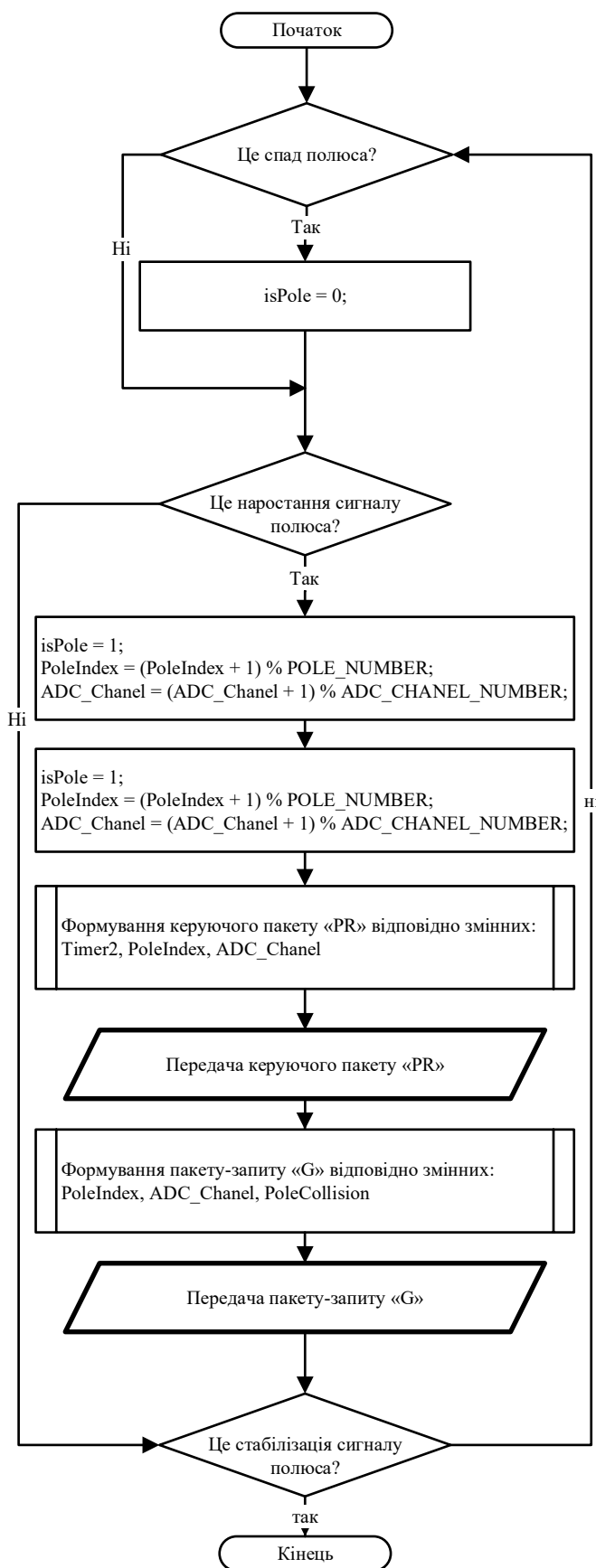


Рис. Д.2 Блок-схема алгоритму опрацювання умови заходу полюса ротора в робочу зону сенсора повітряного проміжку

Основні частини лістингу програмного коду /main.c/ мікроконтролера блоку-диспетчера каналу сенсора повітряного проміжку.

```

#include "main.h"
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#define DATA_BUFFER_SIZE 1000
#define MCU_ADC_SELECTED_CHANEL 1 // to do - make pin selected choise
#define POLE_COUNT 8

uint8_t isReady = 1; // ?? fogotten variable meaning
uint8_t ADC_Chanel; // Channel index
uint8_t Pole; // Pole index
uint8_t storedPole; // stored processed Pole index
uint32_t ADC_CH1 = 0; // ADC sensor value
uint32_t ADC_Summa = 0; // ADC sensor values summ
uint16_t MaxBufferIndex = DATA_BUFFER_SIZE - 1; // buffer max size
uint16_t RecieveDataCount = 0;
volatile uint16_t BufferIndex = 0; // current buffer pointer
volatile int ADCStatus = 0; // ==0 - inactive; ==1 - active;
==2 data send out
char out_str[150]; // string for send to UART
char tmp_str[50]; // tmp string for send to
UART
//
uint8_t Rx_Byte2 = 0; // one UART_Rx byte
uint8_t Rx_Data[150]; // why 150 ? max UART_Rx bytes received
int RxInd = 0; // Rx_Data[] index
/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_DMA_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_TIM2_Init(void);
static void MX_USART2_UART_Init(void);

void ParceRequestP(void)
{
    int ii = 0;
    while (Rx_Data[ii] != ' ' && ii < RxInd) // skip to 1st space
    {
        , &sMasterConfig) != HAL_OK)
        {
            Error_Handler();
        }
    }
}

static void MX_USART2_UART_Init(void)
}

/**
 * Enable DMA controller clock
 */
static void MX_DMA_Init(void)
{
    /* DMA controller clock enable */
    __HAL_RCC_DMA1_CLK_ENABLE();

    /* DMA interrupt init */

```

```

/* DMA1_Channel6_IRQn interrupt configuration */
HAL_NVIC_SetPriority(DMA1_Channel6_IRQn, 0, 0);
HAL_NVIC_EnableIRQ(DMA1_Channel6_IRQn);
/* DMA1_Channel7_IRQn interrupt configuration */
HAL_NVIC_SetPriority(DMA1_Channel7_IRQn, 0, 0);
HAL_NVIC_EnableIRQ(DMA1_Channel7_IRQn);

}

/**
 * @brief GPIO Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure = {0};
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOD_CLK_ENABLE();
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);

    /*Configure GPIO pin : PA5 */
    GPIO_InitStructure.Pin = GPIO_PIN_5;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_PULLDOWN;
    GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);
}

void Error_Handler(void)
{
    __disable_irq();
    while (1)
}

```

Лістинг програмного коду /stm32f1xx_it.c/ мікроконтролера блоку-диспетчера каналу сенсора повітряного проміжку.

```

#include "main.h"
#include "stm32f1xx_it.h"
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
extern uint8_t POLE_NUMBER; // ==8 => 0..7 pole count + 1 if 0-
start turn position is on pole
extern uint8_t ADC_CHANEL_NUMBER; // ==2 => 0..1
// array of previous pole index for actual pole index || case n = 8 --
tod for n = x
extern uint8_t PrevPoleIndex[]; // = {7, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6};
// array of previous ADC chanel index for actual ADC chanel index || case n = 2 --
tod for n = x like above
extern uint8_t PrevADC_Chanel[]; // = {1, 0};
uint8_t PoleCollision = 0; // not use -- for case when 0-
turn mark positioned on pole
uint8_t Prev2PoleIndex = 0; // ?? for check front/fall

ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0}; // for ADC system variable
int StrobeOnCount = 0; // счетчик тиков строба
*/

```

```

void TIM2_get_ADC (void)
{
    /* GET value from ADC -- start of code -- */
    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;
    sConfig.Rank = ADC_REGULAR_RANK_1;
    sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_1CYCLE_5;
    if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    HAL_ADC_Start(&hadc1);
    // init ADV
    __NOP(); // delay 2
cycles
    __NOP();
    HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 5); // comand
for convertation
    __NOP(); // delay 2
cycles
    __NOP();
    ADC_CH1 = HAL_ADC_GetValue(&hadc1); //
AnalogRead - get ADC value
    __NOP(); // delay 2
cycles
    __NOP();
    /* GET value from ADC -- end of code -- */
}

/*
 * set pole LED to 0/1 by Cx value
 */
void TIM2_set_LED_isPole(void) {

    if (ADC_CH1 <= CxValLowLevel + (int)(CxValHighLevel - CxValLowLevel)/3) {
// (CxValHighLevel - CxValLowLevel)/3 ~ 200 {
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, POLE_STROB_FALL_Pin|POLE_STROB_RISE_Pin,
GPIO_PIN_RESET);
    }
    if (ADC_CH1 >= CxValHighLevel - (int)(CxValHighLevel - CxValLowLevel)/3) {
// (CxValHighLevel - CxValLowLevel)/3 ~ 200 {
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, POLE_STROB_FALL_Pin|POLE_STROB_RISE_Pin,
GPIO_PIN_SET);
    }
}

/*
 * start turn position sensor processing & timer2 processing
 */
void TIM2_start_turn(void) {
// timer2 += 1; // !!!!
/*
        (unsigned int)TurnIndex);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
        DelayNTiks(8);
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)out_str, strlen(out_str), 50);
        DelayNTiks(8);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
        //
        DelayNTiks(50);
        //
        strcpy((char*)out_str, (char*)&""); // out_str = "";
        sprintf(out_str, "R %u %u\r\n",

```

```

        (unsigned int)TurnTimer,
        (unsigned int)RPM);

    ButtonOffCount = 0;
    ButtonCountIndex = 0;
    TurnTimer = timer1 - TurnStartTimer;
    TurnStartTimer = timer1;
    RPM = (uint32_t)(60 * 7200 / TurnTimer);           // RPM = (1 / (TurnTimer/7200))
* 60 | 1 делим на время? оборота в ?екундах и множим на 60
}
    if (ButtonOffCount > 100 && ButtonStatus == 1)    // set to off if 100 x off
and status is on
    {
        ButtonStatus = 0;
        ButtonOnCount = 0;
        ButtonOffCount = 0;
        sprintf(out_str, "T %u %u %u %u %u %u\r\n", (unsigned int)timer1,
(unsigned int)timer2,
                (unsigned int)TurnIndex, (unsigned int)PoleIndex,
                (unsigned int)TurnTimer, (unsigned int)RPM);
*/
        sprintf(out_str, "T %u %u\r\n",
                (unsigned int)timer1,
                (unsigned int)TurnIndex);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
        DelayNTiks(8);
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)out_str, strlen(out_str), 50);
        DelayNTiks(8);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
        //
        DelayNTiks(50);
        //
        strcpy((char*)out_str, (char*)& "");        // out_str = "";
        sprintf(out_str, "R %u %u\r\n",
                (unsigned int)TurnTimer,
                (unsigned int)RPM);

    {
        CxValLowLevel = ADC_CH1;
    }
    if (ADC_CH1 > CxValHighLevel)
    {
        CxValHighLevel = ADC_CH1;
    }
    //
    if (timer1 > 10000)
    {
        // out_str = "";
        //sprintf(out_str, "CxLowLvl = ;", CxValLowLevel, " CxHghLvl = ",
CxValHighLevel, ".\r\n"); // create out_str
        sprintf(out_str, "CxValLowLevel = %u; CxValHighLevel = %u.\r\n",
                (unsigned int)CxValLowLevel,
                (unsigned int)CxValHighLevel
                );
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
        // set RS-485 to sending mode
        DelayNTiks(144);
        // delay
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)out_str, strlen(out_str), 50);
        // send out_str to RS-485 bus
        DelayNTiks(144);
        // delay

```

```

        HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
                                // set RS-485 to receiving mode
//
    if ((CxValHighLevel - CxValLowLevel) < 300)
    {
        // ----- reset adjustment & timer
        FSMGlobState = 0;
        CxValLowLevel = 4096;
        CxValHighLevel = 0;
        timer1 = 0;                // !!! todo separate timers
        // ----- output to UART // RS-485 / RS-422
str "
// out_str = "";
    sprintf(out_str, "PF %u %u\r\n",
            (unsigned int)PoleIndex,
            (unsigned int)timer2
            );
    HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)out_str, strlen(out_str), 50);
    DelayNTiks(18);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
        //
    }
    {
        // PR - pak
        isPole = 1;
        PoleIndex = (PoleIndex + 1) % POLE_NUMBER;
        ADC_Chanel = (ADC_Chanel + 1) % ADC_CHANNEL_NUMBER;
        // ----- case POLE == 0 => Start
Turn trigger //
        if (PoleIndex == 0)
        {
            // 0-turn
            TurnTimer = timer1 - TurnStartTimer;
            RPM = (uint32_t)(60 * 7200 / TurnTimer);           // RPM = (1 /
            timer2 = 0;
            TurnIndex += 1;
            PoleIndexPrev = PoleIndex;
            strcpy((char*)out_str, (char*)& "");           // out_str = "";
//            sprintf(out_str, "1/2s.\r\n");
            sprintf(out_str, "CxLLvl= %u; CxHLvl= %u; Cx= %u; PoleIdx= %u; ADCIdx =
            %u, isPole= %u.\r\n",
                    (unsigned int)CxValLowLevel,
                    (unsigned int)ADC_CH1,
                    (unsigned int)ADC_Chanel,
                    (unsigned int)isPole
                    );
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
            DelayNTiks(14);
                                // delay
            HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)out_str, strlen(out_str), 70);
            DelayNTiks(14);
                                // delay
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
        }
// ===== FSMglobState == 1 -----
processing
    if (FSMGlobState == 1)
    {
        FSM_Proc_State1();
    } else
}
}

```