

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Панчик Михайло Вікторович

УДК 621.317

ДИСЕРТАЦІЯ

**Розробка методу та засобів контролю монолітності осердя статора потужного
турбогенератора під час пресування**

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

М. В. Панчик

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

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Панчик М.В. Розробка методу та засобів контролю монолітності осердя статора потужного турбогенератора під час пресування. – 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, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено розробці принципів побудови, теоретичним дослідженням та експериментальній перевірці засобів автоматизації контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора турбогенератора під час його пресування на етапі виготовлення на заводі виробнику. Використання створених засобів контролю дозволить забезпечити оперативне виявлення величин та розміщення місць з недостатньою спресованістю для подальшого їхнього усунення, що дає змогу забезпечити необхідну якість виготовлення осердя статора і у свою чергу – збільшення надійності експлуатації потужних турбогенераторів.

Основні завдання роботи полягають в розробці методу неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного турбогенератора під час пресування на етапі його виготовлення та засобів, що його реалізують, на основі оптичних, тензометричних та ємнісних вимірювальних перетворювачів, які дозволять здійснювати оперативне визначення дефектів осердя.

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 використовуючи системний підхід, було проведено аналітичний огляд наявних науково-технічних джерел та патентної інформації, щодо технології виготовлення осердя статора, існуючих методів контролю та діагностування стану спресованості осердя статора ТГ.

Проведений аналітичний огляд та попередні експериментальні дослідження дозволили визначити причини зміни щільності, а також створити систематизацію можливих дефектів пресування осердя під час його виготовлення. Дослідження були направлені на створення інформаційного підґрунтя для розробки і технічної реалізації системи оперативного контролю осердя статора потужного турбогенератора під час його пресування на етапі виготовлення. Визначено необхідність забезпечення контролю монолітності пакетів осердя статора потужного турбогенератора під час пресування на етапі виготовлення задля забезпечення виявлення в осерді місць з недостатньою монолітністю та подальшим їхнім ремонтом, що дозволить забезпечити необхідну якість виготовлення осердя статора та забезпечити у свою чергу подальшу безаварійну експлуатацію турбогенераторів.

У *другому розділі* представлено результати розробки методу неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного генератора під час пресування на етапі його виготовлення та засоби, що його реалізують на основі оптичних, тензометричних та ємнісних вимірювальних перетворювачів.

В основу методів покладено неперервне вимірювання питомого тиску пресування свинцевих контрольних проб в N рівномірно розміщених точках торцевої поверхні осердя статора з урахуванням того, що тиск є величиною, яка обернено пропорційна величині дефекту осердя (зменшення щільності). Вимірювання питомого тиску здійснюється з використанням металевої мембрани з жорстким центром, як силосприймаючого елементу, і вимірювальних перетворювачів, які реєструють зміну геометричних та механічних характеристик мембрани під дією питомого тиску пресування.

Контролю щільності пресування осердя статора під час його виготовлення дозволить вирішити питання підвищення продуктивності праці під час здійснення

контролю щільності пресування осердя, підвищити достовірність визначення місць зі зменшеною монолітністю в пакетах осердя за рахунок мінімізації впливу людського фактору на процес виготовлення, що в свою чергу дозволить з більшою точністю діагностувати дефекти осердя статора. Результати визначення щільності пресування призначені задля використання в системі контролю під час оперативного визначення місць дефектів монолітності осердя та їхніх параметрів, що дає можливість визначити розміри та місця встановлення ущільнюючого матеріалу при усуненні дефектів. Результатом контролю є підвищення якості виготовлення осердя, і в подальшому забезпечення більш надійної експлуатації ТГ.

Проведені дослідження із визначення механічних характеристик мембрани з жорстким центром, залежності переміщення жорсткого центру мембрани від питомого тиску пресування. Визначення оптимальних механічних параметрів мембрани здійснювався як шляхом аналітичних розрахунків так і комп'ютерного моделювання, що дозволило оптимізувати її геометричні параметри.

Показано, що перспективним методом для вимірювання параметрів мембрани з жорстким центром є оптоволоконний з використанням ґраток Брегга, який базується на спектральному аналізі відбитого пучка світла. До переваг даного методу можна віднести високу чутливість та можливість мультиплексування, тобто об'єднання сенсорів в масив, а до недоліків – високу чутливість до зміни температури, значну вартість виготовлення сенсорів та вимірювальних перетворювачів, що затрудняє його застосування. Для зниження вартості засобів контролю було запропоновано вимірювач параметрів мембрани з тензометричними перетворювачами. Але його недоліками є: по-перше, необхідність тарування кожного перетворювача на мембрані, а, по-друге, складність, або практична неможливість проведення тестування у разі відклеювання первинного перетворювача. Недоліки вищеназваних методів відсутні у випадку використання ємнісних вимірювачів параметрів мембрани. Проведені розрахунки залежності ємності сенсора від переміщення жорсткого центру мембрани під дією питомого тиску пресування.

Третій розділ роботи присвячено розробці принципів побудови системи неперервного контролю монолітності осердя статора турбогенератора під час його пресування на етапі виготовлення, яка реалізує описаний в попередньому підрозділі метод контролю, наведенню результатів досліджень засобів, призначених для отримання контрольно-діагностичних сигналів, параметри яких дозволяють забезпечити ідентифікування дефектів щільності пресування осердя під час його виготовлення. Описано варіанти побудови структури системи контролю щільності осердя статора під час пресування, які передбачають забезпечення можливості використання автономного джерела живлення на базі технології "EnergyHarvesting" та живлення через оптоволоконні лінії з використанням фотогальванічних елементів, які дозволяють зменшити вплив дії потужних магнітних полів на результат вимірювання. Система контролю поділяється на 2 зони. У зоні 1 зі сторони зонтичного пресу розміщено 45 вимірювальних комірок у спеціально створеному додатковому натискному кільці. В зоні 2 віднесеної на безпечну відстань від робочого середовища серверну частину системи контролю пресування осердя статора. Для функціонування системи було розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення, яке використовується засобами контролю монолітності осердя турбогенератора для формування, передачі, обробки вимірювальної інформації та забезпечення взаємодії між засобами контролю в єдиній структурі системи контролю. Структура програмного забезпечення умовно поділяється на програмне забезпечення блоку вимірювальних перетворювачів, розмішених безпосередньо в зоні контролю та серверної частини, яка розташовується в безпечній зоні. Обмін даними у системі відбувається з використанням промислового протоколу зв'язку Modbus RTU. Згідно узагальненого алгоритму роботи вимірювальної комірки, після початку роботи відбувається ініціалізація вторинного вимірювального перетворювача та ліній зв'язку modbus. В основному циклі роботи, відбувається вимірювання питомого тиску пресування, та після отримання запиту від серверу, відбувається передавання пакету даних на сервер. Алгоритм роботи серверної частини в свою чергу включає процес опитування мережі сенсорів та проведення обробки інформаційних сигналів.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень засобів неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного генератора на основі ємнісних вимірювальних перетворювачів. Для перевірки відповідності одержаних результатів розроблено та виготовлено випробувально-демонстраційний стенд. Проведено експериментальні дослідження із визначення характеристик силосприймаючого елементу та ємнісного первинного вимірювального перетворювача. На основі експериментальних даних отримано залежність ємності сенсора від питомого тиску пресування. Підтверджено адекватність створеної фізичної моделі контрольної комірки на основі плоскої мембрани з жорстким центром і ємнісного сенсора переміщення її центру. Результати проведених експериментальних досліджень показали, що сумарна похибка визначення тиску пресування вимірювальною коміркою складає до 5% в діапазоні вимірювання. Розходження між аналітичними та експериментальними даними обумовлені використанням спрощених моделей для розрахунків, які не враховують паразитного впливу крайових ефектів в ємнісному сенсорі, а також похибок обумовлених вторинним вимірювальним перетворювачем та алгоритмічного апарату, використаного задля забезпечення проведення розрахунків інформативних параметрів. Для перевірки можливості використання розроблених засобів контролю осердя статора під час його випробувань на заводі виробнику та під час експлуатації на станціях були проведені дослідження впливу магнітного поля. Для оцінки впливу магнітного поля промислової частоти застосовано спеціально розроблений стенд, який дозволяє проводити випробування впливу магнітного поля промислової частоти величиною до 0,61 Тл. Отримані результати дослідження впливу магнітного поля на первинний та вторинний вимірювальний перетворювач продемонстрували, що вплив магнітного поля на результати вимірювань має адитивний характер та викликає незначне відхилення вимірюваних величин ємності до 0,8% від максимального значення діапазону вимірювання.

В результаті проведених досліджень було розроблено та виготовлено вимірювальні комірки для системи контролю монолітності осердя статора. Система та відповідні розроблені засоби призначені для використання під час

контролю монолітності пресування осердя статора турбогенератора типів ТГВ-200 та ТГВ-300.

Проведені натурні випробування експериментального макету системи неперервного контролю монолітності осердя статора з вимірювальною коміркою під час пресування пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ на АТ «Завод «Електроважмаш» (зараз АТ "Українські енергетичні машини") підтвердили можливість використання ємнісного вимірювача оперативного контролю питомого тиску під час пресування пакетів активного заліза осердя статора турбогенератора, а також їхнього впровадження в технологічний процес виготовлення осердя статора.

Проведені лабораторні дослідження та випробування підтвердили правильність запропонованого метода та прийнятих теоретичних розрахунків для первинних вимірювальних перетворювачів засобів контролю монолітності (щільності пресування).

Наукова новизна та оригінальність запропонованих рішень підтверджено двома патентами України та однією поданою заявкою на патент України.

Практична цінність запропонованих рішень підтверджена впровадження отриманих результатів на АТ «Завод «Електроважмаш» (зараз АТ "Українські енергетичні машини") під час розробок та випробувань нових та модернізації існуючих потужних турбогенераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300, що підтверджується відповідними актами та протоколами проведених успішних випробувань, а також на ТОВ «Політон-Україна» під час модернізації елементів ударного стенду для випробувань елементів захисту промислового обладнання.

Ключові слова: турбогенератор, статор, осердя, складання та пресування, дефекти, контроль, виготовлення, автоматизована система контролю, метрологічне забезпечення.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В. Автоматизований пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора. *Технічна електродинаміка*. 2021. №5. С. 83-87. **DOI:** <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.083>. **Index in SCOPUS.** (Особистий внесок – брав участь у розробці пристрою для контролю монолітності осердя статора під час пресування на основі тензометричних вимірювальних перетворювачів, узагальненні результатів та підготовці статті).

2. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В. Виявлення дефектів складання осердя статора потужного турбогенератора. *Вісник Вінницького політехнічного Інституту*. 2021. № 3. С.47-53. **DOI:** <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-156-3-47-53>. (Особистий внесок – брав участь у розробці принципів побудови пристрою для контролю монолітності осердя статора під час пресування на основі оптоволоконних вимірювальних перетворювачів з решітками Брегга, займався розробкою алгоритмічного апарату забезпечення функціонування системи контролю, узагальненні результатів та підготовці статті).

3. Зайцев Е.А., Панчик М.В. Термометричні методи дослідження стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 59. С. 86–92. **DOI:** <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.086>. (Особистий внесок – брав участь у проведенні аналітичного огляду та аналізі термометричних методів та засобів контролю стану спресованості осердя та підготовці статті).

4. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Фізичні процеси та їх вплив на розвиток дефектів в осерді статора потужних генераторів. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Issue: 224. P. 81–84. **DOI:** <https://doi.org/10.15407/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20>. (Особистий внесок – визначення впливу фізичних процесів та інших факторів, які впливають на ступінь пресування осердя статора).

5. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромп'яс Б.А., Панчик М.В. Дослідження впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2019. Вип. 52. С. 80–86. DOI: 10.15407/publishing2019.52.080. (Особистий внесок – проведенні експериментальних досліджень, розробці алгоритму проведення експериментальних досліджень, узагальненні результатів та підготовці статті).

6. Патент України на винахід UA 125321 C2, H02K 15/02, G01L1/06. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора / Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М. В., Пінської В. Ф., Захожаєв В.М., Шофул А.К. заявник Інститут електродинаміки НАН України. № а2020 02912; заявл. 14.05.2020; публ. 16.02.2022. Бюл. № 7/2022.

7. Патент України на винахід UA 125916 C2, H02K 15/02, G01L1/06. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора/ Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В.– заявник Інститут електродинаміки НАН України. № а2020 03974; заявл. 14.05.2020; публ. 06.07.2022. Бюл. № 27/2022.

8. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Панчик М.В. Особливості процесу пресування осердя статора потужного турбогенератора. *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації*: матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, 11-12 квітня 2019 м. Кременчук, Україна, 2019. С.81-83.

9. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Етапи перетворення інформації в системах контролю пресування елементів гідроагрегатів, *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*: матеріали XIX міжнар. наук.-практ. конф., 14 – 15 травня 2020 року, Київ: К. : ТОВ "Календар", 2020. С.513-516.

10. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Термометричні методи дослідження стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора. *“Приладобудування: стан і перспективи”*: матеріали XX міжнар. наук.-техн. конф., 18 – 19 травня 2021 м. Київ, Україна, С.253.

11. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Програмне забезпечення системи контролю осердя статора потужного генератора під час виготовлення. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах(МСТТР-2021)*: матеріали XXI міжнар. наук.-техн. конф., 3-7 червня 2021 р., м. Одеса, Україна. С. 5-6.

12. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Panchyk M., Bereznynchenko V. Study influence industrial frequency magnetic field on capacitive pressing sensor for large turbogenerator core clamping system. *International Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON-2019)*: Proc. of the 2019 IEEE Ukraine 2 – 6 Jule, 2019 Lviv, Ukraine. P. 566–569. **DOI**: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879949>. **Index in SCOPUS.**

13. Zaitsev I., Levytskyi A., Panchik M., Bereznynchenko V. Fiber Bragg grating-based monitoring system for large generator core clamping fault diagnosis. *Modern electrical and energy system (MEES-2021)*: Proc. of the International conference, November 15 – 17, 2017 Kremenchuk, Ukraine. 2021. P. 1-4. **DOI**: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598630>. **Index in SCOPUS.**

ANNOTATION

Panchyk M.V. Development of a method and means for control monolithic of powerful turbogenerator stator core during pressing. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis on receipt of doctor of philosophy (PhD) scientific degree of the specialty 152 – metrology and information and measurement technology. – Institute of electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the development of construction principles, theoretical research and experimental verification of means of automating monolithic control (pressing density) of the turbogenerator stator core during its pressing at the manufacturing stage at the manufacturing plant. The use of the created control tools will allow for prompt detection of values and placement of places with insufficient compression for their further elimination, which makes it possible to ensure the necessary quality of the stator core manufacturing and, in turn, increase the reliability of operation of powerful turbogenerators.

The main tasks of the work consist in the development of a method of continuous monitoring of the monolithicity (pressing density) of the stator core of a powerful turbogenerator during pressing at the stage of its manufacture and the means that implement it, based on optical, tensometric and capacitive measuring transducers, which will allow for the operative determination of core defects.

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

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, reveals the essence and state of the researched scientific and technical problem, provides justification for the expediency of conducting research, reflects the connection of the work with the scientific programs and plans of the National Academy of Sciences of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, formulates the purpose and tasks of research, scientific novelty and the practical significance of the

obtained results, the personal contribution of the recipient is indicated, approvals of the work and publication of its results in scientific publications are given.

In the first section, using a systematic approach, an analytical review of available scientific and technical sources and patent information was conducted regarding the stator core manufacturing technology, existing methods of controlling and diagnosing the state of compression of the turbogenerator stator core.

The conducted analytical review and preliminary experimental studies made it possible to determine the reasons for the change in density, as well as to create a systematization of possible defects in the pressing of the core during its manufacture. The research was aimed at creating an information basis for the development and technical implementation of a system for operational control of the stator core of a powerful turbogenerator during its pressing at the manufacturing stage. The need to ensure the monolithicity of the packages of the stator core of a powerful turbogenerator during pressing at the manufacturing stage is determined in order to ensure the detection of places in the core with insufficient monolithicity and their subsequent repair, which will allow to ensure the required quality of the stator core and ensure, in turn, further trouble-free operation of turbogenerators.

The second chapter presents the results of the development of a method of continuous monitoring of the monolithicity (pressing density) of the stator core of a powerful generator during pressing at the stage of its manufacture and the means that implement it on the basis of optical, tensometric and capacitive measuring transducers.

The methods are based on the continuous measurement of the specific pressing pressure of lead control samples at N evenly spaced points of the end surface of the stator core, taking into account that the pressure is a value that is inversely proportional to the value of the core defect (density reduction). The specific pressure is measured using a metal membrane with a rigid center as a force-receiving element, and measuring transducers that register the change in the geometric and mechanical characteristics of the membrane under the action of the specific pressing pressure.

Controlling the pressing density of the stator core during its manufacture will allow to solve the issue of increasing labor productivity during control of the pressing density

of the core, increasing the reliability of determining places with reduced monolithicity in the core packages due to minimizing the influence of the human factor on the manufacturing process, which in turn will allow with greater accuracy to diagnose stator core defects. The results of the determination of the pressing density are intended for use in the control system during the operational determination of the locations of core monolithic defects and their parameters, which makes it possible to determine the sizes and places of installation of the sealing material during the elimination of defects. The result of the control is an increase in the quality of the production of the core, and subsequently ensuring more reliable operation of the TG.

Studies were conducted to determine the mechanical characteristics of a membrane with a rigid center, the dependence of the movement of the rigid center of the membrane on the specific pressing pressure. Determination of the optimal mechanical parameters of the membrane was carried out both by analytical calculations and computer modeling, which made it possible to optimize its geometric parameters.

It is shown that a promising method for measuring the parameters of a membrane with a rigid center is an optical fiber using Bragg gratings, which is based on the spectral analysis of a reflected light beam. The advantages of this method include high sensitivity and the possibility of multiplexing, i.e. combining sensors into an array, and the disadvantages include high sensitivity to temperature changes, the significant cost of manufacturing sensors and measuring transducers, which complicates its application. To reduce the cost of control tools, a membrane parameters meter with strain gauge transducers was proposed. But its disadvantages are: firstly, the necessity of taring each transducer on the membrane, and, secondly, the difficulty or the practical impossibility of conducting testing in case of ungluing the primary transducer. The disadvantages of the above-mentioned methods are absent in the case of using capacitive meters of membrane parameters. Calculations of the dependence of the sensor capacity on the movement of the rigid center of the membrane under the action of the specific pressing pressure were carried out.

The third section of the work is devoted to the development of the principles of the construction of a system for continuous control of the monolithicity of the stator core of

the turbogenerator during its pressing at the manufacturing stage, which implements the control method described in the previous subsection, to the presentation of the results of research on means intended for obtaining control and diagnostic signals, the parameters of which allow to ensure the identification of defects core pressing density during its manufacture. Options for building the structure of the stator core density control system during pressing are described, which provide for the possibility of using an autonomous power source based on the "EnergyHarvesting" technology and powering through optical fiber lines using photovoltaic elements, which allow reducing the influence of powerful magnetic fields on the measurement result. The control system is divided into 2 zones, as shown on the slide. In zone 1 on the side of the umbrella press, 45 measuring cells are placed in a specially created additional pressure ring. In zone 2, the server part of the stator core pressing control system is placed at a safe distance from the working environment. For the functioning of the system, algorithmic software was developed, which is used by means of monitoring the monolithicity of the turbogenerator core to form, transmit, process measurement information and ensure interaction between means of control in a single structure of the control system. The structure of the software is conventionally divided into the software of the unit of measuring transducers located directly in the control area and the server part, which is located in the safe area. Data exchange in the system takes place using the Modbus RTU industrial communication protocol. According to the generalized algorithm of the measuring cell, after the start of operation, the secondary measuring converter and modbus communication lines are initialized. In the main work cycle, the specific pressing pressure is measured, and after receiving a request from the server, the data packet is transferred to the server. The algorithm of the server part, in turn, includes the process of surveying the network of sensors and processing information signals.

The fourth chapter presents the results of experimental studies of means of continuous control of monolithicity (pressing density) of the stator core of a powerful generator based on capacitive measuring transducers. To check the conformity of the obtained results, a test and demonstration stand was developed and manufactured. Experimental studies were conducted to determine the characteristics of the force-

receiving element and the capacitive primary measuring transducer. Based on the experimental data, the dependence of the sensor capacity on the specific pressure of the pressing pressure was obtained. The adequacy of the created physical model of the control cell based on a flat membrane with a rigid center and a capacitive sensor of the movement of its center was confirmed. The results of the experimental studies showed that the total error of determining the pressing pressure by the measuring cell is up to 5% in the measurement range. Differences between analytical and experimental data are due to the use of simplified models for calculations that do not take into account the parasitic influence of edge effects in the capacitive sensor, as well as errors caused by the secondary measuring converter and the algorithmic apparatus used to ensure the calculation of informative parameters. In order to verify the possibility of using the developed means of controlling the stator core during its tests at the manufacturer's plant and during operation at the stations, studies of the influence of the magnetic field were conducted. To assess the influence of the industrial frequency magnetic field, a specially designed stand was used, which allows testing the flow of the industrial frequency magnetic field up to 0.61 T. The obtained results of the study of the influence of the magnetic field on the primary and secondary measuring transducer demonstrated that the influence of the magnetic field on the measurement results has additive in nature and causes a slight deviation of the measured capacitance values up to 0.8% from the maximum value of the measurement range.

As a result of the conducted research, measuring cells were developed and manufactured for the monolithic control system of the stator core. The system and corresponding developed means are intended for use during control of monolithic pressing of the stator core of turbogenerator types TGV-200 and TGV-300.

Full-scale tests of the experimental layout of the system for continuous control of the monolithicity of the stator core with a measuring cell during pressing of the package of the stator core of the turbogenerator TGV-250-2PT3 at Elektrovazhmash Plant JSC (now Ukrainian Energy Machines JSC) confirmed the possibility of using a capacitive meter for operational control of specific pressure during pressing of packages of active

iron of the stator core of the turbogenerator, as well as their introduction into the technological process of manufacturing the stator core.

The conducted laboratory studies and tests confirmed the correctness of the proposed method and the accepted theoretical calculations for the primary measuring transducers of monolithic control devices (pressing density).

The scientific novelty and originality of the proposed solutions are confirmed by two patents of Ukraine and one submitted application for a patent of Ukraine.

The practical value of the proposed solutions is confirmed by the implementation of the obtained results at JSC "Electrovajmash Plant" (now JSC "Ukrainian Energy Machines") during the development and testing of new and modernization of existing powerful turbogenerators of the TGV-200 and TGV-300 type, which is confirmed by relevant acts and protocols conducted successful tests, as well as at "Politon-Ukraine" LLC during the modernization of elements of the shock stand for testing elements of protection of industrial equipment.

Key words: turbogenerator, stator, core, assembly and pressing, defects, control, manufacturing, automated control system, metrological support.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ СПРЕСОВАНOSTІ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ.....	30
1.1 Особливості технології складання і пресування осердя статора потужного турбогенератора	30
1.2 Причини та наслідки зміни щільності пресування осердя під час пресування	35
1.3 Види дефектів пресування осердя.....	36
1.4 Основні методи та засоби визначення стану спресованості осердя статора турбогенератора.....	42
1.4.1 Контроль механічними вимірювальними пристроями	43
1.4.2 Вібромеханічний контроль	44
1.4.3 Ультразвуковий контроль	47
1.4.4 Температурний контроль	48
1.4.5 Електромагнітна дефектоскопія осердя (EL CID)	51
1.4.6 Контроль стану осердя з оцінюванням деформації пластичних елементів, розміщених на торцевій поверхні осердя	55
1.5 Напрямки підвищення якості виготовлення осердя статора потужних турбогенераторів	61
1.7 Вимоги до характеристик засобів визначення стану спресованості осердя статора під час складання і пресування	65
Висновки до розділу 1	68
РОЗДІЛ 2 ЗАСОБИ НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ МОНОЛІТНОСТІ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТГ.....	69
2.1 Метод автоматичного визначення щільності пресування осердя статора потужного турбогенератора під час складання	69

2.2 Розрахунок силовимірювальної мембрани засобів контролю щільності пресування осердя статора	73
2.3 Контроль осердя з ємнісним перетворювачем тиску пресування.....	78
2.4 Контроль осердя з тензометричним перетворювачем тиску пресування	82
2.5 Контроль пресування осердя статора на основі оптичних сенсорів із решітками Брегга.....	89
Висновки до розділу 2	99
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРА, АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ МОНОЛІТНОСТІ ОСЕРДЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА	100
3.1 Вимоги до засобів контролю стану спресованості осердя статора турбогенератора	100
3.2 Етапи перетворення інформації в системах контролю стану спресованості осердя статора турбогенератора	103
3.3 Структура системи неперервного контролю щільності пресування осердя статора ТГ із он-лайн обробкою даних	105
3.4 Структура системи неперервного контролю щільності пресування осердя статора ТГ офф-лайн обробкою даних	109
3.5 Структура системи неперервного контролю щільності пресування осердя статора ТГ бездротовою передачею даних	111
3.6 Структура програмного забезпечення засобів контролю	113
3.7 Програмно-алгоритмічне забезпечення вторинних вимірювальних перетворювачів на базі мікросхем CDC.....	117
3.7.1 Структура апаратно-програмного забезпечення вторинного вимірювального перетворювача	117
3.7.2 Структура алгоритму функціонування вторинного вимірювача автоматизованої системи.....	118
3.7.3 Алгоритм реалізації перезавантаження CDC AD7747	132
3.7.4 Алгоритм опрацювання запитів від серверу по лінії Modbus RTU ...	134

3.7.5 Алгоритм реалізації зчитування результату перетворення ВВП CDC AD7747 (алгоритм В).....	136
3.7.6 Алгоритми роботи протоколу обміну даними у системі з урахуванням просторово-розподіленої сенсорної мережі.....	138
Висновки до розділу 3	141
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ МОНОЛІТНОСТІ ОСЕРДЯ СТАТОРА НА ФІЗИЧНИХ МОДЕЛЯХ.....	142
4.1 Дослідження первинного вимірювального перетворювача.....	142
4.2 Дослідження вторинного вимірювального перетворювача.....	144
4.2.1 Вплив магнітного поля на стабільність функціонування вторинного вимірювального перетворювача «ємність-код».....	144
4.2.2 Вплив магнітного поля на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6.....	148
4.3 Результати досліджень експериментального зразку вимірювальної комірки	155
4.4 Результати випробувань експериментального зразку системи контролю монолітності осердя статора	163
Висновки до розділу 4	170
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	173
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	184
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	187
ДОДАТОК В ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ...	190
ДОДАТОК Д ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ ВИМІРЮВАЧА ЗУСИЛЬ ПРЕСУВАННЯ.....	192

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БЖ – блок живлення;

ВБР – волоконна брегівська решітка;

ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач;

ЕМС – електромагнітна сумісність;

ЄС – ємнісний сенсор;

ТГ – турбогенератор;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

CDC – Capacitance-to-Digital Converter;

C – електрична ємність;

E – модуль пружності;

F – сила;

f – частота;

U – напруга;

ε – відносні діелектрична проникність;

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

ν – коефіцієнт Пуассона;

σ – механічна напруга;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

На сьогодні в ОЕС України експлуатуються понад 80 турбогенераторів(ТГ) типу ТГВ-200, ТГВ-300 та інших, які забезпечують значну частину виробітку електроенергії. Переважна більшість турбогенераторів перебуває в експлуатації вже понад 50 років, що значно перевищує розрахунковий термін їх експлуатації за нормативною документацією, а тому необхідно проведення невідкладних робіт з оновлення та модернізації машин, а також з розробки агрегатів нового покоління. Проведення ефективної модернізації існуючих турбогенераторів та виготовлення нових машин, конкурентних на світовому ринку з покращеними експлуатаційними характеристиками (з урахуванням характеру навантаження, географічним розташуванням станції, наявності електричних зв'язків тощо) неможливо без удосконалення методів контролю якості виготовлення їхніх вузлів. Адже особливістю потужних генераторів, на відміну від інших типів енергетичних електромашин, є складність конструктивного виконання та виготовлення їхніх найважливіших деталей і вузлів, які в процесі роботи зазнають високого ступеню механічних навантажень, особливо в перехідних режимах, де мають місце аномальні й аварійні перевантаження. З часом останні призводять до накопичення втомних напружень в елементах конструкції які в сукупності із дефектами виготовлення одночасно скорочують фактичний термін експлуатації машини, а також можуть бути причинами розвитку небезпечних дефектів, і, як наслідок, погіршення експлуатаційних характеристик та фактичного технічного стану генератору або будь-якого його конструктивного вузлу.

ТГ характеризується багатьма параметрами, серед яких вирішального значення набувають параметри, які характеризують їх як механічні системи. Однією із основних механічних властивостей ТГ, яка головним чином визначає експлуатаційну надійність та працездатність, є стан спресованості осердя статора. Початковий стан спресованості осердя задається в процесі виготовлення осердя, а після виготовлення під час транспортування та експлуатації забезпечується за допомогою натискних плит і стяжних призм. З часом внаслідок експлуатаційних

навантажень виникає зниження зусиль, що стискають осердя, що призводить до повної або часткової втрати працездатності осердя, виникнення небезпечних дефектів статора.

Хоча осердя не є найслабшим вузлом статора, більша частина несправностей потужних ТГ пов'язана із пошкодженнями інших складових частин статора [1, 2], які при справному осерді можуть бути відремонтовані або замінені. Вразі втрати працездатності власне осердям виникає необхідність заміни всього статора.

У розроблення та вирішення питань вказаної проблематики внесли вагомий вклад ряд вітчизняних та закордонних вчених: Постніков І.М., Счастливий Г.Г., Титко О.І., Глєбов І.О., Федоренко Г.М., Шульженко М.Г, Левицький А.С., Зозулін Ю.В., Гуревич Е.Й., Голоднова О.С., Кузьмін В.В., Ростик Г.В., Bissonnette M., Lin J., Talas P., Toom P., Rassmussen J., Howard B. та інші.

На даний час існуючі методи та засоби контролю, що використовуються для контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора через різні причини не можуть бути використані для забезпечення підвищення якості виготовлення осердя статора на заводі виробнику.

На основі вищевикладеного можна сформулювати актуальну науково-прикладну задачу, яка полягає у розробці метода задля забезпечення неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного генератора під час пресування на етапі його виготовлення та створенні інформаційно-вимірювальних засобів, які його реалізують. Використання засобів контролю дозволить забезпечити достовірну та оперативну інформацію в режимі реального часу задля автоматичного виявлення місць з недостатнім пресуванням для подальшого їхнього усунення, що дасть змогу забезпечити необхідну якість виготовлення осердя статора та забезпечити у свою чергу подальшу безаварійну експлуатацію потужних електричних машин.

Вирішення цього завдання дозволить забезпечити безперебійну експлуатацію електрообладнання ОЕС України, особливо в воєнний та повоєнний період коли виникає необхідність в короткий час забезпечити проведення модернізації або

оновлення осердя статора потужних турбогенераторів, що виникли в результаті ворожих дій.

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

Дисертаційна робота виконувалась у відділі електричних та магнітних вимірювань та 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:

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

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

«Розвиток елементів теорії, розроблення нових методів розрахунку та створення засобів для підвищення надійності та енергоефективності режимів і технологічних процесів в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «РЕЖИМ-1», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №8 від 29.06.2021 р.), 2022 – 2023 р.р., №ДР 0122U000136 (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);

«Розроблення вдосконалених електромеханічних і електромагнітних систем електричних станцій та методів їх діагностування» (шифр «Агрегат-3»,

затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №8 від 29.06.2021 р.), 2022 – 2024 рр., №ДР 0122U000840 (виконавець).

Під час виконання цих робіт автором створено метод неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного генератора під час пресування на етапі його виготовлення та засоби, що його реалізують на основі оптичних, тензометричних та ємнісних вимірювальних перетворювачів, розроблено алгоритмічний апарат забезпечення функціонування засобів контролю монолітності осердя статора під час пресування у складі системи контролю виготовлення осердя статора потужного турбогенератора, а також проведенні експериментальні дослідження розроблених засобів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка принципів побудови, теоретичні дослідження та експериментальна перевірка засобів неперервного контролю монолітності пресування (щільності пресування) осердя статора турбогенератора під час його пресування.

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

- аналіз існуючих методів та засобів контролю пресування осердя статора;
- проведення аналізу технологічного процесу пресування осердя статора потужних турбогенераторів та під час їх виготовлення;
- розробка методу неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя під час його пресування на основі оптичних, тензометричних та ємнісних вимірювальних перетворювачів;
- удосконалення силовимірювальної комірки засобів контролю монолітності осердя статора під час пресування задля забезпечення автоматизації вимірювання тиску пресування в он-лайн режимі;
- розробка силосприймаючого елементу та визначення його характеристик;
- розробка вимірювача тиску пресування («вимірювальна комірка») на основі силосприймаючого елементу і ємнісних сенсорів, який забезпечує підвищення ефективності контролю осердя статора під час його складання та пресування;
- проведення досліджень характеристик вимірювача тиску пресування;

- розробка алгоритмічного апарату забезпечення функціонування компонентів контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного турбогенератора під час пресування;

- створення макетів та фізичних моделей вузлів осердя статора турбогенератора для проведення лабораторних випробувань;

- проведення експериментальних досліджень вимірювачів тиску пресування осердя статора під час його пресування у складі сегментованої мережі багатоканальної системи неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного турбогенератора під час пресування.

Об'єкт дослідження – процес контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного турбогенератора під час пресування.

Предмет дослідження – методи та засоби контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора турбогенератора під час пресування.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися: положення теоретичної електротехніки та математики, методи фізичного і математичного моделювання, методи теорії інформаційно-вимірювальних систем, теорія ймовірностей, методи статистичного оброблення сигналів, теоретичні і експериментальні методи в області вимірювачів фізичних величин. Достовірність отриманих у роботі результатів підтверджена порівнянням і узгодженістю результатів розрахунків з результатами багаточисленних експериментальних досліджень та проведених натурних випробувань.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено метод, що забезпечує оперативний контроль монолітності осердя статора потужного турбогенератора в N точках поперечного перерізу під час його пресування шляхом автоматизованого вимірювання тиску в кожній точці, що дозволило підвищити достовірність визначення місцезнаходження дефектів осердя, які зумовлені недоліками технології виготовлення;

- удосконалено силовимірювальну комірку з пластичними деформованими елементами шляхом застосування силосприймаючого елемента у вигляді плоскої

мембрани з жорстким центром і автоматичних вимірювачів тиску пресування, що дозволяє підвищити точність, роздільну здатність і забезпечити проведення неперервного контролю щільності пресування осердя статора під час пресування;

- вперше запропоновано використання оптичних, тензометричних та ємнісних вимірювальних перетворювачів та силосприймаючого елемента у вигляді плоскої мембрани з жорстким центром задля забезпечення вимірювання тиску пресування, що дозволило забезпечити автоматизацію контролю тиску пресування осердя і зменшити витрати часу на виготовлення осердя;

- набув подальшого розвитку алгоритмічний апарат забезпечення функціонування компонентів, призначених для утворення, збирання, оброблення й отримання інформації в системі контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора турбогенератора під час його пресування.

Новизна одержаних технічних рішень захищена патентами України на винахід № UA 125321 від 16.02.2022 "Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора" та № UA 125916 від 06.07.2022 "Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора".

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- розроблено структурні схеми, виготовлено та експериментально перевірено експериментальні зразки вимірювальних каналів систем контролю монолітності осердя статора ТГ під час пресування, що дозволило автоматизувати процес контролю монолітності пресування осердя статора під час його пресування та зменшити вплив людського фактору на достовірність контролю та якість виготовлення осердя статора;

- розроблено апаратно-програмне забезпечення системи контролю із сегментованою мережею вимірювальних комірок на базі технології "Energy Harvesting" та оптичних лінії з використанням фотовольтаїчних елементів, як основний спосіб зв'язку для передачі даних;

- визначено технічні характеристики вимірювальних компонентів (ємнісного сенсору та спеціальної мембрани) системи контролю, що дозволило забезпечити

необхідний рівень чутливості визначення монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного ТГ;

- розроблено та виготовлено експериментальні зразки компонентів (ємнісного сенсору та спеціальної мембрани) системи контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора потужного ТГ та проведено його випробування;

- впроваджено як моделі, методи та компоненти системи діагностування зусиль пресування осердя статора під час пресування на підприємстві ДП "Завод "Електроважмаш" (зараз АТ "Українські енергетичні машини") (м. Харків) для підвищення ефективності контролю тиску пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ, що дало змогу підвищити якість виготовлення осердя статора ТГ завдяки реалізації автоматичного контролю технологічного процесу пресування (Акт впровадження, 2019 р., Протокол випробувань, 2019 р.);

- впроваджено в комплекті технічної документації результати дослідження вимірювальної комірки зусилля пресування, як елемент засобів випробувань захисту на ТОВ «Політон-Україна», що дозволило підвищити ефективність проведення випробувань елементів систем гнучкого захисту промислових об'єктів (Акт впровадження, 2021 р.).

Подальше використання теоретичних і практичних результатів дисертаційної роботи передбачено шляхом виготовлення експериментальних зразків вимірювальних компонентів (ємнісного сенсору та спеціальної мембрани) та системи контролю монолітності пресування для проведення їх випробувань та впровадження на АТ "Українські енергетичні машини" (зараз АТ "Українські енергетичні машини") (м. Харків).

Документи, що підтверджують впровадження, наведено у Додатку Б.

Особистий внесок здобувача.

Безпосередньо автором здійснено:

- інформаційний пошук та аналіз літературних даних за темою дисертації;
- проведення аналітичного огляду та аналізу термометричних методів та засобів контролю стану спресованості осердя;

- розробка засобів контролю монолітності осердя статора під час пресування на основі оптичних, тензометричних та ємнісних вимірювальних перетворювачів;
- визначення впливу фізичних процесів та інших факторів, які впливають на ступінь пресування осердя статора;
- розробка алгоритмічного апарату забезпечення функціонування засобів контролю монолітності осердя статора під час пресування у складі системи контролю виготовлення осердя статора потужного турбогенератора;
- визначення характеристик силосприймаючого елементу ємнісних первинних вимірювальних перетворювачів та вторинного вимірювального перетворювача вимірювача тиску пресування («вимірювальна комірка»);
- розробка алгоритму проведення експериментальних досліджень засобів контролю монолітності осердя статора під час пресування.

Наукові роботи опубліковані у співавторстві з Левицьким А.С., Зайцевим Є.О., Кромплясом Б.А., Березниченко В.О., Пінським В.Ф., Захожаєвим В.М., Шофулом А.К..

Співавторами наукових праць є науковий керівник 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.

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

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на міжнародних науково-практичних конференціях: Збірник наукових праць XVII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів "Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації" (Кременчук, 11-12 квітня 2019 р.); XIX Міжнародна науково-

практична конференція *"Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті"* (Київ, 14 – 15 травня 2020 р.); X Міжнародна науково-технічна конференція *"Приладобудування: стан і перспективи"* (Київ, 18 – 19 травня 2021 р.); XXI Міжнародна науково-технічна конференція *"Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (МСТТР-2021)"* (Одеса, 3-7 червня 2021 р.); 2019 IEEE Ukraine International conference *"On electrical and computer engineering (UKRCON-2019)"* (Lviv, 2 – 6 Jule, 2019); International conference *"Modern electrical and energy system (MEES-2021)"* (Kremenchuk, November 15 – 17, 2017).

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

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 197 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатки. Обсяг основного тексту дисертації складає 156 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 9 таблицями та 122 рисунком. Список використаних джерел містить 89 найменування, з них 57 кирилицею та 32 латиницею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ, МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ СПРЕСОВАНOSTІ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

Невід'ємною складовою забезпечення надійності та безаварійності роботи потужних електричних машин, особливо генераторів електростанцій, на сьогодні є проведення ефективного та якісного контролю їхнього фактичного технічного стану не тільки під час експлуатації, але й на етапі виготовлення.

Технічний стан статора потужних турбогенераторів (ТГ) характеризується багатьма параметрами, серед яких вирішального значення набувають параметри, що характеризують статор як механічну систему. Однією із основних механічних властивостей статора, що визначає його працездатність, є наданий йому в процесі виготовлення стан пружного стиснення осердя, який після виготовлення забезпечується за допомогою натискних плит і стяжних призм. Хоча осердя не є найслабшим вузлом статора і більша частина несправностей потужних ТГ пов'язана із пошкодженнями інших складових частин статора [3, 4]. При справному осерді більша частина несправностей можуть бути відремонтовані або замінені. З часом, внаслідок експлуатаційних навантажень, виникає зниження зусиль, що стискають осердя, що призводить до повної або часткової втрати працездатності осердя, виникненню небезпечних дефектів статора [5] та, як наслідок означає необхідність заміни всього статора, а в деяких випадках і генератора.

Отже, велике значення має надійність методів контролю та діагностування фактичного стану пресування осердя статора.

1.1 Особливості технології складання і пресування осердя статора потужного турбогенератора

Основним етапом виготовлення осердя статора потужного турбогенератора на якому задаються його механічні властивості є процеси його складання та пресування на заводі-виробнику. При складанні на заводі-виробнику осердя статора потужного ТГ штаповані і лаковані сегменти з електротехнічної сталі

мають бути укладені з високою точністю та опресовані з однаковою щільністю по всьому об'єму осердя для забезпечення вібраційної стійкості і заданих електромагнітних характеристик [6-9]. Недотримання заданого значення та рівномірності щільності спресованості по всьому об'єму осердя статора є потенційною причиною небезпечних ушкоджень ТГ, які можуть проявитися під час його транспортування на місце експлуатації, або зберігання, або під час його експлуатації на електростанції. Останні ушкодження найбільш небезпечні, адже вони можуть призвести не тільки до фінансових затрат пов'язаних із пошкодження самої машини та електростанції, а і до соціальних та екологічних наслідків.

Необхідна щільність пресування осердя статора забезпечується шляхом періодичного його пресування за допомогою спеціального пресу парасолькового типу (рис. 1.1). Пресування, зазвичай, відбувається окремими частинами – збірками, що складаються із десяти - п'ятнадцяти пакетів. При цьому осердя складається і пресується окремими частинами висотою 400-600 см в залежності від етапу пресування. Форма і розміри сегментів активної сталі повинні забезпечити складання осердя статора з заданими зовнішнім і внутрішнім діаметрами, певною геометрією пазів під укладку обмотки і її заклинення, базування зібраного осердя в корпусі статора [10, 11]. Осердя статора турбогенераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300 збирається у вигляді щільно спресованих між собою лакованих сегментів з електротехнічної сталі, кількість яких може сягати 300 тисяч.

На рис. 1.1 показано схему складання і пресування осердя статора ТГ за допомогою пресу, де в лівій частині зображено складену і спресовану окрему частину осердя, а в правій – повністю складене і спресоване осердя. На рис.1.1 позначено: 1 – прес з верхнім натискним кільцем; 2 – стяжна призма осердя статора ТГ; 3 – колона, яка збирається в процесі складання і пресування осердя; 4 – з'єднувальні муфти колони; 5 – корпус статора; 6 – нижнє натискне кільце; 7 – монтажне кільце; 8 – телескопічний підіймач; 9 – опірна тумба.

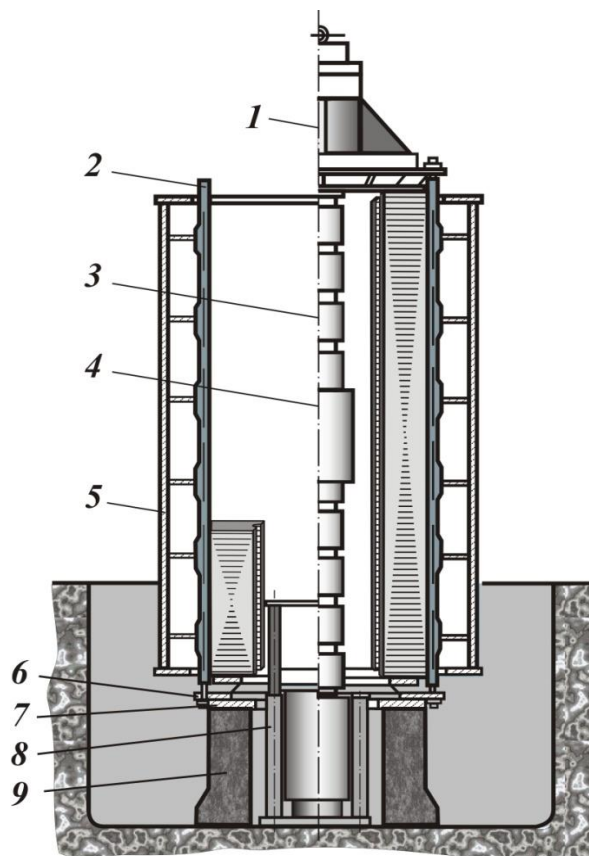


Рис. 1.1 Пресс

На рис. 1.2 представлено процес ручного складання осердя статора ТГ із застосуванням спеціальних калібрів [10].

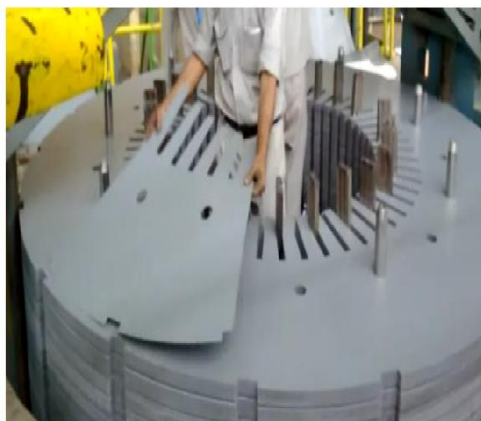


Рис. 1.2 Осердя статора під час ручного складання

На рис. 1.3 зображено фотографію статора турбогенератора типу ТГВ 200 вертикального розміщення під час складання та пресування осердя на АТ "ДП Завод "Електроважмаш"".



Рис. 1.3 Статор ТГВ 200 на пресі

Форма і розміри листів активної сталі мають певну геометрію пазів під укладку обмотки і її заклинення для забезпечення складання осердя статора з заданими зовнішнім і внутрішнім діаметрами, базування зібраного осердя в корпусі статора [12, 13]. Листи виготовляються методом штамповки або різання з подальшим знаттям заусенців та лакуванням емаллю ГФ92-ХК із просушкою протягом 2-6 годин. Листи електротехнічної сталі осердя товщиною 0,5 мм виготовляються цільнопресованими, щоб при роботі машини повністю виключалася можливість їх відносного переміщення. При зовнішньому діаметрі осердя статора $D \geq 990$ мм листи виконуються із сегментів та потім збираються в цілий диск, а при $D < 990$ мм з цілих дисків. Осердя статора при суцільних листах кріпляться в корпусі за допомогою нажимних фланців та шпонок, а при сегментних листах стяжними шпильками.

Приклад сегмента виготовленого із електротехнічної сталі та підготовленого для збирання осердя статора ТГ типу ТГВ 200 зображено на рис.1.4.



Рис. 1.4 Сегмент електротехнічної сталі ТГ типу ТГВ-200

Сегменти виготовлені із електротехнічної сталі в процесі збирання укладаються з високою точністю по колу на стяжні призми (у різних виробників вони можуть називатися ребра, клини, тощо) для надання осердю необхідної монолітності, вібраційної стійкості і заданих електромагнітних характеристик. Останнє в свою чергу досягається поетапним пресуванням зібраних пакетів із сегментів електролітичної сталі з однаковою щільністю по всьому об'єму осердя. Для забезпечення рівномірної щільності пресування осердя, збирання та пресування осердя відбувається в декілька етапів окремими збірками пакетів.

Перше пресування відбувається після збирання пакетів загальною висотою 500-600 мм, всі наступні після 400-450 мм без врахування вентиляційних каналів. Щільність пресування визначається конструкцією статора і становить біля 1 МПа для ТГ потужністю від 160 до 1000 МВт, збільшення сили пресування не призводить до збільшення щільності пресування, але призводить до виникнення порушень ізоляційного покриття сегментів.

Схематичне зображення зібраних пакетів осердя статора ТГ перед його пресуванням приведено на рис. 1.5, на якому введено наступні умовні вісі: Z (axial) – аксіальна; Y (radial) – радіальна; X (circumferential) – тангенціальна або кругова.

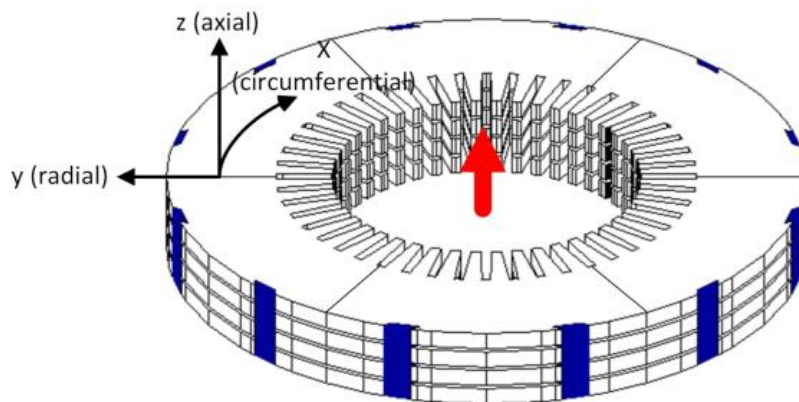


Рис. 1.5 Схематичне зображення зібраних пакетів осердя статора

Для виготовлення осердя статорів ТГ використовуються сегменти виготовлені з гарячекатаної електротехнічної сталі марок 1511 (E41), 1512 (E42), 1513 (E43), 1514 (E43A). Крім цього застосовують холоднокатані електротехнічні сталі марок 3412 (E320) і 3413 (E330), які укладають під час збирання осердя уздовж спинки напрямком прокату (поперек зубців), а також марки сталі 3412 (E320) і 3413 (E330), які укладаються поперек спинки напрямком прокату сталі. Для виготовлення сегментів активної сталі осердя застосовується гарячекатана і холоднокатана електротехнічна сталь товщиною 0,5мм, в деяких випадках 0,35 мм.

У ТГ потужністю до 500 МВт напрямком прокату розташовується впоперек зубців сегментів, що дозволяє знизити вібрацію осердя статора внаслідок анізотропії механічних властивостей сталі. Анізотропна холоднокатана сталь володіє також більш високими магнітними властивостями в напрямку її прокату [14].

1.2 Причини та наслідки зміни щільності пресування осердя під час пресування

Одним із факторів, що визначають якість виготовлення осердя, є правильний вибір зусилля пресування, яке для кожного типу ТГ розраховується, виходячи з його технічних характеристик за методикою описаною в [15].

При цьому, потрібно враховувати, що активна сталь осердя повинна бути спресована так щільно, щоб сила тертя між її окремими листами виключала

можливість будь-якого, навіть незначного, переміщення одного листа по відношенню до іншого, але сила пресування не повинна бути занадто великою, щоб не привести до повної або часткової руйнації елементів статора. Отже, недотримання рівномірності щільності спресованості по всьому об'єму осердя статора під час експлуатації машини може призвести у випадку:

а) *недостатньої сили пресування* до зниження коефіцієнту заповнення осердя сталлю і виникнення вібрації і специфічного шум. Вібрація машини і окремих листів осердя призводить до руйнування міжлистової ізоляції і поломки недоспесованих сталевих листів, суміжних з вентиляційними каналами, неминучих зламів зубців, ослаблення вентиляційних розпірок і ряду інших пошкоджень активної сталі. Значна вібрація сегментів осердя в зубцевій зоні становить особливу небезпеку для ізоляції обмотки, оскільки може викликати стирання її в місцях, прилеглих до ділянок вібрації, а також до відломлювання зубців.

б) *надмірної сили пресування* до руйнування ізоляційного покриття сегментів осердя. Крім того, при надмірному пресуванні зростають механічні напруги в елементах кріплення осердя до корпусу статора, що може призвести до їх деформації і поломки (відрив ребер від корпусу статора, порушення зварних швів, тощо) [3, 15-21].

1.3 Види дефектів пресування осердя

Шихтовані конструкції, до яких відноситься осердя є менш жорсткішими, ніж еквівалентні цільно-металеві конструкції, але при цьому демонструють ортотропні властивості та високі рівні внутрішнього демпфування, які насамперед залежать від якості збирання та пресування осердя статора. При цьому треба враховувати, що на зазначені вище властивості, має плив тип сталі сегментів осердя, якість їх виготовлення, рівномірність лакового покриття, наявність дефектів рівномірності поверхні сегменту (місцевих вигинів, хвилястостей, заломів, зламів, тріщин та інших дефектів), тощо. У більшості випадках недостатність здійснення контролю

якості сегментів, їх збирання та процесу пресування може призвести до виникнення різного типу дефектів, приклад одного з таких дефекту, який призвів до виходу машини з ладу наведено на рис.1.6.



Рис. 1.6 Дефект пресування

Для пошуку параметрів, які можливо використати для визначення параметрів дефектів використано підхід залежності кінцевої форми спеціального силосприймаючого елемента виготовленого з в'язко-еластичного металу від нерівномірності товщини пакетів, яка виникає в наслідок наявності в них дефектів. Цей підхід був розроблений та реалізований на АТ "Завод "Електроважмаш" для контролю осердя статора потужного турбогенератора під час складання і пресування[22]. Результати проведених випробувань для визначення типу дефекту щільності пресування проведені, на основі зазначеного підходу, для визначення залежності кінцевої форми силосприймаючого елемента в результаті його деформації від штучно створеного дефекту в зібраному шихтованому осерді приведені на рис. 1.7–1.11.

Результати пресування пакета шихтованого заліза осердя електричної машини отримані із використанням спеціально зібраного зі 40 пластин електротехнічної сталі розмірами 45x20см., товщиною 0,35 мм пакету. Пакет використовувався для імітування впливу нерівномірності щільності пресування на зміну площинності торцевої поверхні осердя статора ТГ. Для імітування нерівномірності застосовувався

Синтофлекс 51, який розташовувався між пластинами. Навантаження пресування складало 20 кг/см^2 , що є близьким значенням до прийнятого під час пресування ТГ типу ТГВ-200 та ТГВ-300. Контроль здійснювався за допомогою конічних свинцевих силосприймаючих елементів.

На рис. 1.7 приведено результати випробувань із рівномірно розташованим матеріалом між пластинами. Всі силосприймаючі елементи були деформовані однаково. Діаметр деформації склав 10 мм.



Рис. 1.7 Результат випробувань при рівномірному розташуванні матеріалу між пластинами

На рис. 1.8 приведені результати пресування пакета шихтованого заліза осердя електричної машини із імітуванням рівномірного зменшення щільності в один бік. У цьому разі синтофлекс 51 розташовувався шарами: перший, що займав $1/3$ поверхні пластины та другий – $2/3$ поверхні пластины.

Діаметр деформації силосприймаючого елемента, щор озташований з лівої сторони склав 8 мм, центрального – 10 мм, елемента з правої сторони – 12 мм.

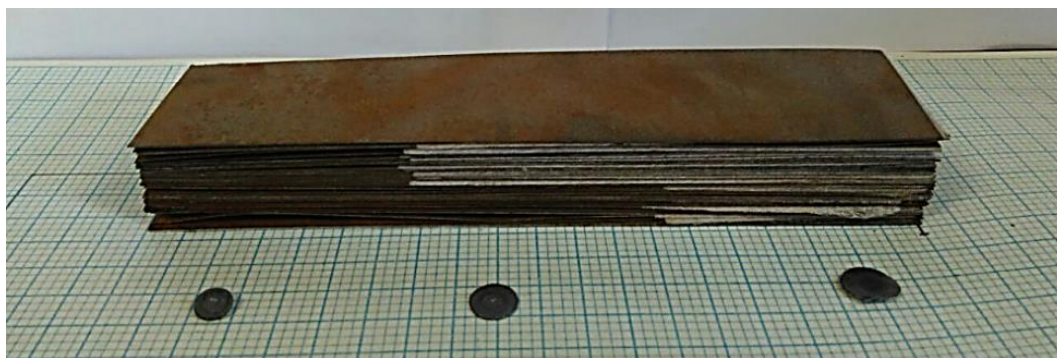


Рис. 1.8 Результат випробувань при рівномірному зменшенні щільності в один бік

На рис. 1.9 приведені результати пресування пакета шихтованого заліза осердя електричної машини із імітуванням нерівномірного щільності пресування осердя статора вигляді «жолоба» з напрямком вигину всередину пакета (тангенсiальному напрямку). У цьому разі синтофлекс 51 рівномірно розташовувався шарами: перший, що займав $2/3$ центральної частини поверхні пластини, другий, що займав $1/3$ правої сторони поверхні пластини та третій, що займав $1/3$ лівої сторони поверхні пластини.

Діаметр деформації силосприймаючого елемента, що розташований з лівої сторони склав 10 мм, центрального – 8 мм, елемента з правої сторони – 10 мм.



Рис. 1.9 Результат випробувань при нерівномірному пресуванні осердя статора у вигляді «жолоба»

На рис. 1.10 приведені результати пресування пакета шихтованого заліза осердя електричної машини із імітуванням нерівномірного щільності пресування осердя статора у вигляді «короба» з напрямком вигину назовні пакета (радіальному або тангенсiальному напрямку). У цьому разі синтофлекс 51 рівномірно розташовувався шарами: перший, що займав $2/3$ центральної частини поверхні пластини, другий, що займав $1/3$ центральної частини поверхні пластини.

Діаметр деформації силосприймаючого елемента, що розташований з лівої сторони склав 8 мм, центрального – 10 мм, елемента з правої сторони – 8 мм.

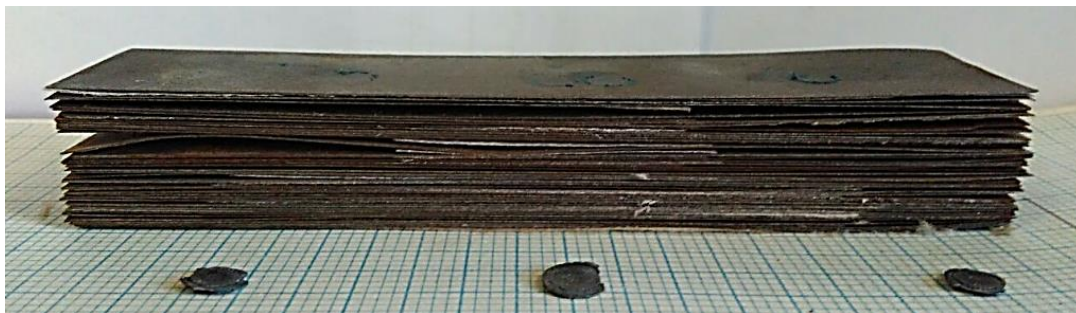


Рис. 1.10 Результат випробувань при нерівномірному пресуванні осердя статора у вигляді «короба»

На рис. 1.11 приведені результати пресування пакета шихтованого заліза осердя електричної машини із імітуванням випадку наявності внутрішньої нерівномірності щільності пресування в пакеті осердя статора. У цьому разі синтофлекс 51 рівномірно розташовувався шарами: перший, що займав $2/3$ лівої сторони поверхні пластини, другий, що займав $2/3$ правої сторони поверхні пластини, третій, що займав $1/3$ лівої сторони поверхні пластини та четвертий, що займав $1/3$ центральної частини поверхні пластини.

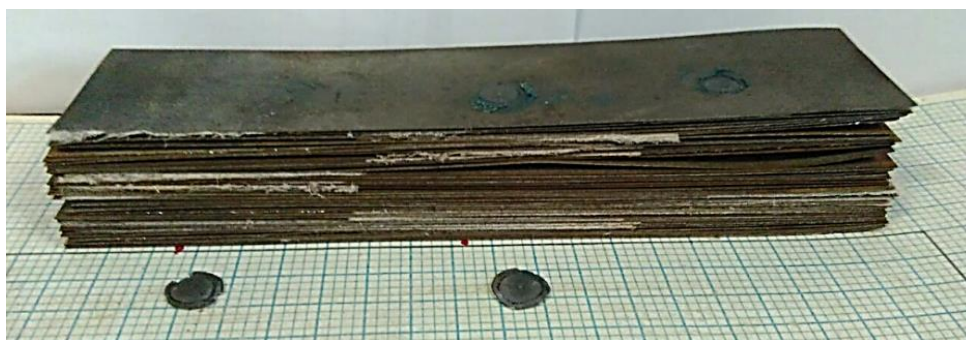


Рис.1.11 Результат випробувань при наявності внутрішньої нерівномірності щільності пресування в пакеті осердя статора

В результаті проведеного експериментального дослідження було виявлено, що при даному розташуванні силосприймаючих елементів нерівномірність в сусідніх зонах не впливають одна на одну. Такий випадок потребує використання методів контролю, які будуть враховувати зміну форми проб та наявність відхилень від площинності торцевої поверхні під час пресування.

Експериментально отримані параметри впливу нерівномірності товщини пакетів шихтованого заліза осердя статора на рівномірність щільності пресування можуть бути використані в якості моделей в автоматизованих системах контролю рівномірності щільності пресування осердя статора для ідентифікації типу дефекту виготовлення осердя статора, визначення місць з недостатньою щільністю пресування або місць з прикладеним зусиллям пресування вище норми, що дозволить визначити розмір, об'єм та місце встановлення ущільнюючого матеріалу для усунення дефекту, що в результаті дозволить підвищити надійність та строк експлуатації ТГ.

Враховуючи наявну у відкритих науково-технічних джерелах інформацію та науково-технічні звіти, а також результати проведених експериментальних досліджень було розроблено класифікацію найбільш розповсюджених видів дефектів, які виникають від зміни рівномірності щільності пресування по об'єму осердя статора ТГ. Розроблена класифікація є наступною:

- ступінь стиснення відповідає заданому значенню пресування (рис. 1.12, а);
- ступінь стиснення є більшою за задане значенню пресування (рис. 1.12, б);
- ступінь стиснення шихтованого заліза пакетів осердя статора є меншою за номінально задане значенню пресування (рис. 1.12, в);
- ступінь стиснення рівномірно зменшується в радіальному напрямку в бік зовнішнього діаметру (в залежності від форми можливо існування випадків рис. 1.12, г та рис. 1.12, д);
- ступінь стиснення рівномірно зменшується в радіальному напрямку в бік внутрішнього діаметру (в залежності від форми можливо існування випадків зображених на рис. 1.12, г та рис. 1.12, д але в протилежному напрямку);
- шихтоване залізо пакетів осердя статора після пресування має чітко виражений вигін у вигляді «жолоба», який характеризується зменшенням ступеню стиснення в радіальному напрямку в бік зовнішнього діаметру осердя (рис. 1.12, е);
- шихтоване залізо пакетів осердя статора має чітко виражений вигін у вигляді «короба» (рис. 1.12, ж);
- шихтоване залізо пакетів осердя статора після пресування має чітко виражений вигін, який характеризується хвилеподібною зміною ступеню стиснення шихтованого заліза пакетів осердя статора в тангенціальному напрямку (рис. 1.12, е та рис. 1.12, ж).

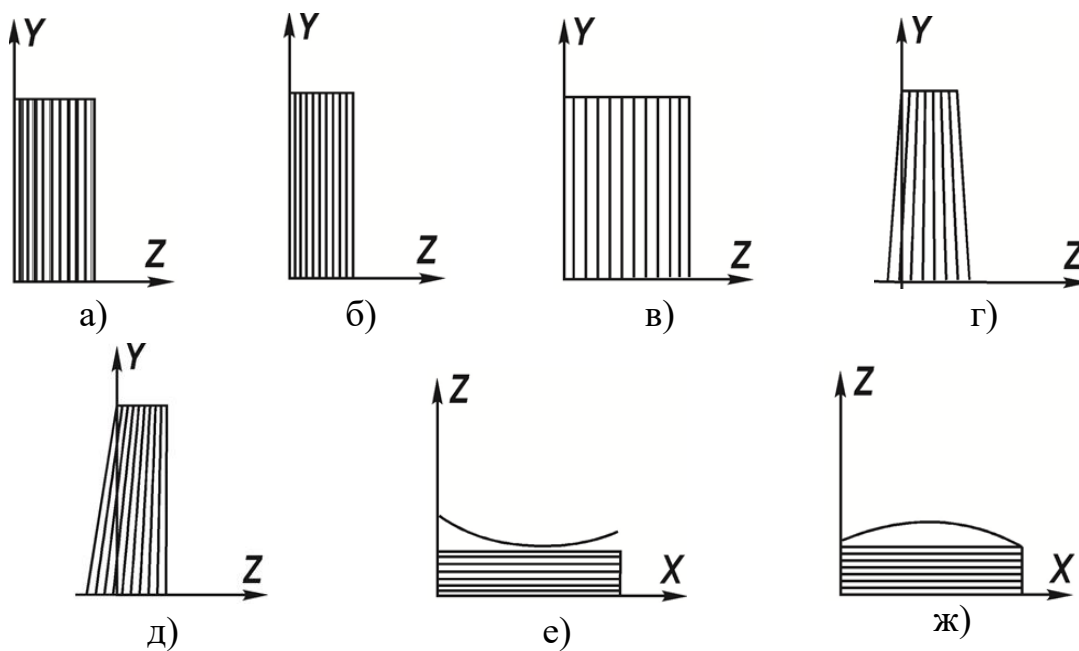


Рис. 1.12 Класифікація найбільш розповсюджених видів дефектів

1.4 Основні методи та засоби визначення стану спресованості осердя статора турбогенератора

На рис. 1.13 наведена класифікація методів, які можуть бути використані визначення стану спресованості осердя статора турбогенератора для контролю ступеня спресованості осердя статора турбогенератора під час виготовлення.



Рис.1.13 Систематизація методів контролю стану спресованості осердя статора потужних генераторів

1.4.1 Контроль механічними вимірювальними пристроями

Класично контроль стану спресованості визначають за допомогою спеціального контрольного щуп-ножа (рис. 1.14), який вводяться між листи пакета сталі [23].

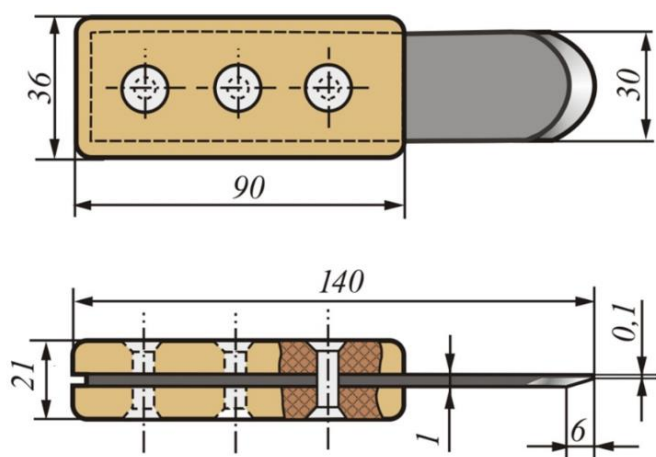


Рис. 1.14 Контрольний щуп-ніж

Мірою спресованості є величина заглиблення клиноподібного щупа між окремими листами активної сталі (рис. 1.15). Під час перевірки лезо щуп-ножа при натисканні на рукоятку не повинне входити між сегментами активної сталі з боку спинки і розточення осердя глибше, ніж на 4 мм.



а



б

Рис. 1.15 Ознаки ослаблення пресування активної сталі [3]:

- а) щуп-ніж входить в активну сталь з боку розточення;
- б) щуп-ніж входить в активну сталь з боку спинки.

Застосування методу на практиці вимагає значних затрат часу, бо один пакет статора ТГ типу ТГВ-200 має 90 листів сталі зібраних із сегментів, а весь статор – 400 пакетів. До того ж, проникнення леза щуп-ножа між листи може спричинити знищення ізоляції сусідніх листів, утворення замкнутого контуру, виникнення локальних перегрівань осердя, також недоліком є те, що результати перевірки досить об'єктивні, так як результат залежить від сили натискання на спинку щуп-ножа.

Використовуючи зазначений метод на підприємстві «Електросила» створено і виготовлено пневматичний - ніж, застосування якого зробило визначення щільності пресування осердя статора більш об'єктивним, незалежним від прикладеного зусилля людиною [15, 24]. Даний метод, має недоліки пов'язані із руйнацією захисного покриття сегментів активної сталі.

В деякій мірі зазначені недоліки усунені в способі контролю спресованості осердя з вимірюванням зусиль стиснення пакету осердя із застосуванням спеціальних пристроїв у вигляді штангенциркуля або струбцини [15, 25, 26]. Такі інструменти під час контролю губками (затискачами) охоплюють через вентиляційні канали окремі пакети сталі. Ненормована зміна товщини пакета під дією затискних губок вказує на місцеві нещільності спресованості.

1.4.2 Вібромеханічний контроль

В основу методу покладена залежність вібромеханічних характеристик пакета осердя (резонансної частоти коливань і логарифмічного декременту збуджених коливань) від спресованості осердя. Відомо, що основними вібромеханічними характеристиками механічної конструкції є жорсткість, власна частота коливань та поглинання (демпфування) енергії коливань [27]. Жорсткість – здатність конструкції чинити опір деформації. Параметром, який характеризує жорсткість, є модуль пружності, а власна частота коливань прямо зв'язана з модулем пружності і пропорційна кореню квадратному з модуля. Осердя статора турбогенератора складається з тонких ламінованих листів, які при цьому стискаються і фіксуються

стяжними шпильками і гайками. Саме тому осердя статора є квазіоднорідним твердим тілом.

Параметром, який відображає поглинання енергії, є безрозмірна величина – коефіцієнт поглинання Ψ . Її аналогом є логарифмічний декремент затухання коливань δ , який зв'язаний з коефіцієнтом поглинання співвідношенням $\Psi = 2\delta$. Коефіцієнт Ψ характеризує швидкість затухання коливань і, власне, здатність конструкції поглинати енергію коливань. Зрозуміло, що всі ці характеристики стосуються і осердя статора, бо ослаблення пресування викликає зміну його вібромеханічних властивостей і, тим самим, зміну відповідних параметрів. Більш високі резонансні частоти відповідають більшій жорсткості осердя, а більш високі декременти затухання коливань – меншій щільності (спресованості) осердя.

Відомим способом дослідження вібраційних якостей будь-якої конструкції (в тому числі пакета осердя потужного ТГ) є імпульсне збудження коливань з застосуванням ударного молотка [25, 28 – 30]. На рис. 1.16 показано схему такого дослідження.

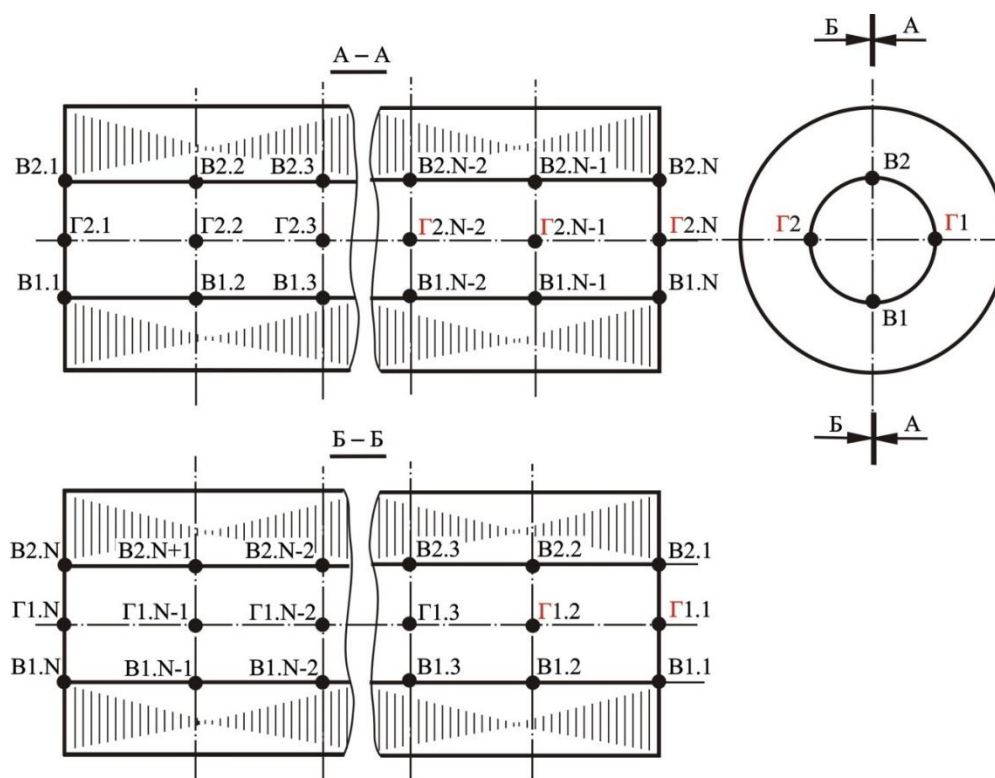


Рис. 1.16 Схема розташування контрольних точок

Через те, що осердя ТГ має досить значну довжину, вібраційні властивості окремих його ділянок можуть суттєво відрізнятись. Тому, як правило, осердя досліджуються в декількох характерних точках його перерізу. Кількість перерізів може змінюватись в залежності від поставленого завдання, ретельності дослідження та розмірів осердя.

Методика дослідження полягає в наступному. В точках Г1.1...Г1.N та В1.1...В1.N наносяться удари спеціальним молотком. В цих же точках містяться сенсори для вимірювання імпульсу сили удару. В точках Г2.1...Г2.N та В2.1...В2.N акселерометрами реєструється сигнали відгуку по горизонтальному та вертикальному діаметру осердя.

Резонансні властивості осердя в кожному перерізі ідентифікуються класичним методом з використанням передавальних функцій, функцій когерентності та функцій взаємної фази сигналів збудження та сигналів відгуку [27–30]. Принциповим є отримання можливості порівняння вібраційних якостей торців осердя та його середньої частини.

На рис. 1.17 показано приклад передавальної функції, яка отримана в одному з перерізів реального осердя статора генератора.

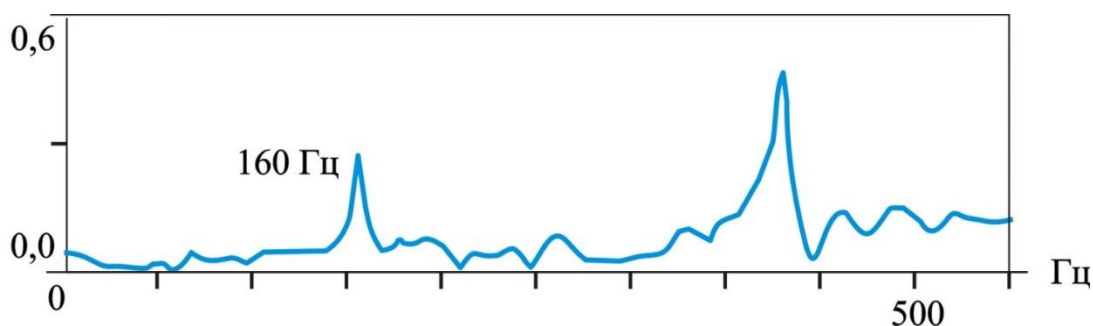


Рис. 1.17 Результати досліджень

Властивості поглинання енергії коливань в перерізах осердя визначались через величини декрементів затухання коливань δ та розраховувались за параметрами резонансних піків з застосуванням методу половинної потужності. Для методологічного спрощення оцінка поглинальних властивостей осердя в першому наближенні виконувалась за першим піком передавальної функції [23–26].

Отримані таким чином дані дозволяють реєструвати нерівномірність частотних властивостей в межах одного осердя, їх зміну з плином часу або після певного періоду експлуатації, чи після проведення ремонту. Досвід застосування підтвердив ефективність методу. Такий зв'язок ступеню пресування і вібромеханічних параметрів підтверджений спеціальними експериментами на пакетах електротехнічної сталі, які є спрощеною моделлю осердя статора [25-30].

До недоліків використання методу треба віднести ненадійну відтворюваність результатів вимірювань та нелінійний характер залежності декременту затухання коливань від тиску пресування. Причинами слабкої відтворюваності декрементів коливань є недостатня досконалість технології виділення резонансного піку на фоні сусідніх резонансних частот і шумів, що накладаються.

1.4.3 Ультразвуковий контроль

В основу методу покладають експериментально визначені на моделях пакетів осердя (з регульованим тиском пресування) залежності швидкості поширення звукових коливань уперек шихтованих пакетів від зусилля стиснення. Схема вимірювань наведена на рис. 1.18.

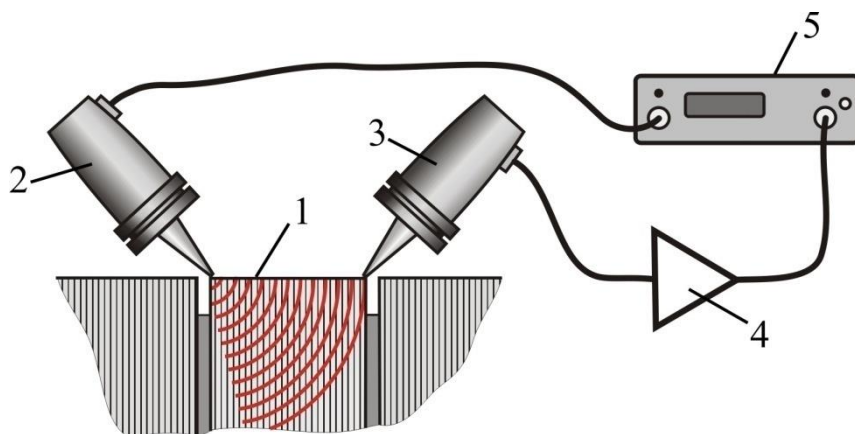


Рис. 1.18 Схема дослідження із використанням ультразвукових сенсорів

При ослабленні спресованості швидкість звуку зменшується [25, 31]. Оскільки кількість листів в пакеті та їхня товщина залежить від моделі турбогенератора, то час проходження імпульсу через пакет потрібно порівнювати

з добутком часу проходження імпульсу через один лист на кількість пакетів. Тобто передбачається, що залежність часу проходження імпульсу через пакет від товщини пакета є лінійною.

Під час вимірювання через пакет осердя статора 1 від передавача 2 до приймача 3 пропускають ультразвуковий імпульс, який підсилюється в пристрої 4 і фіксується приладом 5 (дефектоскопом). Для вимірювання стану пресувань внутрішніх пакетів осердя (передавач і приймач розміщуються в вентиляційних каналах) використовують широкосмуговий діапазон ультразвукових коливань, а для торцевих пакетів – вузько смуговий.

Недоліками методу є те, що результати вимірювання значно залежать від кваліфікації та навиків персоналу, а також стану активної сталі – цілісності ізоляції, геометричних параметрів крайніх листів (товщини пакета, співвідношення площ зубця і вентиляційних розпірок, наявності шліців у зубцях крайніх пакетів), стану лакофарбового покриття поверхні та її дефектів, які істотно відрізняються для осердя статора кожного турбогенератора, який діагностується.

1.4.4 Температурний контроль

Методика пошуку пошкоджень та дефектів осердя статора на основі температурного контролю є однією із найперших практично застосовних методик ідентифікації дефектів статора, яка описані у роботі [32]. Методика полягає у проведенні випробувань стану спресованості осердя статора під час планових ремонтів шляхом виявлення зон надмірного зростання температури (гарячих зон), що виникають під дією підведеної потужності, яка відповідає 100 % потужності ТГ у номінальному режимі роботи. Класично пошук точок з підвищеною температурою виконували на дотик, проте з розвитком засобів пірометричних вимірювань, стало можливим й доцільним використання їх для температурної індикації. У цьому разі, для виявлення гарячих точок застосовуються просочені хлоридом кобальту листи паперу або шматки парафіну, які під дією температури

змінюють свій колір. Після виділення проблемних зон, для їх мінімізації та більш чіткішого визначення типу дефекту використовують термопари.

Подальший розвиток технології пірометричних вимірювань [33-35], дозволив реалізувати метод контролю осердя статора, який отримав назву метод кільцевого намагнічування (High flux stator core Test, HFT) [36]. У цьому разі для визначення стану спресованості осердя статора знайшли застосування інфрачервоні (ІЧ) телевізійні камери. Допустимий поріг виявлення дефектів методом HFT встановлюється за мінімальної різниці температур в 10 °С («гарячих точок») [33]. Поріг нерівномірності температури поверхні в 10 °С вважається гранично допустимим для виявлення глибоко залягаючих дефектів у відповідності до рішення Центральної ради з виробництва електроенергії (CEGB).

У відповідності зі стандартом ANSI/IEEE Std 56-1977, що описує метод кільцевого намагнічування [37], визначення дефектних ділянок в осерді статора ТГ відбувається наступним чином: після 10-20 хвилин індукування осердя магнітним потоком потужністю 100 % від номінальної, визначаються гарячі точки, які підлягають ремонту для продовження експлуатації ТГ. Рівень потужності близький до 100% від номінальної було встановлено в результаті практичного застосування методу.

На сьогоднішній день, в діючому стандарті ANSI/IEEE Std 62.2-2004 [38] детально описано методику тестування HFT. Основна відмінність методики за стандартом ANSI/IEEE Std 62.2-2004 від ANSI/IEEE Std 56-1977 полягає в тому, що визначення дефектних ділянок в осерді статора ТГ здійснюється протягом 2 годин при індукуванні осердя магнітним потоком "на рівні або близько до" номінальної щільності потоку за нормального режиму роботи ТГ. Поріг нерівномірності температури поверхні для визначення гарячих точок визначений в 10 °С.

Окрім зазначених вище стандартів, існують інші чинні нормативні документи, зокрема можна виділити чинний стандарт України, СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (нова редакція 2020) [39]. У відповідності до якого, випробування проводять за індукції $(1,0 \pm 0,1)$ Тл протягом 90 хв. У цьому разі, найбільша температура нагріву зубців у кінці випробування не повинна

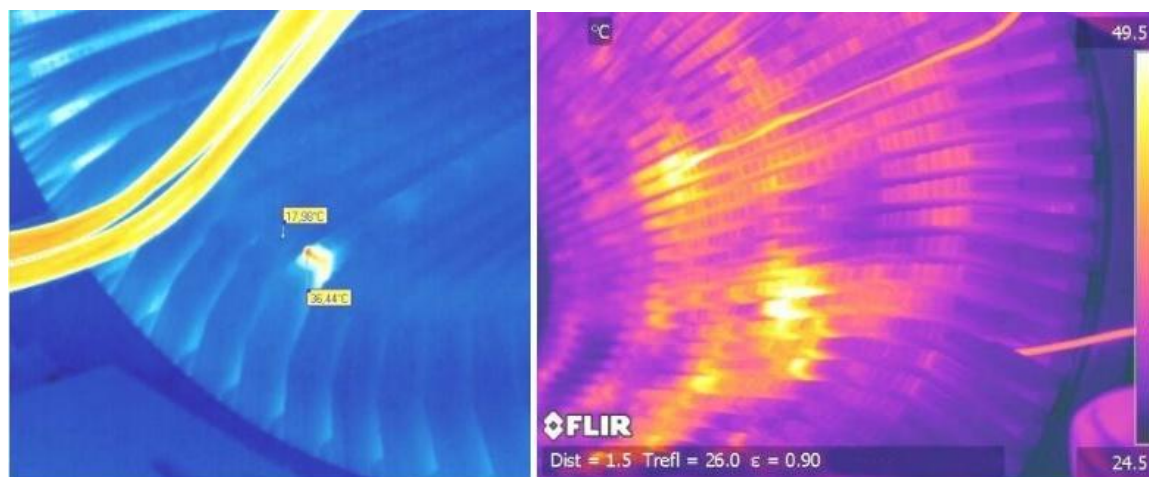
перевищувати $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ від початкової температури, а найбільша різниця температур нагріву різних зубців – $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для генераторів, виготовлених до 1958 р., дозволено найбільшу температуру нагріву зубців $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ від початкової температури, а найбільшу різницю температур нагріву різних зубців – $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Випробування турбогенераторів, виготовлених після 01.07.1977р., і генераторів з безпосереднім охолодженням обмоток проводять за індукції $(1,4\pm 0,1)\text{ Тл}$ протягом 45 хв. і збереження граничних температур з нагріву. Температура може визначатися будь-яким доступним термометричним засобом (термоперетворювачі, інфрачервона техніка тощо) [39].

Згідно діючих стандартів, методика НФТ вимагає намотування достатньої кількох витків кабелю навколо осердя для створення індукції на рівні 80-100 % від номінального потоку. На рис. 1.19 приведено приклад розташування тестової обмотки для ТГ [40]. Контроль рівня підведеної потужності забезпечується додатковим витком обмотки встановленим навколо осердя.



Рис. 1.19 Розташування тестової обмотки

Типові результати оцінювання у випадку наявності одиничного виявленого дефекту наведено на рис. 1.20, за наявності розподілених серйозних пошкоджень осердя статора на рис. 1.20, б.



а

б

Рис. 1.20 Результати температурного контролю

Недоліком розглянутого метода та його аналогів є:

- необхідність здійснення трудомісткої операції намотування витків і енергетично затратної операції нагрівання;
- застосування можливо виключно на повністю зібраному осерді;
- використання чутливих інфрачервоних камер;
- труднощі у виявленні замикань, що виникли в глибині активної сталі (на рівні дна паза та глибше), адже у цьому випадку відчутне нагрівання на поверхні розточування виникає тільки при вже серйозно розвинених ушкодженнях.

1.4.5 Електромагнітна дефектоскопія осердя (EL CID)

Методика електромагнітної дефектоскопії осердя (EL CID) була розроблена в 1978-1980 рр. Центральною електротехнічною науково-дослідницькою лабораторією Великобританії CERL. Основною перевагою методу є зниження часу виявлення дефектів з кількох днів, необхідних для дослідження з визначенням нагріву, до однієї зміни, а також зниження необхідної потужності на декілька порядків [41]. Приклад використання пристрою ELCID під час контролю осердя ТГ наведено на рис. 1.21.

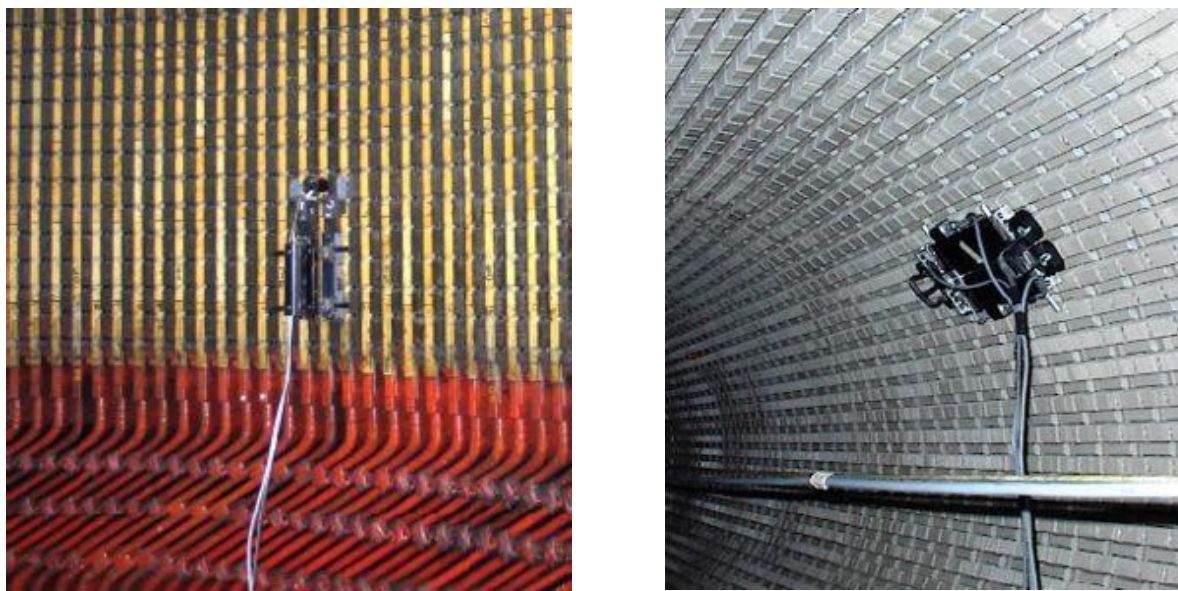


Рис. 1.21 Використання пристрою ELCID під час контролю осердя ТГ

Ідея електромагнітного способу контролю пресованого шихтованого осердя статора полягає в наступному [42]. Кожна точка осердя, яка є неоднорідним анізотропним тілом, може характеризуватись своїми значеннями магнітної проникності за трьома взаємно перпендикулярними осями. В тій же точці існує однозначна залежність між величиною аксіальної складової магнітної індукції μ_z і магнітною проникністю B_z в тому ж напрямку при заданому значенню основного магнітного потоку. З іншого боку магнітна проникність за аксіальною складовою μ_z залежить від тиску пресування σ , збільшення якого зменшує повітряні проміжки між окремими листами сталі, через що збільшується коефіцієнт заповнення осердя сталлю. З використанням залежності $B_z = f(\sigma)$ за зміною аксіальної складової індукції B_z можна ідентифікувати місце зміни тиску пресування.

Залежність $B_z = f(\sigma)$ визначають експериментальним методом, за допомогою проведення досліджень пакетів виготовлених із тих самих матеріалів, що і осердя. При цьому на спеціальному стенді визначають залежність зусилля пресування від аксіальної складової магнітної індукції $\sigma = f(B_z)$ (рис. 1.22).

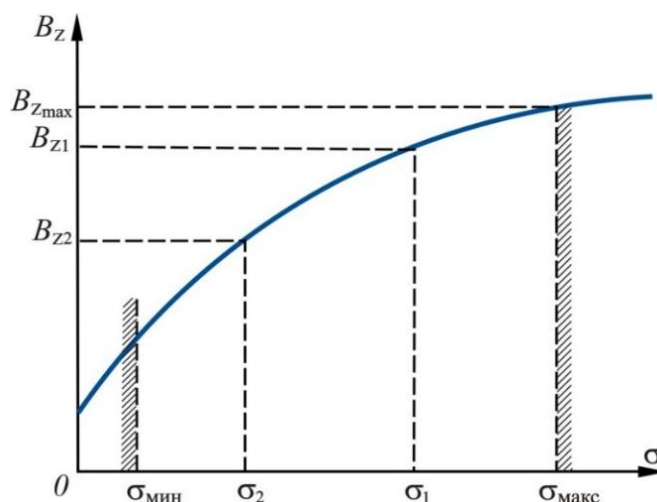


Рис. 1.22 Результати визначення залежності $\sigma = f(B_z)$.

Використовуючи ідею електромагнітного способу контролю пристрій ELCID використовується наступним чином: нагнітаюча обмотка малої потужності, намотана тороїдально на осердя, створює магнітний потік з індукцією порядку 0,1-0,2 Тл. Контур струму, що циркулює при замиканні окремих пластин осердя через напружену призму і місце замикання, викликає потік розсіяння, фіксований вимірювальною котушкою. Схема застосування пристрою ELCID наведена на рис. 1.23, на якому 2 – обмотка намагнічування; 3 – вимірювальний виток; 4 – осердя статора; 11 – осердя первинного вимірювального перетворювача пристрою ELCID; 12 – вимірювальна обмотка. При цьому видно, що основа скануючого сенсору – це осердя 11, на якому розташовано чутливий елемент (обмотка 12). Фізичні явища, які виникають під час контролю може бути представлено наступним чином.

При подачі напруги змінного струму з частотою f на затискачі обмотки 2, з числом витків w_0 по ній протече струм I_0 , що викличе появу в осерді змінного кільцевого намагнічуючого потоку. При цьому частота f на якій проводяться випробування, не дорівнює частоті f на якій призначено експлуатувати осердя генератора. Вимірювальний виток 3 використовується для контролю ЕРС, що наводиться кільцевим потоком. Цей потік у свою чергу наводить в листах вихрові струми і активізує різні короткозамкнені контури, в результаті чого виникає зворотний кільцевий потік, як реакція вторинних контурів. У сумі з первинним

потокотом утворюється результуючий магнітний потік осердя Φ_0 , який залежить локального значення тиску пресування та проходить по пакету, що сканується. Сканування полягає у тому, що у сусідніх зубцях розташовується первинний вимірювальний перетворювач, тобто магнітопровід з обмоткою, який переміщається вздовж поздовжньої осі осердя і по чергово, по вибраному маршруту, проходить всі зубці осердя.

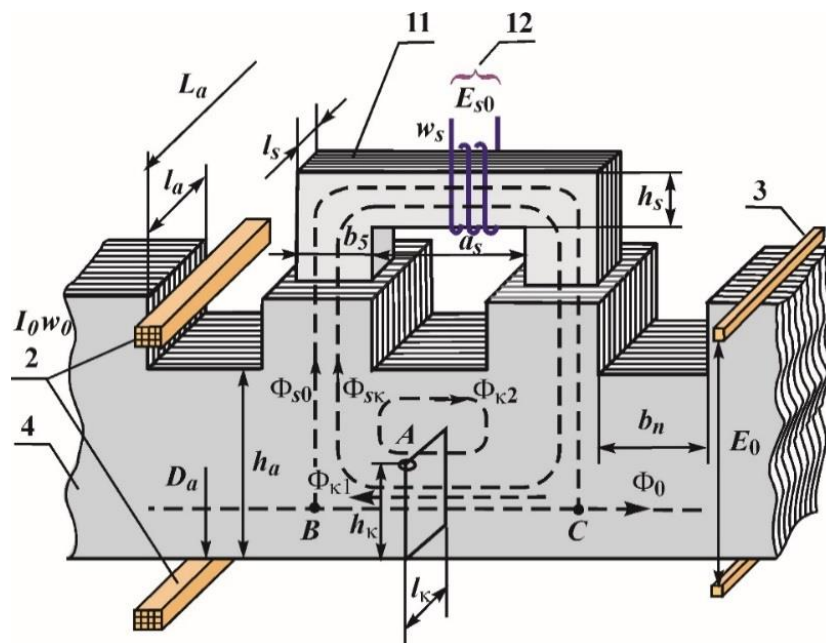


Рис. 1.23 Схема стенду для проведення досліджень

Метод дозволяє виявити дефекти, що знаходяться і в глибині осердя, наприклад на рівні дна паза [43].

Метод контролю EL CID має такі переваги:

- дозволяє забезпечити швидкий контроль машини, потрібно всього 8-10 людино-годин для здійснення контролю (за даними Westinghouse Electric Company LLC);
- швидке налаштування для проведення контролю (за умови наявності тестових зразків).

Недоліком розглянутого метода є можливість його застосування виключно на повність зібраному осерді.

1.4.6 Контроль стану осердя з оцінюванням деформації пластичних елементів, розміщених на торцевій поверхні осердя

В основу методу покладено залежність ступеню деформації окремого спеціального (наприклад, свинцевого) пластичного елемента, розміщеного на торцевій поверхні осердя, від величини дефекту осердя під час пресування [22]. Метод застосовується на АТ "Завод"Електроважмаш" (м. Харків, Україна) під час складання та пресування осердя статора ТГ типу ТГВ-250-2ПТЗ. Схему, що пояснює суть методу наведено рис. 1.24, де: 1 – ділянка осердя статора, 2 – натискне кільце пресу; 3.1...3.3 – контрольні пластичні елементи.

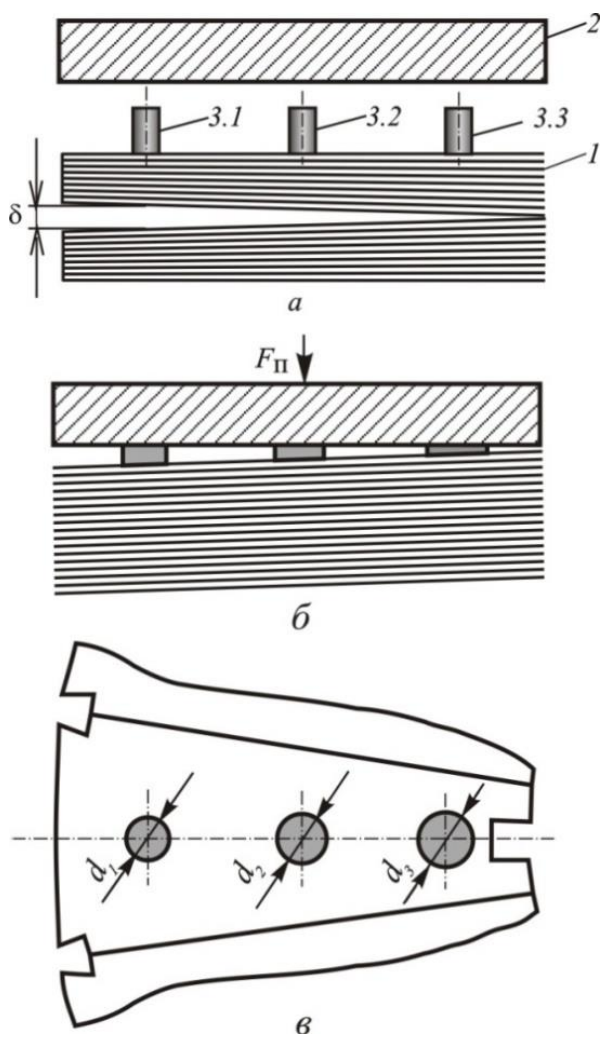


Рис. 1.24 Контроль осердя з оцінюванням деформації пластичних елементів

Якщо після складання окремої частини осердя 1 в ній буде дефект, максимальне значення якого δ (рис. 1.24 б), то його можна ідентифікувати наступним чином. Під час прикладення питомої сили пресування F_{Π} елементи 3.1...3.3 будуть деформовані, і їхня поздовжня деформація буде залежати від величини дефекту осердя, в зоні якого вони розташовані (рис. 1.24 б, рис. 1.24 в): найменше буде деформований пластичний елемент 3.1, розташований в зоні найбільшої величини дефекту, а найбільше – елемент 3.3, де дефект мінімальний, і співвідношення діаметрів деформованих елементів буде становити $d_3 > d_2 > d_1$.

Схему розміщення пластичних елементів на торцевій поверхні осердя статора ТГ показано на рис. 1.25, де 1 – окрема ділянка осердя, яка складається і пресується на заводі; F_{Π} – зусилля пресу.

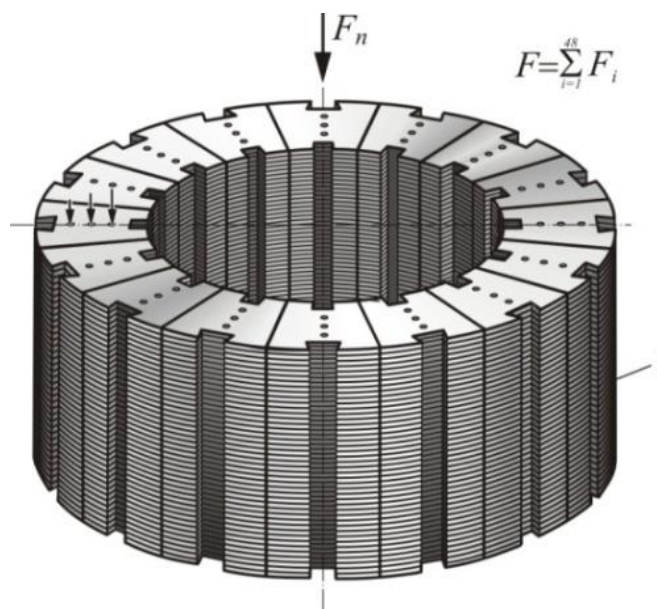


Рис. 1.25 Схema розміщення пластичних елементів
на торцевій поверхні осердя статора ТГ

Для того, щоб пластичні елементи не зміщувались під час пресування, на заводі було розроблено спеціальний пристрій у вигляді додаткового натискного кільця, в якому вмонтовано N вимірювальних комірок (по три на кожний сегмент). Схema встановлення кільця та основні елементи його конструкції показано на рис.1.26, на якому: 1 – парасольчатий прес П995; 2 – верхнє натискне кільце; 3 – нижнє додаткове натискне кільце з вимірювальними комірками.

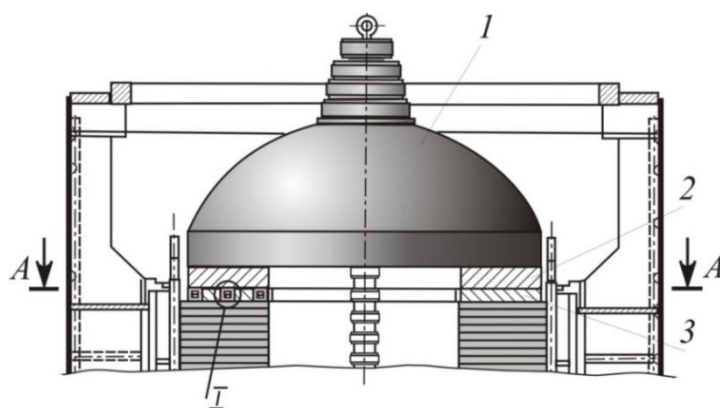


Рис. 1.26 Схема встановлення натискного кільця

Рис. 1.27 ілюструє загальний вид додаткового кільця з 45 місцями встановлення контрольних комірок (1а, 1б, 1в ... 15а, 15б, 15в).

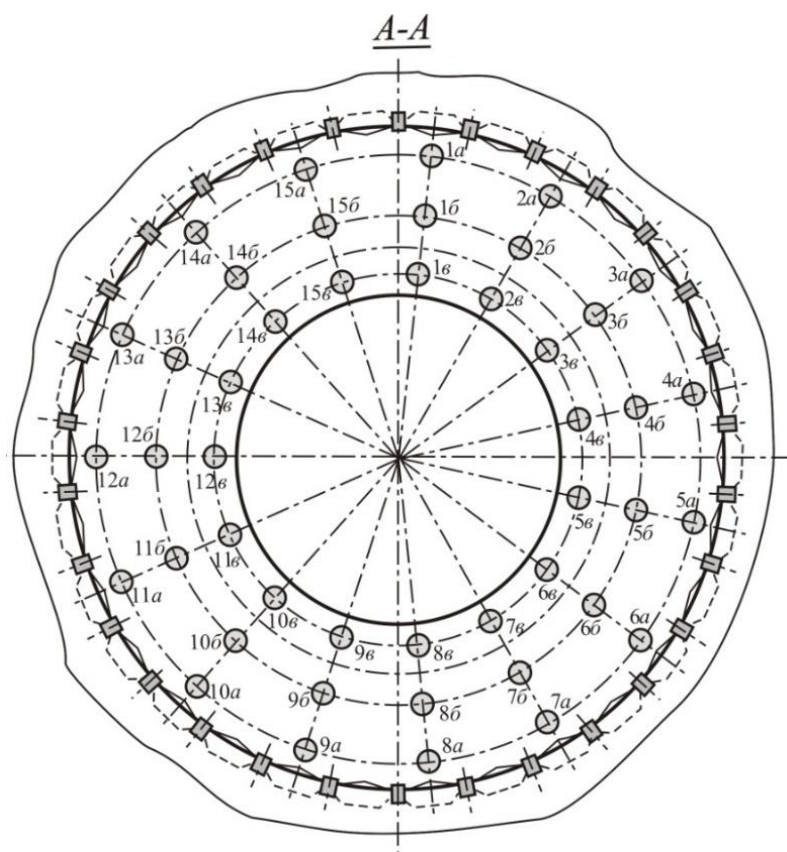


Рис. 1.27 Загальний вид додаткового кільця

Процес складання та пресування ілюструє рис. 1.28, де відображено проміжний етап процесу.



Рис. 1.28 Процес складання та пресування ТГ

Конструктивну схему вимірювальної комірки показано на рис. 1.29, її комп'ютерну модель – на рис. 1.30, а фотографію натурального зразка – на рис. 1.31.

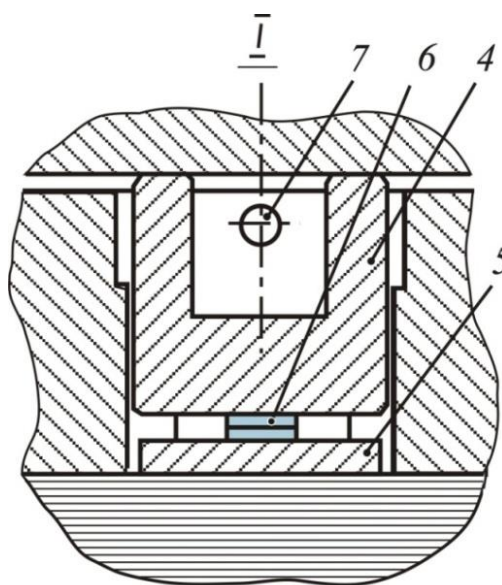
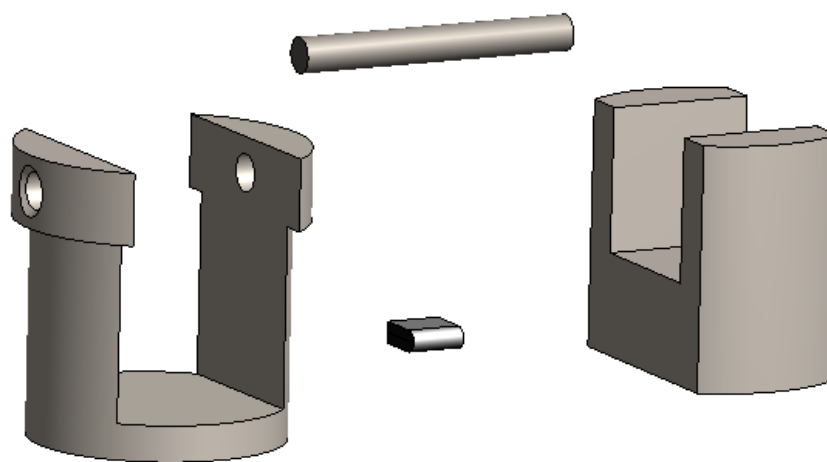


Рис. 1.29 Конструктивна схема вимірювальної комірки

До складу вимірювальної комірки входять (рис. 1.28): 4 – втулка; 5 – стакан; 6 – контрольна свинцева проба; 7 – стержень. Верхнім своїм кінцем втулка 4 контактує з нижньою частиною верхнього натискного кільця, а нижнім – зі свинцевою контрольною пробєю 6. Стакан 5 своєю нижньою частиною встановлюється на торцеву поверхню осердя статора, яке підлягає пресуванню.



a



б

Рис. 1.30 Комп'ютерна модель вимірювальної комірки



Рис. 1.31 Натурний зразок вимірювальної комірки

Під час пресування на втулку 4 від верхнього натискного кільця передається зусилля пресу. Це зусилля передається на пробу 6 (з розмірами 15 мм×15 мм × 6 мм), яка розміщена між нижньою частиною втулки 4 та стаканом 5, і під дією цього зусилля вона буде деформуватись, при цьому її товщина в 6 мм буде зменшуватись. На рис. 1.32 показано проби з різним ступенем деформації.



Рис. 1.32 Проби з різним ступенем деформації

В таблицях 1.1, 1.2, 1.3 наведено дані вимірювання товщини зразків деформованих проб після пресування для різних пакетів осердя статора ТГ типу ТГВ-250-2ПТЗ на ДП "Завод"Електроважмаш".

Таблиця 1.1

Результати вимірювання товщини зразків деформованих проб після пресування для пакету осердя №7

Шихтований пакет осердя №7															
Проба	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
а, мм	4,0	4,4	4,3	4,5	4,4	4,3	4,0	4,2	4,1	3,8	4,3	4,1	4,1	3,9	4,0
б, мм	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,0	2,3	2,2	2,1	2,2	2,3	2,0	2,2	2,2	2,1
в, мм	3,2	3,1	3,1	2,9	2,9	3,0	2,8	3,0	3,0	3,1	2,9	2,7	3,3	2,7	2,8

Таблиця 1.2

**Результати вимірювання товщини зразків деформованих проб після
пресування для пакету осердя №11**

Шихтований пакет осердя №11															
Проба	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>a, мм</i>	4,0	3,9	3,9	3,5	3,9	3,8	4,0	4,0	4,0	3,5	4,3	3,9	3,6	3,6	3,5
<i>б, мм</i>	2,3	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3	2,1	2,2	2,5	2,2	2,4	2,5	2,5	2,5
<i>в, мм</i>	3,2	2,9	3,1	3,2	2,7	3,4	3,4	3,2	3,2	3,0	3,2	2,9	3,0	3,3	3,2

Таблиця 1.3

**Результати вимірювання товщини зразків деформованих проб після
пресування для пакету осердя №16**

Шихтований пакет осердя №16															
Проба	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>a, мм</i>	3,8	3,5	3,5	3,5	4,1	3,9	4,2	4,1	3,5	4,0	4,3	4,0	3,7	3,7	3,2
<i>б, мм</i>	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,1	2,3	2,5	2,3	2,4	2,2	2,2	2,3	2,4
<i>в, мм</i>	3,4	3,1	3,0	3,2	3,3	3,0	3,2	3,4	3,1	3,3	3,0	3,3	3,1	3,4	3,0

Як видно, товщина проб під час пресування зменшувалась з 6 мм до 2 мм.

Перевагою методу є те, що він дає можливість під час складання та пресування визначити місця в осерді статора турбогенератора з послабленою монолітністю та за результатами визначення проводити подальші усунення цих дефектів.

1.5 Напрямки підвищення якості виготовлення осердя статора потужних турбогенераторів

Забезпечення підвищення якості виготовлення осердя вимагає підвищення технічного рівня не тільки контролю процесів збирання та пресування, а також розвиток методів та автоматизованих засобів контролю рівномірності щільності

пресування та площинності торцевої поверхні осердя статора ТГ. У цьому разі, зазначені характеристики є одним із головних критеріїв оцінки якості виготовлення осердя.

Так на заводі АТ "Завод "Електроважмаш" для усунення відхилення від площинності торцевої поверхні зібраного осердя, тобто нерівномірності пресування з виникненням так званої «хвилі», здійснюють вставлянням в послаблені місця спеціальні клини. Клини виготовляться із електротехнічного стеклотекстоліту СТЕФ-1 ГОСТ 12652-74 за шаблонами, які мають форму частин сегментів (рис. 1.33 та рис.1.34). Форма та зовнішній вигляд клину, який використовується для усунення дефектів по зовнішньому периметру зображено на рис.1.33, а для усунення ослаблення пресування по внутрішньому периметру на рис. 1.34.



Рис. 1.33 Клин для усунення дефектів по зовнішньому периметру



Рис. 1.34 Клин для усунення дефектів по внутрішньому периметру

Для усунення дефектів та визначення кінцевої форми клину необхідно мати картину місцевих зменшень монолітності осердя в якомога більшій кількості точок, і ці місця слід ідентифікувати. Така ідентифікація виконується вимірювання відхилення від площинності торцевої поверхні осердя потужного турбогенератора, яка являє собою кільце з зовнішнім діаметром більш ніж 2 м, в декількох десятках

точок, є складним завданням, і одною з основних частин якого є вибір методу вимірювання.

Відхилення від площинності вимірюють непрямым способом, визначаючи після пресування поперечний розмір деформованих пластичних циліндричних елементів, встановлених у кожній контрольній точці. Найменший розмір свідчить про мінімальне місцеве послаблення, а найбільший – про практичну відсутність послаблення. Спосіб малопродуктивний, недостовірний та неточний через вплив людського фактору на результат (суб'єктивність ручного вимірювання). До того ж небезпечний для оператора, через те, що вимірювання, враховуючи значну довжину осердя, виконуються на великій висоті.

Найбільш автоматизований спосіб виробництва осердь розроблений фірмою Siemens, яка використовує повністю роботизовану лінію виготовлення осердь (рис. 1.35). Інвестиції в розробку способу виробництва компанією Siemens Generator Manufacturing в побудову сучасної лінії та її відкриття у листопаді 2011 на території Siemens Charlotte Energy Hubo обійшлися в 350 мільйонів доларів станом на початок 2019 [44]. Основне завдання проекту є розробка нових засобів гідравлічного пресування та контролю якості збирання й пресування осердя під час його виготовлення.



Рис. 1.35 Роботизована лінія виготовлення осердь ТГ

Для досягнення площинності торцевої поверхні осердя та рівномірної щільності пресування після збирання кожного ряду пакетів ламінування статора перевіряється їх відповідність площинності, виконується значна кількість проміжних гідравлічних процесів пресування за допомогою домкратів, встановлених у верхній частині осердя (рис.1.36). При цьому виникає необхідність в проведенні не тільки значної кількості повторів операції пресування, але й проведенні вимірювання висоти з пресованої частини осердя в різних місцях по діаметру, щоб переконатися в якості пресування. Важливо, щоб висота осердя статора підтримувалася рівною протягом усього циклу збирання осердя. Після кожного процесу пресування вимірюють вертикальну відстань від нижньої частини осердя до верхньої. При виявленні «нахилу» осердя, здійснюють його усунення за допомогою ущільнюючих матеріалів [45]. Недоліком лінії є її призначення для виробництва осердь лише для генераторів малої потужності, лінія є дослідницькою, отримані результати мало доступні, а ті що є містять поверхневу інформацію.



Рис. 1.36 Процес пресування осердя

Для забезпечення підвищення якості виготовлення сегментів багатьма виробниками досягається використанням лазерної технології виготовлення сегментів (Lamination Manufacturing Laser Cutting) осердя статора [46]. Використання технології дозволяє отримати виготовлені сегменти з високою

точністю геометричних параметрів (рис. 1.37), які не потребують додаткового шліфування отворів та усунення зубчастих країв, яке це має місце під час використання класичної технології виготовлення сегментів методом вирубки.

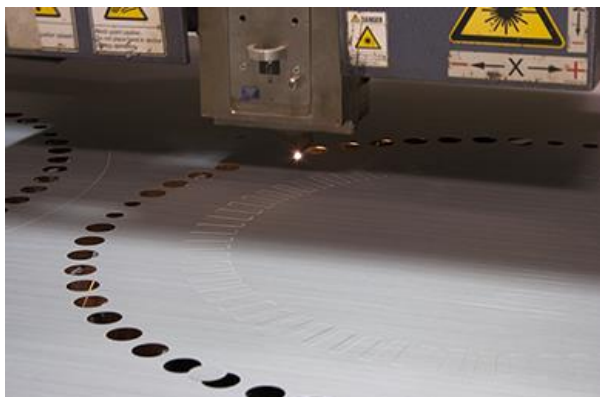


Рис. 1.37 Лазерна технологія виготовлення сегментів осердя статора

Інших даних про практичне впровадження перспективних напрямків вирішення проблеми забезпечення контролю якості виробництва осердя статора на етапах збирання та пресування на виробництві турбогенераторів провідних світових фірм: «Дженерал електрик» (США) «Альстон» (Франція), АВВ (Швейцарця, Швеція) та інших у відкритих науково-технічних джерелах не знайдено.

1.6 Вимоги до характеристик засобів визначення стану спресованості осердя статора під час складання і пресування

Аналіз існуючих технології складання та пресування осердя статора під час його виготовлення, причин та наслідків відхилення ступеня пресування від заданого значення, а також визначення основних видів дефектів пресування та процесу їх утворення показав, що основні напрямки підвищення якості виготовлення осердя статора пов'язані насамперед з забезпеченням:

- зменшення впливу людського фактору;
- забезпечення необхідного рівня вхідного контролю якості сегментів, які використовуються для виготовлення осердя статора;

– якість виготовлення осердя.

Перший напрямок може бути вирішений залученням висококваліфікованих робітників та здійсненням контролю додержанням ними технології, для вирішення другого напрямку доцільно використовувати попереднє сортування та збірка пакетів із листів однієї маси.

Вирішення останнього напрямку вимагає розв'язку складної комплексної науково-прикладного завдання. Вирішення, якого пов'язано з необхідністю одночасного врахування особливостей конструкції осердя, технології його складання та пресування (спеціальний прес парасолькового типу з спеціальними пристосуваннями, які використовуються для виготовлення турбогенераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300) й процесів, які їх супроводжують.

Проведений аналітичний огляд існуючих методів та засобів контролю осердя статора потужного ТГ під час складання та пресування на заводі-виробнику показав, що вони в силу різних причин не забезпечують достатньої достовірності визначення ступеню дефекту осердя (зменшення монолітності) та місця дефекту по перерізу осердя, або вимагають великих витрат часу. Враховуючи, те що осердя є силовою основою механічної системи статора особливе місце посідає завдання забезпечення належної якості спресованість його активної сталі для отримання заданих характеристик.

Для вирішення завдання якісного контролю осердя статора потужного ТГ необхідно визначати місця з зменшеною монолітністю по можливості в як можна більшій кількості точок по торцевому перерізу осердя. При цьому засоби ідентифікування дефектів повинні мати певні характеристики, а саме:

- вимірювачі параметрів, які оцінюють ступінь дефекту та місце його знаходження, повинні мати достатню точність та роздільну здатність;
- вимірювання параметрів дефектів осердя необхідно здійснювати одночасно у всіх точках перерізу осердя;
- забезпечувати необхідну ефективність оцінки якості пресування осердя статора ТГ та пакетів шихтованого заліза з яких складеться осердя;

– здійснювати збирання, обробку та відображення результатів контролю в автоматичному режимі.

Все це обумовлює потребу в створенні нових та удосконалені існуючих методів автоматизованих засобів контролю рівномірності щільності пресування осердя статора ТГ під час його складання та виготовлення. Створення системи контролю, що виконує зазначені вище характеристики дозволить прискорити роботи по збиранню осердя статора, зменшити кількість технологічних операцій, що використовуються з метою контролю якості збирання та пресування, а також мінімізують вплив людського фактору на результат виготовлення осердя статора турбогенератора.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. За результатами аналізу особливостей технологічного процесу виготовлення (складання та пресування) осердя статора потужних турбогенераторів показано, що існуючі методи та засоби контролю монолітності осердя статора потужного не забезпечують достатньої достовірності визначення щільності пресування та не забезпечують необхідну точність виявлення дефектів осердя (зменшення або збільшення щільності) та місця дефекту по перерізу осердя, або вимагають великих витрат часу.

2. Розглянуто вплив зусилля пресування на виникнення можливих дефектів в конструктивних елементах турбогенератора. Наведено способи контролю якості пресування осердя статора потужного турбогенератора під час його пересування на етапі виготовлення та подальшої експлуатації.

3. Визначено необхідність забезпечення контролю монолітності пресування пакетів осердя статора потужного ТГ під час пресування на етапі виготовлення задля забезпечення виявлення в осерді місць з послабленим пресуванням та подальшим їхнім ремонтом, що дозволить забезпечити необхідну якість виготовлення осердя статора та забезпечити у свою чергу подальшу безаварійну експлуатацію ТГ.

Посилання: [1-46], див. список використаних джерел стор. 184 – 186.

РОЗДІЛ 2

ЗАСОБИ НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ МОНОЛІТНОСТІ ОСЕРДЯ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТГ

Осердя статора є найвідповідальнішим елементом конструкції потужного турбогенератора та значною мірою визначає надійність його роботи, довговічність, працездатність у широкому спектрі режимів, що задаються енергосистемою. Складна шихтована структура, різноманітність електромагнітних, теплових та механічних навантажень, що діють на осердя статора під час роботи турбогенератора у широкому спектрі режимів визначають необхідність забезпечення високої експлуатаційної надійності та працездатності осердя. Основною механічною властивістю статора, що визначає його експлуатаційну надійність та працездатність, є наданий йому в процесі виготовлення стан пружного стиснення осердя, який після виготовлення забезпечується за допомогою натискних плит і стяжних призм. Тому даний розділ присвячений розробці методу неперервного контролю монолітності (щільності пресування) осердя статора турбогенератора під час його пресування та засобів, які його реалізують.

Використання результатів неперервного контролю дозволить автоматично визначити місця дефектів та їх розмір, об'єм та місце встановлення ущільнюючого матеріалу для їх усунення, що в результаті дозволить підвищити якість виготовлення осердя та дозволить підвищити надійність й строк експлуатації турбогенератора.

На методи представлені в даному розділі отримано два патенти України на винахід та подана заявка на патент України на винахід [47-49].

2.1 Метод автоматичного визначення щільності пресування осердя статора потужного турбогенератора під час складання

Для забезпечення встановлення засобів контролю між пакетом осердя статора та натискною плитою пресу використовується додаткове натискне кільце, яке

встановлюється на торцеву поверхню осердя статора під верхнє натискне кільце пресу. Діаметр додаткового кільця рівний діаметру верхнього натискного кільця. В кільці вмонтовано рівномірно розміщені відносно торцевої поверхні осердя статора N комірок (по три на кожний сегмент) для автоматичного вимірювання питомого тиску пресування.

В основу методу покладено автоматичне вимірювання питомого тиску пресування в N рівномірно розміщених точках торцевої поверхні осердя статора з урахуванням того, що тиск є величиною, яка обернено пропорційна величині дефекту осердя (зменшення або збільшення щільності).

Схему встановлення кільця показано на рис. 2.1, де: 1 – корпус статора турбогенератора, 2 – осердя статора турбогенератора, 3 – верхнє натискне кільце, 4 – нижнє натискне кільце з вимірювальними елементами, 5 – парасольковий прес.

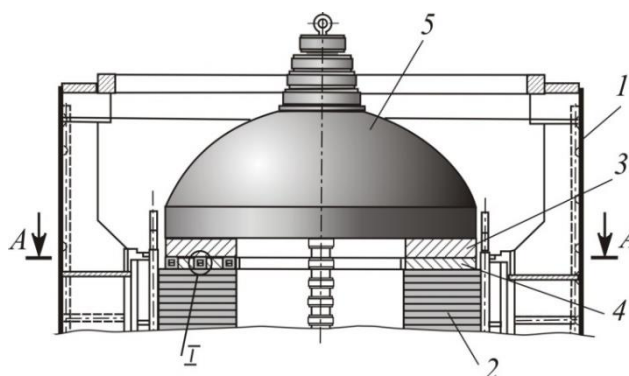


Рис. 2.1 Схема встановлення натискного кільця

На рис. 2.2 представлено загальний вид нижнього додаткового кільця з 45 місцями для встановлення контрольних елементів (комірок 1а, 1б, 1в ... 15а, 15б, 15в), а на рис. 2.3 показано його фотографію із встановленими вимірювальними комірками.

До складу додаткового кільця входять: металевий диск 6, контрольні комірки 7, електронний блок оброблення та реєстрації виміряної інформації 8, а також з'єднувальні кабелі 9 між контрольними комірками 7 і блоком 8. Кабелі 9 розміщуються в спеціально створених канавках на торцевій поверхні осердя, яка контактує з верхнім натискним кільцем (рис. 2.2 та рис. 2.3).

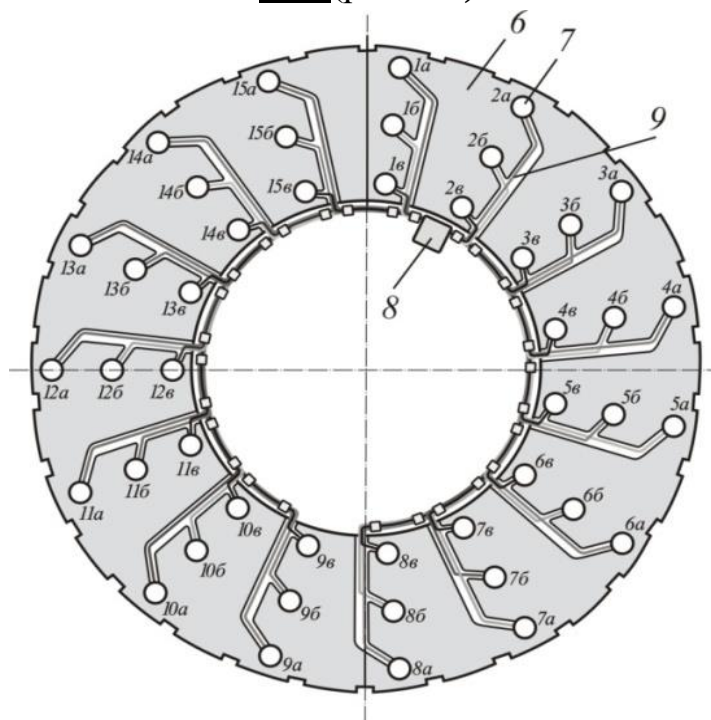
A-A (рис. 2.1)

Рис. 2.2 Загальний вид нижнього додаткового кільця

Рис. 2.3 Нижнє додаткове кільця із встановленими
вимірювальними комірками

Пристрій (рис. 2.4 та рис. 2.5) має вид кільця 1 з встановленими 45 вимірювальними комірками 2. З використанням комірок в точках 1а, 1б, 1в ... 15а, 15б, 15в вимірюється питомий тиск пресування. Виміряна інформація оброблюється мультиплексором-комутатором 3, до якого дані з комірок передаються з використанням з'єднувальних кабелів 4.

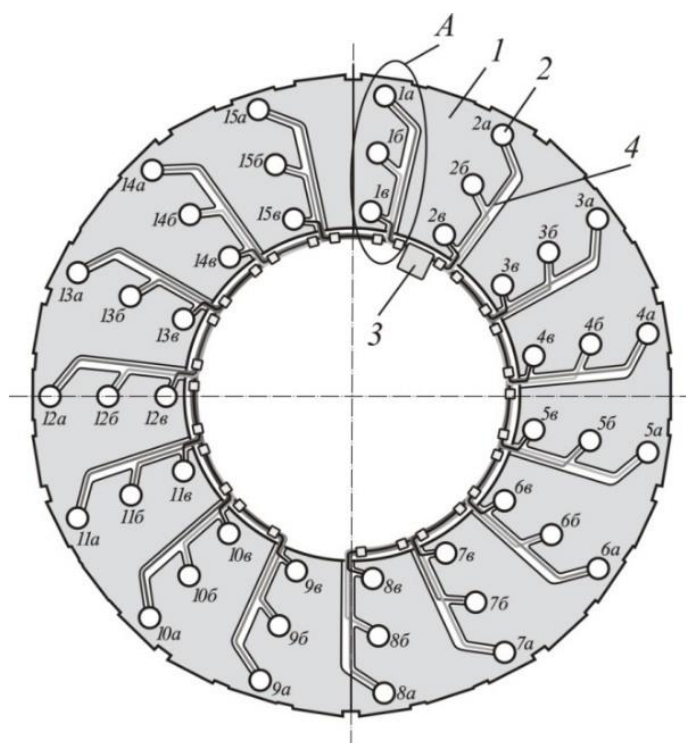


Рис. 2.4 Схеми розміщення

На рис. 2.5 показано місця встановлення на кільці трьох комірок: рис. 2.5, *a* – схема встановлення, рис. 2.5, *б* – фотографія при проведенні випробувань.

A (рис. 2.4)

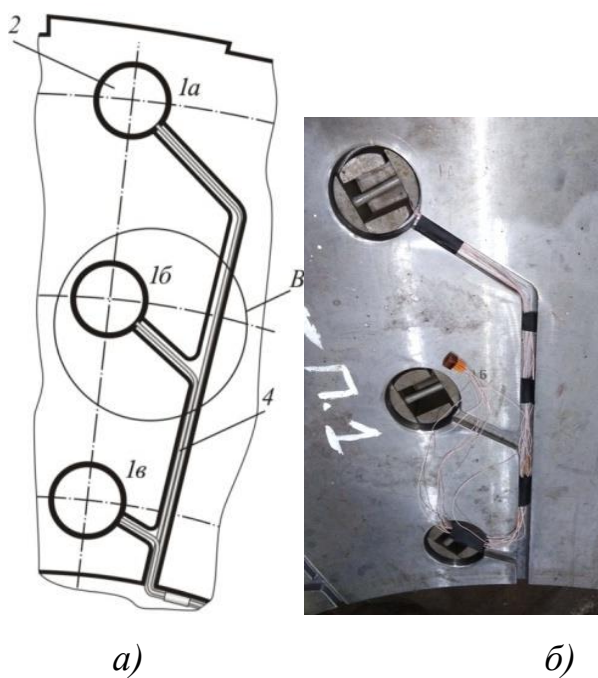


Рис.2.5 Місця встановлення вимірювальних комірок на кільці

Схему встановлення окремої комірки показано на рис. 2.6, де: 1 – вимірювальна комірка, 2 – нижнє натискне кільце, 3 – пластина, яка направляє з'єднувальний джгут, 4 – джгут, 5 – з'єднувальна колодка для кабелів, 6 – вивідний кабель.

В (рис. 2.5, а)

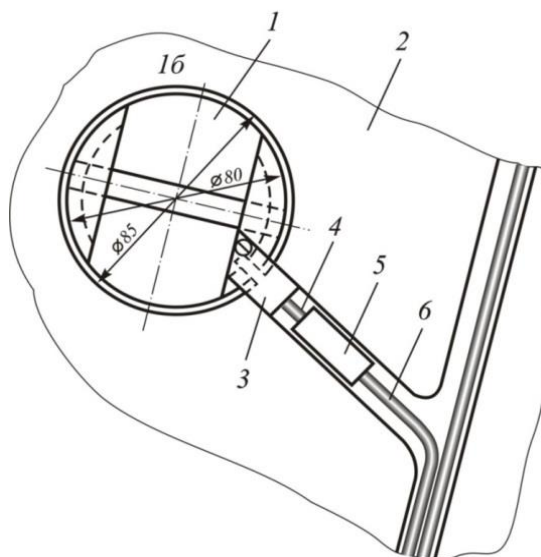


Рис. 2.6 Схема встановлення окремої комірки

Вимірювання тиску здійснюється з використанням металевої мембрани з жорстким центром, як силосприймаючого елементу, і перетворювачів, які реєструють зміну геометричних та механічних характеристик мембрани під дією питомого тиску пресування. Введення нової операції автоматизації в порівнянні з методами, що використовуються класично [22], дозволило отримати позитивний технічний результат, який полягає в підвищенні достовірності контролю стану осердя та підвищення продуктивності праці під час контролю.

2.2 Розрахунок силувимірювальної мембрани засобів контролю щільності пресування осердя статора

Реалізація описаного методу контролю вимагає використання спеціалізованої системи контролю із розподіленою системою спеціальних вимірювальних комірок. Метрологічні та технічні характеристики таких вимірювальних комірок визначаються мембраною із жорстким центром, характеристика якої лінійна при

малих прогинах [50-52] та вимірювальним перетворювачем (сенсором), який призначений для вимірювання мікропереміщень центру мембрани під дією тиску пресування.

Розглянемо випадок використання в якості сенсору в вимірювальній комірці вимірювальний перетворювач ємнісного типу [52, 53]. Конструктивну схему вимірювальної комірки з ємнісним перетворювачем тиску пресування наведено на рис. 2.7.

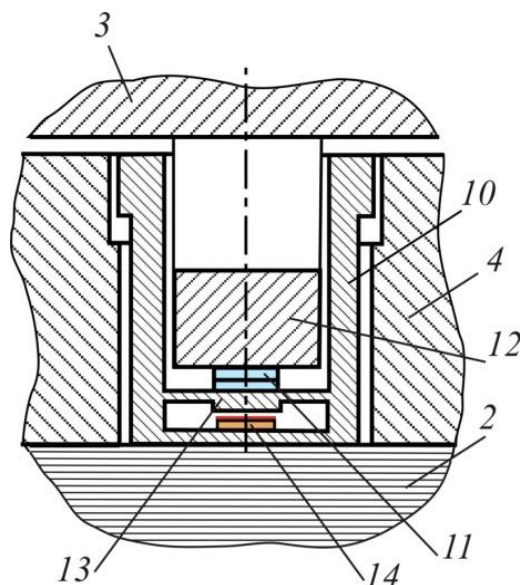


Рис. 2.7 Конструктивна схема вимірювальної комірки з ємнісним перетворювачем тиску пресування

Використання запропонованої комірки із ємнісним вимірювальним перетворювачем здійснюється наступним чином. На осерді статора 2 під верхнім натискним кільцем пресу 3 розміщується металевий диск 4, в спеціальні отвори якого вставлені стакани 10, втулка 12 і свинцева проба 11 таким чином, що нижня поверхня стакана 10 контактує з торцевою поверхнею осердя 2, свинцева проба 11 розміщена на дні стакана, втулка 10 встановлена всередині стакана 10 і нижньою поверхнею контактує з пробойною 11, а верхньою – з верхнім натискним кільцем 3, при цьому висота втулки обрана таким чином, що відстань між верхньою поверхнею втулки 10 і верхньою поверхнею диска 4 була приблизно рівна товщині пробойни 11 (рис. 2.8), і ця відстань є однаковою для всіх N стаканів і всіх N втулок. В верхній частині дна стакана 10 сформовано плоску металеву мембрану з

жорстким центром 13, а в нижню – введено діелектричну пластину 14 з металевим тонкошаровим електродом 14.1 [47].

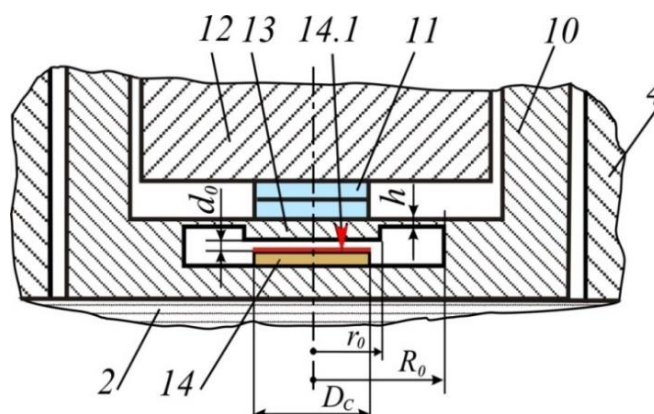


Рис. 2.8 Схема розміщення силосприймаючих елементів вимірювальної комірки

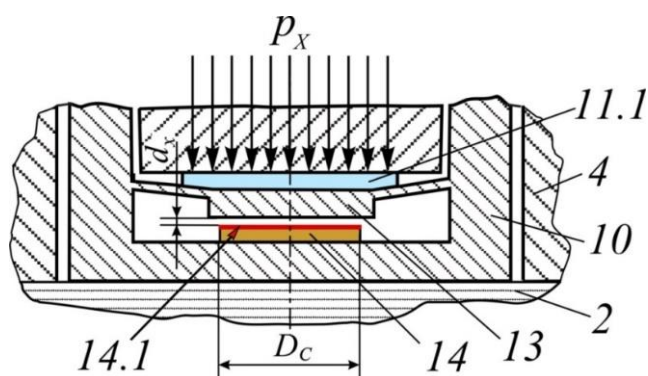


Рис. 2.9 Схема розміщення силовимірювальної мембрани

На рис. 2.8 і рис. 2.9 показано: R_0 – зовнішній радіус мембрани 13, r_0 – радіус жорсткого центру мембрани 13, h – товщина мембрани 13, D_c – діаметр електроду 14.1, p_x – питомий тиск пресування, d_0 – початковий зазор між жорстким центром мембрани 13 і електродом 14.1 за умови відсутності питомого тиску пресування, d_x – зазор після навантаження тиском p_x .

У цьому разі, під впливом тиску пресування p_x через втулку 12 діє на свинцеву пробу 11 і на мембрану 13. Проба буде деформована (поз. 11.1), мембрана 13 прогнеться, при цьому зазор між жорстким центром мембрани 13 і електродом

14.1 зміниться від d_0 до d_X . З іншого боку, переміщення W_X жорсткого центру, згідно [52], може бути визначене за формулою:

$$W_X = A_p \frac{p_X \cdot R_0^4}{Eh^3}, \quad (2.1)$$

де $A_p = f(k) = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{k^4 - 1 - 4k^2 \ln k}{k^4}$ – коефіцієнт, що залежить від розмірів мембрани, $k = R_0/r_0$, $R_0 = 2,5$ см – зовнішній радіус мембрани, $r_0 = 20$ мм – внутрішній радіус мембрани, $h = 0,15$ см = 1,5 мм, $0 \leq p_X \leq 30$ кгс/см² (294.1995 Н*см.) – діапазон зміни зусилля тиску; μ – коефіцієнт Пуассона, E – модуль пружності.

Використовуючи формулу (2.1), розрахуємо переміщення жорсткого центру мембрани під дією питомого тиску пресування p_X , який змінюється від 0 до 30 кгс/см² (2,94·10⁶ Па). Мембрана виготовлена із сталі 40Х, у якої $E = 2,14 \cdot 10^{11}$ Па = 2,1828·10⁶ кгс/см², $\mu = 0,27$. Геометричні розміри мембрани $R_0 = 25$ мм = 2,5 см, $r_0 = 10$ мм = 1 см, $h = 0,15$ см = 1,5 мм.

$$\begin{aligned} W_X &= A_p \frac{p_X \cdot R_0^4}{Eh^3} = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{k^4 - 1 - 4k^2 \ln k}{k^4} \cdot \frac{p_X \cdot R_0^4}{Eh^3} = \\ &= \frac{3(1-(0,27)^2)}{16} \cdot \frac{\left(\frac{2,5}{1}\right)^4 - 1 - 4\left(\frac{2,5}{1}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{2,5}{1}\right)}{\left(\frac{2,5}{1}\right)^4} \cdot \frac{p_X \cdot 2,5^4}{2,1828 \cdot 10^6 \cdot 0,15^3} = \\ &= 0,0003577 \cdot p_X \text{ см} = 0,003577 \cdot p_X \text{ мм} \\ A_p &= \frac{3(1-(0,27)^2)}{16} \cdot \frac{\left(\frac{2,5}{1}\right)^4 - 1 - 4\left(\frac{2,5}{1}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{2,5}{1}\right)}{\left(\frac{2,5}{1}\right)^4} = \\ &= \frac{3 \cdot 0,9271}{16} \cdot \frac{39,0625 - 1 - 4 \cdot 6,25 \cdot 0,91629073187}{39,0625} = \\ &= 0,17383125 \cdot 0,387968 = 0,0674409624 \end{aligned}$$

Для $p_x = 30 \text{ кгс/см}^2$ переміщення центра мембрани складе $W_x = 0,01073 \text{ см} = 0,1073 \text{ мм}$.

Для підтвердження адекватності прийнятої методики розрахунку механічного компоненту системи контролю зусилля пресування осердя статора при його складанні була розроблена імітаційна модель спеціальної вимірювальної мембрани, що знаходиться під дією максимального питомого тиску $p_x = 30 \text{ кг/см}^2$, приведена на рис. 2.10.

З використанням програмно пакету "Comsol multiphysics", в якому застосовується метод скінченних елементів, створено комп'ютерну модель навантаженої мембрани, яку наведено на рис. 2.10.

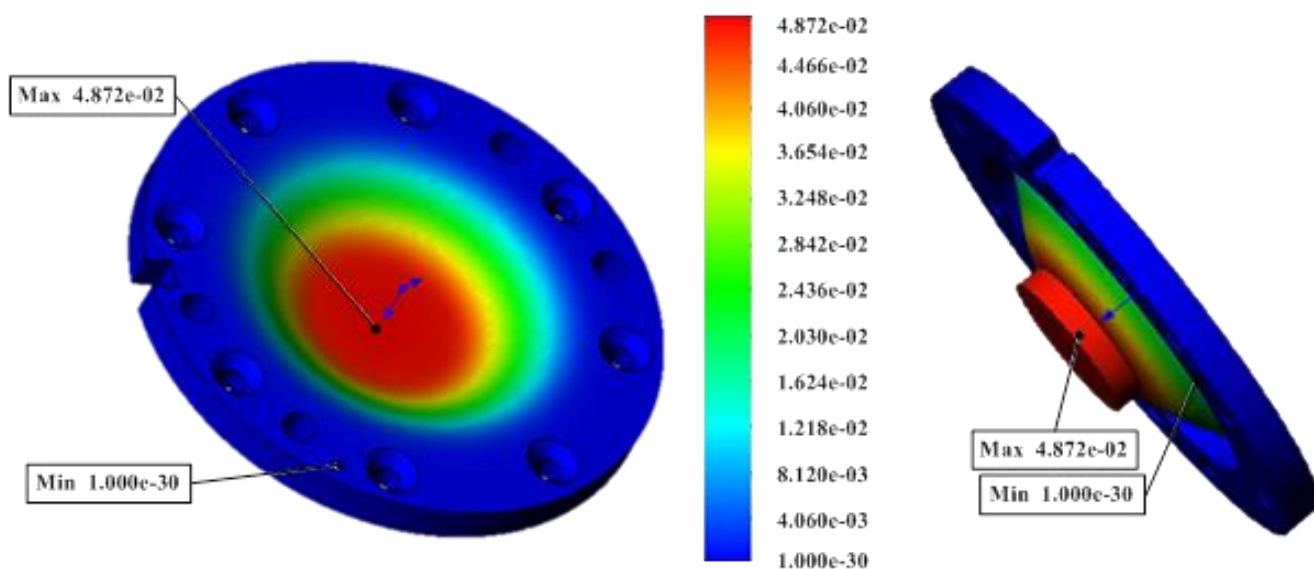


Рис. 2.10 Імітаційна модель вимірювальної мембрани

У результаті проведення імітаційного моделювання були отримані значення, що є майже ідентичними розрахунковим. Проведені дослідження показали, що максимальний прогин мембрани складає 0,487 мм, що є результатом, близьким до розрахункового, а саме 0,5 мм, і підтверджує адекватність прийнятої методики розрахунку механічного компоненту системи контролю зусилля пресування осердя статора при його складанні.

2.3 Контроль осердя з ємнісним перетворювачем тиску пресування

Як, показано в попередньому підрозділі, жорсткий центр мембрани 13 і електрод 14.1 утворюють вимірювальний конденсатор з плоско-паралельними електродами (рис. 2.8 та рис. 2.9), в якому жорсткий центр мембрани є заземленим.

Електрична ємність C_X між жорстким центром мембрани 13 і електродом 14.1 визначається, як

$$C_X = \epsilon\epsilon_0 \frac{S}{d_0 - W_X} = \epsilon\epsilon_0 \frac{\pi D_C^2}{4(d_0 - W_X)}, \quad (2.2)$$

де $\epsilon_0 = 8,8542 \text{ Ф/м}$ – діелектрична проникність вакууму, ϵ – відносна діелектрична проникність, S – площа електрода 14.1. Схема конденсатора з плоско-паралельними електродами представлена на рис. 2.11.

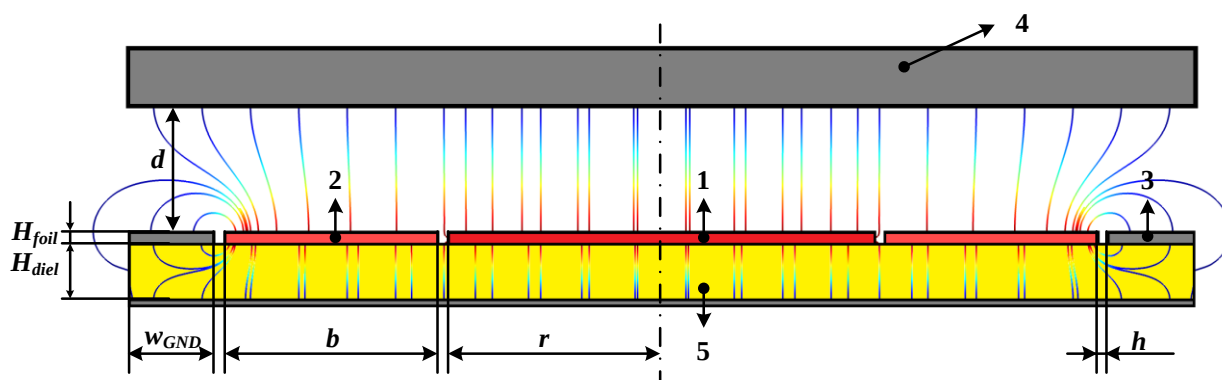


Рис. 2.11 Схема конденсатора з плоско-паралельними електродами

В такому випадку, ємнісний сенсор, з використанням якого вимірюється відстань d до заземленої поверхні мембрани 4, складається з високопотенціального електрода 1 радіусом r , охоронного електрода 2 шириною b , діелектричної підкладки 5 товщиною H_{diel} та заземленого електрода 3, розмір якого встановлюється з конструктивних міркувань. Ширина b охоронного електрода залежить від співвідношення d/r і за заданою похибкою розраховується. Електроди 1 і 2 розділені діелектричним проміжком h , який для більшої рівномірності поля повинен мати мінімальну ширину. Товщина провідного матеріалу (мідної фольги) H_{foil} обирається в залежності від технології виготовлення.

Наявність охоронного електрода забезпечує рівномірне плоско-паралельне поле між потенціальним електродом 1 і заземленою поверхнею вала 4. Окрім того, усувається вплив сторонніх полів і навколишніх предметів на ємність сенсора. Ще одною перевагою застосування охоронного електрода є можливість вимірювання дуже малих значень ємності [54-57]. Одним із недоліків таких сенсорів є необхідність використання тріаксiального кабелю між сенсором з охоронним електродом і вторинним вимірювальним перетворювачем (ВВП). Зазначений вище недолік мінімізується за допомогою усунення такого кабелю шляхом розміщення ВВП у безпосередній близькості до електродів сенсора.

У табл. 2.1 приведено результати визначення значення ємності C_M сенсора, побудованого в програмі ComsolMultiphysics з такими геометричними розмірами: $r - 4$ мм, $b - 4$ мм, $h - 0,1$ мм, $w_{GND} - 1,8$ мм та аналітичні значення ємності C_C , розраховані за формулою

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (2.3)$$

де $S = \pi r^2$ площа електродів сенсора; d – відстань між площиною сенсора та жорсткого центру мембрани.

Графіки отриманих залежностей $C_M = f(d)$ і $C_C = f(d)$ показано на рис. 2.12.

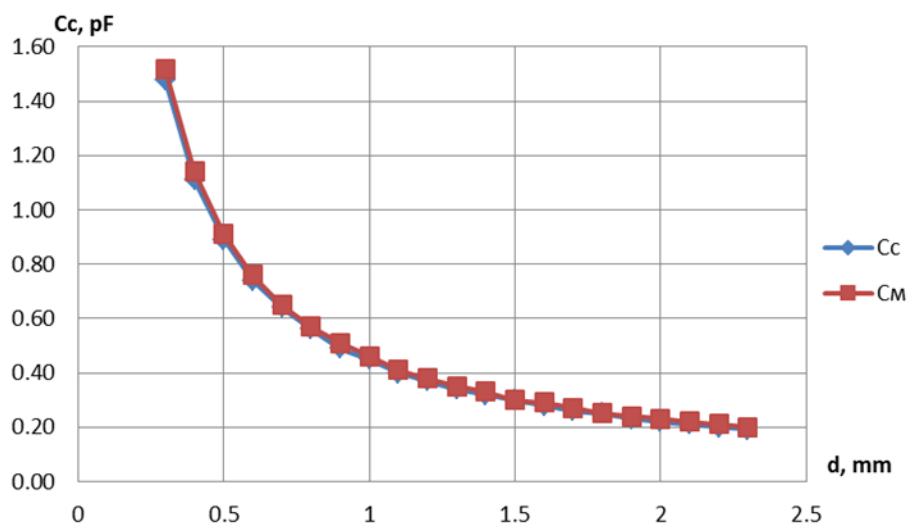


Рис. 2.12 Графіки залежності значення ємності $C_M = f(d)$ і $C_C = f(d)$

Результати визначення значення ємності

$d, \text{мм}$	$C_C, 10^{-12} \text{ Ф}$	$C_M, 10^{-12} \text{ Ф}$	$\Delta C, 10^{-12} \text{ Ф}$
0,3	1,48	1,52	0,04
0,4	1,11	1,14	0,03
0,5	0,89	0,91	0,02
0,6	0,74	0,76	0,02
0,7	0,64	0,65	0,01
0,8	0,56	0,57	0,01
0,9	0,49	0,51	0,02
1	0,45	0,46	0,01
1,1	0,40	0,41	0,01
1,2	0,37	0,38	0,01
1,3	0,34	0,35	0,01
1,4	0,32	0,33	0,01
1,5	0,30	0,30	0,00
1,6	0,28	0,29	0,01
1,7	0,26	0,27	0,01
1,8	0,25	0,25	0,00
1,9	0,23	0,24	0,01
2	0,22	0,23	0,01
2,1	0,21	0,22	0,01
2,2	0,20	0,21	0,01
2,3	0,19	0,20	0,01

Враховуючи те, що початковий зазор в ємнісному сенсори $d_0 = 0,5 \text{ мм}$, робочий діаметр сенсора $D_C = 20 \text{ мм}$, діелектрична проникність вакууму $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, відносна діелектрична проникність повітря $\varepsilon = 1$, з урахуванням формули (2.2) електрична ємність сенсора C_X в залежності від переміщення жорсткого центру мембрани W_X буде змінюватись згідно закону

$$C_X = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\pi D_C^2}{4(d_0 - W_X)} = 8,8542 \cdot \frac{\pi (16 \cdot 10^{-3})^2}{4(0,5 \cdot 10^{-3} - W_X)} \cdot 10^{-12} = \frac{0,00177934}{(0,5 \cdot 10^{-3} - W_X)} \text{ пФ}.$$

На рис. 2.13 наведено графік абсолютної похибки. Абсолютна похибка для отриманих залежностей розраховувалась, як: $\Delta C = |C_C - C_M|$. Похибка зумовленої нехтуванням ширини охоронного електрода при розрахунку значення ємності аналітичним способом. При розрахунках, ширина електрода приймалася нескінченно великою. На рис. 2.14 представлено графік залежності $C_X = f(W)$.

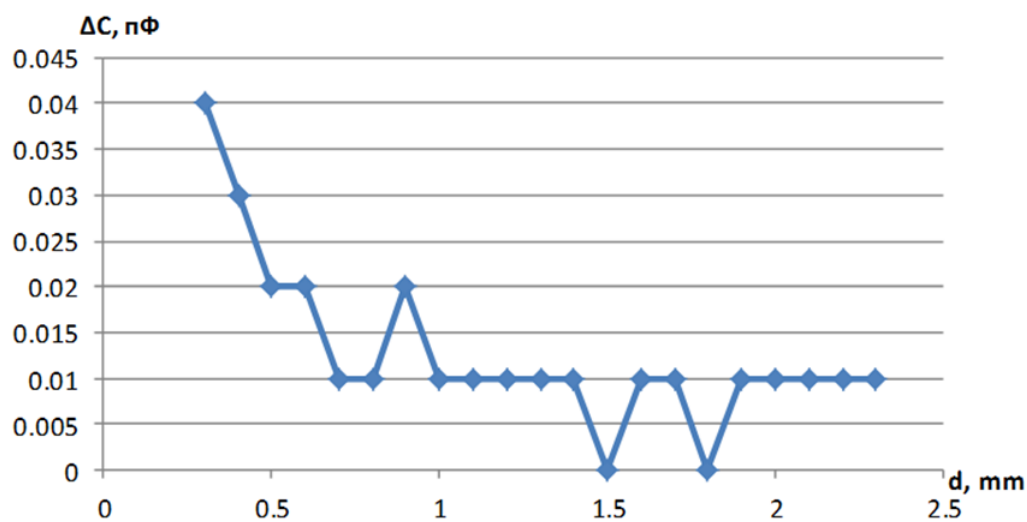


Рис. 2.13 Графіки абсолютної похибки

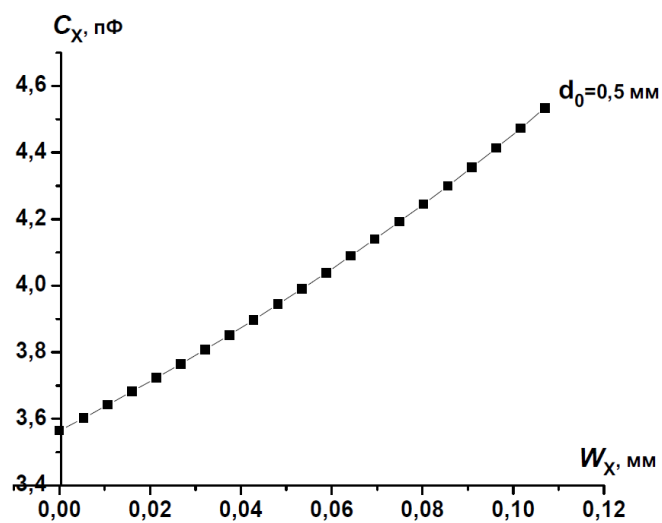
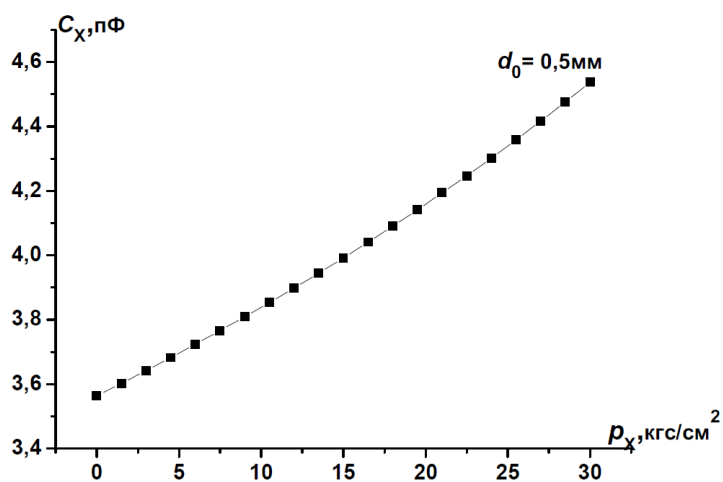
Рис. 2.14 Графік залежності $C_X = f(W)$ 

Рис. 2.15 Графік зміни ємності сенсора в залежності від переміщення жорсткого центра мембрани

Графік зміни ємності сенсора (при $d_0 = 0,5$ мм) в залежності від питомого тиску пресування $C_x = f(p_x)$ показано на рис. 2.15.

Окрім того, враховуючи (2.1)...(2.3), можна записати, що зміна ємності сенсора в залежності від зміни питомого тиску пресування $C_x = f(p_x)$ за умови використання наведених вище механічних і геометричних характеристик мембрани, визначиться як

$$C_x = f(p_x) = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\pi D_C^2}{4 \left(d_0 - A_F \frac{p_x \cdot R_0^4}{E h^3} \right)} =$$

$$= \frac{2,0096}{\left(0,05 \cdot 10^{-3} - 3,65 \cdot 10^{-11} \cdot p_x \right)} \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = \frac{2,0096}{\left(0,05 \cdot 10^{-3} - 3,65 \cdot 10^{-11} \cdot p_x \right)} \text{ пФ}.$$

Враховуючи те, що тиск пресування в кожній із N точок, завдяки різній монолітності осердя після пресування, через наявність дефектів, буде різним, то, вимірявши ємність, можна автоматично визначити місця дефектів та їхню величину.

На метод подано заявку на патенти України на винахід [48]. Метод, як пристрій реалізовано і випробувано під час виготовлення осердя статора ТГ типу ТГВ-250-2ПТЗ на АТ "Завод "Електроважмаш" (м. Харків).

2.4 Контроль осердя з тензометричним перетворювачем тиску пресування

Тензометричний перетворювач [48, 58], як і пристрій з ємнісним перетворювачем використовується в складі додаткового натискного кільця, яке встановлюється на торцеву поверхню осердя статора під верхнє натискне кільце пресу. Діаметр додаткового кільця рівний діаметру верхнього натискного кільця. В кільці вмонтовано рівномірно розміщені відносно торцевої поверхні осердя статора N комірки (по три на кожний сегмент) для автоматичного вимірювання

питомого тиску пресування. До складу пристрою, крім того, входять електронний блок оброблення та реєстрації вимірюваної інформації та з'єднувальні кабелі між контрольними комірками і електронним блоком.

Конструктивну схему вимірювальної комірки, в якій використано тензометричні перетворювачі тиску пресування, показано на рис. 2.16.

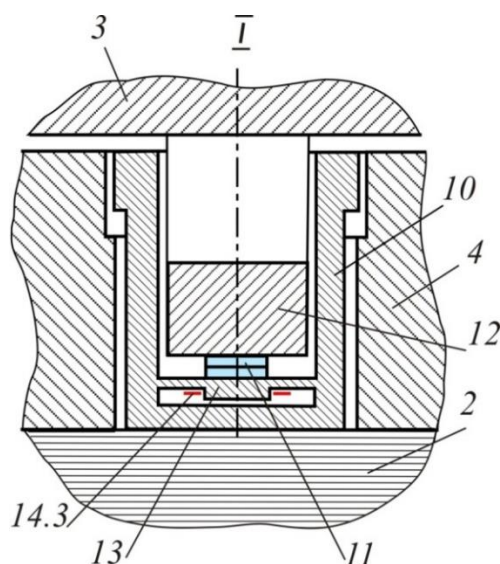


Рис. 2.16 Конструктивна схема вимірювальної комірки,
з тензометричним перетворювачем

На осерді статора 2 під верхнім натискним кільцем пресу 3 розміщується металевий диск 4, в спеціальні отвори якого вставлена комірка, до складу якої входять стакан 10, втулка 12 і свинцева пробка 11. При цьому нижня поверхня стакану 10 контактує з торцевою поверхнею осердя 2, свинцева пробка 11 розміщена на дні стакану, втулка 10 встановлена всередині стакану 10 і нижньою поверхнею контактує з пробкою 11, а верхньою – з верхнім натискним кільцем 3. Висота втулки вибрана таким чином, що відстань між верхньою поверхнею втулки 10 і верхньою поверхнею диска 4 приблизно рівна товщині пробки 11, і ця відстань є однаковою для всіх N стаканів і всіх N втулок. У верхній частині дна стакану 10 сформовано плоску металеву мембрану з жорстким центром 13, який утворено на протилежній пробі стороні мембрани. На мембрані між жорстким центром та місцем заземлення на двох ортогональних діаметрах розміщено чотири тензорезистори 14.

За допомогою мембрани, тензорезисторів, електронного блоку і з'єднувальних кабелів вимірюється питомий тиск пресування в N точках торцевої поверхні осердя, і величина тиску буде обернено пропорційною величині дефекту осердя (зменшення монолітності). Завдяки автоматизації і достатній кількості точок контролю підвищується точність вимірювання, достовірність визначення дефекту осердя, а також зменшуються витрати часу на виконання контрольно-діагностичних операцій.

Запропоновано два варіанти реалізації автоматичного вимірювання тиску пресування.

У першому випадку передбачається розміщення чотирьох тензорезисторів рівномірно по колу одного радіусу в місці заземлення мембрани, при чому два з них, які розміщені на протилежних кінцях одного діаметра, вимірюють радіальну відносну деформацію мембрани, а два інші – тангенціальну.

У другому випадку два з чотирьох тензорезисторів розміщуються на одному діаметрі в місці заземлення мембрани, а інші два – біля жорсткого центру мембрани на діаметрі, який ортогональний діаметру встановлення перших двох тензорезисторів, при чому всі чотири вимірюють відносну радіальну деформацію.

На рис. 2.17 показане положення складових частин вимірювальних елементів комірки до прикладення питомого тиску пресування, а на рис. 2.18 - положення тих самих елементів після прикладення питомого тиску пресування.

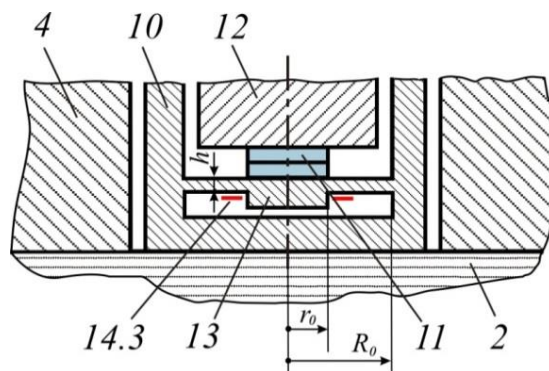


Рис. 2.17 Положення складових частин вимірювальних елементів комірки до прикладення питомого тиску пресування

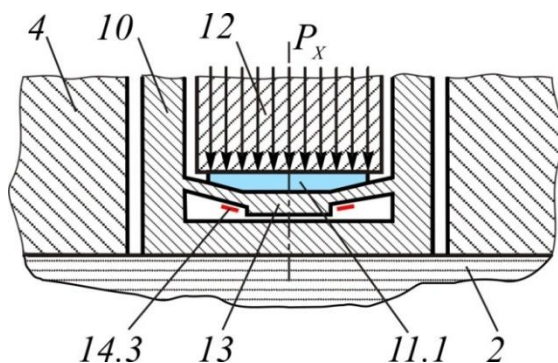


Рис. 2.18 Положення складових частин вимірювальних елементів комірки після прикладення питомого тиску пресування

На рис. 2.17 і рис. 2.18: 2 – осердя статора турбогенератора, 4 – нижнє натискне кільце пресу з вимірювальними елементами, 10 – стакан, 11 – недеформована свинцева проба, 11.1 – деформована свинцева проба, 12 – втулка, 13 – плоска металева мембрана з жорстким центром, 14.3 – тензорезистори, розміщені біля жорсткого центру мембрани, для вимірювання відносної радіальної деформації мембрани.

Пристрій працює наступним чином. Під час пресування осердя питомий тиск P_x через втулку 12 діє на свинцеву пробу 11 і на мембрану 13. Проба буде деформована (поз. 11.1), мембрана 13 прогнеться, в мембрані 13 виникнуть радіальні σ_r і тангенціальні σ_t напруги, і, відповідно, відносні радіальні ε_r і тангенціальні ε_t деформації. Враховуючи те, що мембрана є пластиною, яка симетрична, то по дузі одного радіусу r напруги і відносні деформації будуть однаковими (рис. 2.19).

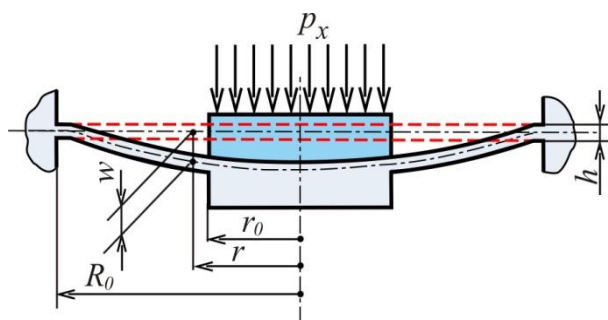


Рис. 2.19 Вплив питомого тиску P_x на свинцеву пробу і мембрану

Величини деформацій ε_r і ε_t в окремій точці мембрани з радіусом r в області малих переміщень центру мембрани залежать від тиску p_x , механічних характеристик матеріалу мембрани та її геометричних розмірів і можуть бути визначені за формулами [48]:

$$\varepsilon_r = \frac{w}{1-\mu^2} \left[C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3p_x r^2}{16D} + \mu \left(C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{p_x r^2}{16D} \right) \right]; \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_t = \frac{w}{1-\mu^2} \left[C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{p_x r^2}{16D} + \mu \left(C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3p_x r^2}{16D} \right) \right]; \quad (2.5)$$

$$w = A_r \frac{p_x R_0^4}{Eh^3}; \quad (2.6)$$

$$A_r = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{c^4 - 1 - 4c^2 \ln c}{c^4}; \quad (2.7)$$

$$C_1 = -\frac{p_x}{16D} (r_0^2 - R_0^2); \quad (2.8)$$

$$C_2 = \frac{p_x}{16D} \cdot \frac{r_0^2 R_0^2 (r_0^2 + R_0^2)}{(R_0^2 - r_0^2)}; \quad (2.9)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (2.10)$$

де p_x – питомий тиск, E – модуль пружності матеріалу мембрани, μ – коефіцієнт Пуассона, R_0 – зовнішній радіус мембрани, r_0 – радіус жорсткого центру мембрани; h – товщина мембрани, w – прогин середньої лінії мембрани в точці з радіусом r , $c = r / r_0$.

Як відомо з [59], зміна активного опору тензорезистора під дією механічної напруги визначається за формулою

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \varepsilon, \quad (2.11)$$

де K_T – коефіцієнт тензочутливості, який залежить від зміни форми тензорезистора і зміни питомого опору, ε – відносна деформація.

Найбільшу чутливість і лінійність вимірювання з використанням тензометричного мосту з чотирма змінними тензорезисторами, розміщеними на вимірювальній мембрані з жорстким центром, можна досягти за умов розміщення всіх тензорезисторів в зоні заземлення мембрани, або двох біля заземлення мембрани, а двох – в зоні жорсткого центру [59].

Розміщення тензорезисторів на мембрані рівномірно по колу (за першим варіантом) показано на рис. 2.20, де тензорезистори 14.1 вимірюють відносну радіальну деформацію ε_r мембрани, а 14.2 – відносну тангенціальну ε_t . Схему включення цих тензорезисторів в тензометричний міст зображено на рис. 2.21. Відносну радіальну деформацію тензорезисторів 14.1 можна визначити, використовуючи вирази (2.4), (2.6) – (2.10), а відносну тангенціальну деформацію тензорезисторів 14.2 – вирази (2.5), (2.6) – (2.10), де $r = R_1$. Якщо використовуються тензорезистори з базою b , то $R_1 \leq R_0 - b/2$.

За другим варіантом два з тензорезисторів (поз. 14.1) розміщуються біля заземлення мембрани, а два (поз. 14.3) – біля жорсткого центру (рис. 2.22), і включаються за схемою рис. 2.23.

Відносну радіальну деформацію тензорезисторів 14.3 можна визначити, використовуючи вирази (2.4), (2.6) – (2.10), де $r = R_2 \geq r_0 + b/2$.

Вимірявши деформації ε_r і ε_t в зазначених точках мембран визначають тиск пресування p_x в кожній із N комірок, а враховуючи те, що тиск пресування, завдяки нерівномірній монолітності осердя після пресування через наявність дефектів буде різним, то можна автоматично визначити місця дефектів та їхню величину.

Введення в дно стакана мембрани з жорстким центром та тензорезисторів, а також використання пристрою обробки та відображення інформації і N з'єднувальних кабелів між вимірювальними перетворювачами та електронним блоком, дозволяє підвищити достовірність контролю осердя статора під час пресування та значно зменшить час оброблення результатів вимірювання (приблизно в 100 разів).

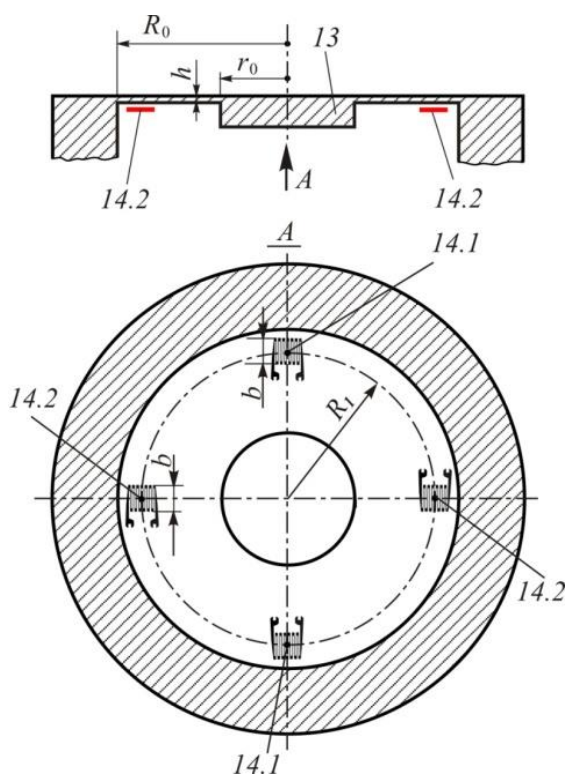


Рис. 2.20 Розміщення тензорезисторів на мембрані рівномірно по колу

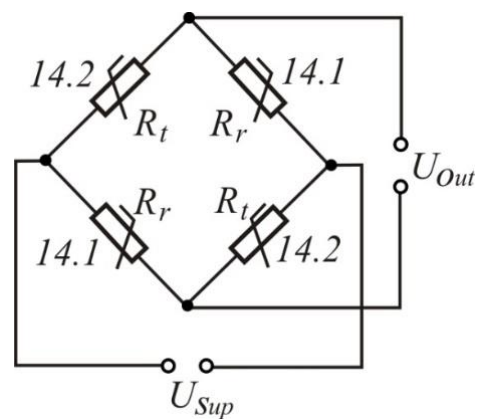


Рис. 2.21 Схема тензометричного моста

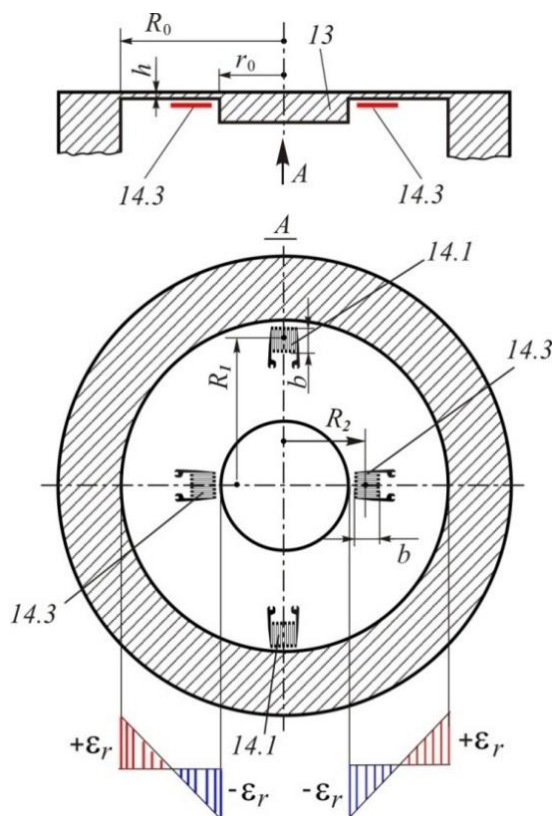


Рис. 2.22 Розміщення тензорезисторів біля защеплення мембрани та жорсткого центру

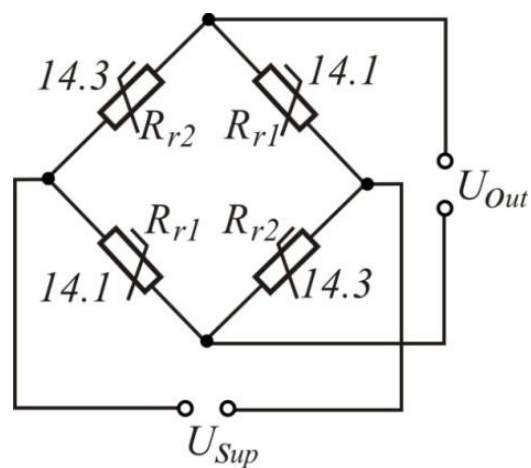


Рис. 2.23 Схема тензометричного моста

Таким чином, запропонований пристрій має вищу швидкодію, що дозволяє більш ефективно контролювати стан пресування осердя статора ТГ під час пресування на заводі-виробнику, що дає можливість покращити якість складання осердя, а отже підвищити надійність машини.

На метод отримано заявку на патенти України на винахід [48].

2.5 Контроль пресування осердя статора на основі оптичних сенсорів із решітками Брегга

Особливістю пристрою є те, що в вимірювальних комірках для перетворення деформації мембрани в електричний сигнал застосовано оптичне волокно з решітками Брега та блок оброблення та реєстрації вимірюваної інформації (інтеррогатор). Застосування сенсорів на основі вимірювальних решіток Брега (ВБР) є одним з перспективних методів розподіленого вимірювання фізичних величин. Розподілені по довжині світловода решітки дозволяють створювати системи вимірювання механічних деформацій різноманітних об'єктів, які вигідно відрізняються від традиційних комплексів аналогічного призначення вартістю і технологічністю виробництва.

Вимірювач з решітками Брега, як і вимірювачі описані в попередніх розділах розташовується в вимірювальних комірках натискної плити. Конструктивно комірки Брега розташовуються на поверхні спеціальної вимірювальної мембрани рівномірно по колу, та закріплюються аналогічно тензорезистивним сенсорам за допомогою клею.

У даному випадку можливо два варіанти реалізації автоматичного вимірювання тиску пресування ТГ за допомогою решіток Брега аналогічно розміщенню тензорезисторів в попередньому методі.

У першому випадку передбачається розміщення чотирьох решіток Брега рівномірно по колу одного радіусу в місці заземлення мембрани, при чому два з них, які розміщені на протилежних кінцях одного діаметра, вимірюють радіальну відносну деформацію мембрани, а два інші – тангенціальну.

У другому випадку дві з чотирьох решіток Брегга розміщуються на одному діаметрі в місці защемлення мембрани, а інші два – біля жорсткого центру мембрани на діаметрі, який ортогональний діаметру встановлення перших двох решіток Брегга, при чому всі чотири вимірюють відносну радіальну деформацію.

Схему комірки для автоматичного вимірювання, її конструкцію і принцип дії наведено на рис. 2.24.

На рис. 2.24 представлено: 1 – осердя статора, 2 – верхнє натискне кільце пресу, 3 – диск нижнього натискного кільця, 4 – стакан, 5 – недеформована свинцева проба, 5.1 – деформована свинцева проба, 6 – втулка, 7 – мембрана з жорстким центром, 8 – оптичне волокно. Висота втулки 6 обрана таким чином, що відстань між верхньою поверхнею втулки 6 і верхньою поверхнею диска 3 приблизно рівна товщині проби 5, і ця відстань є однаковою для всіх N стаканів і втулок. Мембрана 7 розміщена у верхній частині дна стакана 4. На мембрані 7 між жорстким центром та місцем защемлення розміщено оптоволокну 8 з двома ВБР [60–62]. Одна з решіток жорстко закріплена на мембрані в напрямку тангенціальної деформації мембрани і є сенсором цієї деформації (ВБР_{ДЕФ}). Інша решітка, яка не закріплюється на мембрані, є сенсором температури (ВБР_{ТЕМ}) робочого середовища вимірювального перетворювача.

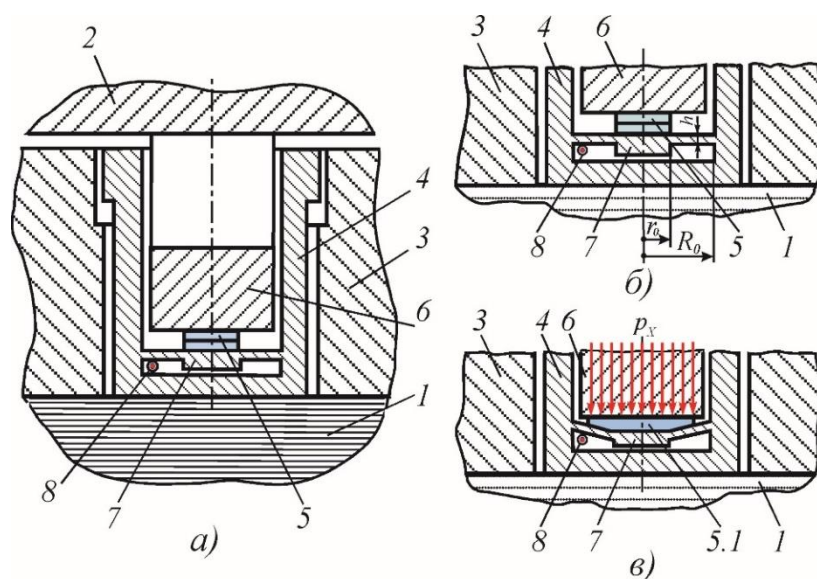


Рис. 2.24 Конструктивна схема вимірювальної комірки,
з решітками Брегга

Результати вимірювання ВБР_{ТЕМ} використовують для компенсації похибки вимірювання ВБР_{ДЕФ}, обумовленої впливом температури. Температурна компенсація при вимірюванні деформації необхідна, адже вимірювання часто здійснюються при температурах, які відрізняються від температури в момент закріплення (ВБР_{ДЕФ}) на мембрані.

В початкове положення кілець 2, 3 і елементів комірки показано на рис. 2.24 а і рис. 2.24 б. Під час пресування осердя питомий тиск пресу p_x через втулку 6 діє на свинцеву пробу 5 і на мембрану 7. Проба буде деформована (поз. 5.1), мембрана 7 прогнеться, в ній виникнуть відносні радіальні σ_r і тангенціальні σ_t напруги, і, відповідно, відносні радіальні ε_r і тангенціальні ε_t деформації. Враховуючи те, що мембрана є пластиною, яка симетрична, то в ній по дузі одного радіусу r напруги і відносні деформації будуть однаковими [52, 63].

Як відомо [60–62], що коли вповдовж оптичного волокна, в якому в поперечному перерізі сформовано ВБР, пропустити широкопasmовий потік світла $\Phi_0(\lambda)$ частотою λ (рис. 2.25), то завдяки ВБР частина цього потоку на відповідній частоті λ_{BG} буде відбита – $\Phi(\lambda_{BG})$. Пік відбитого випромінювання [58] реєструється в інтеррогаторі, а оброблення та відображення виміряної інформації – в ПК (рис. 2.26).

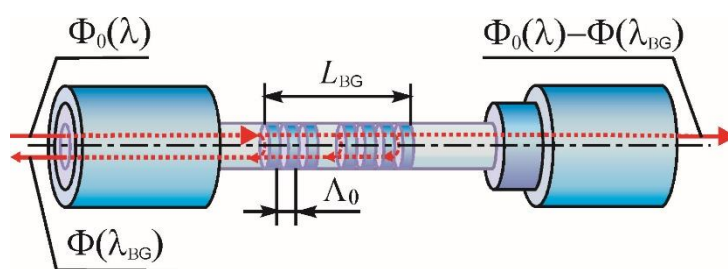


Рис. 2.25 Принцип роботи ВБР

В даному випадку, враховуючи те, що решітка ВБР_{ДЕФ} жорстко закріплена на мембрані в напрямку відносної деформації ε_t , механічна напруга σ_t , що виникає в мембрані, буде прикладена вповдовж оптичного волокна і розтягне його серцевину. Це спричинить зміну періоду решітки з Λ_0 на Λ_1 і довжину решітки на $\Delta_{BG} = L_{BG} \varepsilon_{tr1}$

де ε_{tr1} величина деформації в окремій точці мембрани з радіусом r в області малих переміщень її центру залежать від тиску p_x , механічних характеристик матеріалу мембрани та її геометричних розмірів.

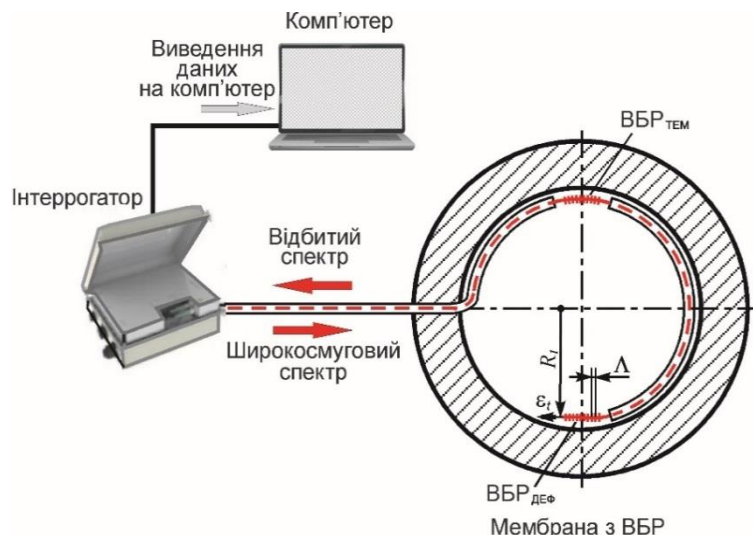


Рис. 2.26 Система контролю із оптоелектронним вимірювальних перетворювачем

В системі обробки (комп'ютер, на рис. 2.26) з використанням спеціального програмного забезпечення обробляються результати вимірювання деформацій мембран в кожній комірці, виконують корегування похибок цих вимірювань, зумовлених впливом температури, і визначають величини і місця дефектів зниження монолітності осердя.

Для визначення значення спектральної складової вихідного сигналу з фотоперетворювача, в якості якого найчастіше застосовують ПЗС-лінійок, використовується багато методів [64]. Більшість із методів має свої недоліки, які пов'язані насамперед із складністю реалізації оптичної частини особливо для систем, які безпосередньо задіяні в технологічних режимах із наявністю ударних чи вібраційних навантажень. Тому авторами в роботі [65] було розроблено метод обробки сигналу із фотоприймача ПЗС-лінійок, який базується на обчисленні «центру мас» [66]. Відповідно до цього методу сигнал з фотоприймача ПЗС-лінійок представляється у вигляді вектора значень, де номер елемента – це піксельні координати ПЗС-лінійок, а значення елементів визначаються усередненою

освітленістю по площі пікселя. Щоб визначити максимальні координати піку вибраної області піку, припустимо, що максимальна координата збігається з координатою «центру мас» фігури (рис.2.27), утвореної стовпцями заданої гістограми, і визначається як [66]

$$x_m = \frac{\sum_i x_i u_i}{\sum_i u_i} \quad (2.11)$$

де x_i – координата, що відповідає номеру i -го стовпця та стовпчастої діаграми, $i = 0 \dots n$, n – кількість стовпців гістограма (пікселі).

Визначення координати піку спектру за виразом (2.11) має недолік - досить високу чутливість до перешкод у вхідному сигналі, що обумовлено підвищеною чутливістю методу до шуму, що виникає на вході ПЗС-лінійок.

Метод, запропонований та досліджений у [67–70], усуває зазначений вище недолік. Він передбачає використання статистичних характеристик закону розподілу світла між пікселями.

У цьому випадку розрахунок «центру мас» піку можливий як функція розподілу диференціального світла. Центри симетрії кривих $A(f)$ визначають за допомогою критерію рівності квадратів площі S_L лівої і S_R правої половини фігури, обмеженої кривою $A(f)$ і координатами $0 \div i$ ділянки на горизонтальній осі і розділених лінією, що представляє спектральні складові з координатами $i/2$.

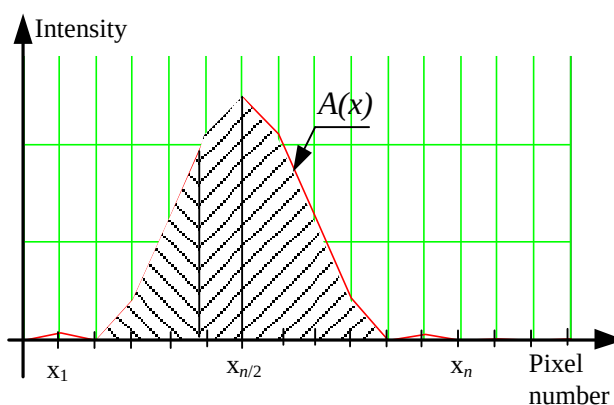


Рис. 2.27 Вихідний сигнал ВБР на виході фотоприймача ПЗС-лінійок

Для визначення «лівих» S_L і «правих» S_R використовують такі співвідношення

$$S_L(x) = \sum_{i=0}^{n/2} A(x_i)(x_i - x_{i-1}) \quad (2.12)$$

$$S_R(x) = \sum_{i=n/2}^n A(x_i)(x_{i+1} - x_i) \quad (2.22)$$

З урахуванням того, що $(x_i - x_{i-1}) = (x_{i+1} - x_i) = \Delta x = \text{const}$, де Δx визначається розміром пікселя, для квадратів площ «лівих» S_L і «правих» S_R , відповідно виразів (1.21) та (1.22) будемо мати

$$S_L(x) = \Delta x^2 \sum_{i=0}^{n/2} A^2(x_i) \quad (2.23)$$

$$S_R(x) = \Delta x^2 \sum_{i=n/2}^n A^2(x_i) \quad (2.24)$$

Використовуючи знайдені значення обчислені за виразами (1.23) і (1.24), знаходимо $\Delta_S = S_R^2(x) - S_L^2(x)$. У випадку коли $\Delta_S \approx 0$, то координати "центру ваги" піку дорівнюють $x_{n/2}$.

У випадку $\Delta_S > 0$, то для пошуку координат центральну умовну лінію розділу зсувають на один піксель в право, тобто $(i+1)/2$. Далі обчислюють Δ_S використовуючи (2.22) та (2.23) із відповідним зсувом. Ітерацію повторюють до тих пір поки не отримують $\Delta_S \approx 0$. У випадку $\Delta_S < 0$, алгоритм аналогічний тільки зсув відбувається в право.

В результаті чисельної оцінки похибки методу проведеної у [67], було встановлено, що похибка оцінки координати x_i при використанні описаної вище методики становить $\delta x = 0,5 \dots 1\%$. без урахування дії завад. З урахуванням дії завади маємо $\delta x \approx 7\%$ за відношення сигнал/завада 30, що є типовим для ПЗС-лінійок.

Методом покращення визначення координат спектральних піків є використання методу найменших квадратів із апроксимуючою гаусовою функцією отриманого сигналу $u(x_i)$ з ПЗС-лінійки перед застосуванням описаного вище

методу визначення координат. У цьому разі для мінімізації похибки знаходження апроксимуючої функції $f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)$ знайдемо значення

$$Q = \sum_{i=1}^N \left(f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m) - u(x_i) \right)^2 \rightarrow \min \quad (2.25)$$

Використовуючи (2.25) знайдемо таке значення $a_1, a_2, \dots, a_m$, при яких Q приймає мінімальне значення.

Для цього розв'яжемо наступну систему рівнянь:

$$\frac{\partial Q}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial Q}{\partial a_2} = 0, \dots, \frac{\partial Q}{\partial a_m} = 0. \quad (2.26)$$

За умови, що система рівнянь (2.26) є лінійною відносно $\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_m$, маємо наступну систему:

$$\begin{cases} a_{11}\delta k_a + a_{12}\delta x_m + a_{13}\delta\sigma = b_1 \\ a_{21}\delta k_a + a_{22}\delta x_m + a_{23}\delta\sigma = b_2 \\ a_{31}\delta k_a + a_{32}\delta x_m + a_{33}\delta\sigma = b_3 \end{cases} \quad (2.27)$$

Коефіцієнти рівнянь (1.26) розраховуються аналогічно випадку розрахунку коефіцієнтів систем рівнянь (2.27). У цьому разі маємо

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sum_{i=1}^N \varphi_i^2, & a_{12} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m}, & a_{13} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, \\ a_{21} &= \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m}, & a_{22} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \right)^2, & a_{23} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, \\ a_{31} &= \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, & a_{32} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma}, & a_{33} &= k_{a0} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} \right)^2, \\ b_1 &= \sum_{i=1}^N u_i \varphi_i - k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i^2 = \sum_{i=1}^N u_i \varphi_i - k_{a0} a_{11} \\ b_2 &= \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} - k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} = \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_m} - k_{a0} a_{21} \\ b_3 &= \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} - k_{a0} \sum_{i=1}^N \varphi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} = \sum_{i=1}^N u_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} - k_{a0} a_{31} \end{aligned} \quad (2.28)$$

де $\varphi(x, x_m, \sigma)$ - функція Гауса, яка визначається нормальним законом розподілу.

У цьому разі якості σ може бути використана величина [66]

$$\sigma = \frac{\Delta w_{1/2}}{2\sqrt{2\ln 2}} \approx 0,425\Delta w_{1/2} \quad (2.29)$$

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

Розрахувавши значення параметрів u_m та σ апроксимуюча функція для отриманого значення брегівського піка визначиться за наступним виразом

$$app(x) = k_a \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_m}{\sigma}\right)^2} \quad (2.30)$$

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

У результаті чисельної оцінки встановлено, що використання (2.30) зменшує похибку координат вимірювань x_i у 2-3 рази при збільшенні кількості ітерацій.

Температурна компенсація значення отриманого в результаті обчислень здійснюється з використання рівняння [64]

$$\Delta\lambda_{Br} = 2n\Delta\left\{\left[1 - \left(\frac{n^2}{2}\right)\right]\left[P_{12} - \nu(P_{11} - P_{12})\right]\varepsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n}\frac{dn}{dT}\right]\Delta T\right\}, \quad (2.31)$$

де ε – подовжня деформація оптичного волокна; ΔT – зміна температури; α – коефіцієнт лінійного розширення кварцового скла; ν – коефіцієнт Пуасона для кварцового скла; P_{11}, P_{12} – коефіцієнти Поккельса пружно-оптичного тензора.

Одною з головних переваг організації систем на основі ВБР сенсорів є можливість мультиплексування, тобто об'єднання сенсорів в масив. При цьому кожна решітка формується в волокні зі своїм унікальним періодом, що дозволяє розрізняти їх по спектру при аналізі. Структурна схема інтеррогатора, який може приймати в одному каналі сигнали від n ВБР, показано на рис. 2.28.

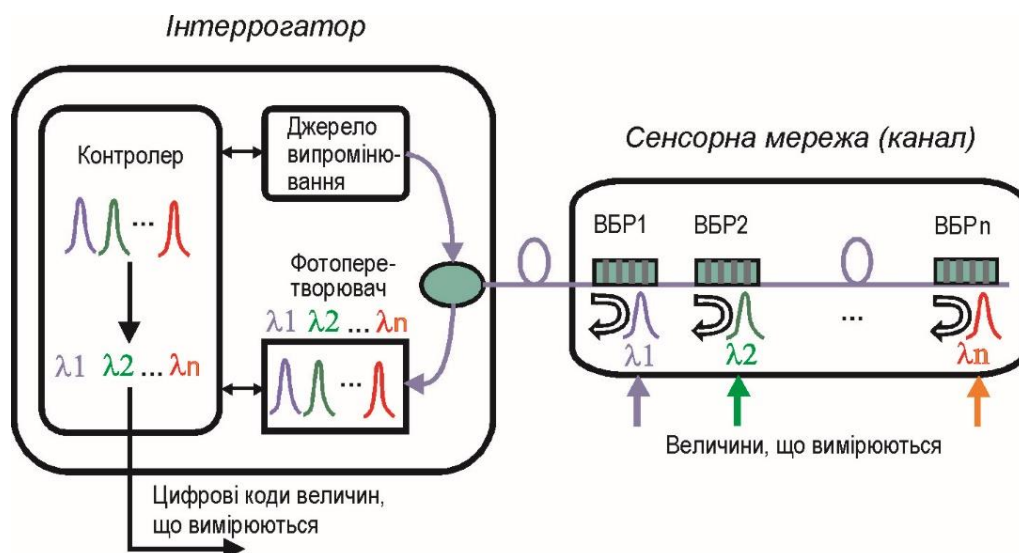


Рис. 2.28 Структурна схема інтеррогатора

З урахуванням того, що в одній вимірювальній комірці використовуються дві ВБР, то структурна схема вимірювання і оброблення сигналів від ВБР в $n/2$ контрольних комірках буде мати вигляд, представлений на рис. 2.29.

На рис. 2.30 наведено експериментальний зразок системи з сенсором Брегга. Система, призначена для вивчення технічних характеристик та потенційних можливостей застосування волоконної решітки Брегга для системи діагностики стану пресування сердечника генератора.

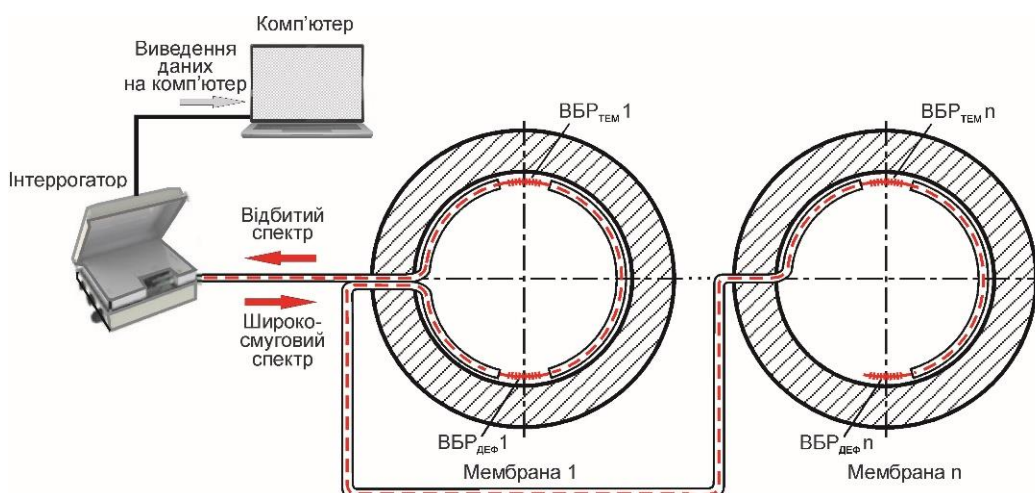


Рис. 2.29 Структурна схема вимірювання і оброблення сигналів від ВБР

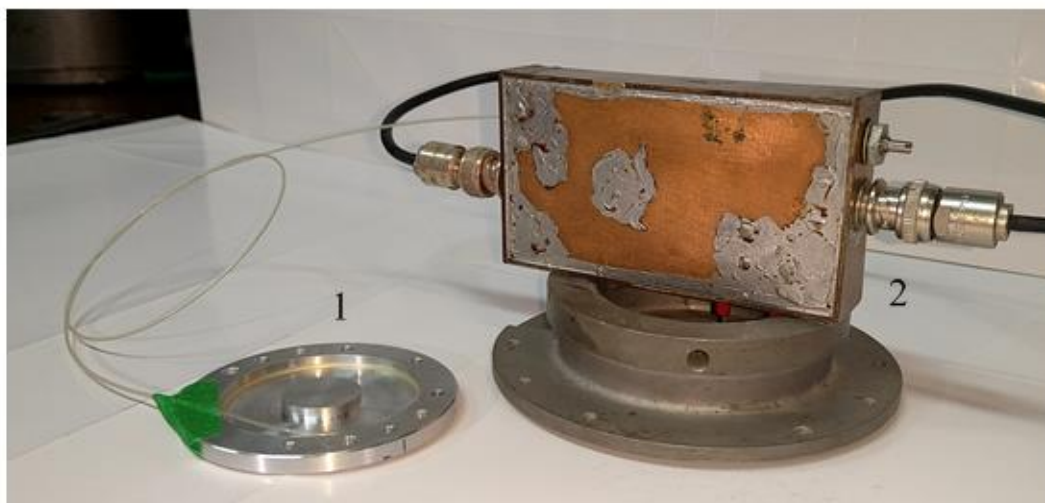


Рис. 2.30 Експериментальний зразок системи з сенсором Брегга

На рис. 2.30 зображено 1 - зразок волоконного сенсора Брегга, встановленого на поверхні мембрани: 2 - система оптичного вимірювання.

Перевагою використання решіток Брегга в системі контролю та діагностування пресування осердя статора ТГ є можливість використання одного оптичного каналу для вимірювання всіх точок та забезпечення повної гальванічної розв'язки з об'єктом контролю та діагностування. При цьому швидкість розповсюдження світла $\approx 300\,000$ м/с дозволяє отримати картину нерівномірності пресування осердя статора ТГ майже миттєво. Запропонований метод має найбільшу швидкодію, та дозволяє покращити якість складання осердя та забезпечити збільшення надійності машини при її експлуатації.

На метод подано заявку на патенти України на винахід [49].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Розроблено метод, що забезпечує контроль монолітності осердя статора потужного турбогенератора в N точках поперечного перерізу під час його пресування шляхом автоматизованого вимірювання тиску в кожній точці, що дозволило підвищити достовірність визначення місцезнаходження дефектів осердя, які зумовлені недоліками технології виготовлення

2. Розроблено засоби задля забезпечення вимірювання тиску пресування, що дозволило підвищити достовірність контролю монолітності осердя статора під час його пресування на основі використання оптичних, тензометричних, ємнісних сенсорів вимірювальних перетворювачів та силосприймаючого елемента у вигляді плоскої мембрани з жорстким центром.

3. Використовуючи аналітичні методи розрахунку отримані функції перетворення зусилля пресування в мікропереміщення силосприймаючого елемента "вимірювальної комірки", що дозволило визначити основні технічні характеристики первинних чутливих елементів вимірювальних комірок.

4. Визначені функції перетворення оптичних, тензометричних, ємнісних сенсорів вимірювальних перетворювачів.

Посилання: [47-67], див. список використаних джерел стор. 184 – 186.

РОЗДІЛ 3

СТРУКТУРА, АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ МОНОЛІТНОСТІ ОСЕРДЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

В попередньому розділі були розроблені нові методи автоматизації контролю технологічного процесу пресування осердя статора потужного турбогенератора та засоби, що їх реалізують. Розроблені засоби на основі різних типів первинних вимірювальних перетворювачів мають свої переваги та недоліки, враховуючи особливості технологічного процесу пресування, необхідності забезпечення незмінності конструкції вже існуючого обладнання, що застосовується під час пресування осердя статора, а також значний досвід відділу електричних та магнітних вимірювань Інституту електродинаміки НАН України в якості найбільш раціонального методу визначення щільності пресування осердя статора є метод контролю із ємнісним перетворювачем тиску.

Забезпечення високої надійності та якості роботи систем контролю із ємнісним перетворювачем тиску полягає в вирішенні задачі з розробки ефективних алгоритмів функціонування програмно-математичного забезпечення та апаратних засобів, призначених для отримання, перетворення та обробки інформації з метою ідентифікації.

3.1 Вимоги до засобів контролю стану спресованості осердя статора турбогенератора

Аналіз існуючих напрямків підвищення якості виготовлення осердя статора ТГ, а також визначені вимоги до характеристик засобів контролю стану спресованості осердя статора ТГ під час його складання і пресування обумовлює необхідність створення сучасних, оптимальних за структурою, завадостійкістю та точністю засобів автоматизації контролю, призначених для отримання актуальної вимірювальної інформації та автоматизації ідентифікації типу дефекту

виготовлення осердя статора, визначення місць з недостатньою щільністю пресування або місць з прикладеним зусиллям пресування вище норми, що дозволить визначити розмір, об'єм та місце встановлення ущільнюючого матеріалу для усунення дефекту, що в результаті дозволить підвищити надійність та строк експлуатації ТГ.

Тому, розробка оптимальних за структурою, завадостійкістю та точністю систем контролю реалізується із додержання принципів, визначених в РД 50–80–88 «АС Основні положення» (системності, розвитку (відкритості), сумісності, стандартизації (уніфікації) та ефективності), а також з врахуванням принципу раціональної організації виробничого процесу. Це надасть можливість покращити метрологічні характеристики інформаційно-вимірювальних каналів та дозволить забезпечити підвищення достовірності оцінювання не тільки щільності пресування окремого пакету осердя статора ТГ, а і створення картини розподілення щільності по всьому об'єму осердя, яка в майбутньому може бути використана під час проведення планових обстежень та визначенні фактичного технічного стану осердя статора.

Враховуючи особливості існуючої технології контролю щільності пресування осердя статора під час виготовлення, інформаційно-вимірювальні засоби системи неперервного контролю мають бути побудовані на основі мережі вимірювальних комірок у кількості достатній, щоб забезпечити можливість реалізації нового метода описаного в розділі 2. У цьому разі систему контролю є доцільним розбити на 3 зони: зі сторони нижнього натискного кільця системи пресування – 45 вимірювальних комірок, які умовно розташовуються в зоні 1 та у зоні 2 зі сторони зонтчного пресу – 45 вимірювальних комірок у спеціально створеному проставочному кільці. В зоні 3 віднесеної на безпечну відстань від робочого середовища системи пресування осердя статора. Під безпечною зоною розуміється безпечна відстань, на якій мінімізований можливий вплив робочого середовища, що можуть виникнути в ізолюваній зоні під час збирання та пресування осердя статора ТГ за допомогою більш ніж 700т. гідравлічного пресу.

При побудові кожного вимірювального каналу вимірювальної комірки використовуються окремі вимірювальні канали, що складаються із первинного та вторинного вимірювального перетворювача. У цьому разі доцільним є об'єднання вимірювальних комірок у єдину мережу. Об'єднання здійснюється за допомогою цифрового інтерфейсу, що утворює локальну розподілену мережу. Розподілені мережі, у свою чергу, у відповідності до стандарту IEEE-802, за структурою розділяють на комутовані (IEEE-802.3), із маркерним кільцем (IEEE-802.5) та з маркерною шиною (IEEE-802.4).

Кожна із перерахованих структур організації мережі має свої переваги та недоліки, які детально описані в [68-70].

Для *комутованих мереж* головною перевагою є робота на значних відстанях між вимірювальними комірками, а основним недоліком – низька швидкодія опитування, що обумовлена кількістю вимірювачів ($K_1 \dots K_m$) та пропускнуою спроможністю каналу.

Для *мереж із маркерним кільцем* швидкодія та можливість одночасного опитування багатьох *вимірювачів* є перевагою в порівнянні з попередньою топологією. Проте менша щільність вимірювальних каналів та складність реалізації роботи значної кількості вимірювачів є їх суттєвим недоліком.

Перевагою *мереж із маркерною шиною*, у порівнянні з комутованими, є можливість збільшення як кількості вимірювачів без значних втрат у швидкодії, так і пропускнуої спроможності передачі інформаційних даних.

Враховуючи переваги та недоліки кожної із структур за стандартом IEEE-802 для побудови економічної автоматизованої системи контролю та легкого її масштабування, доцільним є використання комутованої мережі та з маркерною шиною. У цьому разі кожна вимірювальна комірка, включена у мережу, має свій унікальний номер (маркер), підключений для забезпечення економічності побудови до цифрового комутатора, який виконує функції попередньої обробки цифрових сигналів, та передачі їх до системи контролю розташованої в зоні 3, тобто формування пакетів даних із доповненням їх інформацією, необхідною системі технічної діагностики, опитуванням вимірювальних комірок та отриманням від

них вимірювальної інформації, а також передачі сигналів управління від системи контролю розташованої в зоні 3 до кожної вимірювальної комірки.

Забезпечення принципів, визначених в РД 50–680–88 забезпечувалось також створенням блок-схема автоматизованої системи контролю якості щільності осердя статора потужного турбогенератора при його виготовленні, яка має модульну архітектуру. Використання модульної архітектури побудови дозволяє вносити зміни до структури системи при необхідності, що дозволяє адаптувати функціонування системи в різних середовищах зв'язку. Зокрема використання стандартних промислових модулів перетворювачів інтерфейсів, дозволяє реалізувати автоматизовану систему на основі:

- а) он-лайн обробки даних із застосуванням:
 - волоконно-оптичних або дротових лінії з використанням промислового протоколу передачі даних та перетворювачем інтерфейсів;
 - бездротових ліній зв'язку WLAN .
- б) офф-лайн обробки даних із застосуванням запам'ятовуючих пристроїв

3.2 Етапи перетворення інформації в системах контролю стану спресованості осердя статора турбогенератора

Інформація від первинних, вторинних вимірювальних перетворювачів та програмно-математичних засобів отримання контрольно-діагностичної інформації системи контролю на основі, якої приймається рішення про наявність дефекту пресування пакету осердя статора та визначаються оптимальні шляхи його усунення відбувається в декілька етапів. Кожному етапу притаманні специфічні операції над отриманою інформацією, висуваються свої вимоги при проектуванні, а також використовуються різні критерії ефективності хоча і в більшості випадків вони є корельовані між собою [71].

На початковому етапі відбуваються операції над сигналами, які надходять від первинних перетворювачів вимірювальної інформації, які є невід'ємною складовою будь-якого інформаційно-вимірювального каналу. Отримана інформація від

первинних перетворювачів в результаті обробки вторинними вимірювальними перетворювачами трансформується в кількісні інформаційні сигнали (дані). Інформація на даному етапі як правило, представлена як результат вимірювання випадкових величин і процесів, над якими можуть відбуватися операції аналого-цифрового перетворення, кодування з подальшою передачею по каналу зв'язку або записом в пристрої, що запам'ятовують та тощо. Важливим є те, що інформація при цьому не змінює характеру - це вимірювальні дані або результати обчислювальних операцій над даними.

На наступному етапі дані перетворюються в найпростіші логічні висловлювання в результаті таких логічних операцій, як формування ознак за результатами вимірювань, їх класифікація, пошук відповідностей в базах знань та тощо. Вихідна інформація на цьому рівні виражається словами та/або закономірностями які і є вихідною інформацією для останнього етапу використання вимірювальної інформації, яка функціонально є блоком прийняття рішення, який трансформує вхідну інформацію в семантично наповнені висловлювання типу команд, діагнозів, управлінь, рекомендацій.

Критерії, за якими оцінюється ефективність операцій на різних ступенях, також різні. На початковому етапі - це точність і повнота оцінки джерел інформації, завадостійкість каналів зв'язку і засобів обробки інформації. Критерії на цьому етапі задовольняються шляхом поліпшення технічних характеристик функціональних ланок і поліпшення умов їх спільної роботи - узгодженням їх параметрів,

Ефективність на середньому та останньому ступені ієрархії оцінювати складніше. В якості критеріїв виступають такі поняття, як ймовірність правильного прийняття рішення, вірність розпізнавання та тощо. Визначальним на даних етапах є не стільки досконалість (надійність) апаратури, а ефективністю алгоритмів обробки та якість отриманої на першому етапі інформації.

Враховуючи вище зазначене, були розроблено різні типи структур для побудови автоматизованої багатоканальної системи контролю торцевої поверхні осердя статора ТГ під час його збирання та пресування.

3.3 Структура системи неперервного контролю щільності пресування осердя статора ТГ із он-лайн обробкою даних

На рис. 3.1 наведена структурна блок-схема кальної системи контролю торцевої поверхні осердя статора ТГ під час його збирання із он-лайн системою обробки даних.

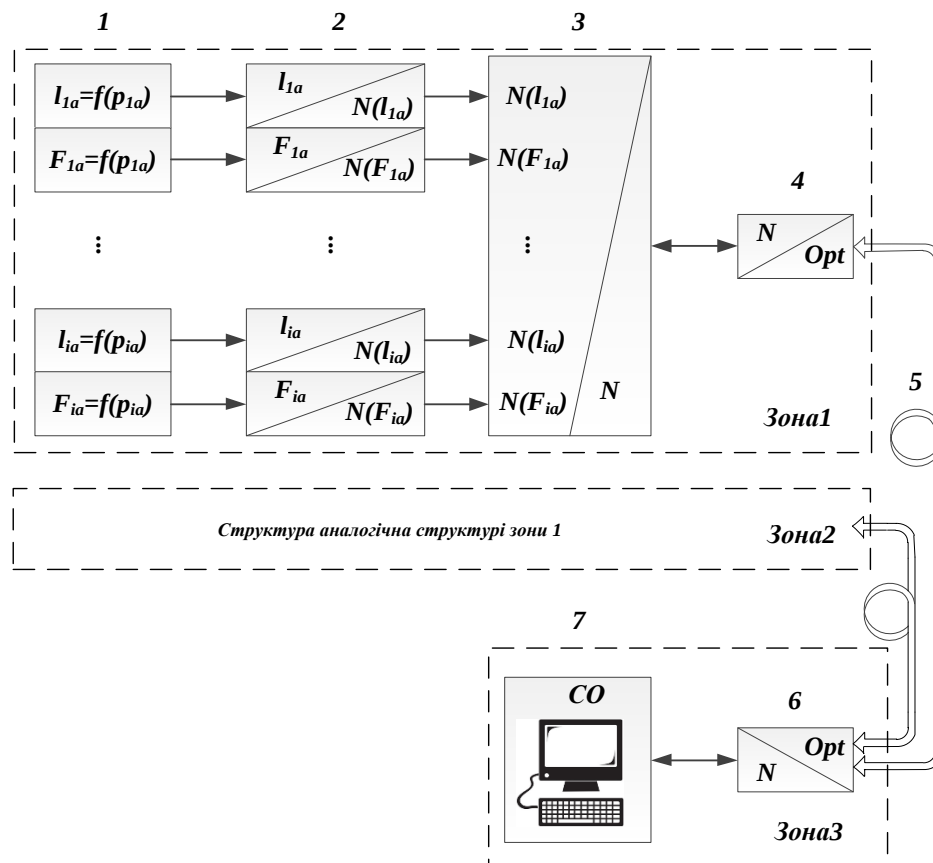


Рис. 3.1 Структура автоматизованої кальної системи контролю стану спресованості осердя статора ТГ з он-лайн обробкою даних

На рис.3.1 введені наступні позначення: 1 – сенсори і-го чутливого елементу; $l_{ia} = f(p_{ia})$ – залежність лінійного переміщення в і-му елементі від тиску; $F_{ia} = f(p_{ia})$ – залежність сили в і-му елементі від тиску; 2 – перетворювачі переміщення код та сила-код; 3 – мультиплексор/комутатор; 4 – перетворювач код-світло; 5 – оптоволоконна лінія передачі даних; 6 – перетворювач світло-код; 7 – станція оператора (система керування та обробки результатів вимірювання).

Особливістю системи є використання волоконно-оптичних ліній, в якості ліній зв'язку. Принципи функціонування оптоелектронних систем діагностування параметрів механічних дефектів ТГ полягає у використанні волоконно-оптичних ліній для передачі інформаційних сигналів в цифровому виді з високою швидкістю, або, за потреби – в аналоговому вигляді. У цьому разі модульований по току або напрузі вихідний сигнал від традиційних сенсорів перетворюється в цифровий оптичний сигнал, який потім передається з області вимірювання (Небезпечна зона, рис. 3.2) через волоконно-оптичний кабель (ВОК) в область обробки (Безпечна зона, рис. 3.2) для подальшої вторинної обробки системою технічної діагностики.

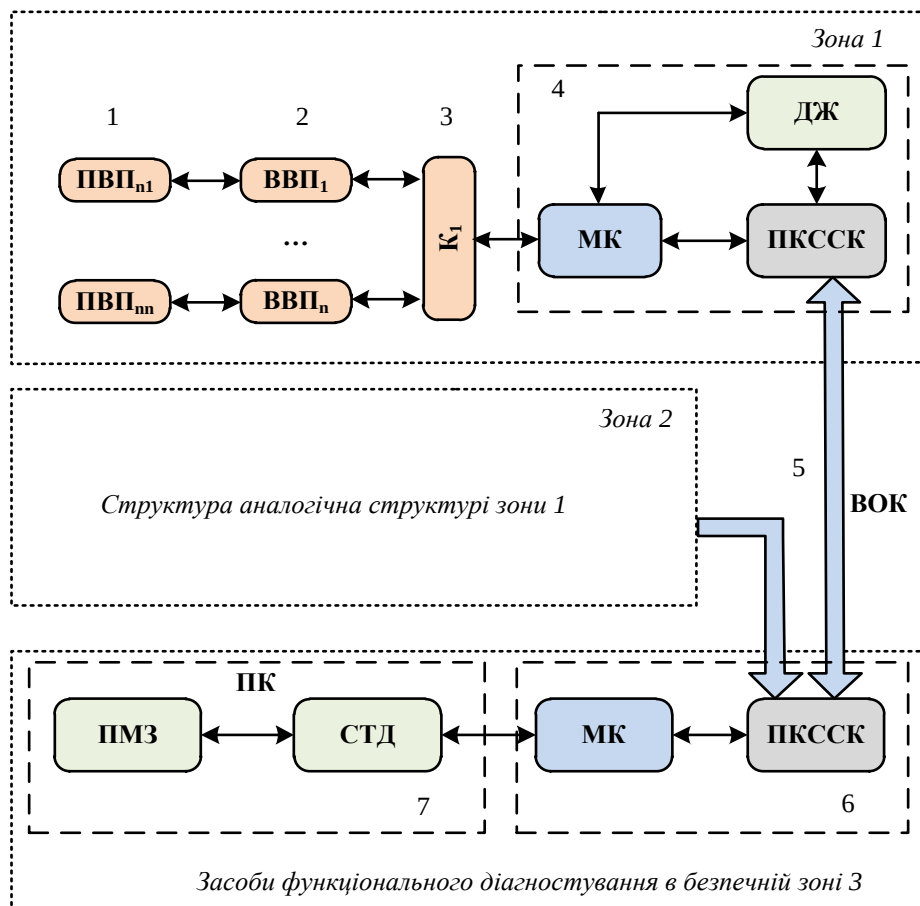


Рис.3.2 Структурна блок-схема кабельної системи з волоконно-оптичними лініями зв'язку

Отриманий таким чином цифровий електричний сигнал перетворюється за допомогою перетворювача код-світло/світло-код (ПКССК) у відповідний цифровий оптичний сигнал. Далі цифровий оптичний сигнал передається по

волоконно-оптичному кабелю до засобів обробки ІВС технічної діагностики потужних ТГ або ГГ.

Така побудова вимірювальної системи дозволяє поєднати в собі переваги волоконно-оптичних засобів та мікроелектронних технологій, що дозволяє надати системам контролю якісно нових властивостей, пов'язаних насамперед високим рівнем гальванічної розв'язки та ізоляції, використанням традиційних чутливих елементів, що є стандартизованими або легко піддаються атестації, а також використання волоконно-оптичних компонентів для передачі інформаційних сигналів та за потребою живлення до вимірювальних комірок дозволяє уникнути труднощів, пов'язаних із компенсацією дії вібраційних прискорень в широкому діапазоні частот та віброударів.

Система технічної діагностики (СТД), розташована у безпечній зоні та працює наступним чином. Далі отриманий цифровий оптичний сигнал через ПКССК (з використанням фотоприймача) перетворюється в електричний сигнал з подальшим підсиленням до необхідного логічного рівня цифрових сигналів для модулю керування роботою системи технічної діагностики (МКСТД). Далі цифровий код поступає в систему обробки інформаційних даних ПМЗ. У випадку передачі сигналів з МКСТД до кожної вимірювальної комірки механічних параметрів система працює аналогічно. При цьому для уникнення зовнішніх впливів (електромагнітні поля, температура тощо), що мають місце в ізольованій зоні під час роботи енергетичного обладнання, засоби обробки інформаційних сигналів з первинних перетворювачів віднесені на безпечну відстань. Така побудова вимірювальної системи дозволяє поєднати в собі переваги волоконно-оптичних та мікроелектронних технологій. У цьому разі основним елементом СКД ТГ, який визначає її метрологічні характеристики, є вимірювальні комірки, які призначені для виконання функцій вимірювання, попередньої обробки інформації та передачі даних по запиту або в неперервному режимі до модуль керування (МК) роботою комунікаційна підсистема.

На рис. 3.3 показана узагальнена структура окремої вимірювальної комірки, що є по суті інформаційно-вимірювальним каналом системи діагностування,

запропонований автором в роботах [72, 73–76], і призначений для вимірювання параметрів ПМД.

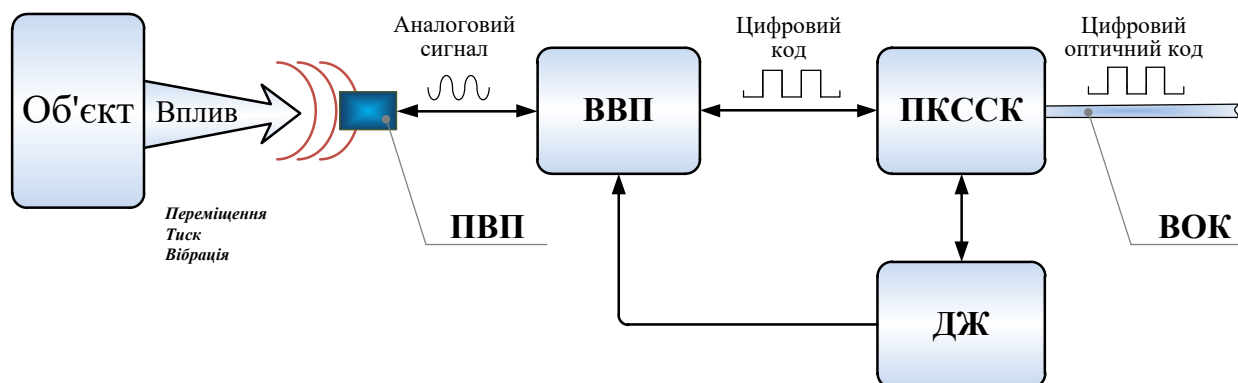


Рис. 3.3 Узагальнена структура окремої вимірювальної комірки

Структура на рис. 3.3 містить чутливий елемент, як первинний вимірювальний перетворювач (ПВП), мікроконтролерний вторинний вимірювальний перетворювач (ВВП) фізичної величини у цифровий код із відповідним програмно-математичним забезпеченням, оптичний інтерфейс з перетворювачем світло-код/код-світло (ПКССК) та джерело живлення (ДЖ).

Вимірювальна комірка параметрів працює наступним чином: ПВП (чутливий елемент) – перетворює контрольований параметр в значення електричної величини (напруга або струм). Далі електрична величина перетворюється у відповідний цифровий код за допомогою ВВП. ВВП у своєму складі містить перетворювач величина-код, мікроконтролер та відповідне програмно-математичне забезпечення, призначене для управління роботою перетворювача ємність-код та взаємодії із підсистемою МК.

Далі комунікаційна підсистема МК забезпечує збір вимірювальної інформації (у формі цифрового коду), використовуючи ($K_1...K_m$) для вибору відповідної групи ВВП, та його перетворення у відповідний цифровий пакет (фрейм) у форматі передачі даних у форматі протоколу Modbus або за потреби у аналогічному форматі, наприклад NRZ (NRZ "Non-Return to Zero").

Крім перерахованих блоків до складу вимірювальної комірки входить джерело живлення (ДЖ) та оптичний інтерфейс (ОІ). ОІ, у свою чергу, містить у своїй структурі перетворювач код-світло та світло-код (ПК ССК), що є частиною комунікаційної системи ІВС із вимірювальною коміркою.

За умови використання в якості перинних чутливих елементів оптоволоконних сенсорів, маємо другий тип системи - оптоволоконну систему діагностування механічних параметрів ТГ. Ця система на відміну від гібридної в якості ПВП та ВВП використовує відповідно волоконно-оптичний сенсор та оптико-електронну систему. Загальна функціональна схема оптоволоконну систему діагностування ТГ є аналогічною гібридній системі діагностування, наведеній на рис. 3.3. Метод опрацювання сигналів оптоволоконних систем діагностування ТГ розглянуто в [77-80].

У разі неможливості застосування волоконно-оптичних ліній для реалізації системи за структурою наведеною на рис. 3.3 їх можливо замінити на дотові лінії. При цьому використання дотової лінії у складі систем контролю не змінює загальну структуру системи та має аналогічний вигляд, як і у випадку використання волоконно-оптичних ліній.

Недоліком такої системи є необхідність застосування фізичних ліній передачі даних, які можуть бути пошкоджені під час збирання пакету осердя статора або його пресування.

3.4 Структура системи неперервного контролю щільності пресування осердя статора ТГ офф-лайн обробкою даних

Для усунення недоліку попередньої схеми розглянуто можливість побудови схеми автоматизованої системи контролю із забезпеченням повної дистанційності вимірювання контрольно-діагностичних параметрів. Розроблена блок-схема система контролю стану спресованості осердя статора ТГ офф-лайн обробкою даних, яка наведена на рис. 3.4.

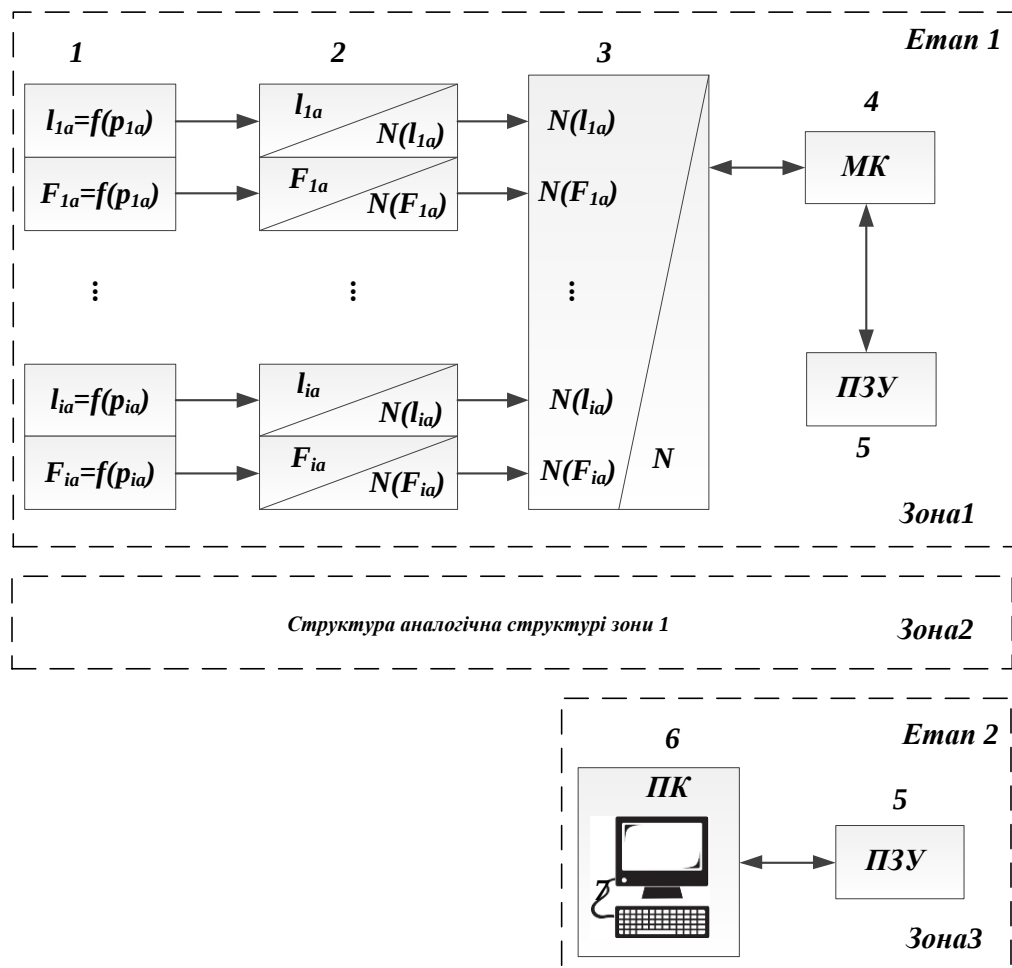


Рис. 3.4 Структура автоматизованої системи контролю стану спресованості осердя статора ТГ з офф-лайн обробкою даних

На рис. 3.4 введені наступні позначення: 1 – сенсори і-го чутливого елементу: $l_{ia}=f(p_{ia})$ – залежність лінійного переміщення в і-му елементі від тиску; $F_{ia}=f(p_{ia})$ – залежність сили в і-му елементі від тиску; 2 – перетворювачі переміщення код та сила-код; 3 – мультиплексор/комутатор; 4 – МК – мікроконтроллер підсистеми керування збором та накопичення даних; 5 – ПЗУ – постійний запам'ятовуючий пристрій; 6 – обробки результатів вимірювання.

Особливістю системи є її робота у два етапи. На першому етапі відбувається збирання та накопичення даних про ступінь відхилення площинності торцевої поверхні статора під час його пресування. Для збирання даних від первинних вимірювальних вимірювачів (поз. 1 та 2 на рис. 3.4) за допомогою цифрового вторинного вимірювального вимірювача (поз. 3 та 4 на рис. 3.4) та їх зберігання для подальшої обробки використовується ПЗУ (поз. 5 на рис. 3.4). В якості ПЗУ

може бути використано - флеш пам'ять. На другому етапі відбувається офф-лайн обробка даних результатів вимірювання в програмно-апаратних засобах обробки даних системи контролю (поз. 6 на рис. 3.4) отриманих з ПЗУ (поз. 5 на рис. 3.4).

У даному випадку, аналогічно раніше розглянутій блок-схемі на рис.3.1, мережа вимірювальних комірок та засоби обробки, які входять до системи контролю також знаходяться в різних зонах.

Перевагою системи є відсутність ліній зв'язку між зоною 3 та зонами 1 й 2 за рахунок використання постійного запам'ятовуючого пристрою.

Недоліком системи є неможливість забезпечення оперативного контролю проходження технологічного процесу пресування осердя статора, вимагає проведення додаткових операцій для отримання контрольно-діагностичної інформації.

3.5 Структура системи неперервного контролю щільності пресування осердя статора ТГ бездротовою передачею даних

Усунення недоліку попередньої структурної схеми можливе за рахунок використання засобів безпроводного зв'язку. На рис. 3.5 наведено схему автоматизованої багатоканальної системи контролю торцевої поверхні осердя статора ТГ при його збиранні із он-лайн системою обробки даних та безпроводного зв'язку для організації передачі даних.

На рис. 3.5 введені наступні позначення: 1 – сенсори i -го чутливого елементу: $l_{ia}=f(p_{ia})$ – залежність лінійного переміщення в i -му елементі від тиску; $F_{ia}=f(p_{ia})$ – залежність сили в i -му елементі від тиску; 2 – перетворювачі переміщення код та сила-код; 3 – мультиплексор/комутатор; 4 – МК – мікроконтроллер підсистеми керування збором та накопичення даних; 5 – бездротовий передавач/приймач; 6 – система керування та обробки результатів вимірювання.

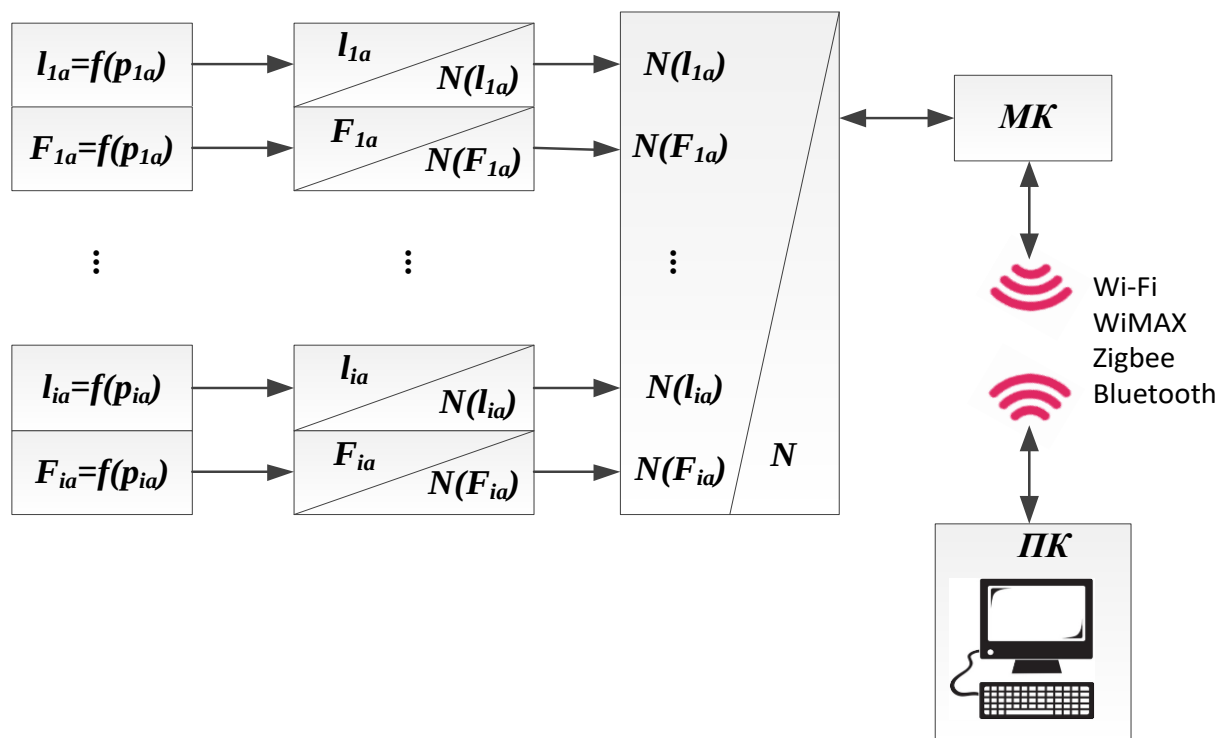


Рис. 3.5 Структура автоматизованої системи контролю стану спресованості осердя статора ТГ з бездротовою передачею даних

Функціонування системи є аналогічним системі представлений в розділі 3.3. Особливістю даної схеми є можливість розміщення засобів обробки на відстані від об'єкту діагностування. В разі необхідності забезпечення просторового рознесення засобів розташованих в зоні 1 та 2 від засобів розміщених в зоні 3, тобто розташуванням засобів обробки на значній відстані від об'єкту діагностування блок-схема наведена на рис. 3.5 видозмінюється додаванням репітеру (ретранслятору). Відповідна блок-схема автоматизованої багатоканальної системи контролю торцевої поверхні осердя статора ТГ при його збиранні із он-лайн системою обробки даних та безпроводного зв'язку для організації передачі даних наведена на рис. 3.6.

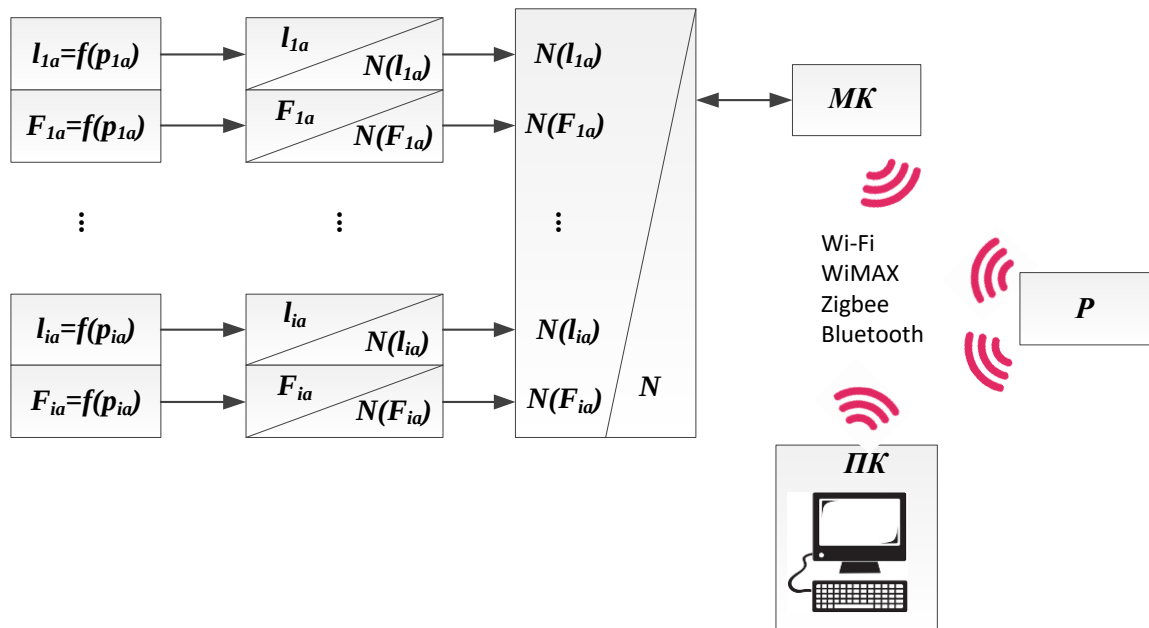


Рис. 3.6 Структура автоматизованої системи контролю стану спресованості осердя статора ТГ з бездротовою передачею даних

3.6 Структура програмного забезпечення засобів контролю

Розроблена структура автоматизованої багатоканальної системи контролю стану спресованості осердя турбогенератора передбачає застосування комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних компонентів для отримання та попередньої обробки сигналів для ідентифікації дефектів спресованості осердя статора під час його виготовлення. Функціонування системи забезпечується програмною частиною, а саме – закладеним в ній алгоритмом роботи. Схема алгоритму взаємодії основних елементів програмного забезпечення системи приведена на рис. 3.7.

В цілому програмне забезпечення забезпечує: функціонування вимірювальних комірок, перетворення "питомий тиск – електрична ємність" та обмін інформацією із системою обробки та відображення даних на основі протоколу Modbus.

Програмне забезпечення реалізується за допомогою послідовного виклику функцій або підпрограм: початкова ініціалізація, запуску процедури збирання даних, отримання та зберігання даних та завершення роботи. Така організація дозволяє забезпечити стабільний зв'язок та взаємодію обміну між вимірювальними

комірками та основним блоком збирання, обробки та відображення інформації в системі контролю щільності пресування осердя статора турбогенератора під час його пресування.

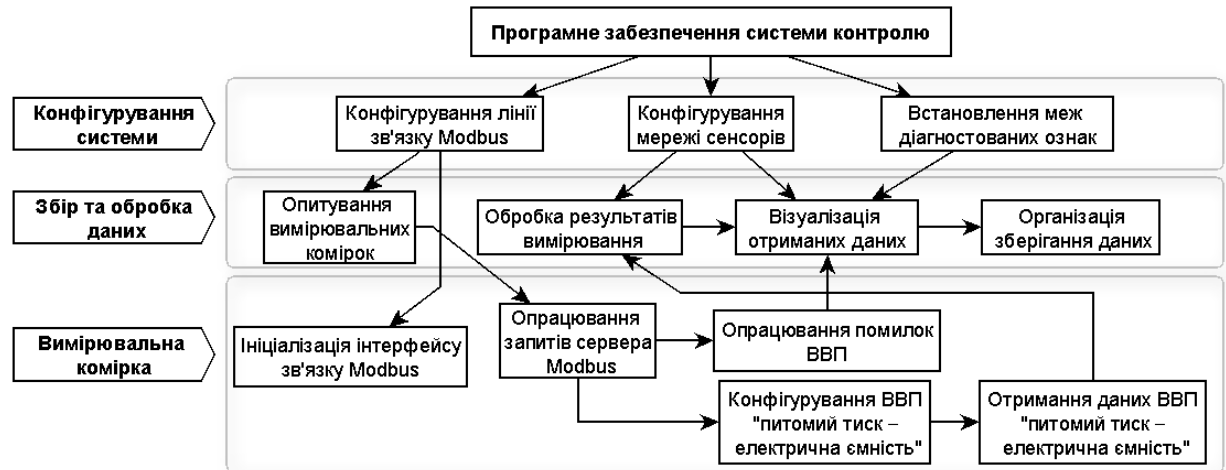


Рис. 3.7 Схема взаємодії основних елементів програмного забезпечення системи контролю монолітності осердя статора потужного генератора

Система містить програмно-математичні засоби, які є одними з основних компонентів системи, що використовується для:

- реалізації функції взаємодії з первинними та вторинними вимірювальними перетворювачами вимірювальної комірки;
- реалізації керування інформаційними потоками в середині системи;
- реалізацію алгоритмів отримання та обробки інформаційних сигналів;
- отримання контрольно-діагностичних параметрів для ідентифікації типу дефекту пресування та вироблення рекомендацій з його усунення;
- формування інтерфейсу користувача;
- збереження отриманої інформації та вихідних результатів, тощо.

Враховуючи вище зазначене, була розроблена узагальнена структура програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) автоматизованої багатоканальної системи контролю, яка приведена на рис. 3.7 [75, 58, 80-81].

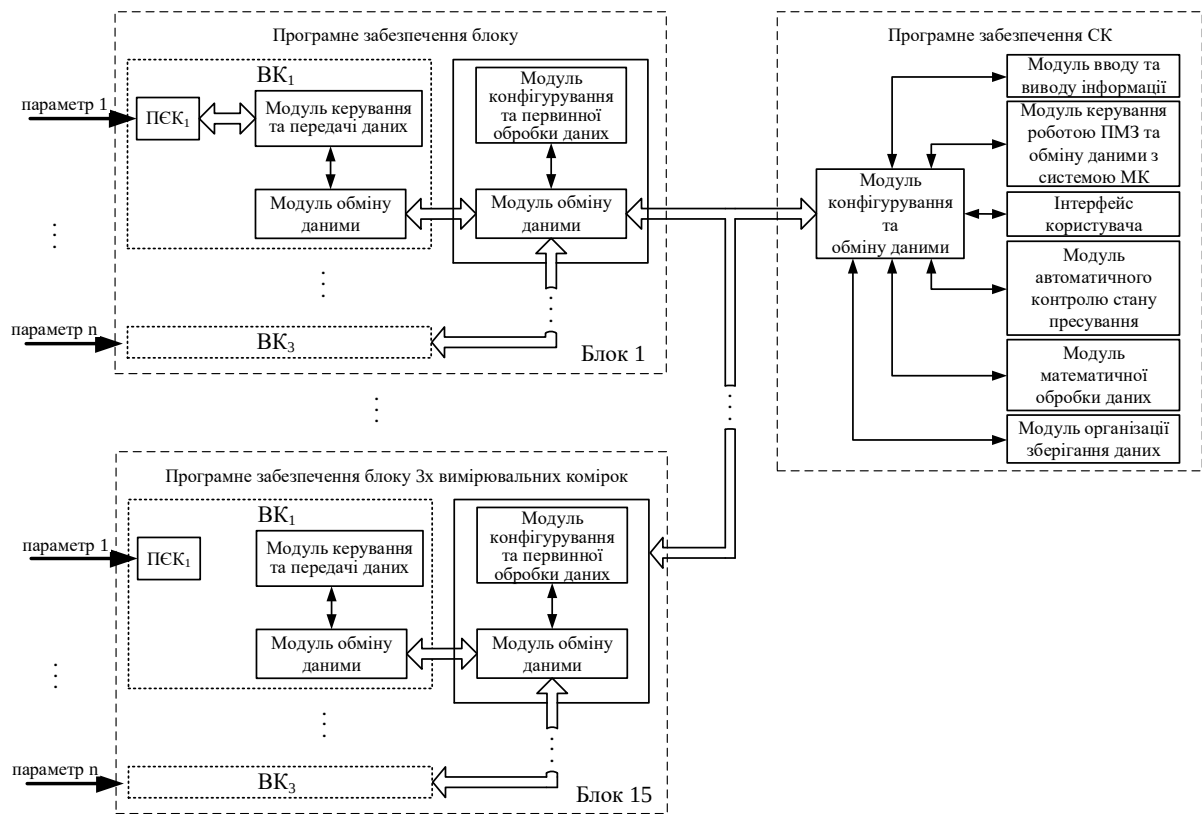


Рис. 3.8 Узагальнена структура програмно-математичного забезпечення

Структура ПМЗ для забезпечення особливостей технологічного процесу контролю щільності пресування осердя статора під час його виготовлення складається з двох частин: програмного забезпечення (ПЗ) блоку вимірювання (первинний модуль збору та обробки даних для трьох вимірювальних комірок) і ПЗ СК (вторинний модуль збору, обробки та аналізу даних системи контролю).

У свою чергу, первинний модуль збору та обробки даних складається з наступних частин: модуля ПЗ перетворювача ємність-код (ПЄК) і керування його роботою, модуля конфігурації системи МК, модуля первинної обробки сигналу та модулю обміну даними між апаратно-програмними засобами системи МК та СК системи контролю. Модуль керування роботою ПЄК забезпечує роботу перетворювача ємність-код "AD7747" відповідно до алгоритму функціонування та здійснює зчитування цифрових даних з ПЄК за алгоритмом, що приведений в наступних підрозділах даного розділу. Модуль керування є спільним для кожної вимірювальної комірки (ВК). Модуль обміну даними призначений для забезпечення організації обміну даними між апаратно-програмними засобами системи кожного блоку та СК.

Модуль первинної обробки сигналу призначений для формування єдиного масиву даних з отриманих від ВК даних з метою створення такого масиву, який є необхідним і достатнім для подальшого вирішення завдань обробки і аналізу стану пресування пакету осердя статора. Модуль конфігурації забезпечує зв'язок ВК з СК для отримання сигналів керування за допомогою інтерфейсу зв'язку (конвертора USB-UART). ПЗ СК складається з наступних основних частин: модуля вводу та виводу інформації, інтерфейсу користувача, модуля керування роботою ПМЗ та обміну даними з системою з МК, модуля автоматичного контролю стану пресування осердя статора, модуля математичної обробки даних, модуля організації зберігання даних.

Модуль математичної обробки призначений для проведення операцій ідентифікації дефектів спресованості осердя статора та формування рекомендацій для їх усунення. Наступна обробка отриманих даних відбувається у модулі автоматичного контролю значення тиску пресування у кожній вимірювальній комірці, зі сторони нижнього натискного кільця системи пресування та зі сторони зонтичного пресу у спеціально створеному проставочному кільці. В свою чергу, отримана інформація передається в модуль організації зберігання даних для ведення бази даних на основі історії вимірювань. В даному випадку з'являється можливість створення баз знань з діагностичним ознаками, які залежать від значення тиску пресування для кожного пакету осердя статора або групи пакетів, а також точні параметри ідентифікованих дефектів та використані засоби, щодо їхнього усунення.

Модуль керування роботою ПМЗ та обміну даними з системою блоку комірок має аналогічні функції модуля системи будь-якої вимірювальної комірки. Відмінністю цього модуля є наявність транспортного компонента, який призначений для сполучення програмного забезпечення із стандартними інтерфейсами зв'язку СК. Зв'язок системи МК і СТД СКПЗ здійснюється за допомогою розробленого алгоритму із застосуванням стандартного промислового протоколу обміну даними Modbus, який є складовою частиною модуля вводу та виводу інформації. Використовуючи розроблений модуль можна реалізувати розгалужену систему одночасного вимірювання кожною вимірювальною коміркою, що входить до складу системи та почергового збору даних з кожного блоку. Також модуль вводу та виводу інформації призначений для організації обміну між модулями програмного забезпечення СК.

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

3.7.1 Структура апаратно-програмного забезпечення вторинного вимірювального перетворювача

Первинним джерелом вимірювальної інформації в системі контролю є вимірювальна комірка, в корпусі якої (як було описано вище) розміщено перетворювач питомого тиску пресування в електричний сигнал. Перетворювач утворений плоскою металевою мембраною з жорстким центром, ємнісним сенсором зі змінним зазором та вторинним вимірювальним перетворювачем (ВВП). ВВП в значній мірі визначає алгоритм її функціонування, технічні та метрологічні характеристики вимірювальної комірки, є перетворювачем руху мембрани спричиненої механічною енергією пресування в цифровий інформаційний сигнал.

В вимірювальних комірках із ємнісними первинними вимірювачем мікропереміщень в інформаційний сигнал є вторинний вимірювальний перетворювач ємність-код на базі мікросхеми AD7747 виробництва Analog Devices, Inc. (Norwood, MA, USA). Такий перетворювач забезпечує високу точність вимірювання ємності, мають зручний цифровий інтерфейс, малі розміри, а також при цьому відносно низьку вартість в порівнянні із іншими перетворювачами ємність код.

Мікросхема AD7747 призначена для роботи з несиметричними або диференціальними ємнісними сенсорами, і може бути використана у випадку, коли одна обкладка підключена до землі [54]. Окрім цього перевагами використання мікросхеми AD7747 є наявність сигма-дельта АЦП з високою роздільною здатністю в 24 біта з максимальною частотою вибірок рівній 90 SPS, висока лінійність ($\pm 0,01\%$), висока точність ($\pm 4\text{фФ}$) із стандартним діапазоном вимірювання до 4 пФ, можливість перебудови внутрішніх параметрів (постійних часу фільтрів, коефіцієнтів підсилення, режиму роботи АЦП та тощо), низьким енергоспоживанням струму до 0,7 мА для діапазону напруги живлення від 2,7 В до

5,25 В, а також використання простого двохпровідного інтерфейсу I²C-сумісний послідовний інтерфейс [55].

При використанні у якості перетворювача ємність-код інтегральної мікросхеми AD7747 з'являється можливість розташування перетворювача у безпосередній близькості із сенсором, уникаючи таким чином виникнення паразитної ємності сполучних ліній та впливу зовнішніх полів на значення інформативної складової ємності, що дозволяє реалізувати компактні первинні вимірювачі із цифровим виходом. На рис. 1.92 представлено блок-схему апаратно-програмного забезпечення вторинного вимірювального перетворювача а основі інтегральної мікросхеми AD7747 вимірювальних перетворювачів автоматизованої системи контролю якості пресування осердя статора.

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

3.7.2 Структура алгоритму функціонування вторинного вимірювача автоматизованої системи

Узагальнена структура алгоритму функціонування вторинного вимірювача автоматизованої системи на базі інтегральної мікросхеми AD7747 приведена на рис. 3.9, на якому введені наступні позначення: МК – мікроконтролер вторинного вимірювального перетворювача; СК – система контролю; МКОД – модуль конфігурування та обміну даними; UART – послідовний інтерфейс.

Детальний алгоритм роботи, який наведено на рис. 3.10 для вимірювальної комірки із ємнісним сенсором призначений для початкової ініціалізації регістрів AD7747, керування роботою AD7747, його калібрування в разі необхідності, отримання даних, попередньої обробку отриманих даних (перетворення "питомий тиск – електрична ємність") та відправки даних до системи контролю.

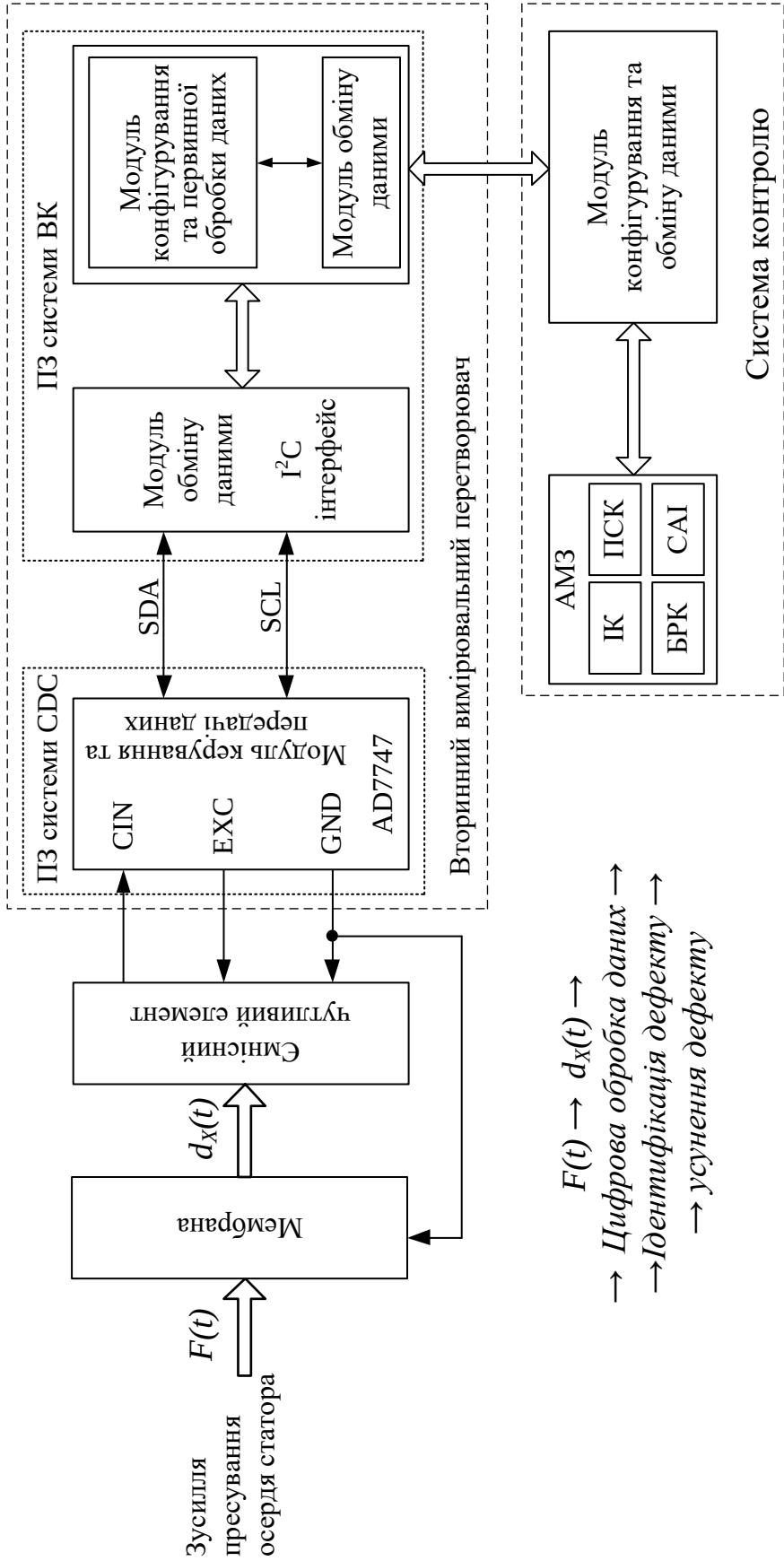


Рис. 3.9 Узагальнена структура алгоритму функціонування вторинного вимірювача автоматизованої системи на базі інтегральної мікросхеми AD7747

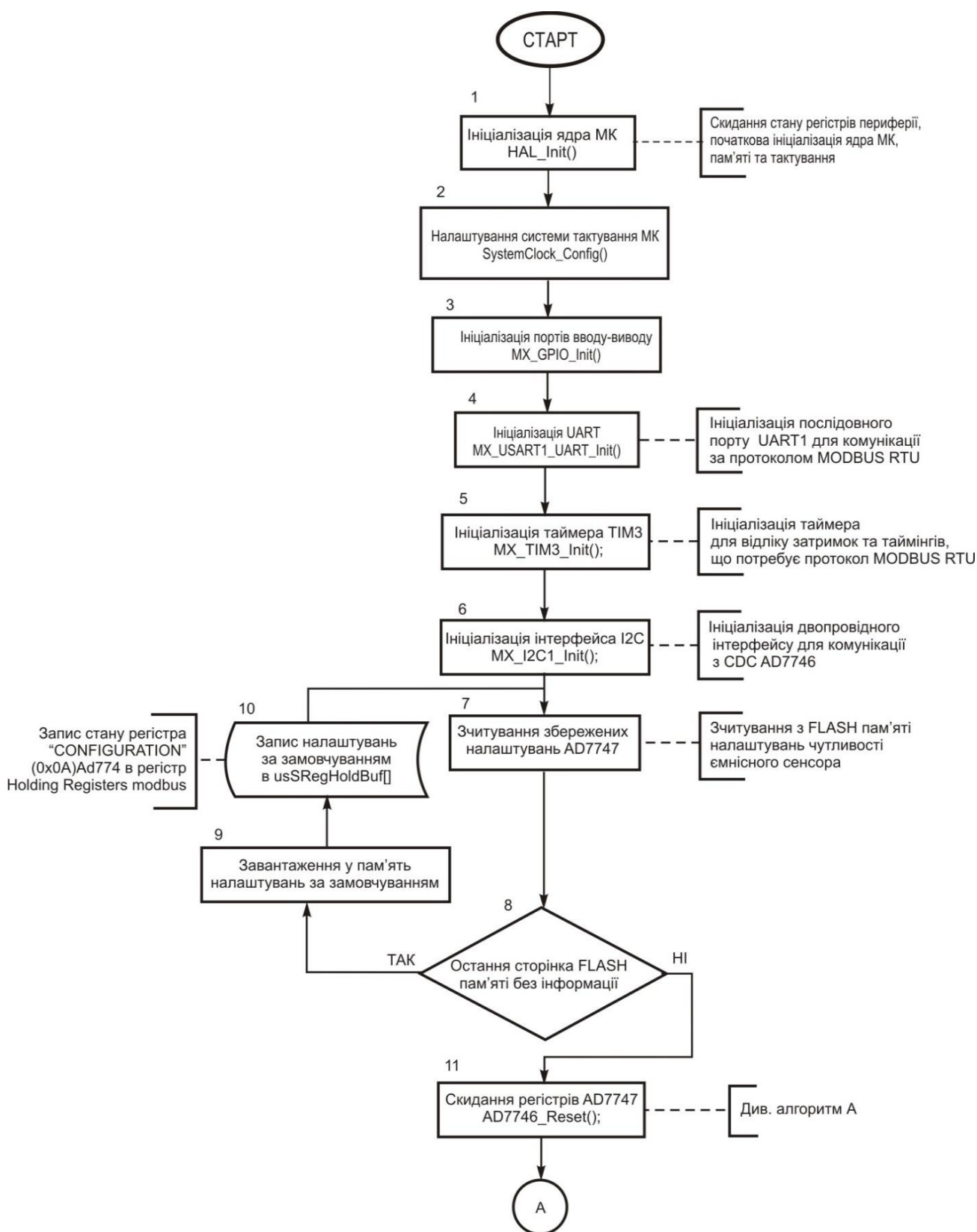


Рисунок 3.10 (а) Алгоритм роботи вторинного вимірювача автоматизованої системи на базі інтегральної мікросхеми AD7747

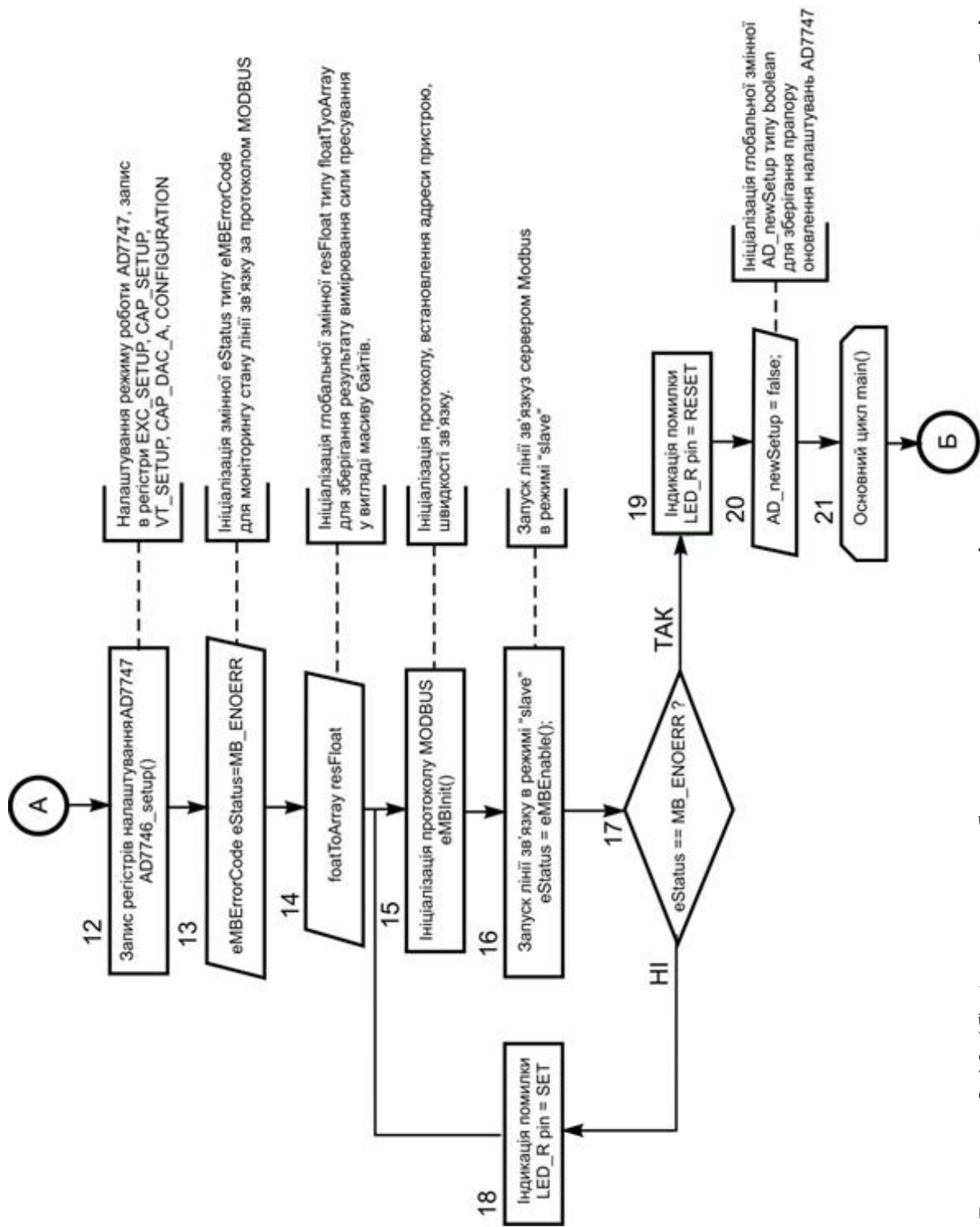


Рисунок 3.10 (б) Алгоритм роботи вторинного вимірювача автоматизованої системи на базі інтегральної мікросхеми AD7747

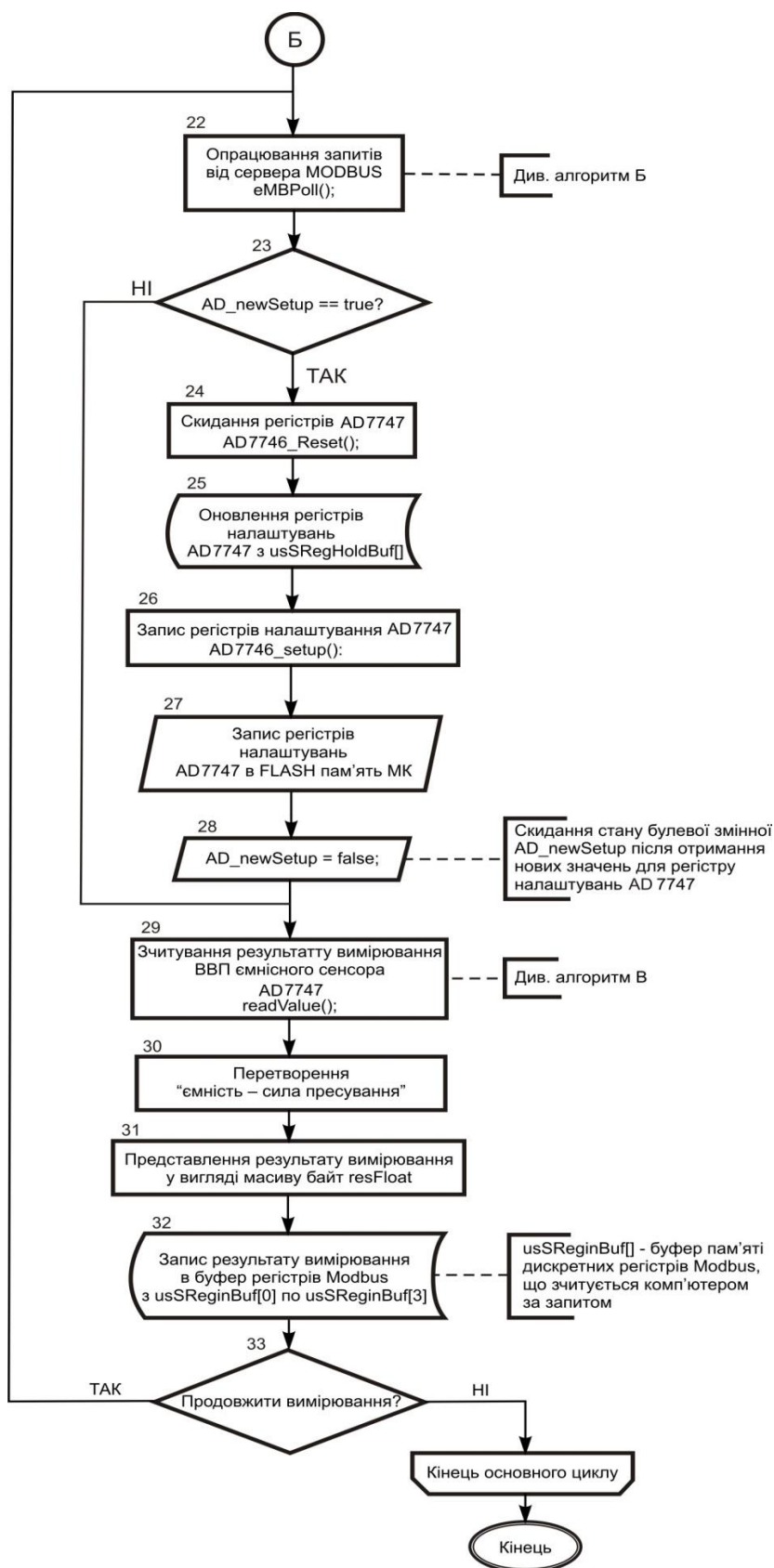


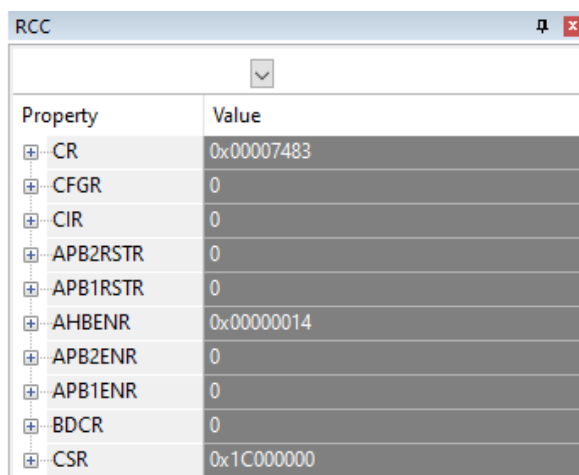
Рисунок 3.10 (в) Алгоритм роботи вторинного вимірювача автоматизованої системи на базі інтегральної мікросхеми AD7747

У цьому разі, основними частинами алгоритму є:

- основного циклу роботи вимірювальної комірки;
- реалізації перезавантаження CDC AD7747 (алгоритм а);
- опрацювання запитів по лінії Modbus RTU від серверу (алгоритм б);
- реалізації зчитування результату перетворення ВВП CDC AD7747.

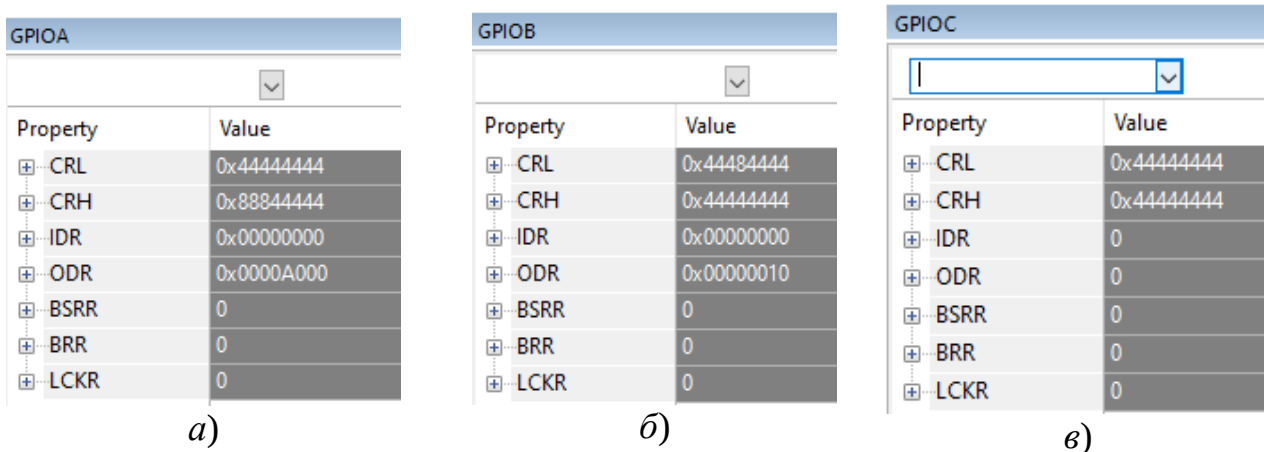
У відповідності до основного алгоритма робота вимірювальної комірки відбувається наступним чином:

Блок 1. Ініціалізація мікроконтролера при подачі живлення. Включає початкову ініціалізацію логічного ядра Cortex-M3 із встановлення значень регістрів периферії в початковий стан за замовчуванням. На рис. 3.11 приведений початковий стан регістрів системи тактування RCC. На рис. 3.12 – стан регістрів портів периферії вводу-виводу GPIOA (рис. 3.12 а), GPIOB (рис. 3.12 б) та GPIOC (рис. 3.12 в).



Property	Value
CR	0x00007483
CFGR	0
CIR	0
APB2RSTR	0
APB1RSTR	0
AHBENR	0x00000014
APB2ENR	0
APB1ENR	0
BDCR	0
CSR	0x1C000000

Рис. 3.11 Початковий стан регістрів системи тактування RCC



Property	Value
CRL	0x44444444
CRH	0x88844444
IDR	0x00000000
ODR	0x0000A000
BSRR	0
BRR	0
LCKR	0

Property	Value
CRL	0x44484444
CRH	0x44444444
IDR	0x00000000
ODR	0x00000010
BSRR	0
BRR	0
LCKR	0

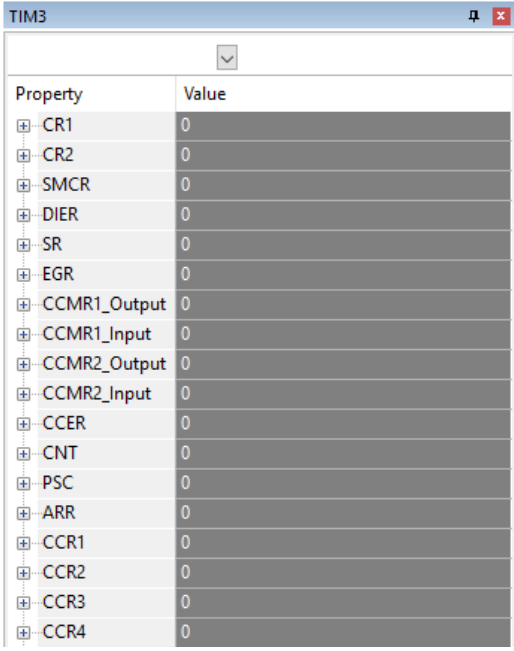
Property	Value
CRL	0x44444444
CRH	0x44444444
IDR	0
ODR	0
BSRR	0
BRR	0
LCKR	0

а)
б)
в)

Рис. 3.12 Стан регістрів портів периферії вводу-виводу

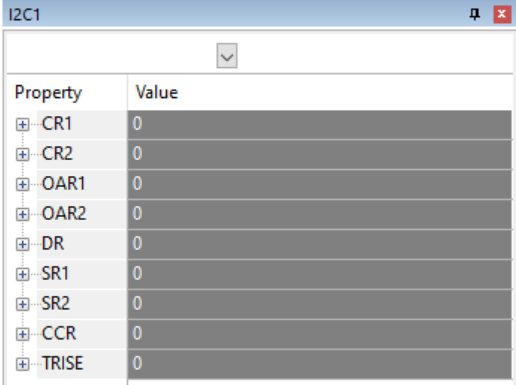
Початковий стан регістрів периферії таймера-лічильника TIM3 при ініціалізації МК, що використовується для лінії Modbus, наведено на рис. 3.13. На рис. 3.14 наведено стан регістрів периферії I²C при ініціалізації МК, а на рис. 3.15 – відображено стан регістрів периферії послідовного порту UART1.

Блок 2. Налаштування системи тактування МК. Включає встановлення режиму роботи МК від вбудованого джерела тактового сигналу МК на 64 МГц з використанням помножувача частоти та опорного вбудованого джерела тактового сигналу на 8 МГц. Для забезпечення стабільності частоти тактового сигналу МК використовується система ФАПЧ.



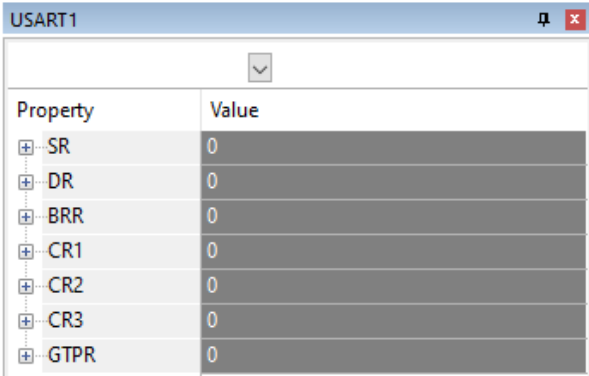
Property	Value
CR1	0
CR2	0
SMCR	0
DIER	0
SR	0
EGR	0
CCMR1_Output	0
CCMR1_Input	0
CCMR2_Output	0
CCMR2_Input	0
CCER	0
CNT	0
PSC	0
ARR	0
CCR1	0
CCR2	0
CCR3	0
CCR4	0

Рис. 3.13 Початковий стан регістрів TIM3 при ініціалізації МК



Property	Value
CR1	0
CR2	0
OAR1	0
OAR2	0
DR	0
SR1	0
SR2	0
CCR	0
TRISE	0

Рис. 3.14 Стан регістрів периферії I2C при ініціалізації МК



Property	Value
SR	0
DR	0
BRR	0
CR1	0
CR2	0
CR3	0
GTPR	0

Рис. 3.15 Стан регістрів порту UART1 при ініціалізації МК

На рис. 3.16 представлена блок-схема системи тактування МК, що складається з наступних базових блоків:

- HSIRC – вбудоване джерело тактового сигналу на 8 МГц;
- HSE – зовнішній кварцевий резонатор або генератор;
- PLL – помножувач тактової частоти з системою ФАПЧ;
- PLL SourceMux – мультиплексор джерел тактового сигналу, що подається на помножувач частоти PLL;
- SystemClockMux – мультиплексор тактового сигналу, що тактує лінії периферії AHB1 та AHB2, ядро Cortex та пам'ять.

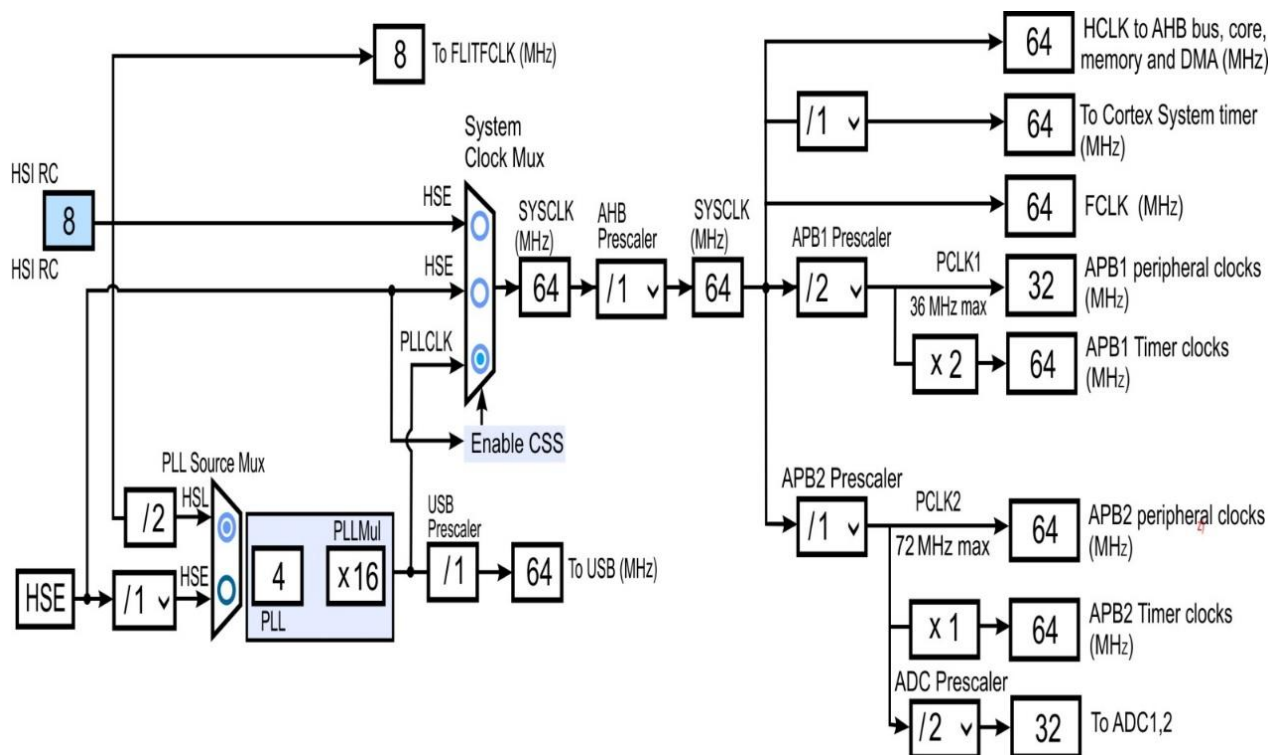


Рис. 3.16 блок-схема системи тактування МК

На рис. 3.18 наведено стан регістрів налаштування системи тактування RCC мікроконтролера після встановлення налаштувань.

Блок 3. Ініціалізація портів вводу-виводу МК. Включає: налаштування швидкості опитування та встановлення стану виводів МК; маршрутизація портів внутрішньої периферії I²C, UART, SWD на зовнішні виводи МК; встановлення режиму роботи ніжок МК на вхід, вихід або в якості портів вводу-виводу

вбудованої периферії. Маршрутизація відбувається за допомогою вбудованих мультиплексорів.

RCC	
Property	Value
CR	0x03007483
CFGR	0x0038040A
CIR	0
APB2RSTR	0
APB1RSTR	0
AHBENR	0x00000014
APB2ENR	0x0000401D
APB1ENR	0x00200002
BDCR	0
CSR	0x1C000000

Рис. 3.18 Стан регістрів налаштування системи тактування RCC мікроконтролера після встановлення налаштувань

На рис. 3.19 наведено стан регістрів портів периферії вводу-виводу GPIOA (рис. 3.19.а), GPIOB (рис. 3.19.б) та GPIOC (рис. 3.19.в).

GPIOA	
Property	Value
CRL	0x44444444
CRH	0x388444B3
IDR	0x0000DEFE
ODR	0x0000A000
BSRR	0
BRR	0
LCKR	0

а)

GPIOB	
Property	Value
CRL	0xFF433444
CRH	0x44444444
IDR	0x0000FF73
ODR	0x00000010
BSRR	0
BRR	0
LCKR	0

б)

GPIOC	
Property	Value
CRL	0x44444444
CRH	0x44344444
IDR	0x0000C000
ODR	0
BSRR	0
BRR	0
LCKR	0

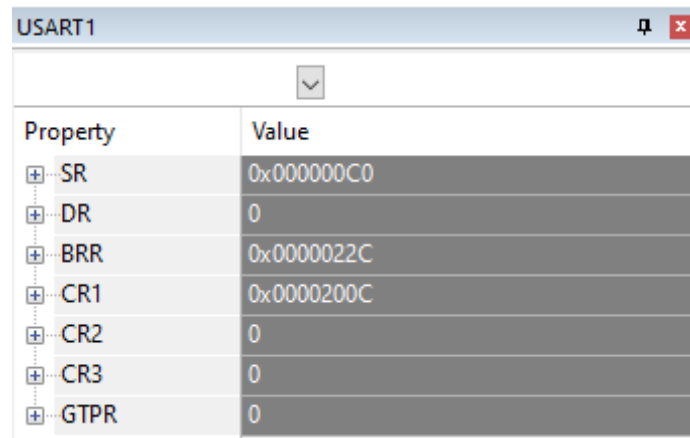
в)

Рис. 3.19 Стан регістрів портів периферії вводу-виводу

Блок 4. Налаштування послідовного порту МК UART для реалізації фізичної лінії зв'язку за протоколом Modbus RTU. В якості середовища передачі даних використовується двопровідний напівдуплексний диференційний інтерфейс

TIA/EIA-485. Блок включає налаштування швидкості комунікації, формату кадру обміну інформації, а також конфігурування переривання при прийомі нових даних. Всі пристрої в мережі повинні мати один формат передачі даних та одну швидкість передачі даних. Рекомендована швидкість передачі даних становить 115,2 кБіт/с.

На рис. 3.20 наведено стан регістрів периферії UART після встановлення налаштувань.



Property	Value
SR	0x000000C0
DR	0
BRR	0x0000022C
CR1	0x0000200C
CR2	0
CR3	0
GTPR	0

Рис. 3.20 Стан регістрів периферії UART після встановлення налаштувань

Блок 5. Ініціалізація таймеру-лічильника TIM3 та формування часових проміжків затримок. Згідно специфікації до середовища передачі даних ANSI/TIA/EIA-485-A-98 та Modbus RTU [82, 83], при комунікації між клієнтом та сервером необхідно витримувати фіксовані часові інтервали для початку та закінчення передачі даних. Перед початком передачі чергового фрейму даних необхідна часова затримка, що відповідає 3,5 тривалості передачі одного байту даних ($3,5 \cdot t$) після завершення передачі попереднього фрейму (або "помилкової" передачі даних). Завершення передачі фрейму є відсутність передачі даних протягом 1,5 тривалості передачі одного байту даних ($1,5 \cdot t$). Однак, якщо після закінчення інтервалу часу в $1,5 \cdot t$ протягом часу $3,5 \cdot t$ відновиться передача даних - фрейм вважається недостовірним. На рис. 3.21 приведена діаграма передачі фреймів.

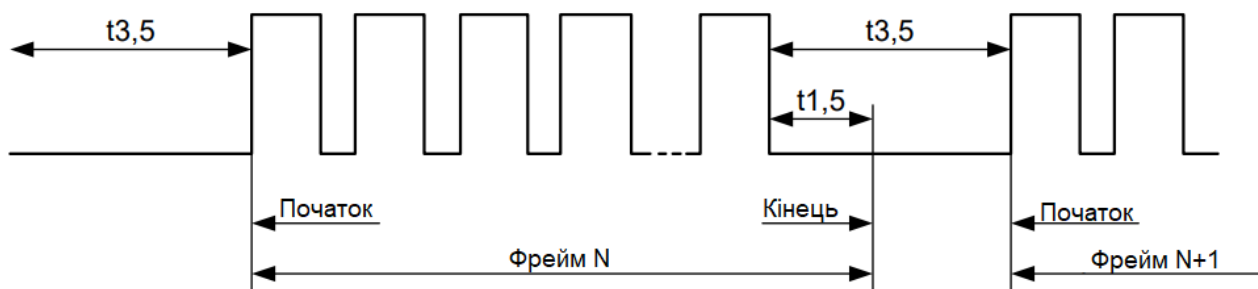


Рис. 3.21 Діаграма передачі фреймів

На рис. 3.22 приведена осцилограма сигналу з лінії передачі даних.

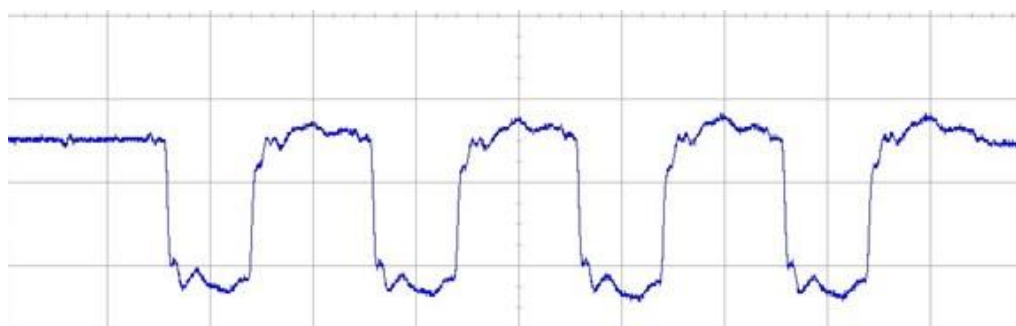


Рис. 3.22 Осцилограма передачі фреймів

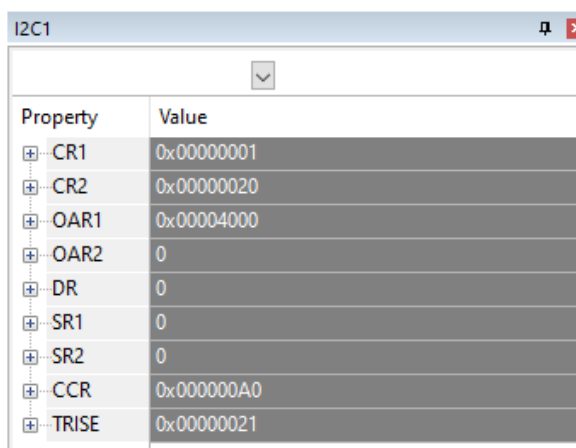
На рис. 3.23 наведено стан регістрів таймера-лічильника TIM3.

TIM3	
Property	Value
CR1	0
CR2	0
SMCR	0
DIER	0
SR	0x00000001
EGR	0
CCMR1_Output	0
CCMR1_Input	0
CCMR2_Output	0
CCMR2_Input	0
CCER	0
CNT	0
PSC	0x00001C7F
ARR	0x00000023
CCR1	0
CCR2	0
CCR3	0
CCR4	0
DCR	0
DMAR	0

Рис. 3.23 Стан регістрів таймера-лічильника TIM3

Блок 6. Ініціалізація периферії двопровідного інтерфейсу I²C. Включає: встановлення режиму роботи «ведучий» у регістрі I2C_CR1 та I2C_CCR1; встановлення швидкості роботи інтерфейсу в стандартному режимі 100 кГц у регістрі I2C_CR2. Двопровідний інтерфейс I²C використовується для встановлення режиму роботи вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) на базі АЦП ємності (CDC) AD7747, а також передачі результату перетворення ВВП в пам'ять мікроконтролера.

На рис. 3.24 наведено стан регістрів периферії I²C після встановлення налаштувань.



Property	Value
CR1	0x00000001
CR2	0x00000020
OAR1	0x00004000
OAR2	0
DR	0
SR1	0
SR2	0
CCR	0x000000A0
TRISE	0x00000021

Рис. 3.24 стан регістрів периферії I2C після встановлення налаштувань

Блок 7. Зчитування збережених у FLASH-пам'яті МК конфігураційних даних вторинного вимірювального перетворювача. Встановлення режиму вимірювання сенсору (зокрема чутливості) відбувається шляхом запису відповідних значень у регістр Configuration (0x0A) AD7747. З метою оптимізації процесу калібрування та налагодження системи контролю сили пресування осердя статора турбогенератора доцільно забезпечити можливість дистанційного корегування чутливості сенсорів з серверу по лінії зв'язку Modbus. Значення стану регістра 0x0A AD7747 доцільно зберігати в останній сторінці FLASH-пам'яті МК за адресами 0x0801FC00 – 0x0801FFFF, що містить об'єм 1024 байт вільного простору пам'яті МК.

Блок 8. Перевірка наявності інформації за адресами 0x0801FC00 – 0x0801FFFF. Перевірка необхідна після оновлення програмного забезпечення вимірювальної комірки мережі сенсорів. У випадку, якщо сторінка 0x0801FC00

містить у всіх комірках значення 0xFF, це свідчить про відсутність попередньо збережених даних налаштувань.

Блок 9. Запис стану для регістру Configuration (0x0A) AD7747 у FLASH-пам'ять МК за замовчуванням, а саме 0x78.

Блок 10. Збереження поточного значення регістру Configuration (0x0A) AD7747 у регістр зберігання Modbus (HoldingRegisters) за адресою 0x0001Modbus.

Блок 11. Ініціалізації та встановлення режиму роботи АЦП перетворювача ємність-код AD7747 (детально робота блоку 11 розглянута в "алгоритмі А"), перезавантаження AD7747;

Блок 12. Встановлення значень конфігураційних регістрів для завдання режимів роботи АЦП перетворювача ємність-код AD7747. Конфігураційні регістри AD7747 мають наступні значення:

- EXC_SETUP = 0x0F. Регістр встановлення напруги на електроді сенсору;
- CAP_SETUP = 0xA0. Регістр налаштування каналу вимірювання ємності;
- VT_SETUP = 0x80. Регістр налаштування вбудованого температурного сенсору та монітору напруги;
- CAP_DAC_A = 0x9E. Регістр налаштування ЦАП ємності в AD7747;
- CONFIGURATION= 0x65. Регістр налаштування перетворення CDC, чутливості, режиму роботи АЦП;

Після встановлення зазначених вище конфігураційних регістрів, регістр CONFIGURATION встановлюється рівним 0x79, що відповідає безперервному режиму роботи CDC.

Блок 13: ініціалізація змінної eStatus типу eMBCErrorCode для збереження поточного стану лінії зв'язку при комунікації за протоколом Modbus. Бібліотекою freemodbus v1.6 передбачені наступні коди помилок:

- MB_ENOERR – помилок немає;
- MB_ENOREG – некоректна адреса регістру;
- MB_EINVAL – некоректне значення аргументу;
- MB_EPORTERR – помилка в роботі бібліотеки freemodbus;
- MB_ENORES –недостатньо ресурсів регістрів;

- MB_EIO – помилка вводу-виводу;
- MB_EILLSTATE – лінія зв'язку в не дозволеному стані;
- MB_ETIMEDOUT – помилка через недотримання часових затримок.

Блок 14. Ініціалізація глобальної змінної resFloat типу floatToArray для зберігання результату вимірювання сили пресування у вигляді масиву з 4 байтів. Результат перетворення "ємність – зусилля пресування" представлена у вигляді величини з плаваючою комою, що не підтримується протоколом Modbus.

Блок 15. Ініціалізація протоколу Modbus RTU, встановлення адреси пристрою у режимі клієнта та встановлення швидкості лінії зв'язку в 115200 бод.

Блок 16. Запуск лінії зв'язку між сервером та клієнтом, тобто вимірювальною коміркою. Статус з'єднання зберігається у змінній eStatus.

Блок 17. Перевірка умови «eStatus == MB_ENOERR». Не виконання умови свідчить про наявність помилки.

Блок 18. Запис в регістр GPIOC_ODR біт ODR13=1, що призводить до вмикання сигнального індикатора LED_Rта повторної ініціалізації протоколу Modbus RTU.

Блок 19. Запис в регістр GPIOC_ODR біт ODR13=0, що призводить до вимикання сигнального індикатора LED_R.

Блок 20. Ініціалізація глобальної змінної AD_newSetup типу boolean для зберігання прапору оновлення налаштувань AD7747. Глобальна змінна вводиться з метою запобігання багаторазового встановлення оновлених значень регістру 0x0A AD7747.

Блок 21. Вхід в основний цикл (main) алгоритму.

Блок 22. Опрацювання запитів від сервера Modbus (детальну роботу блоку опрацювання запитів від сервера розглянуто в алгоритмі Б).

Блок 23. Перевірка умови «AD_newSetup==true». Умова виконується у випадку отримання нових налаштувань для AD7747 після опрацювання запиту сервера. Процедура встановлення нових параметрів вимірювання представлена блоками 24-27.

Блок 24. Скидання стану регістрів та перезавантаження AD7747 (детально робота блоку 24 розглянута в алгоритмі А).

Блок 25. Зчитування значень параметрів з вхідного буферу регістрів вводу-виводу Modbus (HoldingRegisters) за адресою 0x0001 Modbus.

Блок 26. Запис зчитаних параметрів налаштувань в регістр Configuration (0x0A) AD7747.

Блок 27. Збереження оновлених параметрів налаштувань в FLASH-пам'ять МК за адресою 0x0801FC00.

Блок 28. Скидання стану змінної AD_newSetup = false.

Блок 29. Зчитування результату вимірювання ВВП ємнісного сенсора AD7747 (детальна робота блоку зчитування результату вимірювання – алгоритм В).

Блок 30. Перетворення отриманого результату вимірювання ВВП ємнісного сенсору в силу пресування.

Блок 31. Перетворення типу інформації. З метою подальшої передачі результату вимірювання на сервер, результат вимірювання представляється у вигляді масиву байтів наступним чином з прямим порядком байтів (DCBA):

0,001=0x6F12833A, тоді resFloat[4]={0x6F, 0x12, 0x83, 0x3A}.

Блок 32. Запис масиву даних результату вимірювання resFloat[4] записується у вихідний буфер usSRegInBuf[] вхідних регістрів Modbus (InputRegisters) за адресою 0x0001-0x0004 Modbus. Вихідний буфер зчитується комп'ютером за запитом.

Блок 33. Перевірка умори «Продовжити вимірювання». Виконання умови призводить до продовження виконання основного циклу. Причиною зупинення вимірювання може бути вимкнення системи.

3.7.3 Алгоритм реалізації перезавантаження CDC AD7747

Алгоритм призначений для ініціалізації та встановлення режиму роботи перетворювача ємність-код AD7747, яка потребує проведення процедури попереднього перезавантаження вбудованого сигма-дельта АЦП. На рис. 3.25

наведено алгоритм реалізації перезавантаження вторинного вимірювального перетворювача CDC AD7747.

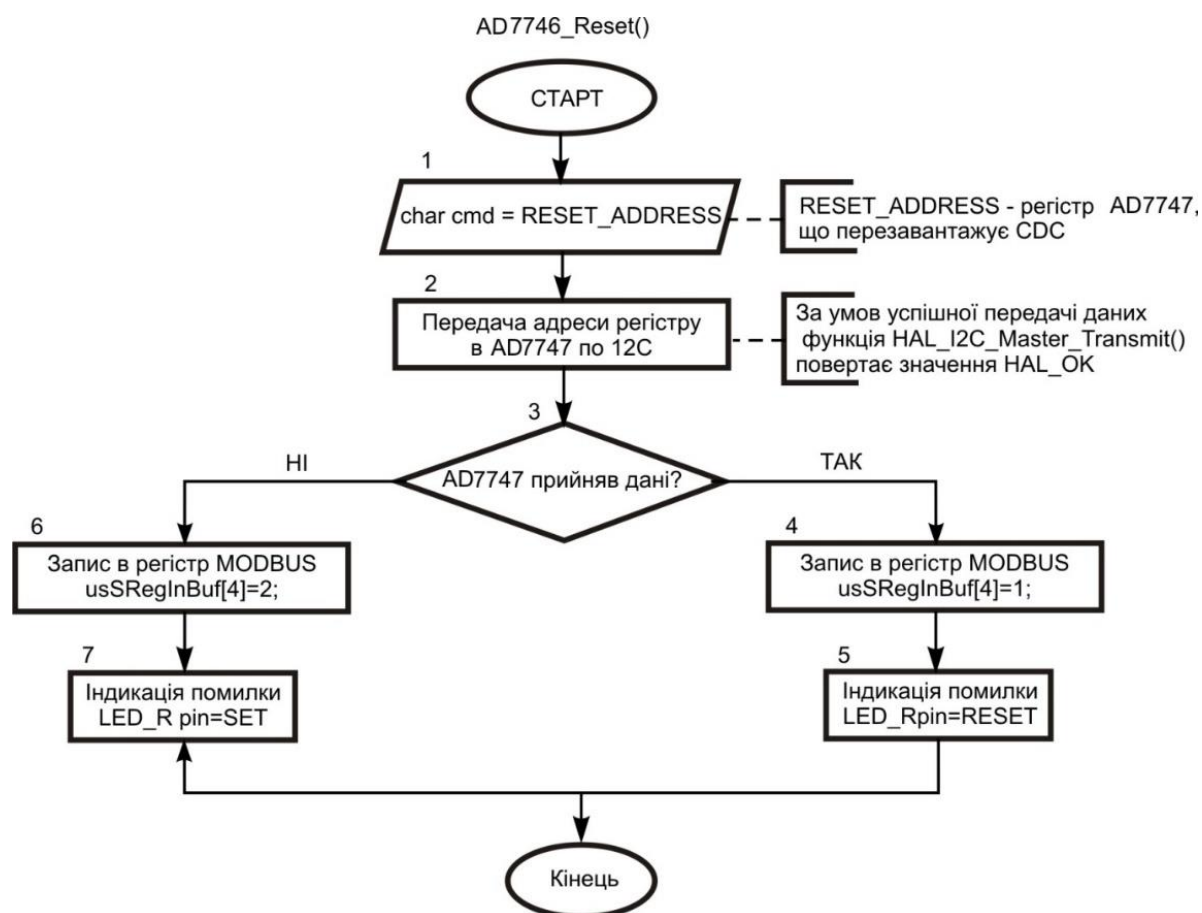


Рис. 3.25 Алгоритм реалізації перезавантаження ВВП AD7747

Алгоритм перезавантаження ємнісного ВВП AD7747 має наступні блоки:

Блок 1. Запис команди RESET_ADDRESS (0xBF) у вихідний буфер периферії I²C, що представлений змінною «cmd» типу char.

Блок 2. Запис значення вихідного буферу cmd до регістру даних I2C_DR[0:7]. Запис даних в регістрі I2C_DR призводить до відправки даних по лінії I²C.

Блок 3. Перевірка умови «AD7747 прийняв дані?». У разі повернення функцією HAL_I2C_Master_Transmit() значення HAL_OK умова виконується.

Блок 4. Запис у вихідний буфер usSRegInBuf[4] вхідних регістрів Modbus (InputRegisters) здійснюється за адресою 0x0005 Modbus значення «1», у випадку виконання умови в блоці 3.

Блок 5. Вимкнення індикації помилки. Запис в регістр GPIOC_ODR біт ODR13=0, що призводить до вимкнення сигнального індикатора LED_R.

Блок 6. Запис у вихідний буфер usSRegInBuf[4] вхідних регістрів Modbus (InputRegisters) за адресою 0x0005 Modbus значення «2», у випадку не виконання умови в блоці 3.

Блок 7. Ввімкнення індикації помилки. Запис в регістр GPIOC_ODR біт ODR13=1, що призводить до ввімкнення сигнального індикатора LED_R.

3.7.4 Алгоритм опрацювання запитів від серверу по лінії Modbus RTU

На рис. 3.26 наведено алгоритм опрацювання запитів від серверу Modbus RTU до вимірювальної комірки сенсорної мережі. Згідно специфікації до протоколу Modbus, сервер надсилає клієнту запит з кодом функції. В алгоритмі використовуються наступні функції:

- 0x03 – зчитування декількох регістрів зберігання;
- 0x04 – зчитування декількох вхідних регістрів;
- 0x06 – запис регістру зберігання.

Алгоритм опрацювання запитів від серверу по лінії Modbus RTU містить наступні блоки:

Блок 1. Перевірка умови «Отримано запит від сервера modbus?». Умова виконується у випадку, якщо сервер звертається за адресою обраної вимірювальної комірки сенсорної мережі.

Блок 2. Перевірка умови «Код функції == 0x04?», що відповідає запиту на зчитування декількох вхідних регістрів.

Блок 3. Запис у вихідний буфер лінії Modbus даних з буферу usSRegInBuf[.].

Блок 4. Надсилання відповіді на запит серверу. Відповідь містить дані, що записані у вихідний буфер шини Modbus.

Блок 5. Перевірка умови «eMBCErrorcode == MB_ENOERR?». Після надсилання відповіді на сервер відбувається перевірка відсутності помилок при зчитуванні/запису даних в сенсорі та комунікації в лінії зв'язку Modbus.

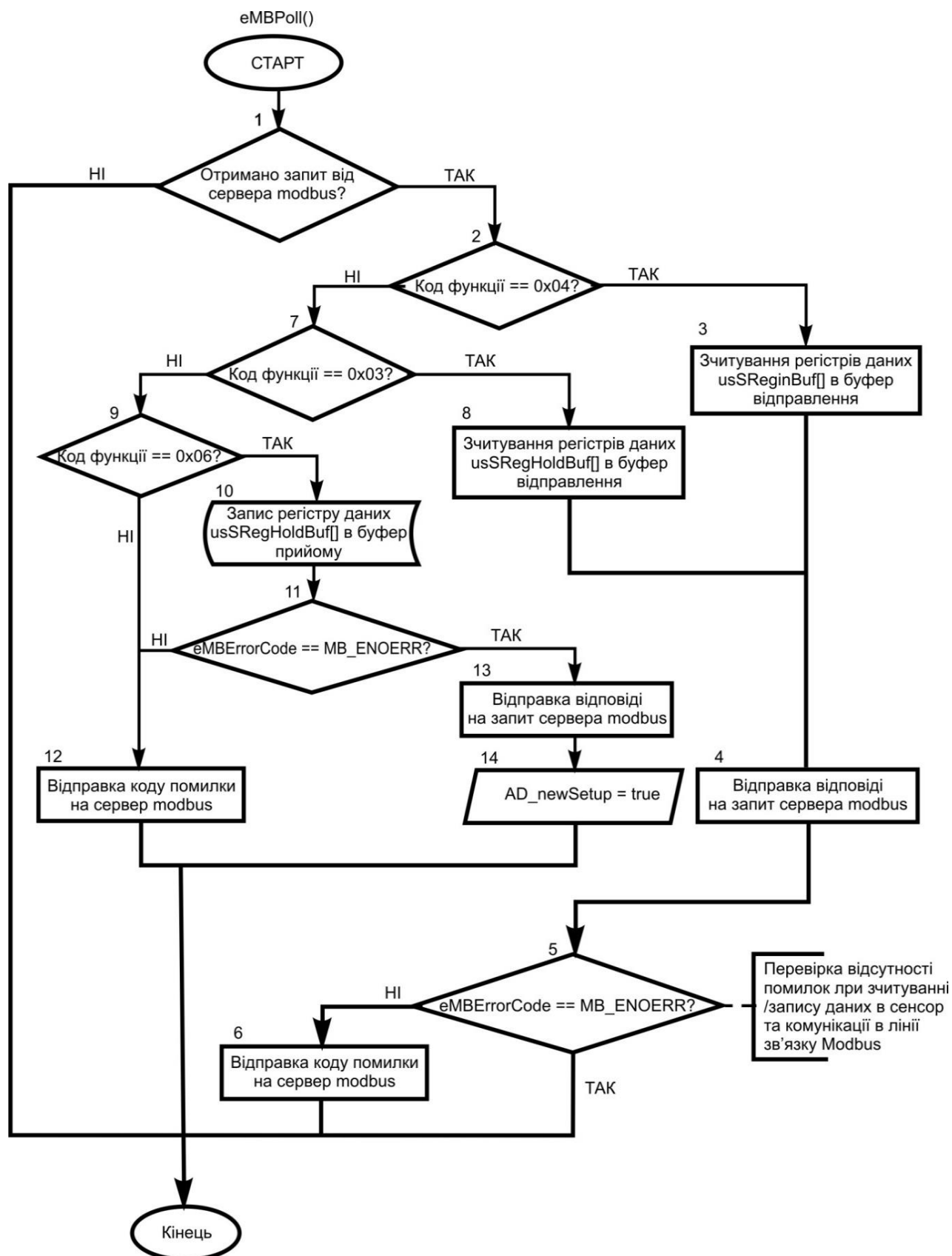


Рис. 3.26 Алгоритм опрацювання запитів від серверу по лінії Modbus RTU

Блок 6. Надсилання до серверу Modbus коду помилки, якщо умова «eMBCErrorcode == MB_ENOERR?» не виконується.

Блок 7. Перевірка умови «Код функції == 0x03?», що відповідає запиту на зчитування декількох регістрів зберігання.

Блок 8. Зчитування декількох регістрів зберігання, у вихідний буфер шини Modbus записується дані з буферу usSRegHoldBuf[].

Блок 9. Перевірка умови «Код функції == 0x06?», що відповідає запиту на запис регістру зберігання.

Блок 10. Зчитування даних з вхідного буферу шини Modbus та запис у буфер usSRegHoldBuf [].

Блок 11. Перевірка умови «eMBCErrorcode == MB_ENOERR?». Умова виконується у разі коректного отримання даних та успішного запису у відповідні регістри зберігання.

Блок 12. Надсилання до серверу Modbus коду помилки, якщо умова «eMBCErrorcode == MB_ENOERR?» не виконується.

Блок 13. Надсилання відповіді на сервер з підтвердженням запису даних на стороні клієнта.

Блок 14. Запис значення глобальної змінної AD_newSetup = true, після успішного отримання нових даних по лінії Modbus.

3.7.5 Алгоритм реалізації зчитування результату перетворення ВВП CDC AD7747 (алгоритм В)

На рис. 3.27 наведено алгоритм реалізації зчитування результату перетворення ємнісного ВВП AD7747. Опитування результату перетворення відбувається в основному циклі, що потребує оптимізацію використання процесорного часу. Так як час перетворення АЦП ємності значно більший допустимих значень при використанні Modbus RTU, в алгоритмі В передбачено перевірку наявності нових результатів перетворення.

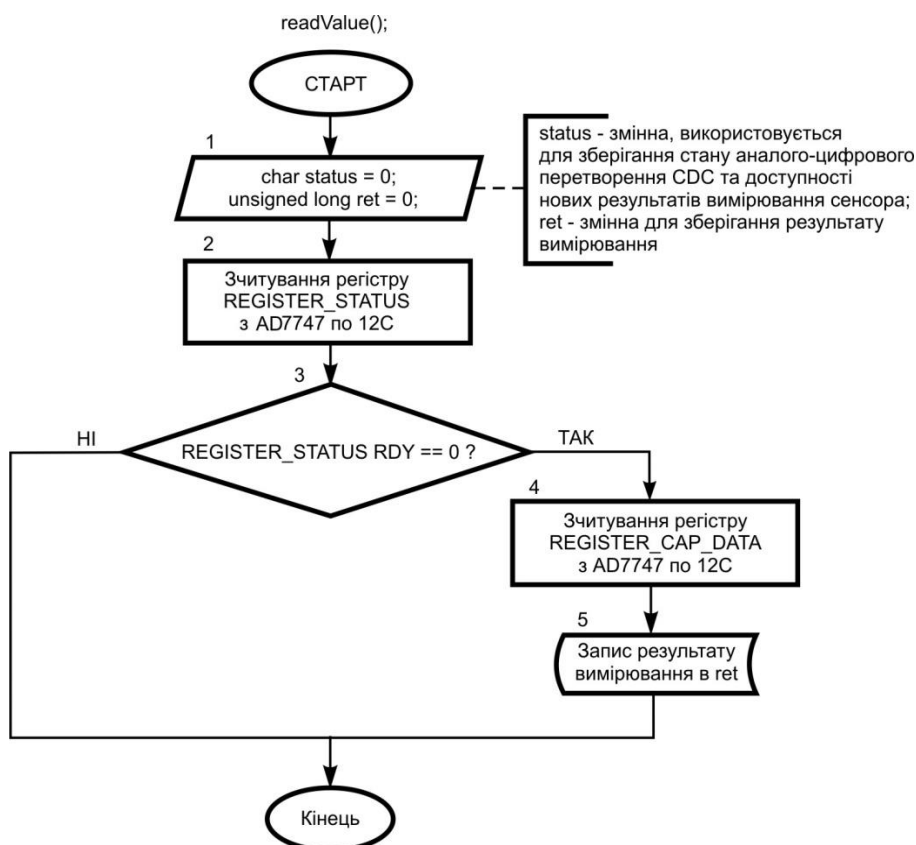


Рис. 3.27 Алгоритм реалізації зчитування результату перетворення ВВП AD7747

Алгоритм реалізації зчитування результату перетворення ємнісного ВВП AD7747 складається з наступних блоків:

Блок 1. Ініціалізація локальних змінних «status» та «ret», що використовуються для зберігання поточного статусу результатів перетворення та безпосередньо результату перетворення.

Блок 2. Зчитування регістру статусу AD7747 REGISTER_STATUS для перевірки наявності актуального результату перетворення ємність-код. Для індикації готовності результату перетворення ємнісного ВВП використовується біт RDY, що рівний має наступні значення:

- «0» – перетворення завершено, дані перетворення ємності готові;
- «1» – відбувається перетворення, дані не доступні.

Блок 3. Перевірка умови «REGISTER_STATUS RDY == 0 ?». Умова виконується, якщо біт 2 (RDY) регістру статусу AB7747 дорівнює «0».

Блок 4. Зчитування результату перетворення з регістру REGISTER_CAP_DATA.

Блок 5. Зберігання результату перетворення у відповідній змінній «ret».

3.7.6 Алгоритми роботи протоколу обміну даними у системі з урахуванням просторово-розподіленої сенсорної мережі

Система контролю відхилення від площинності торцевої поверхні осердя статора турбогенератора під час його виготовлення використовує поширенішим для організації промислової сенсорної мережі протокол Modbus із реалізацією на основі 2-провідного інтерфейсу RS-485. У цьому разі, протокол використовується для організації обміну інформацією між вимірювальними комірками просторово-розподіленої сенсорної мережі і блоком збирання та обробки даних(далі сервер). Протокол є промисловим стандартом для систем автоматизації, інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), систем моніторингу та діагностики.

Обмін даними в системі можна розділити на декілька рівнів:

- Верхній рівень - це рівень диспетчеризації та адміністрування, робота з базами даних чи знань та статистичними функціями;
- Середній рівень - це рівень контролерів, у даному випадку серверів на базі ПК - пристроїв, які здійснюють збір даних і управління технологічним процесом;
- Нижній або польовий - це рівень взаємодії сенсорів та контролерів або сенсорів безпосередньо з сервером.

В автоматизованій системі контролю протокол Modbus, використано під час організації процесів комунікації на середньому і нижньому рівнях. Використання протоколу дозволило досягти значної завадостійкості, можливості застосування ліній зв'язку протяжністю понад 500 метрів для організації комунікації між мережею сенсорів та системою контролю, апаратній простоті реалізації за використання сучасних мікросхем, тощо. Протокол використовує фізичний інтерфейс RS-485 або RS-422 в якості середовища обміну інформацією за протоколом ModBus RTU.

Також застосування протоколу дозволяє забезпечити універсальність як системи в цілому так і її окремих інформаційно-вимірювальних каналів, з точки зору гнучкості застосування для систем контролю осердь різних типів генераторів

під час їх виготовленні та ремонтів, а також простою в експлуатації і обслуговуванні за рахунок відкритості архітектури протоколу.

Практична реалізація транспортного рівня послідовного порту потребує використання вбудованого у середовище Processing (мови Java) стандартної бібліотеки RXTX-lib. При цьому, я показали експериментальні дослідження, використання стандартної бібліотеки RXTX-lib для реалізації обміну даними через інтерфейс послідовного порту між мікропроцесором вторинного вимірювального перетворювача вимірювальної комірки та системою збору та первинної обробки даних накладає певні обмеження на використання не стандартизованих часових інтервалів під час організації передачі інформаційних та керуючих даних за використання асинхронної лінії зв'язку в системі контролю. Таким чином, для забезпечення стабільного зв'язку на основі протоколу Modbus RTU та стандартної бібліотеки RXTX-lib часові інтервали між символами інформаційних пакетів були встановлені на рівні 30 мс, що дозволило забезпечити синхронізацію між усіма елементами системи контролю. Прийом та передача пакетів Modbus RTU у бібліотеці реалізована з використанням машинних станів периферії мікроконтролера. Зміна машинних станів призводить до виклику відповідних callback-функцій з шару абстракції від апаратури (hardware abstraction layer, HAL). Використанням рівнів абстрагування у бібліотеці дозволяє інтегрувати підтримку протоколу Modbus у вузли автоматизованої системи контролю.

Серверний компонент системи контролю стану пресування осердя статора турбогенератор реалізований на базі персонального комп'ютера з використанням мови програмування Java та фреймворку Processing.

Алгоритм роботи серверної частини передбачає використання лінії зв'язку за протоколом Modbus RTU з транспортним рівнем RS-485. Реалізація його протоколу у бібліотеці MODBUS для Processing забезпечує роботу серверу в режимі ведучого пристрою в мережі та підтримує наступні функції:

- ReadCoils (0x01);
- ReadDiscreteInputs (0x02);
- ReadHoldingRegisters (0x03);

- ReadInputRegister (0x04);
- WriteMultipleCoils (0x0F);
- WriteMultipleRegisters (0x10).

Слід зазначити, що середовище Processing та Бібліотека MODBUS, які використані під час реалізації протоколів обміну в системі розповсюджується за ліцензією GNU LGPL та GNU GPL v3 відповідно. Це забезпечує їх вільне використання під час реалізації протоколів обміну між вимірювальними комірками та основним блоком збирання, обробки та відображення інформації в системі контролю відхилення або нерівномірності щільності пресування пакету осердя статора турбогенератора під час його виготовлення.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблено алгоритм взаємодії апаратно-програмного забезпечення системи, яке дає змогу уніфікувати формати даних та протоколів обміну даними для різних типів сенсорів і засобів зв'язку підсистем, а також між підсистемами. Застосування протоколів дозволяє реалізувати модульну систему, що забезпечує додавання нових і видалення пошкоджених або застарілих вимірювальних комірок, що є модулями із системи без необхідності її повної заміни.

2. Реалізовано протоколи обміну між вимірювальними комірками та основним блоком збирання, обробки та відображення інформації в системі неперервного контролю щільності пресування пакету осердя статора турбогенератора під час його пресування на етапі виготовлення.

3. Отримані результати можуть бути використані при розробці програмно-математичного забезпечення в систем контролю механічних параметрів ТГ.

Посилання: [68-83] див. список використаних джерел стор. 184–186.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ МОНОЛІТНОСТІ ОСЕРДЯ СТАТОРА НА ФІЗИЧНИХ МОДЕЛЯХ

Завдання даного розділу – описати результати експериментальних досліджень та випробувань розроблених засобів контролю монолітності (якості пресування) осердя турбогенератора на фізичних моделях.

Результати досліджень, які представлені в даному розділі отримані за безпосередньої участі автора і опубліковані в наступних роботах [84, 85], а також представлені у протоколах випробувань та звітах з фундаментальних та прикладних НДР, які виконувались в Інституті електродинаміки НАН України.

4.1 Дослідження первинного вимірювального перетворювача

Для перевірки відповідності результатів досліджень, проведених в попередніх розділах, засобів контролю монолітності осердя статора, отриманих шляхом аналітичного розрахунку, реальним, був розроблений та створений випробувально-вимірювальний стенд. Стенд призначено для перевірки теоретичних результатів та проведення експериментальних досліджень компонентів ємнісного вимірювача зусилля пресування. Зовнішній вигляд випробувально-вимірювальний стенд первинного вимірювального перетворювача зусилля пресування представлено на рис 4.1.

Ємнісний сенсор, що досліджувався, призначений для використання в якості первинного вимірювального перетворювача в вимірювальній комірці системи контролю тиску пресування під час пресування осердя статора ТГ на етапі його виготовлення.

Сенсор може використовуватися в сукупності із вторинним вимірювальним перетворювачем побудованим за схемою «напівдиференціального» або «диференціального» способів вимірювання інформативної складової ємності. Це дозволяє підвищити точність сенсора завдяки усуненню впливу на результат

вимірювання дестабілізуючих неінформативних факторів таких, як температура і вологість газового середовища, в якому знаходиться сенсор.

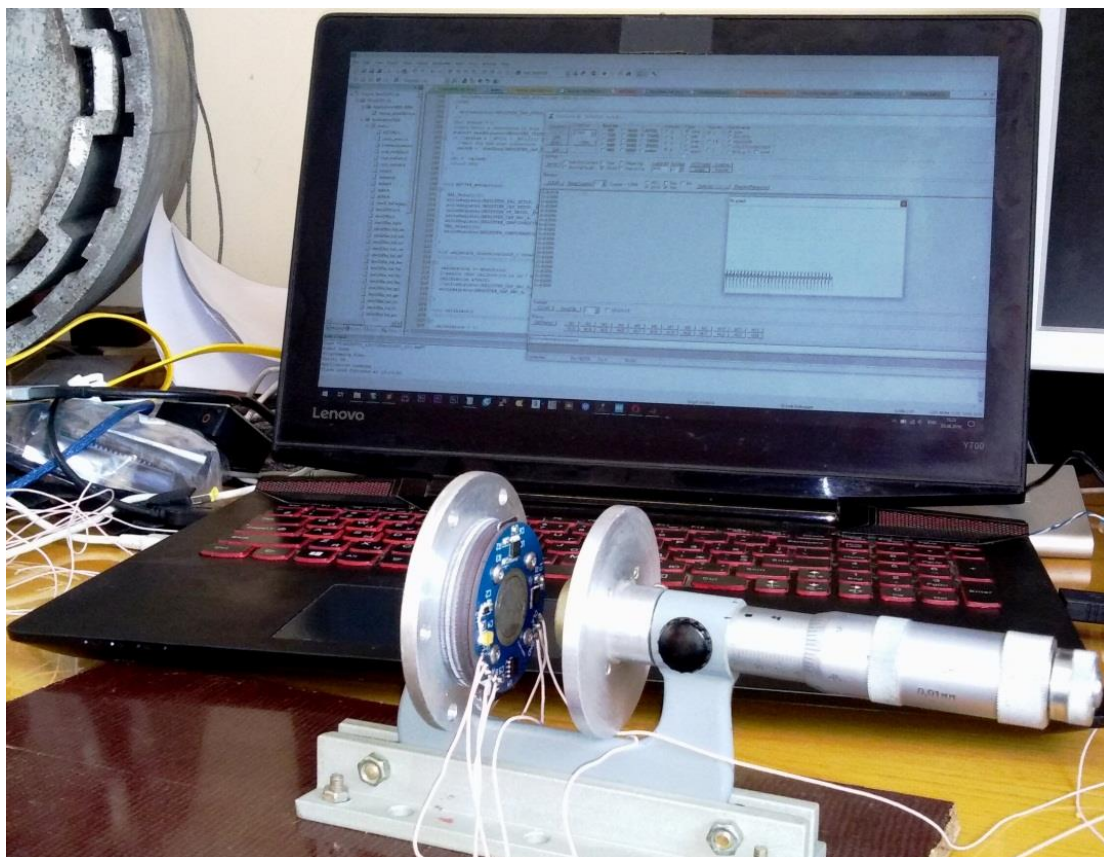


Рис. 4.1 Випробувально-вимірний стенд
первинного вимірального перетворювача зусилля пресування

Результати дослідження роботоздатність сенсора під час експериментальних досліджень залежності значення ємності від відстані до заземленої поверхні $C_{34} = f(d_x)$ наведені в таблиці 4.1, де: C_{CL_P} результат під час прямої зміни зазору d_x та C_{CL_Z} – при зворотній зміні зазору d_x , а також їх середня величина ємності $C_{CL_C} = (C_{CL_P} + C_{CL_Z}) / 2$. Результати отримані з осередненням вимірювання зі 100 однократних вимірювань в кожній точці.

Результати випробувань ємнісного сенсора

d_X , мм	0,01	0,03	0,05		0,08	0,10	0,13	0,15
C_{CL_P} , 10^{-15} Ф	7,95	6,97	6,355		5,553	5,14	4,63	4,32
C_{CL_Z} , 10^{-15} Ф	7,84	7,11	6,389		5,756	5,12	4,71	4,31
C_{CL_C} , 10^{-15} Ф	7,89	7,04	6,372		5,654	5,13	4,67	4,31
d_X , мм	0,18	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30	0,33	0,35
C_{CL_P} , 10^{-15} Ф	3,95	3,76	3,442	3,249	3,004	2,84	2,62	2,49
C_{CL_Z} , 10^{-15} Ф	3,98	3,66	3,407	3,160	2,979	2,8	2,64	2,49
C_{CL_C} , 10^{-15} Ф	3,96	3,71	3,424	3,205	2,991	2,82	2,63	2,49
d_X , мм	0,38	0,40	0,43	0,45	0,48		0,50	
C_{CL_P} , 10^{-15} Ф	2,32	2,23	2,0842	2,0026	1,8888		1,8161	
C_{CL_Z} , 10^{-15} Ф	2,36	2,24	2,1309	2,0248	1,9205		1,8161	
C_{CL_C} , 10^{-15} Ф	2,34	2,23	2,1076	2,0137	1,9046		1,8161	

Отримані результати підтверджують роботоздатність макетного зразка ємнісного сенсора зусиль та можливість розробки автоматизованої системи контролю монолітності (якості пресування) осердя статора під час його пресування на етапі виготовлення. Це підтверджує можливість застосування ємнісного сенсора з концентричними плоскопаралельними електродами для систем контролю тиску пресування осердя статора потужних генераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300 при їх пресуванні на етапі складання.

4.2 Дослідження вторинного вимірювального перетворювача

4.2.1 Вплив магнітного поля на стабільність функціонування вторинного вимірювального перетворювача «ємність-код»

Розроблені засоби контролю монолітності осердя статора можуть бути використанні не тільки під час виробництва осердя статора, але й під час його

випробувань на заводі виробнику та експлуатації на станціях. Однією із таких систем є система вимірювача зусиль в стяжних призмах під час експлуатації ТГ. В цій системі може використовуватися ємнісний сенсор, а вторинний вимірювальний перетворювач та засоби формування та передачі інформаційних сигналів знаходяться на призмі під стяжною гайкою, і піддаються впливу сильних магнітних полів промислової частоти. Для оцінки впливу магнітного поля промислової частоти на вторинний вимірювальний перетворювач "ємність-код", створений на базі CDC конвертора AD7745, було застосовано спеціально розроблений стенд, структурна схема якого представлена на рис. 4.2.

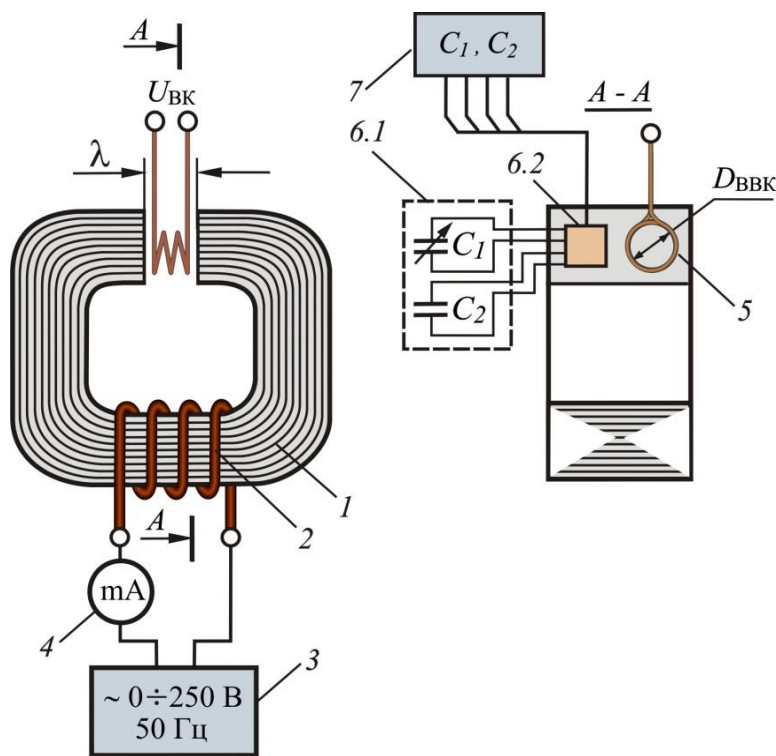


Рис. 4.2 Схема випробувань магнітного поля на ВВП

Вимірювач призначений задля забезпечення перетворення ємність-код напівдиференціального ємнісного сенсора зусиль, у якого C_1 – ємність змінного конденсатора, а C_2 – ємність постійного.

Загальний вид створеного стенду для випробувань магнітного поля на ВВП представлено на рис 4.3.



Рис. 4.3 Стенд для проведення випробувань впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування перетворювача "ємність-код"

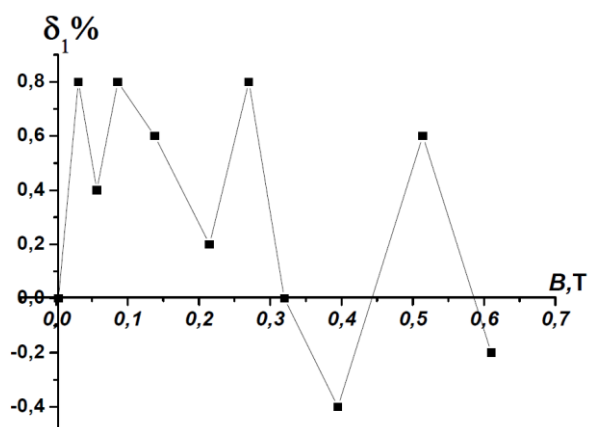
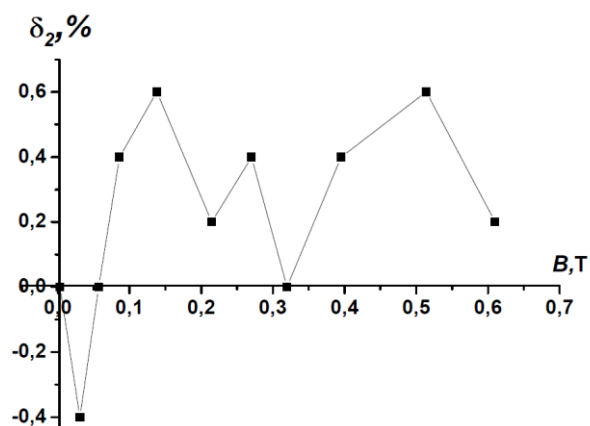
Стенд складається з осердя 1, котушки 2, джерела живлення 3 і вимірювача сили струму 4. За подачі змінної напруги на котушку 2 в повітряному зазорі λ осердя 1 створювалося змінне магнітне поле з індукцією B_λ , яке викликає Е.Р.С. в спеціальній вимірювальній котушці 5, також розміщеній в зазорі λ . Вимірювач 6.2 розміщувався в зазорі поруч з котушкою 5, а сенсор 6.1 знаходився поза межами зазору λ , і на нього не було впливу магнітного поля. Відлік показань вимірювача (C_1, C_2) здійснювався за допомогою пристрою індикації 7. Загальний час впливу магнітного поля (від його мінімального до максимального значення) на вимірювач 6.2 склав 30 хв.

В розрахунках використовувалися дані, отримані під час дослідження мікроелектронних компонентів вторинного вимірювального перетворювача.

Результати випробувань наведено в таблиці 4.2, відповідно на рис. 4.4 та рис. 4.5 приведено графіки відносної похибки ємності C_1 та C_2 , зумовленою впливом магнітного поля.

Результати випробувань

$I, \text{мА}$	10	10 0	200	310	510	800	100 0	1200	1500	2000	2430
$U_{BK}, \text{мВ}$	0,9	8,2	15,3	22,9	36,9	57,5	71,2	85,4	105, 5	137, 3	163, 0
$B_\lambda, \text{Т}$	0,0 03	0,03 1	0,05 7	0,08 6	0,13 8	0,21 5	0,27	0,32 0	0,39 5	0,51 4	0,61 0
$C_1, \text{пФ}$	24, 7	24,5	24,6	24,5	24,5 5	24,6 5	24,5	24,7	24,8 5	24,5 5	24,7 5
$\delta_1, \%$	0	0,8	0,4	0,8	0,6	0,2	0,8	0	-0,4	0,6	-0,2
$C_2, \text{пФ}$	24, 7	24,8	24,7 0	24,6	24,5 5	24,6 5	24,6	24,7	24,6	24,5 5	24,6 5
$\delta_2, \%$	0	-0,4	0	0,4	0,6	0,2	0,4	0	0,4	0,6	0,2

Рис. 4.4 Графік відносної похибки вимірювання ємності C_1 , зумовлена впливом магнітного поляРис. 4.5 Графік відносної похибки вимірювання ємності C_2 , зумовленої впливом магнітного поля

Випробування вторинного вимірювального перетворювача на основі конвертора CDC типу AD7745 стосовно впливу індукції B_λ магнітного поля промислової частоти величиною до 0,61 Т показали, що дія поля викликає незначне відносне відхилення вимірюваних величин: ємності $C_1 - 0,8\%$ і ємності $C_2 - 0,6\%$. Це відхилення може бути враховано програмно на основі лінеаризації функції перетворення $N = f(C)$ з урахуванням значення індукції B_λ , що діє в момент вимірювання. Таке врахування може бути організоване за умови використання одного із каналів конвертора CDC типу AD7745 для вимірювання напруги на виході спеціальної каліброваної вимірювальної котушки, яка в даному випадку використовується як вимірювач індукції B_λ магнітного поля.

4.2.2 Вплив магнітного поля на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6

При проведенні випробувань мікроконтролера STM32F051K8T6 проводилося зовнішнє тестування, що складалося із тестування: типових арифметичних операцій в ядрі мікроконтролера, роботи оперативного запам'ятовуючого пристрою, що входить до складу мікроконтролера та операцій із передачі даних по стандартному протоколу UART у відповідності до вимог [87-89].

Випробувальний макет 6 містить мікроконтролер STM32F051K8T6, що розроблений на основі 32-розрядного процесора на ядрі ARM. Мікроконтролер STM32F051K8T6 має наступні характеристики: об'єм вбудованої пам'яті становить 64 кБ Flash-пам'яті і 8Кб ОЗУ. Мікросхема мікроконтролера виконана в 32 вивідному корпусі LQFP для поверхневого монтажу. Всі лінії портів мікроконтролера виведені на роз'єми, розташовані по периметру плати (рис. 4.6) та є доступними з обох сторін. Для живлення мікроконтролера використовувалася напруга 3.3В.

Блок-схема макету вимірювального каналу системи, з мікроконтролером 6 (STM32F051K8T6), що розміщувався в зазорі поруч з вимірювальною котушкою 5 представлено на рис. 4.6. Контроль за виконанням зовнішнього тестування

проводився за допомогою системи контролю та діагностування (IBC) 3 та компаратора кодів (КК) 7.

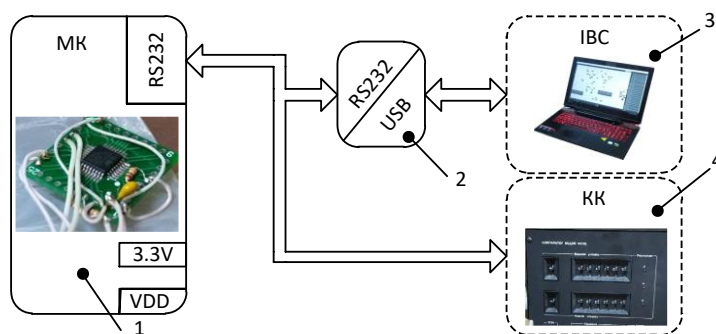


Рис. 4.6 Блок схема частини інформаційно-вимірювального каналу системи контролю

Блок-схема програмного забезпечення верхнього рівня, що була розроблена для взаємодії макету та інформаційно-вимірювальної системи складеться з таких основних частин (рис. 4.6): мікроконтролер (МК) 1 типу "STM32F051K8T6", мікросхема 2 перетворювач інтерфейсів "USBtoUART" типу "HC340G" та інформаційно-вимірювальна система (IBC), в якості якої використано персональний комп'ютер 3 з відповідним програмно-математичним забезпеченням або компаратор кодів Ф2102 (КК) 4.

У випадку використання IBC при тестуванні застосовувалось спеціально розроблене програмне забезпечення за допомогою мови візуального програмування. Блок-діаграма розробленого програмного забезпечення приведена на рис. 4.7.

На рис. 4.7 для блоків прийняті наступні позначення: 1 – "open" – ініціалізація послідовних портів UART, до якого підключено перетворювач інтерфейсів "USBtoUART" типу "HC340G"; 2 – "print" – пошук та вивід списку послідовних портів UART активних в IBC; 3 – формування послідовності даних, що передаються на обробку в МК; 4 – отримана послідовність даних з МК; append – блок запису результатів тестування в кінець файлу; clear – очистка файлу від попередніх результатів тестування; close – закриття послідовного порту UART; counter – лічильник імпульсів; loadband – ініціалізація початкових параметрів

програмного забезпечення; open – відкриття текстового редактору; print – вивід отриманої послідовності тестових даних в консоль; print.diff – вивід в консоль повідомлення про помилку; qmetro – генератор тактових імпульсів, синхронізований з частотою процесору IBC; serial– блок роботи з послідовним портом UART; text – блок роботи з текстовим файлом; wclose – закриття текстового редактору; zl.group – блок групування вхідних даних в масив; zl.unique – блок порівняння даних переданої та прийнятої послідовності, формування контрольної суми.

Схему алгоритму програмного забезпечення представлено на рис. 4.8.

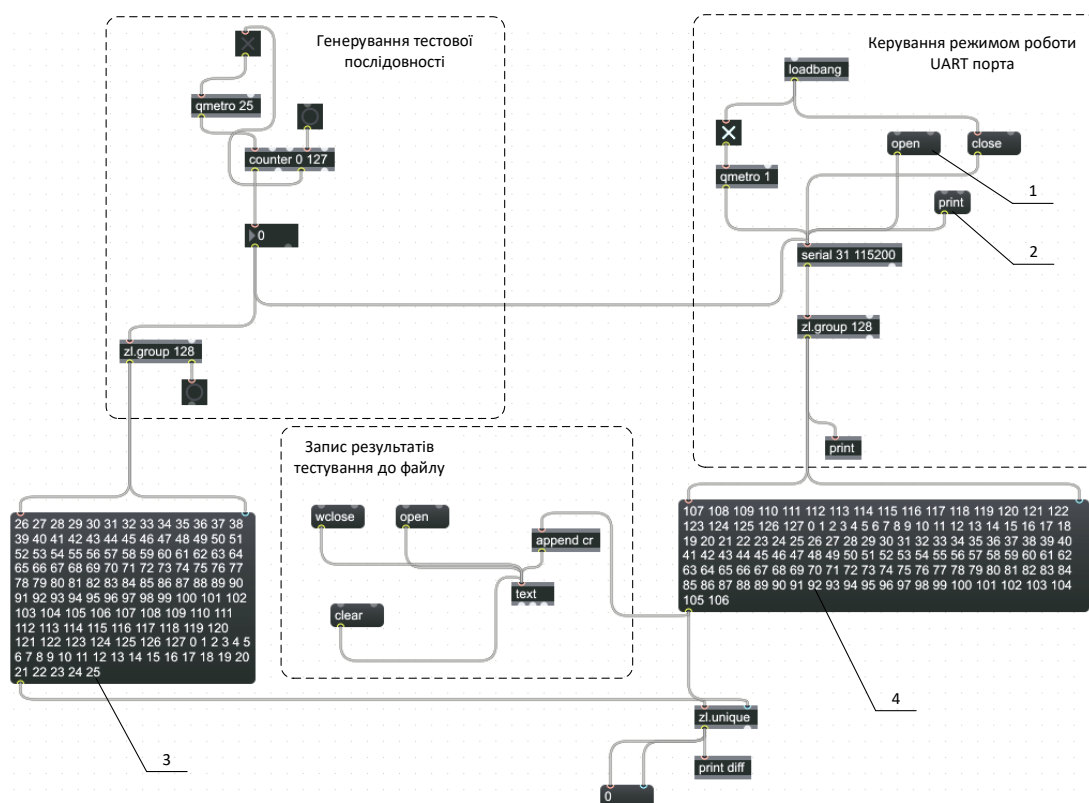


Рис. 4.7 Блок-діаграма програмного забезпечення для проведення та відображення результатів тестування

Відповідно до розробленого алгоритму сформовані дані в IBC (блок 3 на рис. 4.7) у вигляді кодів подаються на перетворювач інтерфейсу 2 (рис.4.7), де перетворюється в послідовний код типу NRZ. Далі з виходу перетворювача інтерфейсу 2 (рис. 4.6) коди подаються в МК 1 (рис. 4.6), що розміщений на стенді.

МК 1 після отримання повного масиву даних P_TX, формує масив даних, що подається на вхід перетворювача інтерфейсу 2 (рис. 4.7).

З виходу інтерфейсу масив даних передається до ІВС (блок 4, рис. 4.8) де заноситься в масив P_RX. Далі в ІВС проводиться послідовне посимвольне порівняння кожного елементу масиву P_TX з відповідним елементом масиву P_RX з метою виявлення помилки обміну даних. У разі виявлення неспівпадіння кодів виводиться повідомлення про помилку в передачі даних та відбувається запис у файл елементу масиву, що відрізняється від елементів масиву P_TX та продовжується тестування. За відсутності помилки в передачі даних, тестування проводиться автоматично 100 циклів, з метою зменшення ймовірності отримання випадкового результату тестування МК на заданому значенні індукцій магнітного поля в $\sqrt{n}$ раз, де n – кількість повторів.

У випадку використання компараторів кодів КК при тестуванні МК тестування проходить за алгоритмом, представленим на рис. 4.9. Алгоритм тестування за допомогою КК є аналогічним розглянутому вище, але має свої відмінності. У випадку використання КК завдання коду для тестування відбувається в ручному режимі за допомогою спеціальних тумблерів, з подальшим відправленням коду на МК та отримання опрацьованого коду. Далі відбувається автоматичне порівняння відправленого та отриманого кодів. Цикл із автоматичним порівнянням повторюється 99 разів для зменшення ймовірності отримання випадкового результату тестування МК на заданому значенні індукцій магнітного поля. Завдання коду здійснюється у діапазоні від значення 0000 0000 до 1111 1111 у бінарному коді, з кроком в один біт. У разі неспівпадіння кодів програма тестування завершується, як і у випадку проходження коду 1111 1111.

Випробування проводилося шляхом тестування мікроконтролера 1 (STM32F051K8T6) під час в зміни індукції B_d магнітного поля від 0 до 0,67 Т за алгоритмом приведеним на рис.4.8. Загальний час впливу магнітного поля для одного вимірювання складав до 60 хв.

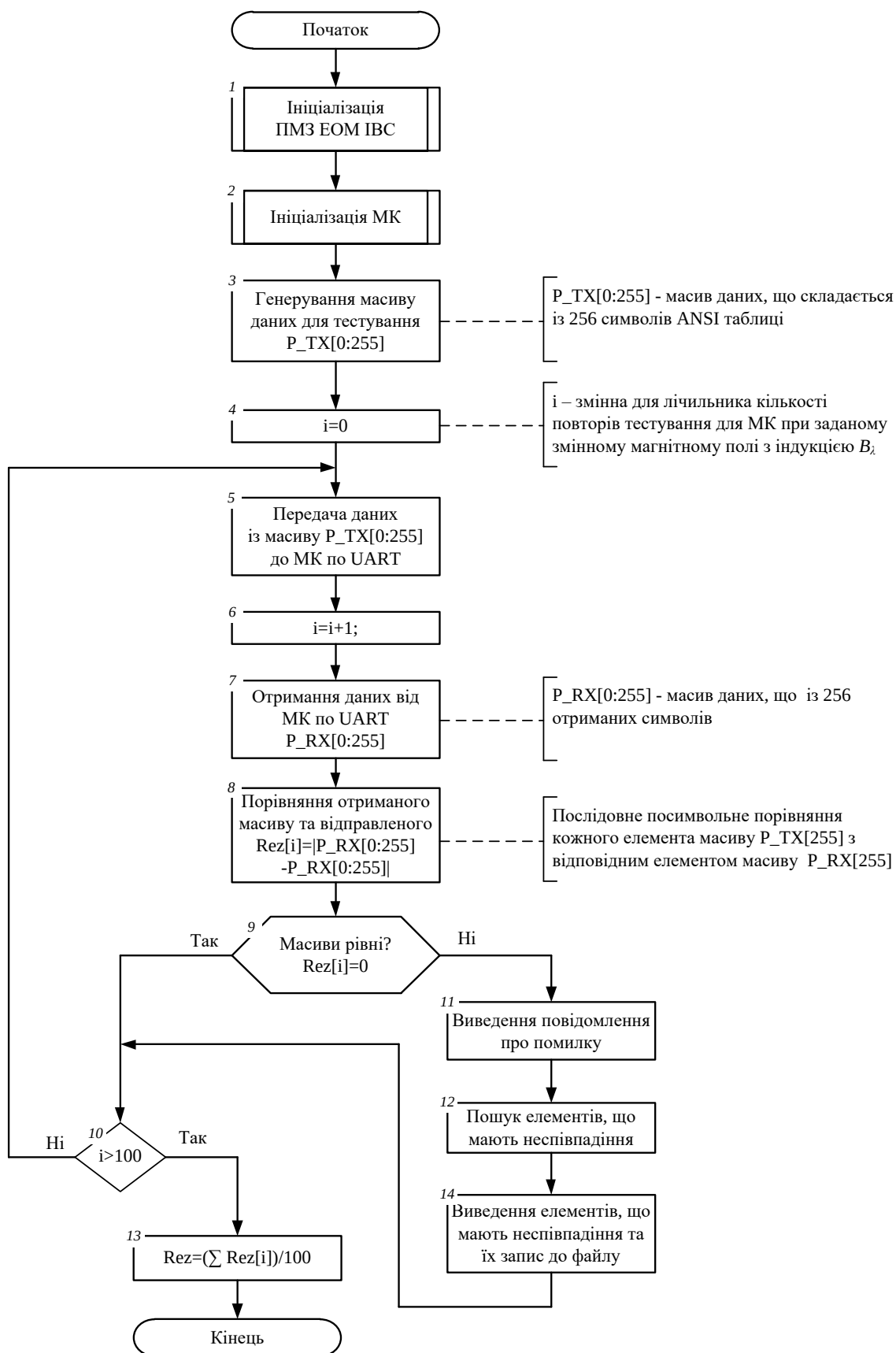
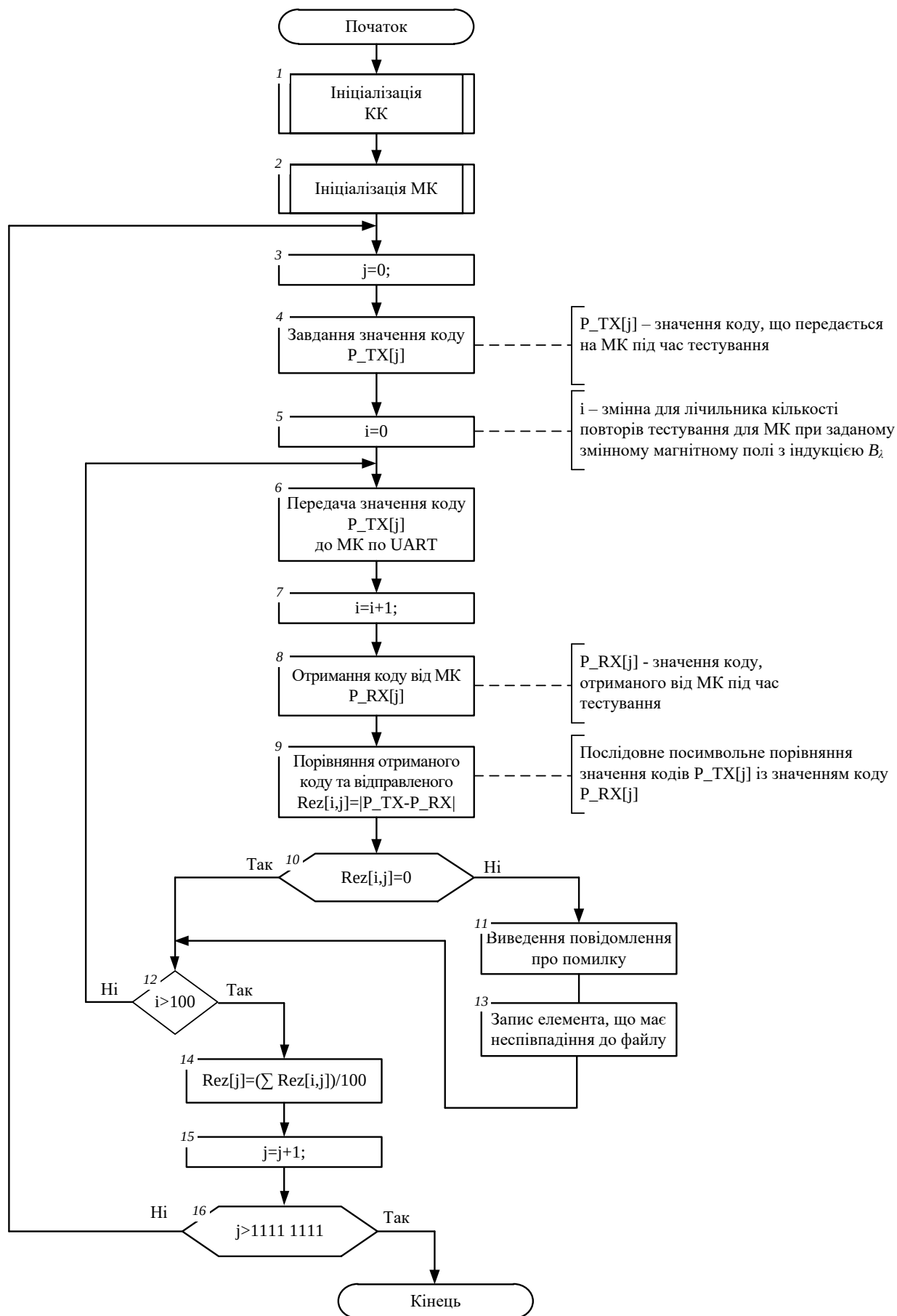


Рис. 4.8 Алгоритм випробування



Результати тестування **Rez** при використанні ІВС для прямої зміни значення індукції $B_{\lambda\text{П}}$ магнітного поля від 0 до 0,683 Т та зворотної зміни значення індукції $B_{\lambda\text{З}}$ магнітного поля наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати випробувань

За прямої зміни значення $B_{\lambda\text{П}}$										
$B_{\lambda\text{П}}, \text{T}$	0,061	0,100	0,124	0,154	0,187	0,218	0,286	0,298	0,328	0,364
Rez	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$B_{\lambda\text{П}}, \text{T}$	0,391	0,427	0,451	0,481	0,514	0,544	0,571	0,604	0,634	0,685
Rez	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
За зворотної зміни значення $B_{\lambda\text{З}}$										
$B_{\lambda\text{З}}, \text{T}$	0,631	0,604	0,574	0,541	0,487	0,454	0,427	0,391	0,364	0,334
Rez	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$B_{\lambda\text{З}}, \text{T}$	0,301	0,271	0,238	0,217	0,184	0,154	0,151	0,118	0,085	0,061
Rez	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Результати тестування **Rez** при використанні КК для прямої зміни значення індукції $B_{\lambda\text{П}}$ магнітного поля від 0 до 0,683 Т та зворотної зміни значення індукції $B_{\lambda\text{З}}$ магнітного поля наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати випробувань при використанні компараторів кодів

За прямої зміни значення $B_{\lambda\text{П}}$										
$B_{\lambda\text{П}}, \text{T}$	0,061	0,100	0,124	0,154	0,187	0,218	0,286	0,298	0,328	0,364
Rez[j]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$B_{\lambda\text{П}}, \text{T}$	0,391	0,427	0,451	0,481	0,514	0,544	0,571	0,604	0,634	0,685
Rez[j]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
За зворотної зміни значення $B_{\lambda\text{З}}$										
$B_{\lambda\text{З}}, \text{T}$	0,631	0,604	0,574	0,541	0,487	0,454	0,427	0,391	0,364	0,334
Rez[j]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$B_{\lambda\text{З}}, \text{T}$	0,301	0,271	0,238	0,217	0,184	0,154	0,151	0,118	0,085	0,061
Rez[j]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Як видно з таблиці 4.3 та таблиці 4.4, магнітне поле із величиною магнітної індукції від 0,1 до 0,61Т не впливає на стабільність функціонування 32 розрядного

мікроконтролера STM32F051K8T6 серії Cortex-M0, що дозволяє його використати під час створення автоматизованих систем контролю пресування осердя статора.

Отримані результати:

- підтверджують можливість застосування 32 розрядного мікроконтролера STM32F051K8T6 серії Cortex-M0 в структурі систем контролю пресування осердя статора потужних генераторів під час випробувань та експлуатації під дією на них магнітного поля промислової частоти від 0,1 до 0,61 Т;
- продемонстрували, що внесення мікроконтролера STM32F051K8T6 серії Cortex-M0 в магнітне поле з величиною магнітної індукції від 0,1 до 0,61 Т його функціонування відповідає критерію А;
- дозволяють встановлювати граничнодопустимі рівні завадостійкості до магнітного поля промислової частоти, за яких забезпечується стабільність функціонування комп'ютеризованих вимірювачів контрольно-діагностичних параметрів електрообладнання безпосередньо на електрогенеруючих об'єктах за критерієм А в тому числі і АЕС.

4.3 Результати досліджень експериментального зразку вимірювальної комірки

З метою визначення технічних характеристик вимірювальної комірки була розроблено та виготовлено експериментальний зразок вимірювальної комірки у відповідності із рекомендаціями отриманими під час проведених натурних випробувань. На рис. 4.10. приведено зовнішній вигляд експериментального зразку вимірювальної комірки. На рис. 4.11 представлено зовнішній вигляд силосприймаючого елементу комірки в зібраному вигляді, а на рис. 4.12 наведено зовнішній вигляд виготовлених елементів вимірювальної комірки, а саме спеціальної вимірювальної мембрани, проставочного кільця, плати сенсору та днища.



Рис. 4.10 Вимірювальна комірка



Рис. 4.11 Зібраний силосприймаючий елемент комірки



Рис. 4.12 Елементи вимірювальної комірки

З метою проведення експериментальних досліджень вимірювальної комірки та перевірки правильності теоретичних розрахунків для первинного та вторинного вимірювального перетворювачів з доопрацьованою структурою було створено випробувальний стенд приведений на рис. 4.13.



Рис. 4.13 Випробувальний стенд

Навантаження пресування на вимірювальну комірку задавалось за допомогою поступового додавання навантаження керамічними пластинами з кроком $0,65 \text{ кгс/см}^2$. Для забезпечення вертикального положення (в реальному випадку для комірки забезпечується спеціальне посадкове місце в додатковому натискному кільці (нижнє натискне кільце), виготовлено фрагмент моделі натискного кільця, який зображено на рис. 4.14. На рис. 4.15 наведено вимірювальну комірку з розміщеною пробою та під'єднаним вторинним вимірювальним перетворювачем до системи контролю.



Рис.4.14 Вимірювальна комірка із фрагментом моделі натискного кільця



Рис. 4.15 Вимірювальна комірка з
вторинним вимірювальним перетворювачем

Випробування продемонстрували можливість використання вимірювальної комірки для контролю тиску пресування осердя статора в автоматичному режимі. Також використання стенду та створених вимірювальних комірок дозволило

налагодити роботу програмного-алгоритмічного забезпечення, розробленого в попередніх розділах.

На рис. 4.16 наведено результати проведених вимірювань з осередненням результату вимірювання зі 100 однократних вимірювань для кожного кроку навантаження під час прямого навантаження (покрокового збільшення ваги) та зворотного навантаження для однієї комірки. Отримані експериментальні дані вказують на наявність гістерезису.

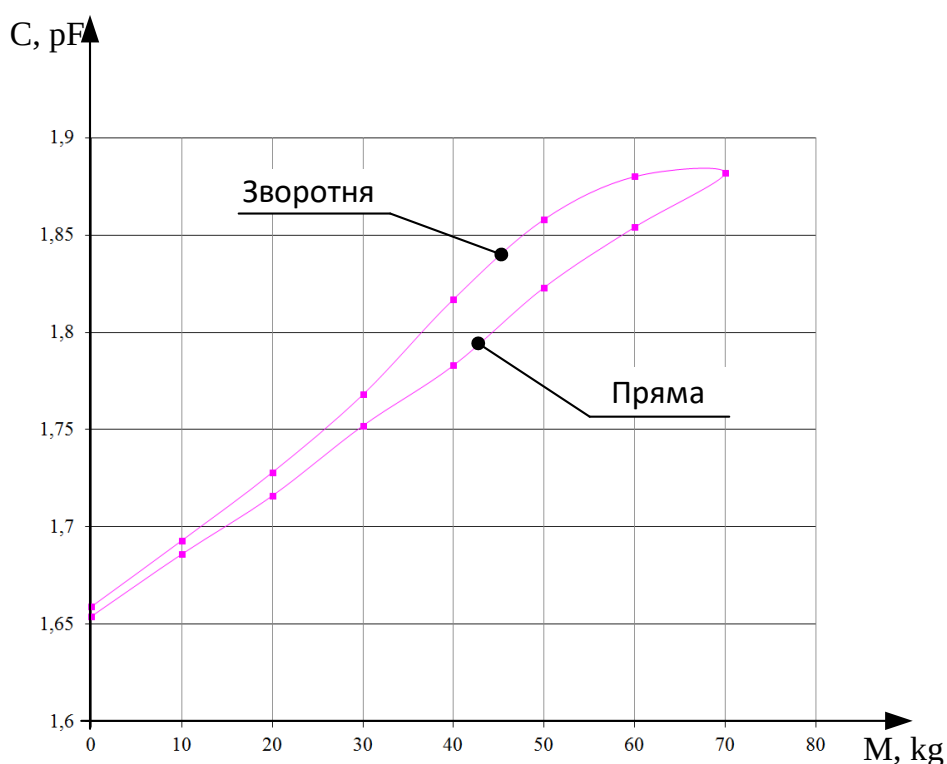


Рис. 4.16 Залежність ємності від навантаження

Для визначення можливості компенсації впливу гістерезису на залежність ємності від питомого тиску було проведено серію експериментальних випробувань (рис. 4.17). Як показали отримані результати систематичне навантаження та розвантаження мембрани стабілізує її властивості.

Серія проведених досліджень включала проведення систематичних навантажень та розвантажень мембрани з кроком $0,65 \text{ кгс/см}^2$ двічі на день протягом року. Результати досліджень зміни величини гістерезису у часі наведено

на рис. 4.18. Проведені експериментальні дослідження зразку мембрани протягом року продемонстрували поступове зменшення величини гістерезису майже до нульових значень.

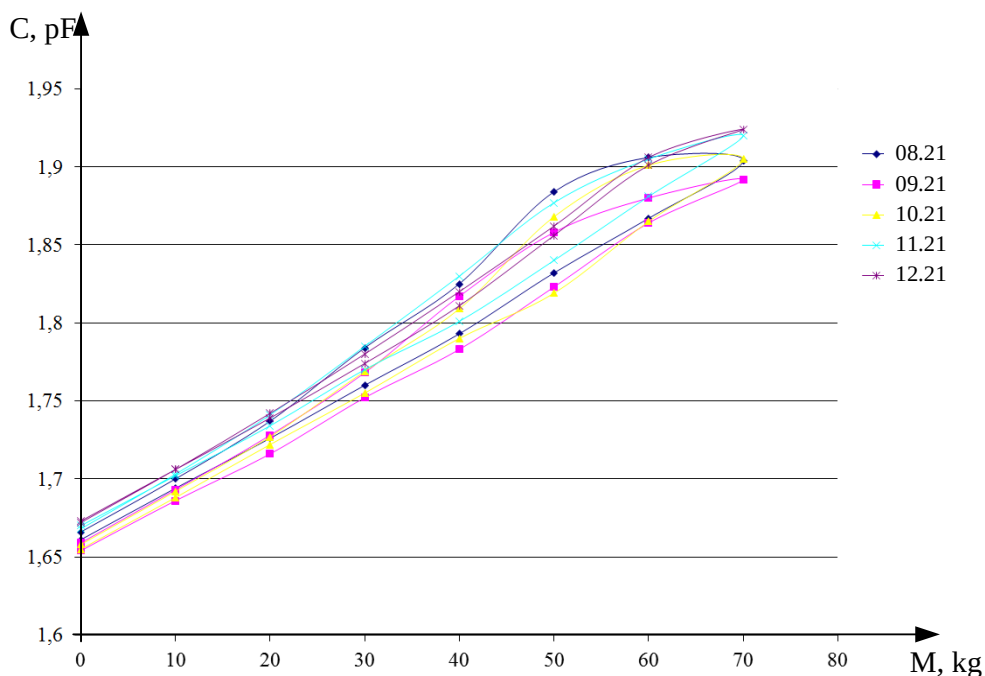


Рис. 4.17 Залежність ємності від від навантаження

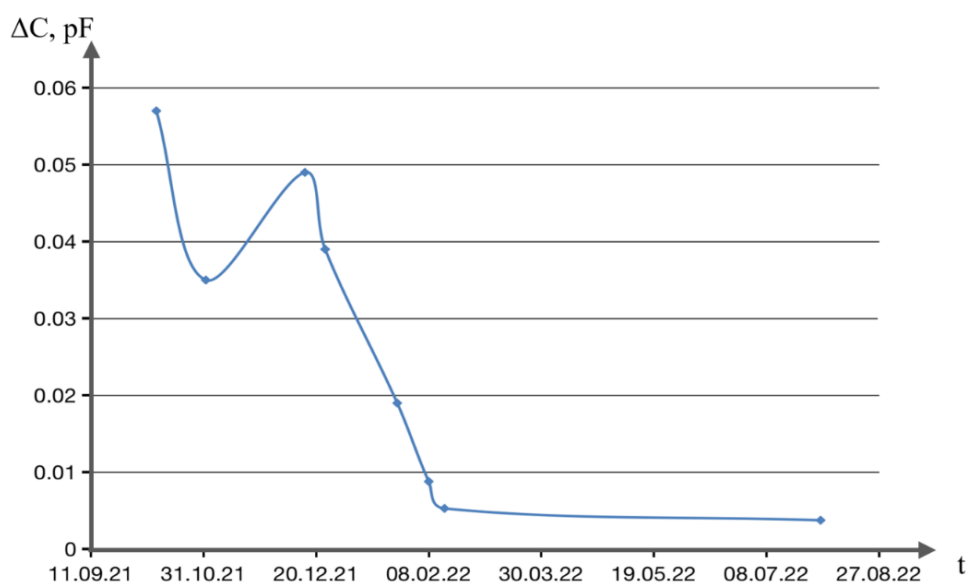


Рис. 4.18 Графік зміни величини гістерезису

Використовуючи отриману серію експериментальних даних було розраховано середнє відхилення параметрів між різними днями проведення

вимірювань тиску пресування, величина значення якого склала до 0,04 пФ або 4 кг, що може бути пов'язано із зміною параметрів середовища (температура, тиск, вологість) та їхньою дією на діелектричну проникність робочого середовища ємнісного сенсору – повітря в проміжку між площиною сенсора та мембрани.

Для визначення похибки системою контролю з вимірювальною коміркою було використано зразковий динамометр ДОСМ-3-1 та набір тарованих ваг, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 4.19.



Рис. 4.19 Зразковий динамометр ДОСМ-3-1

На рис. 4.20 наведено результати визначення залежності ємності від навантаження для вимірювальної комірки із стабілізованою мембраною протягом року. Результати проведених експериментальних досліджень показали, що середня сумарна похибка визначення тиску пресування вимірювальною коміркою складає до 3% в діапазоні вимірювання (рис. 4.21).

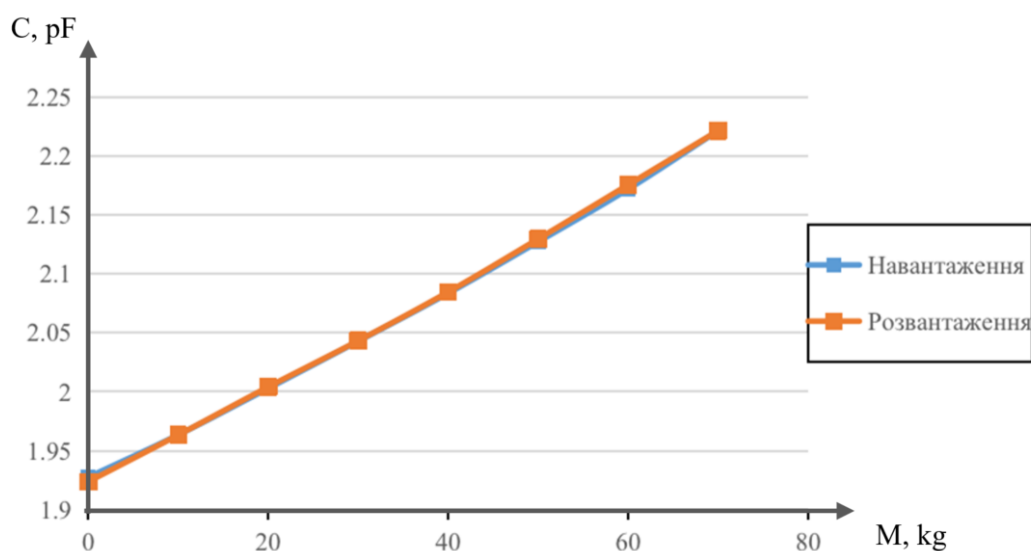


Рис. 4.20 Залежність ємності від навантаження для вимірювальної комірки із стабілізованою мембраною

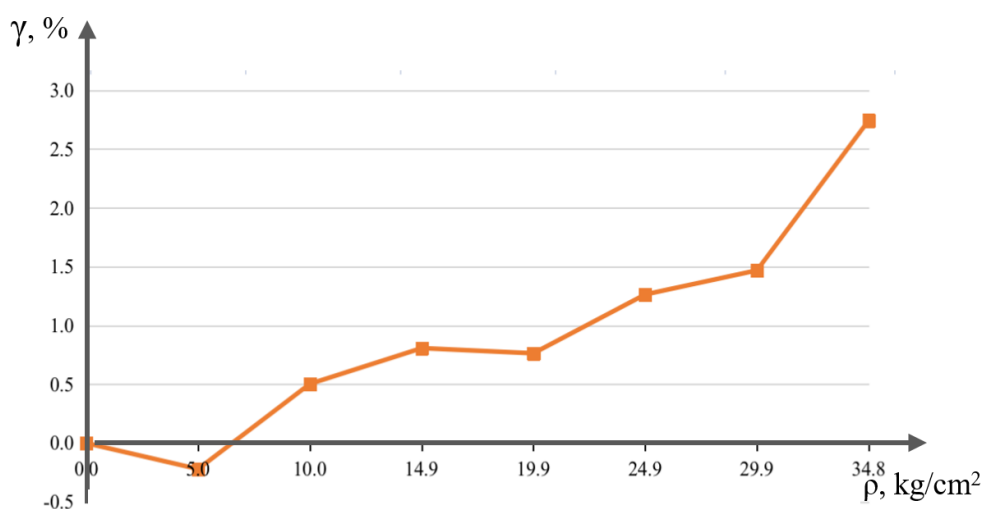


Рис. 4.21 Похибка визначення тиску пресування вимірювальною коміркою

Отримана похибка вимірювання значним чином обумовлена впливом параметрів середовища на інформативну складову ємнісного сенсора. Для її зменшення доцільним є застосування диференціальних або напівдиференціальних схем ємнісних вимірювачів. Це дозволить зменшити вплив робочого середовища на результат визначення тиску пресування, а значить покращити якість визначення дефектів під час виготовлення осердя статора.

4.4 Результати випробувань експериментального зразку системи контролю монолітності осердя статора

Для експериментальної перевірки теоретичних результатів та проведення експериментальних досліджень створених засобів контролю монолітності осердя статора ТГ типу ТВВ-200 та ТВВ-300 під час його пресування було розроблено випробувально-демонстраційний стенд.

Загальний вигляд стенду для перевірки та налагодження роботи системи контролю монолітності осердя статора під час пресування та її інформаційно-вимірювальних компонентів представлено на рис. 4.22.

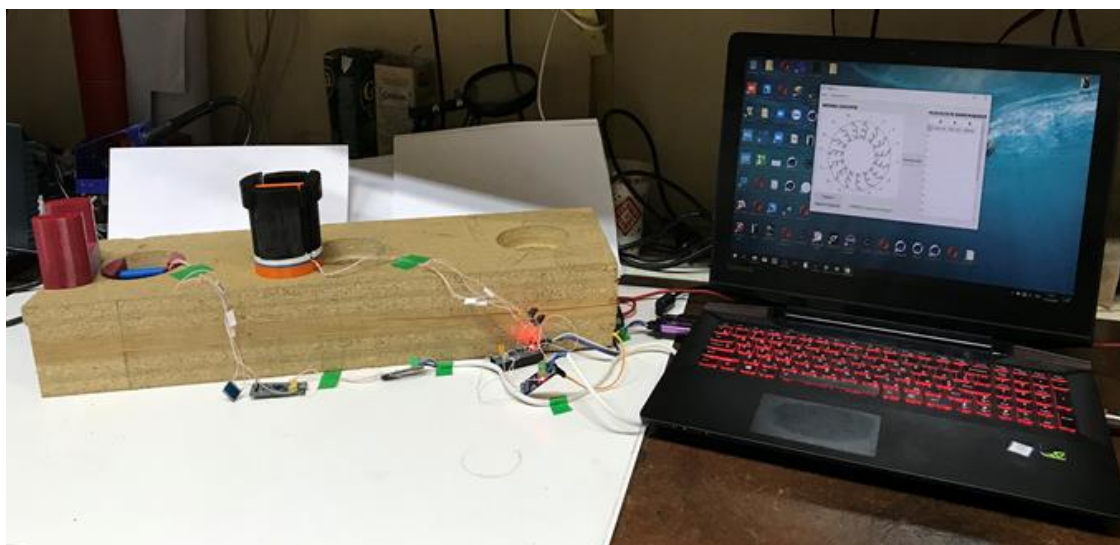


Рис. 4.22 Випробувально-вимірювальний стенд компонентів системи контролю монолітності осердя статора під час пресування

Випробування проводилися під час пресування пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ за затвердженою програмою пресування активного заліза осердя статора. Вимірювальна комірка із ємнісним сенсором та мембраною (рис. 4.23) встановлювалась замість стандартної комірки (розділ №1 рис. 1.31) на заздалегідь затверджене місце у нижньому кільці (розділ №2 рис. 2.3).



Рис. 4.23 Експериментальний зразок вимірювальної комірки

У відповідності до технологічного процесу навантаження пресування змінюється поступово від 0 т. до 600 т. для пресування перших пакетів та 680 т. для всіх інших. При цьому загальна площа нижнього кільця складає 30202,55 см². Залежність середнього зусилля на пресування осердя від навантаження приведена в табл. 4.5.

В результаті проведених досліджень була отримана характеристика зміни ємності в часі від зміни навантаження пресування. Отримана залежність приведена на рис. 4.24.

Таблиця 4.5

Залежність середнього зусилля на пресування осердя від навантаження

Найменування	маса, кг	середнє зусилля, кг/см ²
кільце верхнє	4167,5	0,14
парасолька пресу	8600	0,28
навантаження пресування	600000	19,87
навантаження пресування	68000	22,51

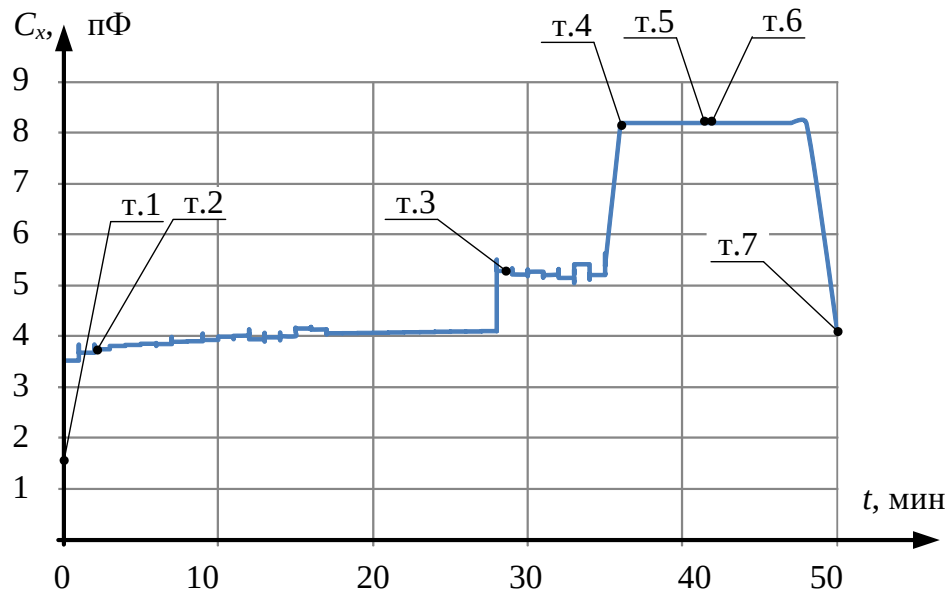
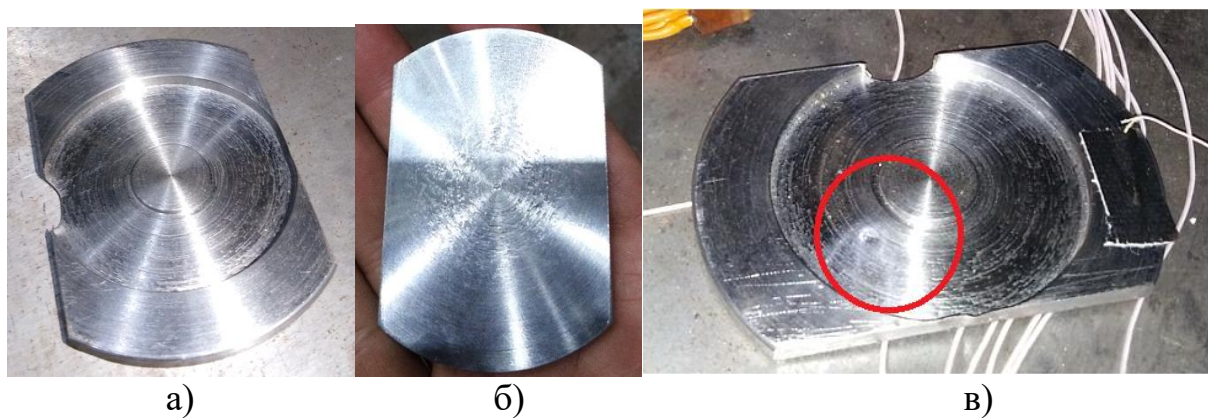


Рис. 4.24 Зміна вихідної величини вимірювача від зміни навантаження пресування в часі

На рис.4.24 прийняті наступні позначення: т.1 = 1.834 пФ – встановлення нижнього кільця із вимірювальними комірками по місцю пресування осердя статора; т.2 = 3.811 пФ – встановлення верхнього кільця масою 4167,5 кг.; т.3 = 5.509 пФ – встановлення опресовувальної парасольки пресу масою 8600 кг. – встановлена не повною масою; т.4 = 8.192 пФ – встановлення опресовувальної парасольки пресу масою 8600 кг. – повна маса; т.5 = 8.192 пФ – під'єднання пресувальної колони до опресовувальної парасольки пресу; т.6 = 8.192 пФ – пресування; т.7 = 4.100 пФ – зняття елементів пресу.

При проведенні випробувань максимальне розрахункове навантаження на вимірювальну комірку виходячи із середнього зусилля складало для: т.1 = 0; т.2 = 0,14 кг/см²; т.3 = від 0,14 кг/см² до 0,42 кг/см²; т.4 = 0,42 кг/см²; т.5 = від 0,42 кг/см²; т.6= 22,51 кг/см²; т.7 =0 кг/см².

На рис. 4.25 наведено спеціальний силосприймаючий елемент (мембрана), відповідно на рис. 4.25, а – вид знизу, б – вид зверху дослідного зразку мембрани до тестування, а на в – наведено дослідний зразок мембрани вид зверху після тестування.



а) б) в)
Рис. 4.25 Спеціальний силосприймаючий елемент (мембрана)

а, б) дослідний зразок мембрани від знизу та зверху до тестування;
в) дослідний зразок мембрани від зверху після тестування

В результаті сповзання проби за межі жорсткого центру мембрани виникло нерівномірне навантаження та деформація мембрани. Деформація, що виникла в свою чергу призвела до похибки вимірювання ступеню зусилля пресування сенсором та виходом сенсора за діапазон вимірювання (т.4-т.6).

Після зняття всіх елементів пресу мембрана в деякій мірі відновила форму, що засвідчують показання отримані в т.7. Результати отримані в т.3 (рис. 4.24) демонструють пластичну деформацію проби виготовленої із листа ДПРНХ 3,0 СЗ (свинцю). На рис. 4.26 зображено динаміку деформації проби, яка є залежністю ємності C_x від зміни (деформації) проби отриманої в т.3

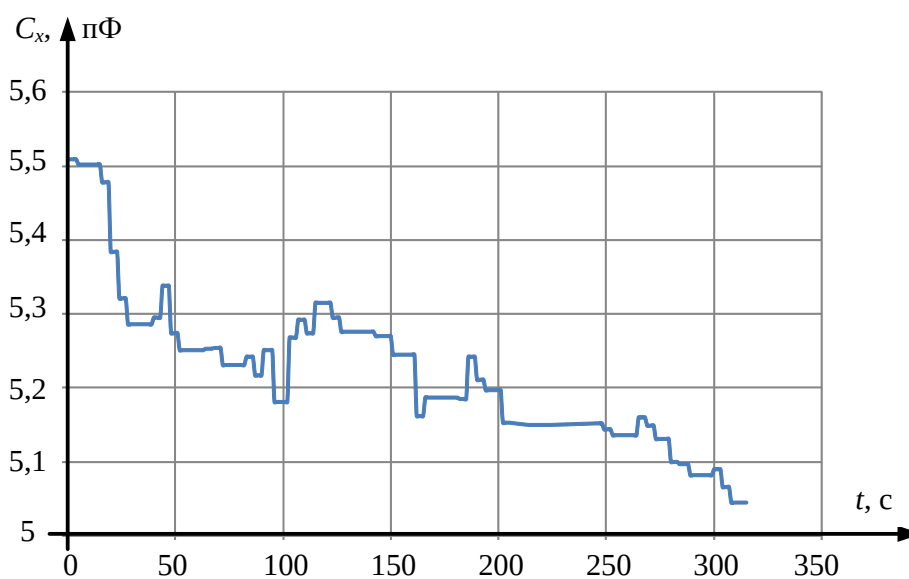


Рис. 4.26 Залежність ємності від зміни (деформації) проби отриманої в т.3

За результатами випробувань було визначено необхідність доопрацювання, як конструкції вимірювальної комірки та електродної частини ємнісного сенсору контролю зусилля пресування, так і розробки елемента для кріплення проби та недопущення її сповзання підчас пресування з центру мембрани. Можливий варіант недопущення сповзання проби підчас пресування з центру мембрани - є використання спеціального фіксуючого елемента.

На рис. 4.27,а приведено CAD-модель стандартної вимірювальної комірки із фіксуючим елементом для проби без встановленої втулки, на якому: 1 – стакан; 4 – проба; 6 – палець; 7 – фіксуючий елемент. На рис. 4.27, б загальний вигляд фіксуючого елемента. Даний варіант із застосуванням фіксуючого елемента є можливим для використання також і в вимірювальній комірці, що використовувалась при натурних експериментальних дослідженнях (рис. 4.27), а також для доопрацьованої вимірювальної комірки (рис. 4.27).

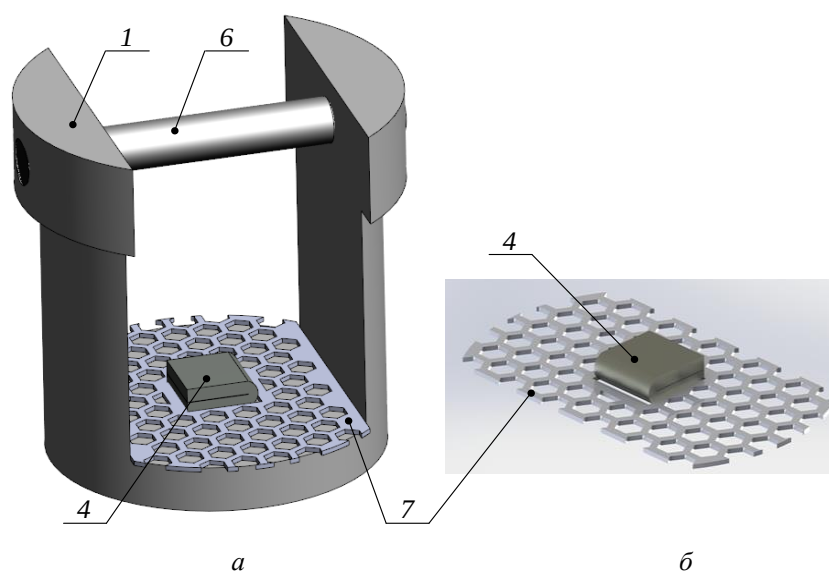


Рис. 4.27 CAD-модель стандартної вимірювальної комірки із фіксуючим елементом для проби без встановленої втулки

а) Розташування в комірці б) Загальний вигляд

Варіантом автоматизації вимірювань зусилля пресування та заміни механічної вимірювальної комірки є запропонований варіант автоматизованої вимірювальної комірки із описом принципу роботи від ІЕД НАНУ. В результаті розгляду варіанту було запропоновано в якості доопрацювання днища автоматизованої

вимірювальної комірки, шляхом його розбиття на два складових елементи кільце та днище (рис. 4.28). На рис. 4.28 приведена схема доопрацювання днища, на якому: 1.1 – днище; 1.2 – кільце. Доопрацювання призначені для покращення точності виготовлення вимірювальної комірки, що в свою чергу дозволить зменшити вплив похибки обумовленої неточністю виготовлення елементів на результат вимірювання зусилля пресування.

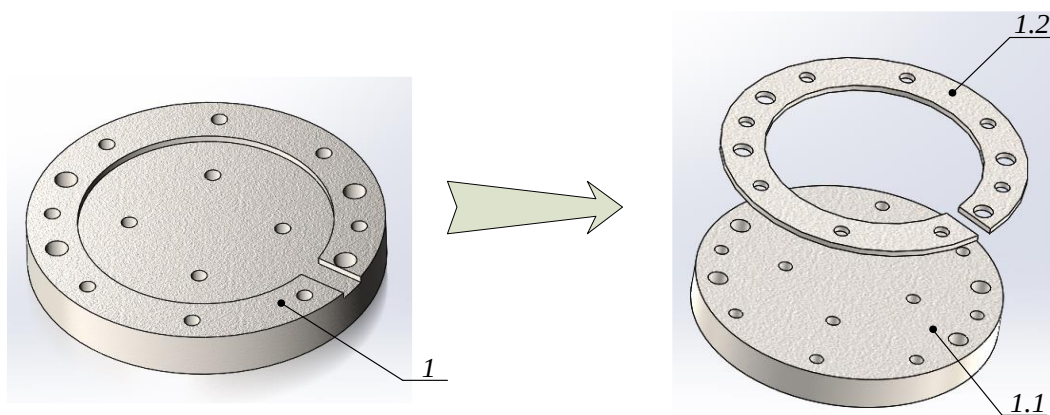


Рис. 4.28 Схема доопрацювання днища

1, 1.1 – днище; 1.2 – кільце

CAD-модель доопрацьованої розробленої автоматизованої вимірювальної комірки приведена на рис. 4.29, на якому: 1.1 – днище; 1.2 – кільце; 2 – сенсор; 3 – гвинти М3х6.36.016; 4 – мембрана; 5 – проба; 6 – гвинти М4х20х36.016; 7 – гвинти М3х12.36.016; 8 – гвинт М3х6; 9 – пластина; 10 – стойка; 11 – втулка; 12 – стойка; 13 – палець.

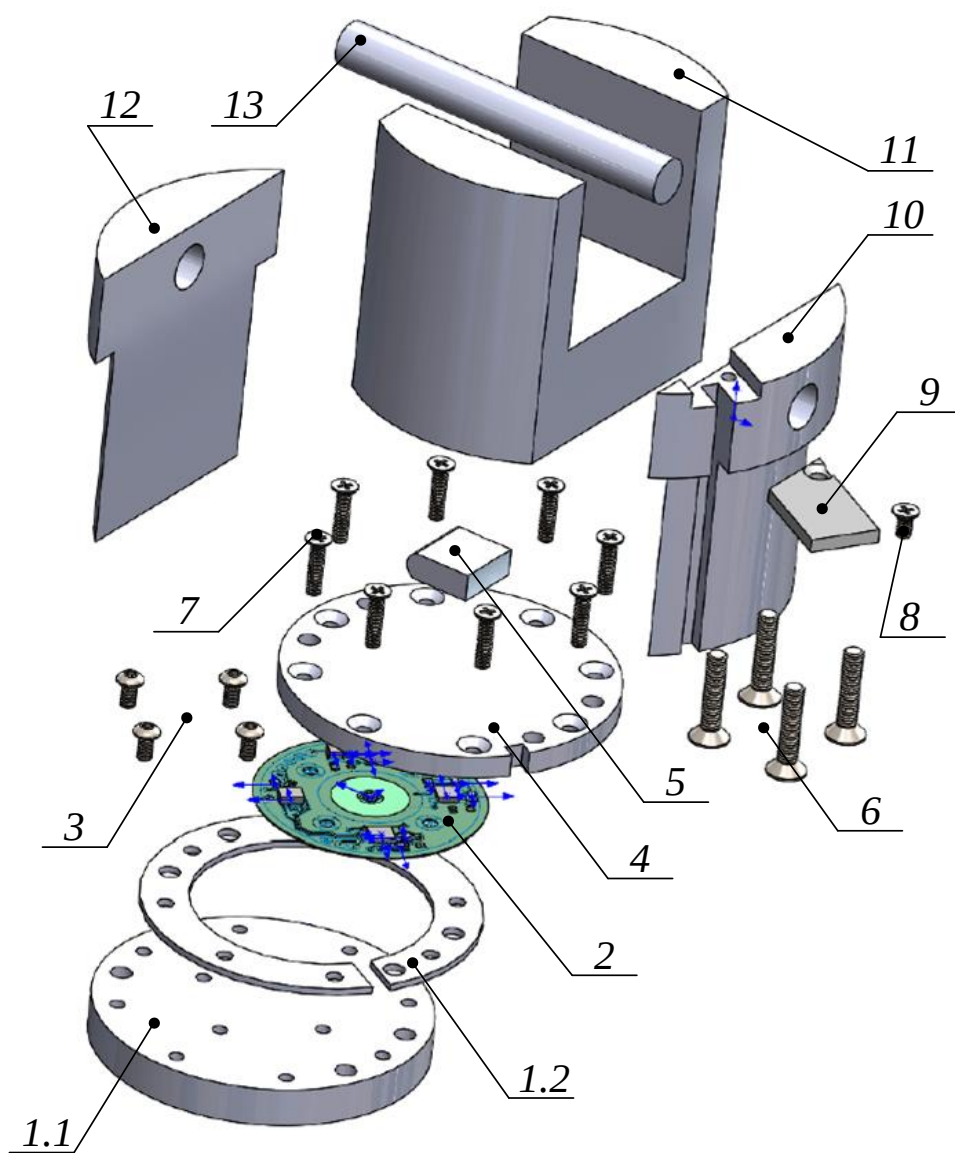


Рис. 4.29 CAD-модель доопрацьованої вимірювальної комірки
із ємнісним сенсором зусилля пресування:

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Отримані експериментальні результати з визначення функції перетворення вимірювальної комірки з ємнісним сенсором для систем автоматичного контролю монолітності (якості пресування) осердя статора потужних генераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-300 під час їх складання та виготовлення, підтверджують можливість їх практичного використання.

2. Експериментальні дослідження елементів автоматичного контролю монолітності (якості пресування) осердя статора потужних генераторів, показали можливість створення системи контролю монолітності пресування з необхідною точністю.

3. Результати експериментальних досліджень на вплив магнітного поля промислової частоти на розроблені компоненти системи показали можливість їх застосування в системі автоматизованого контролю, як під час складання та виготовлення осердя статора турбогенератора, так і під час його випробувань та експлуатації.

4. Проведені дослідження дозволили встановити граничнодопустимі рівні завадостійкості до магнітного поля промислової частоти, за яких забезпечується стабільність функціонування комп'ютеризованих вимірювачів контрольно-діагностичних параметрів електрообладнання безпосередньо на електрогенеруючих об'єктах за критерієм А в тому числі і АЕС.

5. Проведенні натурні експериментальні дослідження макетного зразку ємнісного вимірювача зусилля пресування підтвердили можливість використання ємнісного вимірювача зусилля для оперативного контролю зусилля пресування в процесі пресування пакетів активного заліза осердя статора турбогенератора

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналітичний огляд існуючих методів та засобів контролю осердя статора потужного ТГ під час складання та пресування на заводі-виробнику показав, що вони в силу різних причин не забезпечують достатньої достовірності визначення ступеню дефекту осердя (зменшення монолітності) та місця дефекту по перерізу осердя, або вимагають великих витрат часу. Також, проведений аналіз дозволив визначити оптимальні методи та засоби для реалізації системи контролю за критерієм забезпечення максимізації ефективності та завадостійкості інформаційно-вимірювальних каналів системи автоматизованого контролю якості пресування пакетів осердя статора потужного ТГ під час складання та виготовлення.

2. Розроблена узагальнена структурна схема-системи контролю відхилення від площинності торцевої поверхні осердя статора турбогенератора при складанні пакету шихтованого заліза з використанням мережі спеціалізованих інформаційно-вимірювальних каналів. Використання системи надало можливість розробити підхід до визначення якості та стану спресованості пакету осердя статора, що базується на інформації про відповідність відхилення ступеню стиснення в зоні контролю встановленому номінальному діапазону. Використання підходу забезпечує підвищення точності контролю початкового стану пресування осердя статора при його виготовленні.

3. Створено метод автоматизації контролю технологічного процесу пресування осердя статора потужного турбогенератора. В основу методу покладено автоматичне вимірювання питомого тиску пресування в N рівномірно розміщених точках торцевої поверхні осердя статора з урахуванням того, що тиск є величиною, яка обернено пропорційна величині дефекту осердя (зменшення монолітності).

4. Розроблено принципи побудови автоматизованої системи контролю стану спресованості осердя статора турбогенератора, а також її основних компонентів призначених для отримання інформаційних сигналів для ідентифікування дефекту

щільності пресування осердя. Розроблено алгоритми функціонування апаратно-програмного забезпечення автоматизованої системи контролю. Це дозволило реалізувати автоматизований метод контролю спресованості шихтованих пакетів статора шляхом застосування ємнісних сенсорів, які дозволяють проводити контроль ступеню спресованості під час пресування без зниження точності вимірювання.

5. Проведенні натурні експериментальні дослідження макетного зразку ємнісного вимірювача зусилля пресування підтвердили можливість використання ємнісного вимірювача зусилля для оперативного контролю зусилля пресування в процесі пресування пакетів активного заліза осердя статора турбогенератора.

6. Створені засоби контролю якості пресування осердя статора ТГ дозволяють забезпечити необхідний рівень метрологічного контролю виробничого процесу збирання шихтованих пакетів осердя статора ТГ та їх пресування. Наведені результати підтверджують перспективність досліджень, що дозволяють забезпечити підвищення якості та надійності роботи ТГ.

7. Розроблені ємнісні сенсори контролю тиску спресованості із ємнісним вимірювальним конденсатором застосовані під час натурних експериментальних випробувань засобів контролю якості пресування пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ.

9. Подальше використання теоретичних і практичних результатів дисертаційної роботи передбачено шляхом виготовлення експериментальних зразків вимірювачів монолітності пресування осердя статора для їх випробувань та впровадження на АТ "Українські енергетичні машини" (м. Харків).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Геллер Р.Л., Синатюк С.Л., Цветков В.А. Ретроспективный анализ и прогнозирование повреждаемости активной стали статоров турбогенераторов 200 и 300 МВт. *Электротехника*. 1987. №7. С. 29-33.
2. Счастливый Г. Г., Федоренко Г. М., Терешонков В. А., Выговский В. И. Электрические машины с жидкостным охлаждением. Киев : Наукова думка, 1989. 288 с..
3. Čerón G., Pirnat M., Boltežar M. An experimental and numerical identification of laminated structure dynamics. *Noise and Vibration Engineering (ISMA2012) and on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2012)*: Proceedings of International Conference, 17-19 September, 2012. Vol. 3. P. 3153–3165. http://past.isma-isaac.be/downloads/isma2012/papers/isma2012_0531.pdf
4. G.F. (US) Use of fiber optic sensor techniques for monitoring and diagnostics of large AC generators: pat. 20120026482 A1 United States Patent: Int. Cl. G01J5/48; Appl. No. US 13/065,842; Publ date Feb. 02, 2012.
5. Левицький А.С., Федоренко Г.М. Датчики для вимірювання зусилля пресування осердя статорів гідро- і турбогенераторів. *Гідроенергетика України*. 2009. № 4. С.35 – 39.
6. Зайцев Є. О., Левицький А. С., Панчик М. В. Особливості процесу пресування осердя статора потужного турбогенератора. *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації*: матеріали XVII міжнарод. наук.-тех. конф. молодих учених і спеціалістів, м. Кременчук, 11-12 квіт. 2019 р. Кременчук, КрНУ, 2019. С. 81–83.
7. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Фізичні процеси та їх вплив на розвиток дефектів в осерді статора потужних генераторів. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Issue: 224. P. 81–84. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20>.

8. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В. Виявлення дефектів складання осердя статора потужного турбогенератора. *Вісник Вінницького політехнічного Інституту*. 2021. № 3. С.47-53

9. Zaitsev I.O., Panchik M.V. Physical processes and their influence on the evolution of defects in the powerful generators stator core. *Actual Problems of Science and Education (APSE – 2020): Proceedings of International Conference, February 15 – 17, 2020, Budapest, Hungary*. 2020. Pp URL: <http://scaspee.com/all-materials/actual-problems-of-science-and-education-apse-2020>.

10. Patil A., Biswas S. Modeling a virtual prototype of stator core lamination assembly device. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*. 2013. Vol. 1, Issue 10. P. 32–355

11. Geddam P., Barik B. K. Developing a virtual prototype for stacking laminations in stator core of turbogenerator using robot simulation software. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering (JMSME)*. 2015. Vol. 2, No 5. P. 456–460. URL: https://mafiadoc.com/developing-a-virtual-prototype-for-stacking-_5bac3f96097c47ae4e8b45f1.html

12. Глебов И. А., Домбровский В. В., Дукштау А. А. Гидрогенераторы: справочник. Энергоиздат. 1982. 368 с.

13. Голоднова О. С., Ростик Г. В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов. *Сборник «Электросила»*. 2004. № 43. С. 56–64.

14. Грень Я. В., Роман В. І. Дослідження розповсюдження ультразвукового імпульсу в пакеті листів електротехнічної сталі. *Вісник НТУ «Львівська політехніка»*. 2011. № 707. С. 36–41.

15. Юхимчук В. Д. Технология производства электрических машин. Харьков: Тимченко, 2006. 560 с.

16. Tavner P. J., Anderson A. F. Core faults in large generators. *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 2005. Vol. 152, No 6. P. 456–460. DOI: 10.1049/ip-epa:20050102.

17. Method and apparatus for measuring compression in a stator core / Cook, James Allan; Allen, David T. (USA): pat. US7946023B2 United States: МПК H02K15/00, G01R31/28, H01F3/04; заявник і патентовласник Siemens Energy, Inc. (Orlando, USA). № US11/285834; заяв. 11.22.05; опуб. 05.24.11.

18. Kuznetsov D. V., Polyakov F. A., Shandybin M. I. Instrumental and visual inspection of turbogenerator stator cores. *Power Technology and Engineering*. 2014. Vol. 48, No 3. P. 241–248. DOI: 10.3103/S1068371215100119

19. Kuznetsov D.V. Investigation of features of localization of defects of stator core elastic suspension systems in high-power turbogenerators. *Electrical Engineering*. 2015. Vol. 86, No 10. P. 612–619.

20. Бутов А. В., Мамиконянц Л. Г., Пикульский В. А., др. Повреждаемость и контроль зубцовых зон запеченных крайних пакетов стали сердечников статоров турбогенераторов *Электрические станции*. 2001. № 5. С. 41–48.

21. Фомин Б.П., Циханович Б.Г., Виро Г.М. Технология крупного электромашиностроения. Турбогенераторы. Т. 1. Энергоатомиздат,. 1981. 303 с.

22. Пінської В. Ф., Захожаєв В. М., Шофул А. К., Левицький А.С. Контроль осердя статора потужного турбогенератора під час складання і пресування. *Гідроенергетика України*. 2020. № 1-2. С.57–59

23. Пузаков С. Е., Голоднова О. С., Ростик Г. В. и др. Справочник по ремонту турбогенераторов: справочник. ВИПКЭнерго. 2006. 724 с.

24. Штогрін О.В. Науково-технічні заходи щодо зменшення пошкоджуваності старторів потужних турбогенераторів, спричинених вібрацією в торцевих зонах : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.01/ Електр. машини і апарати. Одеса, 2015. 161 с.

25. Алексеев Б. А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов: монография.: НЦ ЭНАС, 2001. 152 с.

26. Stator core compressibility test. URL:<https://www.slideshare.net/donaldsatrianistephen/stator-core-compr-test> (дата звернення 28.02.2021).

27. Челомей В.Н. Вибрации в технике. Измерения и испытания: справочник в 6 т. Т. 5. / под ред. М. Д. Генкина.: Машиностроение, 1981. 496 с.

28. Григорьев А. В., Осотов В. Н., Ямпольский Д. А. Применение параметра поглощения энергии колебаний для контроля прессовки сердечников статоров турбогенераторов. *Электротехника*. 2004. № 11. С. 16–19.

29. Григорьев А. В., Семенов Д. Ю., Осотов В. Н., др. Исследование вибромеханических характеристик пакета электротехнической стали и возможностей их использования для контроля прессовки сердечника статора турбогенератора. *Электротехника*. 2003. № 8. С. 36–41.

30. Григорьев А.В., Осотов В.Н., Ямпольский Д.А. Способ контроля прессовки сердечника статора синхронной электрической машины : пат. 2155429: МПК H02K15/00, H02K15/02. № 99120899/09; заявл. 05.10.1999; опубл. 27.08. 2000, Бюл. № 24.

31. Грень Я.В., Роман В.І. Дослідження розповсюдження ультразвукового імпульсу в пакеті листів електротехнічної сталі. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2011. № 707 С. 36–41.

32. IEEE Std 62.2-2004. Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus. IEEE, USA, 2005.

33. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. 2020. 243 с. URL: <https://docs.dtki.ua/download/pdf/1225.943.1> (дата звернення: 01.07.2021)

34. Зайцев Е.А., Панчик М.В. Термометричні методи дослідження стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 59. С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.086>.

35. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Термометричні методи дослідження стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора. *Приладобудування: стан і перспективи*: матеріали XX міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 18 – 19 травня 2021 р. Київ, Україна, С.253.

36. Bertenshaw D. R., Smith A. C., Ho C. W., Chan T., Sasic M. Detection of stator core faults in large electrical machines. *Electric Power Applications*. 2012. Vol. 6, No 6, P. 295–301. DOI: 10.1049/iet-epa.2011.0125

37. Bertenshaw D.R. Stator core interlamination faults and their detection by electromagnetic means. *School of Electrical and Electronic Engineering*. 2014. 214 с.

38. Левицкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. *Приборы и методы измерений*. 2018. Т. 9(2) С. 121-129. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129.

39. Новик А.И., Левицкий А.С., Зайцев Е.А. Емкостный датчик усилия стягивания с компенсацией погрешности от перекоса электродов. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2016. Вип. 48. С. 126–132.

40. Левицкий А.С., Зайцев Е.О., Смирнова А. М. Пружний елемент перетворювача зусиль в стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 49. С. 32–39.

41. Slltton J. Теория метода обнаружения дефектов шихтованих сердечников. *Insight*, 1994. Vol. 36, No 4. P. 246–251.

42. Счастливый Г. Г., Федоренко Г. М., Терешонков В. А., Выговский В. И. Электрические машины с жидкостным охлаждением: монография. Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.

43. Ridley G. K. Теория и практика тестирования електромагнитного сердечника по методу детектора неидеальности. *Power Engineering Journal*. 1997. Vol. 11. No 1. P. 21–27.

44. Report. Siemens - generator stator core pressing leak prevention and height metrology project. Senior design project description. P. 5. URL: <https://isl.charlotte.edu/sites/isl.charlotte.edu/files/media/Siemens%20-%20Generator%20Stator%20Core%20Pressing%20Leak%20Prevention%20and%20Height%20Metrology%20Project.pdf> (дата звернення: 17.03.2021).

45. McDonald E. Siemens stator donut core replacement update. EPRI Turbine Generator Technology Transfer Workshop and Turbine Generator Users Group meeting. St Louis, USA. 2010. 16-17 August.

46. Lamination Manufacturing Laser Cutting. URL: <https://www.lasertechnologiesinc.com/lamination-manufacturing-laser-cutting> (дата звернення: 19.08.2021).

47. Патент України на винахід UA 125321 C2, H02K 15/02, G01L1/06. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора / Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М. В., Пінської В. Ф., Захожаєв В.М., Шофул А.К. – заявник Інститут електродинаміки НАН України. – № а2020 02912; заявл. 14.05.2020; публ. 16.02.2022. – Бюл. № 7/2022.

48. Патент України на винахід UA 125916 C2, H02K 15/02, G01L1/06. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора/ Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М. В.– заявник Інститут електродинаміки НАН України. – № а2020 03974; заявл. 14.05.2020; публ. 06.07.2022. – Бюл. № 27/2022.

49. Левицький А.С., Зайцев Є. О., Панчик М. В. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора: заявка на патент України № а 2021 03398 : МКИ H02 K 15/00.; заявл. 01.07.2020 Інститут електродинаміки НАН України.

50. Guide to the Measurement of Force. URL: http://resource.npl.co.uk/docs/science_technology/mass_force_pressure/clubs_groups/instm_c_weighing_panel/forceguide.pdf. (дата звернення: 29.11.2019).

51. Зайцев Є.О., Левицький А.С. Експериментально-теоретичні дослідження ємнісного сенсора повітряного зазору для гідрогенераторів методами регресійного аналізу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. №.2. С .35–40.

52. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В. Автоматизований пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора. *Технічна електродинаміка*. 2021. №5. С. 83-87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.083>. **Index in SCOPUS**.

53. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S. Determination of response characteristic of capacitive coplanar air gap sensor. *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017): Proceedings of the 2017 IEEE, August 29 – June 30 2017: Kiev, 2017*. P. 85-88.

54. Березниченко В. О., Зайцев Є. О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 57. С. 81–88.

55. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Bereznichenko V.O., Smyrnova A.M. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. №78 (2) :1-8. P. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80>.

56. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., Левицький А.С., Підчібій О.Є., Логвиненко І.В. Дослідження функції перетворення ємнісних сенсорів для потужних генераторів засобами комп'ютерного моделювання. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XX міжнар. наук.-практ. конф.*, 20 – 21 травня 2021 року, Київ:К.: ТОВ "Календар", 2021. С.199-202. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/tezi2021.pdf>.

57. Зайцев Є.О., Березниченко В.О., Левицький А.С., Підчібій О.Є. Використання методу скінчених елементів для реалізації моделі компланарного ємнісного сенсору. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2021. №35(111). С.84–91. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.35.111.2021.10>

58. Zaitsev Ie. Monitoring system with sensors networks: Architectural and functional design. *Aviation in the XXI-st Century: Proceedings of the Ninth World Congress*, September 22-24, 2020 Kiev, Ukraine. URL: <http://ocs.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2020/paper/viewFile/7692/6422>

59. Dan M. S. Handbook of Force Transducers: Principle and Components: монографія. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 612 p.

60. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. San Diego, CA : Academic Press, 1999. 478 p. URL: <https://www.amazon.com/Fiber-Bragg-Gratings-Optics-Photonics/dp/0124005608>. (дата звернення: 05.05.2021).

61. Sarkar S., Tarhani M., Eghbal M. K., Shadaram M. Discrimination between strain and temperature effects of a single fiber Bragg grating sensor using sidelobe power. *Journal of Applied Physics*. № 127(11). P. 114503-1–114503-8. 2020. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5139041?journalCode=jap>.

62. Масхидов В. В., Шиенок А. М., Йошин Д. В., Резников В. А. Измерение деформаций материала с помощью волоконных береговских решеток (обобщающая статья). *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016. Т. 82, № 11. С. 54–60.

63. Тиняков Ю.Н., Николаева А.С. О расчете мембран датчиков давления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2015. № 6. С. 135–142.

64. Шардаков И.Н., Кошелева Н.А., Цветков Н.А. Экспериментальный и теоретические варианты термокомпенсации волоконно-оптических датчиков деформации. URL: http://www.applied Photonics.pstu.ru/_res/fs/4396file.pdf. (дата звернення: 05.05.2021).

65. Зайцев Є. О., Левицький А.С., Березниченко В.О. Заявка на патент України, МКИ G01B7/14. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах; заявл. Інститут електродинаміки НАН України. – № а 2021 04551; заявл. 05.08.2021.

66. Неболюбов Е.Ю., Новик А.И. Электронные преобразователи для работы с емкостными датчиками (аналоговые и цифровые). *Технічна електродинаміка*. 2015. № 3. С. 67–74.

67. AD7747 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7747.pdf>. (дата звернення: 20.10.2019).

68. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи : монография. КомпьютерПресс, 1998. 302 с.

69. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети: уч. пособ. 2012. 960 с.

70. Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Засоби забезпечення надійності експлуатації генеруючого обладнання. *Сучасні проблеми машинобудування-2021: Збірник матеріалів конференції молодих вчених та спеціалістів з нагоди 145-річчя з дня народження академіка НАН України Г. Ф. Проскури та 95-річчю з дня народження академіка НАН України В.Л. Рвачова*, 30 червня 2021 р, С.23.

71. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Етапи перетворення інформації в системах контролю пресування елементів гідроагрегатів, *Відновлювана енергетика та*

енергоефективність у XXI столітті: матеріали XIX міжнар. наук.-практ. конф., 14 – 15 травня 2020 року, Київ: К.: ТОВ "Календар", 2020. С.513-516.

72. Зайцев Є.О. Реалізація гібридних волоконно-оптичних вимірювачів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали XIX міжнар. наук.-техн. конф.*, 14-17 червня 2019 р., м. Одеса, Україна. Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. Одеса: ФОП Бондаренко, 2019. С.28-29.

73. Zaitsev Ie.O. Electric machines faults monitoring system with hybrid electro-optic capacitive mechanical sensors. *Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)* : Proceedings of the 2017 IEEE International conference, 17-20 October 2017 Lviv, Ukraine, 2017. P.15-18

74. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Berezhnychenko V. Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors. *Power systems research and operation: Selected problems* / editors: Kyrylenko O., Zharkin A. and other. Springer, 2021, P. 71-98. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_4.

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

76. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Балящук Л.І. Гібридні волоконно-оптичні вимірювачі фізичних параметрів літальних апаратів. «*ABIA-2017*» : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. 19-21 квітня 2017 м. Київ, Україна: К.: НАУ, 2017. С. 2.37-2.39.

77. Zaitsev Ie., Shpylka A., Shpylka N. Output signal processing method for fiber bragg grating sensing system. *Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020): Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics*. 25-29 February 2020: Lviv-Slavske, Ukraine. 2020. P.152-155. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235412

78. Zaitsev I., Titko V., Berezhnychenko V. Noise-immune transmitting information signals technique for power equipment diagnostic systems information channels.

Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà domestiche: Proceedings of the International Conference 12 nov. 2021. Bologna, Repubblica Italiana, 2021. P. 36–37. DOI 10.36074/logos-12.11.2021.v2.09

79. Зайцев Е.А. Метод формирования сигналов в системах технической диагностики с пространственно-распределенной системой сенсоров. *85-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием)*: материалы конф. 1-13 февраля 2021. С. 72-75.

80. Зайцев Є.О. Комп'ютеризовані системи контролю механічних параметрів критично-важливих елементів генеруючого обладнання. *"ABIA-2021"*: матеріати XIII міжнар. наук.-техн. Конф.. 20-22 квітня 2021 р., м. Київ, НАУ, Україна. 2021. С. 14.5–14.7. <http://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2021/paper/view/8378/6892>

81. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Програмне забезпечення системи контролю осердя статора потужного генератора під час виготовлення. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (МСТТР-2021)*: матеріали XXI міжнар. наук.-техн. конф., 3-7 червня 2021 р., м. Одеса, Україна. С. 5-6.

82. Zaitsev I., Levytskyi A., Panchik M., Berezyuchenko V. Fiber Bragg grating-based monitoring system for large generator core clamping fault diagnosis. *Modern electrical and energy system (MEES-2021)*: Proc. of the International conference, November 15 – 17, 2017 Kremenchuk, Ukraine. 2021. P. 1-4. (IEEE Xplore, Index in SCOPUS). DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598630>.

83. Скворцов П. А. Разработка методики расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре "Кремний на сапфире" : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06. 2019. 20 с.

84. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромпляс Б.А., Панчик М.В. Дослідження впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2019. Вип. 52. С. 80–86. DOI: 10.15407/publishing2019.52.080.

85. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Kromplyas B., Panchyk M., Bereznynchenko V. Study influence industrial frequency magnetic field on capacitive pressing sensor for large turbogenerator core clamping system/ *In Proc. of the 2019 IEEE Ukraine International Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON-2019)*, 2 – 6 Jule, 2019 Lviv, Ukraine. P. 566–569. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879949>.

86. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги і методи випробувань (ІЕС 61000-4-8:1993) [Чинний від 1995-01-01]. Київ, 1995. 31с.

87. ДСТУ 2793-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до потужних електромагнітних завад. Загальні положення [Чинний від 1995-07- 01]. Київ: Держстандарт України, 1994. 15 с.

88. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. [Чинний від 01.01.1996]. Київ: Держстандарт України, 1995. 86 с.

89. ДСТУ EN 61000-4-8:2017. Електромагнітна сумісність. Частина 4-8. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливність до магнітного поля частоти мережі (EN 61000-4-8:2010, IDT; ІЕС 61000-4-8:2009, IDT) [Чинний від 22.12.2017]. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2018.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В. Автоматизований пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора. *Технічна електродинаміка*. 2021. №5. С. 83-87. **DOI:** <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.083>. **Index in SCOPUS.** (Особистий внесок – брав участь у розробці пристрою для контролю монолітності осердя статора під час пресування на основі тензометричних вимірювальних перетворювачів, узагальненні результатів та підготовці статті).

2. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В. Виявлення дефектів складання осердя статора потужного турбогенератора. *Вісник Вінницького політехнічного Інституту*. 2021. № 3. С.47-53. **DOI:** <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-156-3-47-53>. (Особистий внесок – брав участь у розробці принципів побудови пристрою для контролю монолітності осердя статора під час пресування на основі оптоволоконних вимірювальних перетворювачів з решітками Брегга, займався розробкою алгоритмічного апарату забезпечення функціонування системи контролю, узагальненні результатів та підготовці статті).

3. Зайцев Е.А., Панчик М.В. Термометричні методи дослідження стану спресованості осердя статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 59. С. 86–92. **DOI:** <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.086>. (Особистий внесок – брав участь у проведенні аналітичного огляду та аналізі термометричних методів та засобів контролю стану спресованості осердя та підготовці статті).

4. Зайцев Є.О., Панчик М.В. Фізичні процеси та їх вплив на розвиток дефектів в осерді статора потужних генераторів. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Issue: 224. P. 81–84. **DOI:** <https://doi.org/10.15407/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20>. (Особистий внесок – визначення впливу фізичних процесів та інших факторів, які впливають на ступінь пресування осердя статора).

5. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Кромплас Б.А., Панчик М.В. Дослідження впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2019. Вип. 52. С. 80–86. DOI: 10.15407/publishing2019.52.080. (Особистий внесок – проведенні експериментальних досліджень, розробці алгоритму проведення експериментальних досліджень, узагальненні результатів та підготовці статті).

6. Патент України на винахід UA 125321 C2, H02K 15/02, G01L1/06. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора / Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М. В., Пінської В. Ф., Захожаєв В.М., Шофул А.К. заявник Інститут електродинаміки НАН України. № а2020 02912; заявл. 14.05.2020; публ. 16.02.2022. Бюл. № 7/2022.

7. Патент України на винахід UA 125916 C2, H02K 15/02, G01L1/06. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора/ Левицький А.С., Зайцев Є.О., Панчик М.В.– заявник Інститут електродинаміки НАН України. № а2020 03974; заявл. 14.05.2020; публ. 06.07.2022. Бюл. № 27/2022.

ПРОДОВЖ. ДОД. А

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на міжнародних наукових конференціях:

1. International conference "*Modern electrical and energy system (MEES-2021)*" (Kremenchuk, November 15 – 17, 2017, форма участі – очна, публікація тез).

2. XVII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів "*Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації*" (Кременчук, 11-12 квітня 2019 р., форма участі – заочна, публікація тез);

3. XIX Міжнародна науково-практична конференція "*Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*" (Київ, 14 – 15 травня 2020 р.);
X Міжнародна науково-технічна конференція "*Приладобудування: стан і перспективи*" (Київ, 18 – 19 травня 2021 р., форма участі – очна, публікація тез);

4. XXI Міжнародна науково-технічна конференція "*Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (МСТТР-2021)*" (Одеса, 3-7 червня 2021 р.); 2019 IEEE Ukraine International conference "*On electrical and computer engineering (UKRCON-2019)*" (Lviv, 2 – 6 Jule, 2019, форма участі – очна, публікація тез);

Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідались та обговорювались на: науково-технічній нараді відділу Головного технолога ДП «Завод Електроважмаш» (Протокол технічної наради ДП "Завод "Електроважмаш" (зараз АТ "Українські енергетичні машини"), 2019 р., м. Харків); наукових семінарах відділу електричних та магнітних вимірювань, відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання, а також на літній школі Інституту електродинаміки НАН України.

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Державного підприємства

«Завод «Електроважмаш»

А. П. ШЕВЧЕНКО

«09» _____ 2019г.



АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи

«__» _____ 2019,

м. Харків

Чинний акт складено про те, що на Державному підприємстві завод «Електроважмаш» в обладнанні для контролю тиску пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ використані результати прикладної науково-дослідної роботи **«Створення автоматизованих багатоканальних систем контролю в електроенергетиці»**, яка виконується в Інституті електродинаміки Національної академії наук України (термін виконання 2019–2021 рр.; шифр теми «ТОРЕЦЬ»; № держреєстрації 0119U001215; науковий керівник – доктор технічних наук Левицький А. С., відповідальний виконавець – кандидат технічних наук Зайцев Є. О., виконавець – аспірант Панчик М. В.), а саме:

- метод контролю тиску пресування з застосуванням ємнісних сенсорів;
- теорія та практичні результати досліджень ємнісної вимірювальної комірки, до складу якої входить силосприймаючий елемент у вигляді плоскої мембрани з жорстким центром та ємнісний сенсор з цифровим виходом;
- електронно-оптичний перетворювач інформаційних сигналів гібридного волоконно-оптичного вимірювача зусилля пресування, який був використаний для живлення ємнісного сенсора з цифровим виходом і передачі сигналів від нього;
- макетний зразок ємнісного вимірювача зусиль.

Головний технолог
з турбогенераторобудування

В. М. Захожаєв

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. генерального директора
АТ «Завод «Електроважмаш»А.С.Кравець
«09» вересня 2021 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складено про те, що на АТ «Завод «Електроважмаш» під час проектування нових і модернізації існуючих турбогенераторів (ТГ) будуть використані результати науково-дослідної роботи *«Створення автоматизованої багатоканальної системи контролю торцевої поверхні осердя статора турбогенератора при складанні»* (шифр "ТОРЕЦЬ", номер держреєстрації 0119U001215, науковий керівник – докт. техн. наук А.С. Левицький, відповідальний виконавець – докт. техн. наук Є.О. Зайцев, виконавець – аспірант М.В. Панчик), яка виконувалась в Інституті електродинаміки НАН України в 2019-2021 рр., зокрема:

- принципи побудови та структурна схема автоматизованої системи вимірювання питомого тиску пресування осердя статора потужного турбогенератора під час складання з використання окремих вимірювальних комірок, до складу яких входить елемент, який пластично деформується при пресуванні;
- алгоритми та програми, які забезпечують функціонування автоматизованої системи;
- технічна документація на вимірювальні комірки з ємнісним, тензометричним та волоконно-оптичним вимірювачами питомого тиску пресування;
- конструкторська документація на дослідний зразок вимірювальної комірки;
- дослідний зразок вимірювальної комірки для інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану пресування осердя статора під час його збирання.

Головний конструктор з турбогенераторів
АТ «Завод «Електроважмаш»,
Лауреат державної премії України,
кандидат технічних наук

К.О. Кобзар

З А Т В Е Р Д Ж У Ю
 Директор
 ТОВ «Політон-Україна»
 ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ
 № 383724311
 Клімченко А.В.
 « » 2021 р.

А К Т впровадження результатів науково-дослідної роботи

« » 2021,

Чинний акт складено про те, що результати прикладної науково-дослідної роботи **«Створення автоматизованих багатоканальних систем контролю в електроенергетиці»**, яка виконувалась в Інституті електродинаміки Національної академії наук України (термін виконання 2019–2021 рр.; шифр теми «ТОРЕЦЬ»; № держреєстрації 0119U001215; науковий керівник – доктор технічних наук Левицький А. С., відповідальний виконавець – доктор технічних наук Зайцев Є. О., виконавець – аспірант Панчик М. В.), а саме:

- теоретичні та практичні результати отримані під час досліджень вимірювальної комірки зусилля пресування, до складу якої входить силосприймаючий елемент у вигляді плоскої мембрани з жорстким центром та сенсор з цифровим виходом;
- електронно-оптичний перетворювач інформаційних сигналів гібридного волоконно-оптичного вимірювача зусилля пресування, який призначений для живлення сенсорів з цифровим виходом і передачі сигналів від них

використані на ТОВ «Політон-Україна» під час випробувань елементів гнучкого захисту на ударному стенді.

Інженер-конструктор
 ТОВ «Політон-Україна»

 Шпилька А.М.

ДОДАТОК В

ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Інтегральна мікросхема AD7747 призначена для роботи у випадку коли одна із обкладинок ємності підключена до землі, тобто розрахована для випадку роботи із мембраною TOP 01.00.02.

Узагальнена структура програмно-апаратного забезпечення первинного вимірювача ступеню пресування осердя статора із ємнісним сенсором на базі інтегральної мікросхеми AD7745/46 приведена на рис. В.1

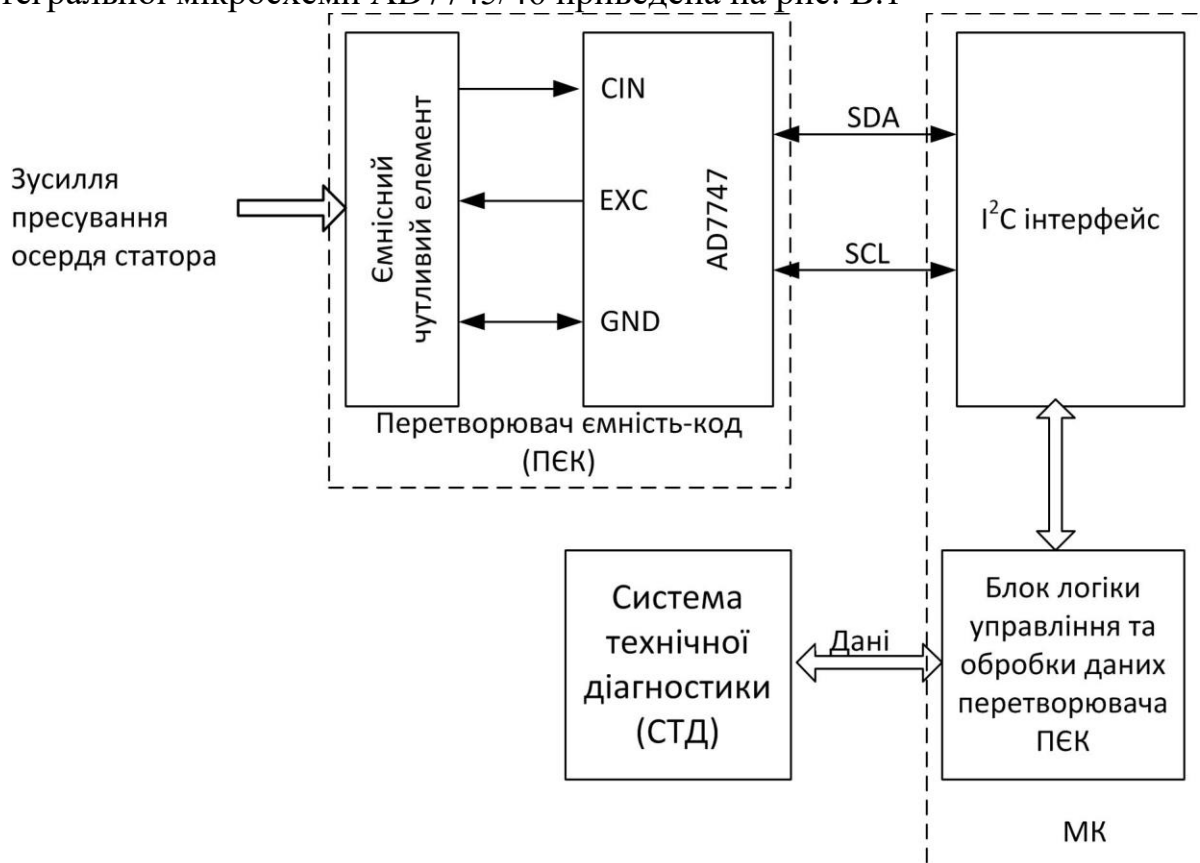


Рис. В.1 – Узагальнена структура програмно-апаратного забезпечення вимірювача ступеню пресування осердя статора

Функціонування вимірювача відбувається відповідно до алгоритму, що задається програмно-математичною частиною вимірювача ступеню пресування осердя в комп'ютеризованій інформаційно-вимірювальній системі технічної діагностики ТТ та ТГ.

Алгоритм програмного забезпечення вимірювача включає в себе початкову ініціалізацію регістрів AD7747, керування роботою AD7747 та його калібрування в разі необхідності, отримання даних, їх попередню обробку та відправку до системи технічної діагностики. Схема алгоритму програмного забезпечення вимірювача приведена на рис. В.2.

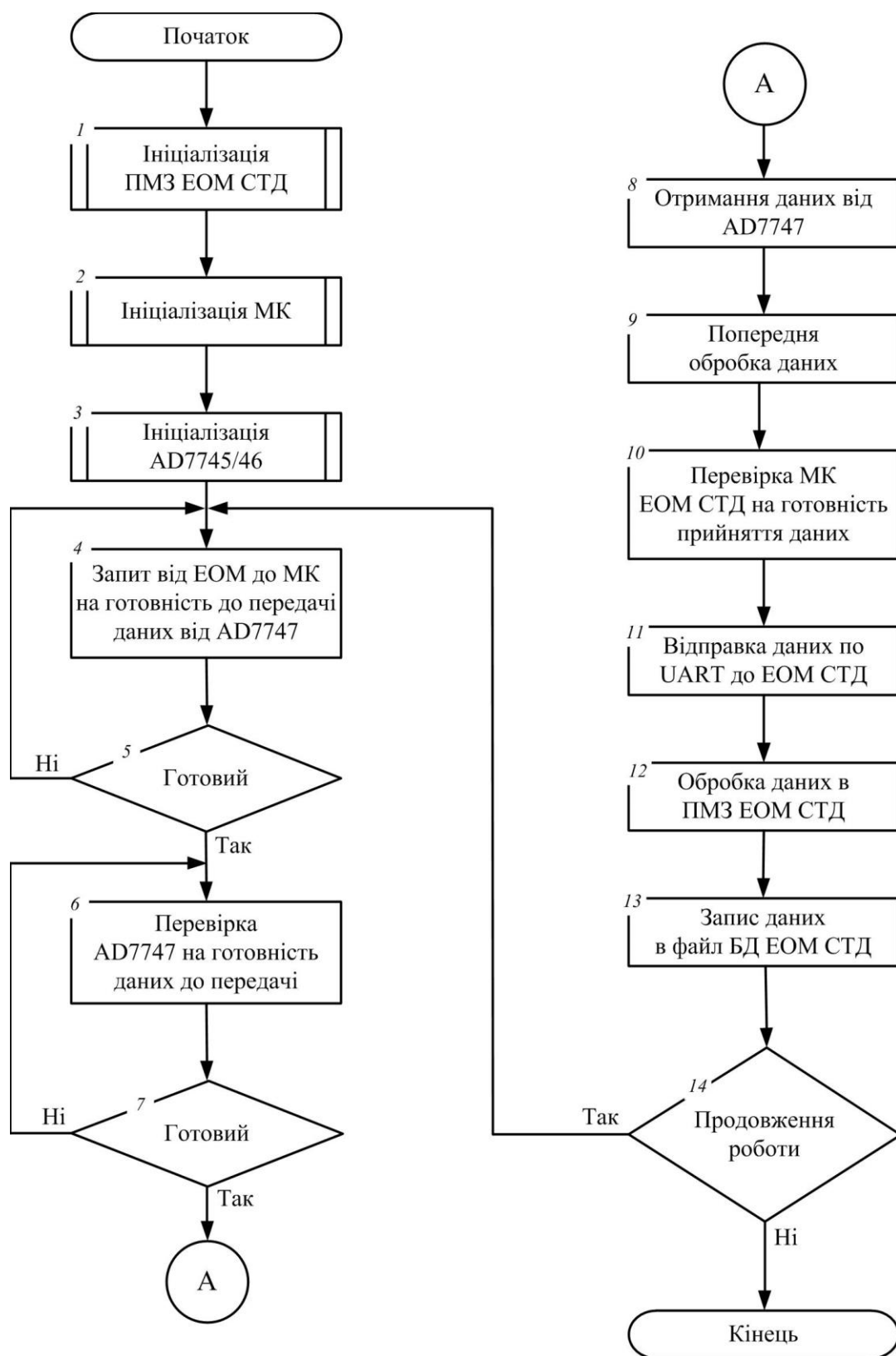


Рис. В.2 – Алгоритм

ДОДАТОК Д

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ ВИМІРЮВАЧА ЗУСИЛЬ ПРЕСУВАННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукової роботи
Інституту електродинаміки НАН України,
чл.-кор. НАН України



А. Ф. ЖАРКІН

2019

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Державного підприємства
«Завод «Електроважмаш»



А. П. ШЕВЧЕНКО

2019 г.

Протокол

випробувань макетного зразку вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора при складанні пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ на державному підприємстві завод "Електроважмаш"

8 серпня 2019р.
м. Харків

1. ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ

Об'єктом випробувань є макетний зразок вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора типу ТГВ-250-2ПТЗ при складанні.

2. ЦІЛЬ ВИПРОБУВАНЬ

Перевірка працездатності та метрологічних характеристик макету ємнісного вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора типу ТГВ-250-2ПТЗ.

ПРОГРАМА ВИПРОБУВАНЬ

Визначити можливість застосування ємнісного вимірювача зусилля для контролю тиску пресування в окремій точці пакету осердя статора при його складанні.

3. ПРИЛАДИ І УСТАТКУВАННЯ

При проведенні натурних випробувань при опресуванні пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ використовувався вимірювальний комплекс в складі:

- макетного зразку ємнісного вимірювача зусилля пресування осердя статора турбогенератора (рис.1) із цифровим виходом розробки ІЕД НАНУ;
- електронно-оптичний перетворювач інформаційних сигналів гібридного волоконно-оптичних вимірювачів зусилля пресування, який був використаний для живлення ємнісного сенсора з цифровим виходом і передачі сигналів від нього;
- апаратурою для реєстрації результатів вимірювань у вигляді персонального комп'ютера;

- відповідного розробленого в ІЕД НАНУ програмного забезпечення, встановленого на персональному комп'ютері та мікропроцесорі ємнісного вимірювача;
- вимірювальної комірки виробництва ДП заводу "Електроважмаш", що складалась із: стакану А5441/4, проби А54441/5, втулки А5441/3 та пальцю;
- спеціального силосприймаючого елемента (мембрани) сумісної розробки ІЕД НАНУ та ДП заводу "Електроважмаш" (рис.2).

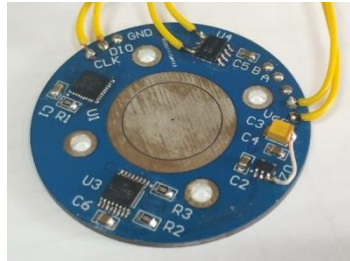


Рис. 1 – Ємнісний вимірювач зусилля пресування осердя статора турбогенератора

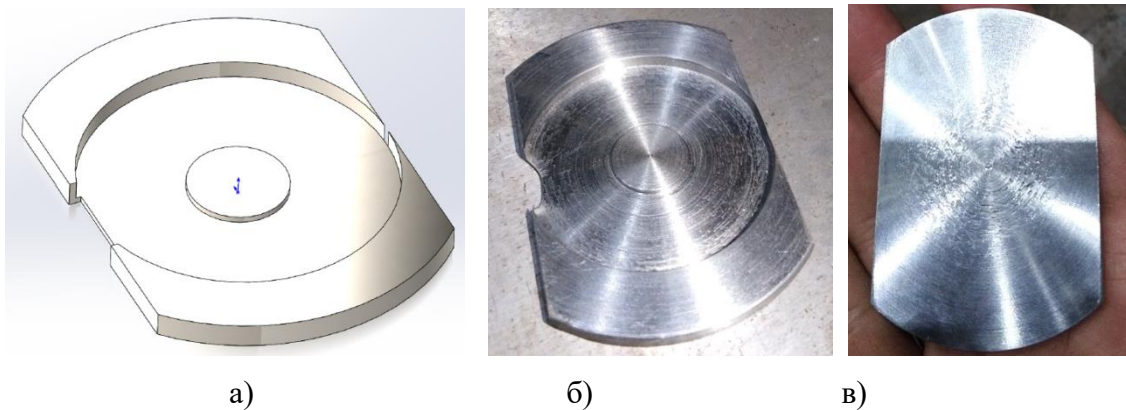


Рис. 2 – Спеціальний силосприймаючий елемент (мембрана):

- а) CAD-модель; б) дослідний зразок мембрани вид знизу;
в) дослідний зразок мембрани вид зверху;

4. МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ

Випробування проводилися при пресуванні пакету осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ за затвердженою програмою пресування активного заліза осердя статора. Вимірювальна комірка із ємнісним сенсором та мембраною встановлювалась замість стандартної комірки на заздалегідь затверджене місце у нижньому кільці А54446/1.

У відповідності до технологічного процесу навантаження пресування змінюється поступово від 0 т. до 600 т. для пресування перших пакетів та 680 т. для всіх інших. При цьому загальна площа нижнього кільця А54446/1 складає 30202,55 см². Залежність середнього зусилля на пресування осердя від навантаження приведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Найменування	маса, кг	середнє зусилля, кг/см ²
кільце верхнє	4167,5	0,14
парасолька пресу	8600	0,28
навантаження пресування	600000	19,87
навантаження пресування	68000	22,51

5. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

В результаті проведених досліджень була отримана характеристика зміни ємності в часі від зміни навантаження пресування. Отримана залежність приведена на рис. 3.

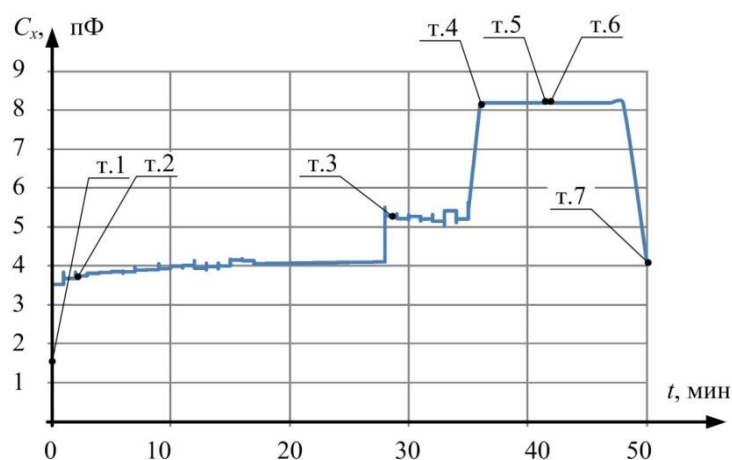


Рис. 3 – Характеристика ємності в часі від зміни навантаження пресування

На рис.3. введені наступні позначення:

т.1 = 1.834 пФ – встановлення нижнього кільця А54446/1 із вимірювальними комірками по місцю пресування осердя статора;

т.2 = 3.811 пФ – встановлення верхнього кільця масою 4167,5 кг.;

т.3 = 5.509 пФ – встановлення опресовувальної парасольки пресу масою 8600 кг. – встановлена не повною масою;

т.4 = 8.192 пФ – встановлення повною масою опресовувальної парасольки;

т.5 = 8.192 пФ – під'єднання пресувальної колони до опресовувальної парасольки;

т.6 = 8.192 пФ – пресування;

т.7 = 4.100 пФ – зняття елементів пресу.

При проведенні випробувань максимальне розрахункове навантаження на вимірювальну комірку виходячи із середнього зусилля (Таблиця 1) складало для:

т.1 = 0; т.2 = 0,14 кг/см²; т.3 = від 0,14 кг/см² до 0,42 кг/см²;

т.4 = 0,42 кг/см²; т.5 = від 0,42 кг/см²; т.6 = 22,51 кг/см² т.7 = 0 кг/см².

В результаті сповзання проби за межі жорсткого центру мембрани виникло нерівномірне навантаження та деформація мембрани. Результати деформації мембрани продемонстровані на рис. 4, мембрана до деформації приведена на рис. 2, б, в. Деформація, що виникла в свою чергу призвела до похибки вимірювання ступеню зусилля пресування сенсором та виходом сенсора за розрахунковий діапазон вимірювання (т.4-т.6).



Рис. 4 – Дослідний зразок мембрани вид знизу після деформації

Після зняття всіх елементів пресу мембрана в деякій мірі відновила форму, що засвідчують показання отримані в т.7.

Результати отримані в т.3 демонструють пластичну деформацію проби А54441/5 виготовленої із листа ДПРНХ 3,0 С3 (свинцю). На рис.4 зображено динаміку деформації проби А54441/5, яка була зафіксована в т.3 (рис.3)

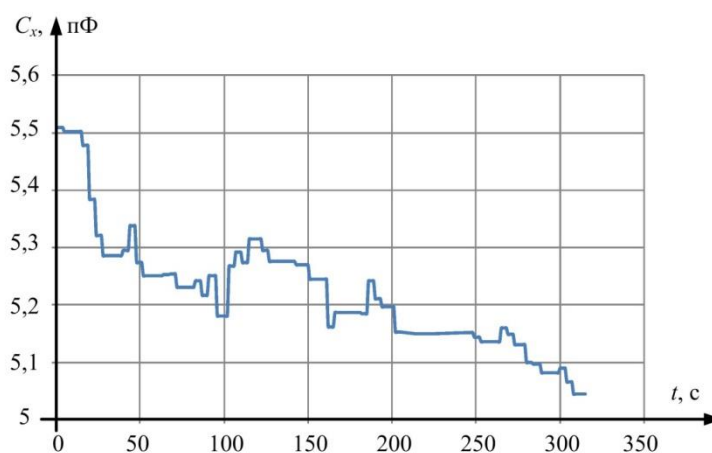


Рис. 4 – Залежність ємності C_x від зміни(деформації) проби А54441/5 отриманої в т.3

6. ВИСНОВКИ ПО ВИПРОБУВАННЯМ

6.1. Отримані результати свідчать про те, що розроблений метод та пристрій, який його реалізує у вигляді вимірювальної комірки із ємнісним сенсором дозволяє забезпечити необхідний рівень метрологічного контролю тиску пресування в окремій точці пакету осердя статора турбогенератора при його складанні.

6.2. Випробування макетного зразку вимірювача зусиль пресування, в якому застосовано ємнісний сенсор з цифровим виходом, в основному підтвердили технічні характеристики пристрою.

6.3. Проведені випробування показали можливість створення багатоточкової системи контролю зусиль пресування, яка дозволить забезпечити визначення картини нерівномірності торцевої поверхні пакетів осердя статора відносно пресувальної плити при його складанні.

6. УХВАЛИЛИ:

7.1. Запропонований спосіб вимірювання зусилля пресування та макет пристрою, що його реалізує, є корисним, і може бути застосований під час складання і пресування осердя статора потужних турбогенераторів.

7.2. Провести доробку конструкції ємнісного сенсора з урахуванням зауважень за результатами випробувань.

7.3. Рекомендувати створити силами ІЕД НАН України автоматизовану багатоточкову систему контролю та моніторингу зусилля пресування осердя статора, в якій застосувати розроблену вимірювальну комірку із ємнісним сенсором зусиль.

Випробування проводили:

Від ІЕД НАНУ:

Старший науковий співробітник,
кандидат технічних наук

 **Є. О. Зайцев**
Аспірант

 **М. В. Панчик**

Від ДП «Завод Електроважмаш»:

головний технолог з турбогенераторного
виробництва;

 **В. М. Захожаєв**
заступник головного технолога
з турбогенераторного виробництва

 **Ф. Г. Богасенко**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукової роботи
Інституту електродинаміки НАН України,
чл. кор. НАН України



А. Ф. ЖАРКІН

2019

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер
Державного підприємства
«Завод «Електроважмаш»



А. П. ШЕВЧЕНКО

2019 г.

ПРОТОКОЛ

технічної наради фахівців
державного підприємства завод «Електроважмаш» та
Інституту електродинаміки Національної академії наук України

8 серпня 2019р.
м. Харків

ПРИСУТНІ:**1. Від ДП «Завод Електроважмаш»:**

Захожаєв Володимир Миколайович, головний технолог з турбогенераторного виробництва;

Богаєнко Федір Геннадійович, заступник головного технолога з турбогенераторного виробництва.

2. Від Інституту електродинаміки НАН України:

Зайцев Євген Олександрович, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук;

Панчик Михайло Вікторович, аспірант.

СЛУХАЛИ:

1. Інформацію Зайцева Є. О. стосовно технічних особливостей розробленого в ІЕД НАН України при виконанні НДР «Торець» (№ держреєстрації 0119U001215) ємнісного вимірювача зусиль пресування осердя статора потужного турбогенератора.

2. Інформацію Захожаєва В. М. відносно результатів випробувань макетного зразку вимірювача зусиль пресування під час складання і пресування осердя статора турбогенератора ТГВ-250-2ПТЗ.

УХВАЛИЛИ:

1. Запропонований спосіб вимірювання зусилля пресування та макет пристрою, що його реалізує, є корисним, і може бути застосований під час складання і пресування осердя статора потужних турбогенераторів.

2. Випробування макетного зразку вимірювача зусиль пресування, в якому застосовано ємнісний сенсор з цифровим виходом, в основному підтвердили технічні характеристики приладу.

3. Провести доробку конструкції ємнісного сенсора з урахуванням зауважень за результатами випробувань.

4. Рекомендувати створити силами ІЕД НАН України автоматизовану систему контролю зусилля пресування осердя статора, в якій застосувати розроблений сенсор зусиль.

5. Подати спільні заявки на патент України на спосіб контролю зусилля пресування осердя статора при складанні та пристрої, що його реалізують.

Від ІЕД НАНУ:

Є. О. Зайцев

М. В. Панчик

Від ДП «Завод Електроважмаш»:

В. М. Захожаєв

Ф. Г. Богаєнко