

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Березниченко Вікторія Олександрівна

УДК 621.317

ДИСЕРТАЦІЯ

**Ємнісні вимірювачі радіального биття циліндричних поверхонь валів
потужних гідрогенераторів**

152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

В.О. Березниченко

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

Київ – 2022

АНОТАЦІЯ

Березниченко В.О. Ємнісні вимірювачі радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка". – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2022.

Дисертаційну роботу присвячено розвитку ємнісного методу вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів в потужних гідрогенераторах шляхом створення нових вимірювачів биття та методів моделювання сенсорів радіального биття циліндричних поверхонь валів в потужних гідрогенераторах ГЕС та ГАЕС ОЕС України під час їхньої експлуатації з урахуванням конструктивних особливостей об'єкту діагностування.

Основні завдання роботи полягають в визначенні характеристик та дослідженні ємнісних сенсорів методами комп'ютерного моделювання, обґрунтуванні вибору оптимальної топології сенсорів в залежності від конструктивних параметрів об'єкту діагностування, оцінці впливу технології виготовлення сенсорів на їхню функцію перетворення та розробленню шляхів мінімізації похибки вимірювання, зумовленої цим впливом, оцінці основних похибок сенсорів.

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 показано, що в процесі експлуатації в елементах конструкції потужних гідрогенераторів протікає цілий ряд фізико-хімічних, термічних і механічних процесів, які з плином часу призводять до виникнення дефектів в обертових та не обертових елементах конструкції машини. В результаті проведеного аналітичного огляду встановлено, що у відповідності до чинних міжнародних стандартів моніторинг та діагностика гідроагрегатів включає серію вимірювань контрольних-діагностичних параметрів, за якими можна відстежити дефекти від їх появи до виникнення аварійної ситуації. Під час аналізу було виявлено основні дефекти вузлів, розвиток яких може призвести до погіршення роботи критично-важливих вузлів гідрогенератора, і в найгіршому випадку, до його аварії.

Як об'єкт досліджень було обрано вал, оскільки симптоми виникнення та розвитку великої кількості дефектів гідрогенератора можна розглядати як ознаки, які визначаються параметрами биття валу.

У зв'язку з цим, було досліджено методи вимірювання параметрів биття валів та засоби, що реалізують ці методи. За результатами аналізу було визначено, що в якості безконтактних первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) широкого використання набули струмовихрові сенсори, які мають хороші метрологічні характеристики.

Але їм притаманні такі недоліки як залежність функції перетворення від металургійних та хімічних характеристик матеріалу контрольованого валу та його намагніченості, що потребує тарування відносно марок сталі матеріалу валу.

В ємнісних вимірювачах биття, які поки що не набули широкого використання, недоліки струмовихрових сенсорів биття усунуто.

Окрім того, ці сенсори вигідно відрізняються високою чутливістю до переміщень, роздільною здатністю, малим часом спрацьовування, відсутністю гістерезису, малою інерційністю вимірювань, температурною стабільністю, практично повною відсутністю сигнальних шумів, малим енергоспоживанням і втратами потужності внаслідок самонагрівання, що робить їх кращим варіантом для роботи при діагностуванні технічного стану складних систем та об'єктів до

яких відносяться потужні гідрогенератори. Особливою перевагою ємнісних сенсорів биття є те, що їхня функція перетворення не залежить від матеріалу валу, його температури та намагніченості, що має місце на реальних гідроагрегатах. Застосування існуючих сенсорів обмежено вузькою спеціалізованістю, недостатніми метрологічними характеристиками та функціональними можливостями. Створення нових або адаптація існуючих сенсорів задля вирішення задачі визначення параметрів биття валів потужних генераторів вимагає розрахунок їх функцій перетворення з урахуванням конструктивних параметрів об'єкту діагностування. Однак, функція перетворення ємнісних сенсорів в значній мірі залежить від конструктивних параметрів сенсору та його типу, а також від технологічних процесів, що використовуються під час їх виготовлення. Тому, задля визначення впливу конструктивних параметрів елементів сенсору та технології виготовлення є актуальним побудова моделей ємнісних сенсорів биття різного типу методами комп'ютерного моделювання.

Другий розділ присвячений дослідженням впливу конструктивних параметрів, методів виготовлення та технологічних похибок ємнісних сенсорів на результати вимірювань. Для цього, були досліджені методи розрахунку, які дозволяють створити моделі сенсорів з необхідними характеристиками та провести їх дослідження, шляхом комп'ютерного моделювання. Процес проектування сенсорів характеризується значним обсягом і трудомісткістю аналітичних розрахунків. Аналітичні моделі для сенсорів зазвичай базуються на спрощених конфігураціях і ідеалізованих припущеннях, які обмежують їх точність розрахунку для реальних конструкцій і можуть призводити до значних розбіжностей між теоретичними і експериментальними даними. Дослідження сенсорів методами комп'ютерного моделювання дозволить забезпечити високу точність розрахунку сенсорів з урахуванням реальних конструкцій, мінімізувати вплив робочого середовища на характеристики сенсорів, сформулювати критерії вибору оптимальної топології сенсорів в залежності від конструктивних параметрів об'єкту діагностування та розрахувати метрологічні характеристики сенсорів.

За результатами проведеного аналізу існуючих методів чисельного рішення і програмних засобів моделювання, було виявлено, що метод кінцевих елементів і програмний пакет Comsol Multiphysics мають всі засоби та ресурси для повноцінного дослідження обраних типів ємнісних сенсорів, електроди яких формуються з фольгового діелектрика методом фотолітографії.

Для визначення функції перетворення були створені комп'ютерні моделі ємнісних сенсорів з різною конфігурацією електродів, а саме: сенсор з плоскопаралельними електродами (тип 1), сенсор з охоронним кільцевим електродом Кельвіна (тип 2) та сенсор з концентричними компланарними електродами (тип 3). Було з'ясовано, що на результати вимірювань в значній мірі впливають паразитні ємності, викликані викривленням електричного поля, тобто крайових ефектів. На рівномірність екіпотенціальних ліній електростатичного поля також впливають зовнішні об'єкти, через які поле може замикатися, що призводить до виникнення додаткових випадкових похибок вимірювання ємності.

Для зменшення впливу "крайових ефектів" сенсора на результат вимірювання необхідно забезпечити рівномірність екіпотенціальних ліній електростатичного поля. Для вирішення цієї проблеми в систему електродів плоскопаралельного сенсора між потенціальним і кільцевим заземленим електродом розміщують кільцевий охоронний електрод, який ще називають "кільцем Кельвіна". Одним із недоліків таких сенсорів є необхідність використання триаксального кабелю між сенсором з охоронним електродом і вторинним вимірювальним перетворювачем. Зазначений недолік мінімізується за допомогою усунення такого кабелю шляхом розміщення ВВП у безпосередній близькості до електродів сенсора. Вищезазначені недоліки мінімізуються в схемі ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами.

Під час дослідження впливу технологічних дефектів виготовлення на функцію перетворення ємнісних сенсорів було встановлено, що в межах граничнодопустимих значень технічних характеристик фольгованих матеріалів, зміна ширини міжелектродного зазору, призводить до збільшення значення ємності на відносно мале значення та майже не впливає на кінцевий результат

вимірювань. Також, величиною другого порядку малості є вплив зміни товщини мідної фольги електродів на функцію перетворення сенсору. Зміна ж товщини діелектричної підкладки носить адитивний характер і може бути врахована під час проведення розрахунків із визначення інформативної складової ємності.

Отримані результати в розділі дозволяють забезпечити оптимізацію топології сенсорів биття циліндричних поверхонь гідрогенераторів в залежності від конструктивних параметрів об'єкту діагностування та розрахувати метрологічні характеристики сенсорів.

У *третьому* розділі представлено результати досліджень вторинних вимірювальних перетворювачів, призначених задля створення інформаційно-вимірювальних каналів засобів вимірювання биття з ємнісними сенсорами. Досліджено можливості застосування запропонованих структур вторинних вимірювальних перетворювачів задля їх застосування в робочих режимах енергетичного обладнання. Відзначено переваги побудови вторинних вимірювальних перетворювачів прямого перетворення ємності в напругу на базі операційних підсилювачів, методом заряду-розряду та з попереднім перетворенням в частоту. Зазначені перетворювачі мають невисоку точність і стабільність характеристики перетворення, зумовлену нестабільністю параметрів додаткових елементів (конденсаторів, резисторів, порогових пристроїв) на результат перетворення.

Кращі параметри мають компенсаційно-мостові вторинні вимірювальні перетворювачі з аналоговим або дискретним (цифровим) виходом, що мають малі похибки перетворення, високу стійкість і швидкодію. Використання компенсаційно-мостових вторинних вимірювальних перетворювачів є доцільним задля побудови інформаційно-вимірювальних каналів вимірювання швидкозмінних процесів, які мають місце під час проведення визначення параметрів биття на працюючому обладнанні. У інших випадках для зменшення вартості вимірювача є доцільним застосування сигма-дельта перетворювачів ємності в цифровий код (capacitance-to-digital converter) з високою роздільною здатністю, наприклад серійних інтегральних мікросхем AD774 /AD7746 та

AD7747 виробництва Analog Devices. Такі перетворювачі забезпечують високу точність вимірювання ємності, мають зручний цифровий інтерфейс, малі розміри, а також мають відносно низьку вартість в порівнянні із іншими перетворювачами.

У *четвертому* розділі представлено результати експериментальних досліджень ємнісних сенсорів та вторинних вимірювальних перетворювачів описаних в попередніх розділах. Були проведені дослідження для визначення залежності функції перетворення ємнісних сенсорів від відстані до заземленої поверхні валу та визначено похибку нелінійності. Розходження між результатами експериментальних, аналітичних та отриманих шляхом моделювання розрахунків обумовлені паразитною ємністю фольгованого склотекстоліту.

Для перевірки відповідності одержаних результатів розроблено та виготовлено макетний зразок вимірювача радіального биття циліндричних поверхонь валів. Дослідження впливу температури на результати вимірювань показали, що похибка вимірювача радіального биття валів з ємнісним сенсором в діапазоні температур від -15 до $+80$ °C не перевищує 0,4 %.

Отримані результати дослідження впливу магнітного поля на вторинний вимірювальний перетворювач продемонстрували, що вплив магнітного поля на результати вимірювань має адитивний характер в момент дії поля та може бути компенсована програмними методами. Також, отримані результати експериментальних досліджень дозволили підвередити адекватність створених комп'ютерних моделей, макетних зразків та запропонованих теоретичних рішень (за результатами проведених досліджень, шляхом комп'ютерного моделювання).

Ключові слова: гідрогенератор, биття валу, ємнісний сенсор, безконтактні вимірювання, комп'ютерне моделювання, похибки.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Bereznichenko 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: 10.1007/978-3-030-82926-1_4. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – брала участь у визначенні впливу технології виготовлення на функцію перетворення ємнісних сенсорів, узагальненні результатів та підготовці розділу монографії).

2. 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. No.78(2):5-18 P.173-180. **Index in SCOPUS, IF 0.408**. (Особистий внесок – брала участь в функції перетворення ємнісних сенсорів, узагальненні результатів та підготовці статті).

3. Zaitsev I., Bereznichenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. *Sensors*. 2022. vol. 22(1634). 19 p. DOI: 10.3390/s22041634. **Index in SCOPUS, Q1, IF 3.847**. (Особистий внесок – брала участь в плануванні експерименту, визначенні функцій перетворення сенсорів, розрахунку похибок).

4. Березниченко В.О. Розрахунок функції перетворення ємнісного сенсора радіального биття валів засобами комп'ютерного моделювання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. № 58. С. 107–112. DOI: 10.15407/publishing2021.58.107.

5. Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. № 57. С. 81 – 88. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081> (Особистий внесок – брала участь розроблення принципів побудови вторинного ємнісного вимірювача та розрахунку функції перетворення ємнісного сенсора).

6. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Особливості вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату. *Гідроенергетика України*. 2019. № 1-2. С. 39 – 44. (Особистий внесок – брала участь у визначенні дефектів вузлів гідроагрегатів, які можуть бути визначенні через параметри биття валів та підготовці статті).

7. Левицький А. С., Березниченко В. О., Зайцев Є. О. Відносна та абсолютна радіальна вібрація вала вертикального гідроагрегата. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3-4. С. 68 – 72. (Особистий внесок – брала участь у визначенні критеріїв оцінки вібрації валів потужних гідроагрегатів).

8. Левицький А.С., Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Сучасні системи вібродіагностики гідроагрегатів з вимірювачами абсолютної та відносної вібрації валів. *Гідроенергетика України*. 2021. № 1-2. С. 57 – 66. (Особистий внесок – брала участь в проведенні аналітичного огляду та аналізі методів та засобів вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів).

9. Zaitsev I., Levytskyi A., Bereznichenko V. Development shaft run-out measurement transducers for powerful generators fault control system with capacitive coplanar concentric sensor. *Theory and practice of science: key aspects: Proc. of the I Int. scientific and practical conference. February 19-20, 2021. Rome, Italy: Dana, 2021. Pp. 1014 – 2021. DOI: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2021.103>.*

10. Березниченко В.О. Вимірювач биття циліндричних поверхонь валів гідрогенераторів із ємнісним компланарно концентричним сенсором. Збірник матеріалів І науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 15 березня 2021 р., м. Київ, Україна, 2021. С.33 – 37.

11. Березниченко В.О. Дослідження методів комп'ютерного моделювання ємнісних сенсорів. Збірник матеріалів XXXIX Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (до 40-річчя інституту). 12 травня 2021 р., м. Київ Україна, 2021. С.35 – 38.

ANNOTATION

Bereznychenko V.O. Radial cylindrical surfaces shaft run-out capacitive sensors for powerful hydro-generators. – 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, 2022.

The dissertation is devoted to the development of modeling methods and design of capacitive sensors of information and measurement systems for determining the radial runout of cylindrical surfaces of shafts in powerful hydro-generators of hydroelectric power plants and gas power plants of the IPS of Ukraine during their operation, taking into account the design features of the diagnostic object.

The main tasks of the work are to perform calculations of the characteristics and research of capacitive sensors using computer modeling methods, justification of the choice of the optimal topology of sensors depending on the constructive parameters of the diagnostic object, methods of minimizing the influence of sensor manufacturing technology on their conversion function, assessment of the main errors of capacitive sensors.

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, discloses 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 goal and task 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* chapter, shown that a number of physico-chemical, thermal and mechanical processes take place in the design elements of powerful generators during operation, which over time lead to the development of defects in the rotating and non-rotating elements of the machine design. Because of the conducted analytical review, it was established that in accordance with the current international standards, the method of monitoring and diagnostics of hydraulic units consists of a series of measurements of control and diagnostic parameters, which can be used to track the appearance and development of defects before the occurrence of an emergency state. During the inspection, the main control points and node defects were identified, the development of which can lead to the deterioration of the operation of the critically important nodes of the hydrogenerator, and in the worst case, to its breakdown.

The shaft was chosen as the main object of research, since the symptoms of the occurrence and development of a large number of defects caused by the action of mechanical, hydraulic and electromagnetic forces can be considered as signs that are determined by the parameters of the shaft beating and which can be observed over a sufficient period of time to ensure the economic effect of effective maintenance of the machine during the entire period of its operation.

Methods of measuring shaft runout parameters and control tools implementing these methods were investigated. Based on the results of the analysis, it was determined that eddy current and capacitive sensors are widely used as primary measuring transducers (sensors). Taking into account the advantages and disadvantages of each of the sensors, it was established that to solve the problem of measuring beating parameters, it is better to use non-contact capacitive beating sensors in control systems, which allow to ensure non-contact measurement, simplicity and compactness of designs, repeatability of characteristics, small size and weight, ability to function in wide working limits, including frequency and temperature ranges and low cost. From others, these sensors are advantageously distinguished by high sensitivity to movements, resolution, short response time, lack of hysteresis, low measurement inertia, temperature stability, almost complete absence of signal noise, low power consumption and power losses due to self-heating, which makes them the best option

for work when diagnosing the technical condition of complex systems and facilities, which include powerful hydro generators. A special advantage of capacitive knock sensors is that their conversion function does not depend on the material of the shaft, its temperature and magnetization, which occurs on real hydraulic units. The use of existing sensors is limited by narrow specialization, insufficient metrological characteristics and functional capabilities. The creation of new or adaptation of existing sensors to solve the problem of determining the beating parameters of the shafts of powerful generators requires the calculation of their transformation functions taking into account the design parameters of the diagnostic object. However, the conversion function of capacitive sensors largely depends on the design parameters of the sensor and its type, as well as on the technological processes used during their manufacture. Therefore, in order to determine the influence of the design parameters of the sensor elements and the manufacturing technology, it is relevant to build models of capacitive beat sensors of various types using computer modeling methods.

The *second* section is devoted to research on the influence of design parameters, manufacturing methods and technological errors of capacitive sensors on measurement results. For this purpose, calculation methods were investigated, which allow to create models of sensors with the necessary characteristics and to conduct their research by means of computer simulation. The sensor design process is characterized by a significant volume and time-consuming analytical calculations. Analytical models for sensors are usually based on simplified configurations and idealized assumptions, which limit their calculation accuracy for real structures and can lead to significant discrepancies between theoretical and experimental data. The study of sensors using computer modeling methods will allow to ensure high accuracy of sensor calculation taking into account real structures, minimize the influence of the working environment on sensor characteristics, form criteria for choosing the optimal sensor topology depending on the design parameters of the diagnostic object, and calculate the metrological characteristics of sensors.

According to the results of the analysis of the existing numerical solution methods and software simulation tools, it was found that the finite element method and

the Comsol Multiphysics software package have all the means and resources for a full-fledged study of the selected types of capacitive sensors, the electrodes of which are formed from a foil dielectric by the photolithography method.

To determine the conversion function, computer models of capacitive sensors with different electrode configurations were created, namely: a sensor with plane-parallel electrodes (type 1), a sensor with a Kelvin guard ring electrode (type 2), and a sensor with concentric coplanar electrodes (type 3). It was found that the measurement results are significantly affected by parasitic capacitances caused by distortion of the electric field, i.e. edge effects. The uniformity of the equipotential lines of the electrostatic field is also affected by external objects through which the field can close, which leads to the appearance of additional random errors in the measurement of capacitance.

In order to reduce the influence of the "edge effects" of the sensor on the measurement result, it is necessary to ensure the uniformity of the equipotential lines of the electrostatic field. To solve this problem, a ring guard electrode, also called a "Kelvin ring", is placed in the electrode system of the plane-parallel sensor between the potential and ring grounded electrode. One of the disadvantages of such sensors is the need to use a triaxial cable between the sensor with the protective electrode and the secondary measuring transducer. This drawback is minimized by eliminating such a cable by placing the GDP in close proximity to the sensor electrodes. The above-mentioned disadvantages are minimized in the capacitive sensor scheme with concentric coplanar electrodes.

During the study of the influence of technological manufacturing defects on the conversion function of capacitive sensors, it was established that within the limits of the permissible values of the technical characteristics of foiled materials, a change in the width of the interelectrode gap leads to an increase in the capacitance value by a relatively small value and almost does not affect the final measurement result. Also, the value of the second order of smallness is the influence of the change in the thickness of the copper foil of the electrodes on the conversion function of the sensor. The change in

the thickness of the dielectric substrate is additive in nature and can be taken into account during calculations to determine the informative component of the capacity.

The obtained results in the section make it possible to optimize the topology of the sensors of beating cylindrical surfaces of hydrogen generators depending on the design parameters of the diagnostic object and to calculate the metrological characteristics of the sensors.

The third section presents the results of research on secondary measuring transducers designed for the creation of information and measurement channels of beat measuring devices with capacitive sensors. The possibility of using the proposed structures of secondary measuring transducers for their application in the operating modes of power equipment was investigated. The advantages of building secondary measuring converters of direct capacity-to-voltage conversion on the basis of operational amplifiers, on the basis of charge-discharge and with preliminary conversion to frequency are noted. The specified converters have low accuracy and stability of the conversion characteristic, due to the instability of the parameters of additional elements (capacitors, resistors, threshold devices) on the conversion result.

The best parameters are compensation-bridge secondary measuring converters with analog or discrete (digital) output, which have small conversion errors, high stability and high speed. The use of compensation-bridge secondary measuring transducers is expedient for the construction of information-measuring channels for the measurement of rapidly changing processes that take place during the determination of beating parameters on operating equipment. In other cases, to minimize costs, it is advisable to use sigma-delta capacitance-to-digital converters with high resolution, for example, serial integrated circuits AD774 /AD7746 and AD7747 manufactured by Analog Devices. Such converters provide high accuracy of capacitance measurement, have a convenient digital interface, small dimensions, and also have a relatively low cost compared to other converters.

The fourth chapter presents the results of experimental studies of capacitive sensors and secondary measuring transducers described in the previous chapters. Studies were conducted to determine the dependence of the conversion function of

capacitive sensors on the distance to the grounded surface of the shaft and the nonlinearity error was determined. Differences between the results of experimental, analytical and simulation calculations are due to the parasitic capacitance of foiled textolite as FR4.

To check the conformity of the obtained results, a mock-up sample of the meter of radial runout of cylindrical surfaces of shafts was developed and manufactured. Studies of the effect of temperature on the measurement results showed that the error of the radial runout meter with a capacitive sensor in the temperature range from -15 to +80 °C does not exceed 0.4%.

The obtained results of the study of the influence of the magnetic field on the secondary measuring transducer demonstrated that the influence of the magnetic field on the measurement results has an additive nature now of the field's action and can be compensated by software methods. Therefore, the obtained results of experimental studies made it possible to verify the correctness of the created computer models, created mock-up samples based on the results of the conducted research, by means of computer simulation, as well as the correctness of the proposed theoretical solutions.

Key words: capacitive sensor, hydrogenerator, non-contact, errors, computer simulation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТА ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РАДІАЛЬНОГО БИТТЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ВАЛІВ ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ.....	28
1.1 Аналіз об'єкту контролю	29
1.2 Методи вимірювання параметрів биття валів	35
1.3 Сенсори параметрів биття валів та системи моніторингу на їх основі	39
1.4 Критерії оцінки вібрації валів потужних ГА.....	59
1.5 Постановка задачі дослідження.....	62
Висновки до розділу 1	63
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	64
2.1 Аналіз методів комп'ютерного моделювання ємнісних сенсорів	65
2.2 Аналітичний огляд засобів мультифізичного моделювання ємнісних сенсорів.....	67
2.3 Алгоритм побудови моделі	69
2.4 Типи ємнісних сенсорів.....	72
2.4.1 Сенсор із плоскопаралельними електродами.....	73
2.4.2 Сенсор з охоронним кільцем	74
2.4.3 Сенсор з концентричними компланарними електродами	77
2.5 Результати визначення функцій перетворення ємнісних сенсорів, шляхом комп'ютерного моделювання.....	78
2.6 Вплив технології виготовлення на характеристики ємнісних сенсорів	82
2.6.1 Особливості технології виготовлення електродів ємнісних сенсорів..	82

2.6.2 Дослідження впливу технологічних дефектів на функцію перетворення ємнісного сенсору	85
Висновки до розділу 2	108

РОЗДІЛ 3 ВТОРИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ВВП)

ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ БИТТЯ	109
3.1 Вторинні вимірювальні перетворювачі для сенсорів биття	109
3.2 Вимоги до вторинних вимірювальних перетворювачів.....	110
3.3 ВВП на основі спеціалізованої мікросхеми AD7745/46 для сенсорів з концентрично компланарними електродами	111
3.4 ВВП на основі спеціалізованої мікросхеми AD7747 для сенсорів з плоскопаралельними електродами.....	115
3.5 ВВП з підвищеною швидкодією.....	117
3.6 ВВП на основі частотно-незалежного вимірювального кола.....	123
3.7 ВВП на основі компенсаційно-мостового кола	126
Висновки до розділу 3	132

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ БИТТЯ.....

4.1 Визначення похибки нелінійності.....	133
4.2 Лабораторні випробування макетного зразка ємнісного сенсора.....	139
4.3 Експериментальні дослідження вимірювача радіального биття валів ємнісним сенсором з концентричними компланарними електродами.....	146
4.3.1 Параметри та технічна характеристика вимірювача радіального биття валів	148
4.3.2 Експериментальне визначення функції перетворення сенсора.....	150
4.3.3 Дослідження впливу температури на ємнісний сенсор	153
4.3.4 Дослідження впливу магнітного поля на ВВП	157
4.4 Дослідження похибки нелінійності.....	163
Висновки до розділу 4	165

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	168
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	179
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	182

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГАЕС – гідроакумулювальна електростанція;

ГЕС – гідроелектростанція;

ГА – гідроагрегат;

ОЕС – об'єднана енергетична системи;

ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач;

ПЄК – перетворювач ємність-код;

ІВК - інформаційно-вимірювальний канал;

МК – мікроконтролер;

ПК – персональний комп'ютер;

CDC – Capacitance-to-Digital Converter;

B – магнітна індукція;

C – електрична ємність;

f – частота;

I – струм;

T – температура;

t – час;

U – напруга;

ε – відносні діелектрична проникність;

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

r – радіус робочої зони електрода сенсора;

h – міжелектродний проміжок;

w_{GND} – ширина заземленого кільця;

d – відстань між пластинами;

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

H_{diel} – товщина базового матеріалу сенсора.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Україна має розвинений гідроенергетичний комплекс, основна частина якого складається з гідроелектростанцій розташованих на річках Дніпро і Дністер. Більшість енергообладнання цих електростанцій була введена в експлуатацію в 60 – 80-х роках минулого століття і практично відпрацювала свій ресурс та потребує проведення заміни гідроагрегатів на нові або проведення їх глибокої реконструкції й модернізації. Так на 2018 рік із 103 гідроагрегатів гідроенергетичного комплексу України було реконструйовано лише 45 гідроагрегатів, що дозволило продовжити їх термін служби не менше ніж на 40 років. Важливим завданням, що вирішується під час експлуатації та проведення реконструкції існуючих гідроагрегатів є питання оцінки їх фактичного технічного стану.

Задля отримання інформації про стан гідроагрегату широко використовуються системи вібродіагностики, сенсори яких встановлюються безпосередньо на машині задля вимірювання параметрів вібрацій. Проте вібрація корпусу, зміна траєкторії руху центру (годографа) або ексцентриситет вала, значно гаситься або спотворюється масляною плівкою в підшипниках ковзання валу гідрогенераторів. У цьому разі визначення параметрів биття є одним із основних параметрів, які дозволяють визначити дефекти та підвищити повноту й достовірність визначення фактичного технічного стану потужних генераторів. Тому є актуальним створення вимірювачів биття валу на основі безконтактних методів вимірювання, які дозволяють врахувати конструктивні особливості та режими роботи гідрогенератора. Параметри биття не повинні перевищувати норм, встановлених відповідними стандартами та технічними умовами на машину. В якості чутливих елементів у вимірювачах параметрів биття використовуються сенсори, які повинні відповідати певним, досить жорстким вимогам, які враховують не тільки особливості конструкції валу, але й особливості роботи машини.

В значній мірі ємнісні вимірювачі переміщень та відстаней відповідають зазначеним вимогам. Вони забезпечують високу точність і роздільну здатність

вимірювання, довготривалу стабільність характеристик, а також можуть працювати в умовах дії електромагнітних полів. Застосування існуючих ємнісних сенсорів під час вимірювань параметрів биття обмежено через їх вузькоспеціалізованість, недостатні метрологічні характеристики та функціональні можливості, а також вони не враховують в повній мірі особливості конструкцій і режимів роботи генератора.

Забезпечення виконання цих вимог обумовлює необхідність подальшого вдосконалення методів моделювання та проектування ємнісних сенсорів, які дозволять забезпечити підвищення точності, роздільної здатності та дистанційності вимірювання параметрів биття, що дасть змогу покращити оцінку технічного стану гідрогенераторів, і як результат підвищити надійність та безпечність експлуатації енергетичного обладнання ОЕС України.

У розроблення та вирішення питань вказаної проблематики внесли вагомий вклад ряд вітчизняних та закордонних вчених: І.М. Постніков, А.К. Шидловський, Б.С. Стогній, Г.Г. Счастливий, О.І. Титко, В.П. Бабак, О.Ф. Буткевич, І.О. Глебов, Г.М. Федоренко, Б.Г. Марченко, М.В. Мислович, В.Ю. Кучерук, З.Т. Назарчук, М.Г. Шульженко, А.С. Левицький, Ю.В. Зозулін, Е.Й. Гуревич, О.С. Голоднова, В.В. Кузьмін, В.І. Мілих, Г.В. Ростик, M. Bissonnette, J. Lin, P. Talas, P. Toom, J. Rassmussen, V. Howard та інші.

Проте, на даний час залишаються недостатньо розробленими засоби і методи побудови ряду вимірювачів параметрів биття валів, сенсори яких повинні розроблюватися з урахуванням особливостей конструкцій та режимів роботи потужних генераторів.

На основі вищевикладеного можна сформулювати актуальне науково-прикладне завдання, яке полягає у створенні вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів, які забезпечать підвищення точності, роздільної здатності та дистанційності вимірювання, що дасть змогу одержувати достовірну та оперативну інформацію в режимі реального часу про поточний і прогнозований стан потужних гідрогенераторів.

Вирішення цього завдання дозволить забезпечити безперебійну експлуатацію електрообладнання ОЕС України, особливо в воєнний та повоєнний період коли виникає необхідність в короткий час оцінити фактичний технічний стан та визначити шляхи усунення дефектів, 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 рр., №ДР 0116U007285 (виконавець);

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

«Наукове обґрунтування та розробка методів і засобів підвищення безвідмовності потужного генеруючого обладнання ТЕС, ГЕС і АЕС» (шифр «БЕЗВІДМОВНІСТЬ-2», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №9 від 29.05.2018 р.), 2019 – 2023 рр., №ДР 0119U001213 (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 рр., №ДР 0122U000136 (виконавець);

та грантом НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку

науки і техніки 2022-2023 рр. "Підвищення надійності електропостачання споживачів та розроблення засобів ідентифікації аварійних станів в розподільчих мережах ОЕС України (шифр: Індикатор)", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №16/01-2022 від 01.03.2022 р.), 2022 – 2023 рр., №ДР 0122U002116 (виконавець).

При виконанні цих робіт автором створено новий тип ємнісного сенсора відстані до заземленої поверхні, розроблено комп'ютерні моделі ємнісних сенсорів радіального биття валів, а також проведені дослідження їх характеристик шляхом комп'ютерного моделювання та лабораторних випробувань.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка принципів побудови, теоретичні дослідження та експериментальна перевірка ємнісних вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних електричних машин.

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

- аналіз існуючих методів та обґрунтування шляхів їх вдосконалення;
- розроблення варіантів конструктивного виконання електродів ємнісних сенсорів призначених для вимірювання відстані до заземленої поверхні валу з урахуванням його параметрів;
- розрахунок функцій перетворення для обраних варіантів конструктивного виконання ємнісних сенсорів шляхом мультифізичного моделювання задля забезпечення підвищення точності вимірювань шляхом оцінки впливу крайових ефектів та оптимізацією конструкцій сенсорів;
- дослідження технологічних факторів, що впливають на на ємнісних сенсорів радіального биття з метою вибору оптимальної технології виготовлення електродів та їхньої геометричної форми;
- дослідження впливу неідеальності встановлення сенсорів биття на машині з метою вироблення технічних вимог до операцій монтажу;
- розроблення вторинного вимірювального перетворювача ємнісних сенсорів радіального биття валів, який має малі габарити, високу швидкодію та стабільність характеристик;

– проведення експериментальних досліджень створених ємнісних сенсорів з метою оцінки достовірності контролю.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання контрольно-діагностичних параметрів в потужних гідрогенераторах.

Предмет дослідження – ємнісні вимірювачі радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних електричних машин.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися: методи чисельного та мультифізичного моделювання, методи теорії інформаційно-вимірювальних систем, теорія ймовірностей, методи статистичного оброблення сигналів, теоретичні і експериментальні методи в області ємнісних вимірювачів фізичних величин. Теоретична частина роботи ґрунтується на аналітичних і числових методах дослідження з використанням положень математичного аналізу, теорії функцій комплексної змінної з використанням конформних відображень, теорії еліптичних функцій, електротехніки та інформаційно-вимірювальних систем. Дослідження ємнісних сенсорів, шляхом мультифізичного моделювання здійснювали за допомогою програми Comsol Multiphysics 5.4.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набули подальшого розвитку ємнісні методи вимірювання параметрів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів, що дозволило підвищити точність, роздільну здатність і дистанційність вимірювання;

– вперше розроблено комп'ютеризовані моделі ємнісних сенсорів радіального биття валів з трьома різними конфігураціями електродів, що дозволило провести аналіз метрологічних характеристик та оцінку впливу крайових ефектів;

– вперше визначено функції перетворення ємнісних сенсорів шляхом мультифізичного моделювання, що дозволило оцінити точність вимірювання;

– вперше встановлено вплив технології виготовлення на функцію перетворення ємнісних сенсорів радіального биття валів з трьома різними

конфігураціями електродів, що дозволило розробити шляхи покращення вихідних метрологічних характеристик ємнісних сенсорів радіального биття валів;

– запропоновано новий ємнісний сенсор биття з кільцевими концентричними компланарними електродами, який в порівнянні з аналогами є більш стабільним під час роботи в динамічних режимах генератора за рахунок того, що струм інформаційної складової електричного сигналу не проходить через підшипники і корпус машини.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

– розроблено структурні схеми, виготовлено та експериментально перевірено макетні та експериментальні зразки ємнісних сенсорів вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів, що дозволяє підвищити надійність та безпечність роботи нових та вже існуючих потужних гідрогенераторів АГЕС та АЕС ОЕС України;

– розроблено та виготовлено експериментальні зразки ємнісних сенсорів радіального биття валів з трьома різними конфігураціями електродів для інформаційно-вимірювальних каналів систем контролю параметрів циліндричних поверхонь валів потужних генераторів та проведено їх лабораторні випробування;

– впроваджено результати досліджень вимірювачів параметрів биття в ТОВ «Політон-Україна» (м. Полтава) задля покращення ефективності визначення процесів, що виникають під час випробувань зразків на ударному стенді (Акт впровадження, 2021 р.);

– впроваджено в комплекті технічної документації та макетного зразка ємнісного вимірювача биття з компенсаційно-мостовим вторинним вимірювальним перетворювачем інформаційно-вимірювального каналу систем технічної діагностики генераторів на підприємстві АТ "Завод "Електроважмаш" (м. Харків), що дало змогу підвищити достовірність контролю параметрів биття валів потужних генераторів під час їх виготовлення (Акт впровадження, 2021 р.).

Подальше використання теоретичних і практичних результатів дисертаційної роботи передбачено шляхом виготовлення експериментальних зразків вимірювачів радіального биття валів з різними типами ємнісних сенсорів

для їх випробувань та впровадження на АТ "Українські енергетичні машини" (м. Харків) та ПрАТ «Укргідроенерго».

Документи, що підтверджують впровадження, наведено у Додатку Б.

Особистий внесок здобувача.

Безпосередньо автором здійснено:

- інформаційний пошук та аналіз літературних даних за темою дисертації;
- розробка комп'ютеризованих моделей ємнісних сенсорів радіального биття валів з трьома різними конфігураціями електродів;
- аналіз метрологічних характеристик ємнісних сенсорів радіального биття валів з трьома різними конфігураціями електродів та оцінка впливу крайових ефектів, шляхом мультифізичного моделювання;
- визначення функції перетворення ємнісних сенсорів шляхом мультифізичного моделювання;
- визначення впливу технології виготовлення на функцію перетворення ємнісних сенсорів;
- аналіз дефектів вузлів гідроагрегатів, які можуть бути визначенні через параметри биття валів ;
- визначення критеріїв оцінки вібрації валів потужних гідроагрегатів;
- розроблення принципів побудови вторинного ємнісного вимірювача інформаційно-вимірювальних систем параметрів биття валів потужних генераторів.

Наукові роботи опубліковані у співавторстві з Новік А.І., Левицький А. С., Зайцев Є.О., Титко В.О., Вајај М., Таһа І.В.М., Belkhier Y., Kamel S.

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», Харків, 2020. 424 с.

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

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня: Міжнародна науково-практична конференція "Theory and practice of science: key aspects"(Italy, Rome 19-20 February 2021); I науково-технічної конференції "молодих вчених та спеціалістів Інституту електродинаміки Національної академії наук України" (Київ, 15 березня 2021 р.); XXXIX Науково-технічної конференції "молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (до 40-річчя інституту)" (Київ, 12 травня 2021 р.)

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 183 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатки. Обсяг основного тексту дисертації складає 157 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 37 таблицями та 91 рисунком. Список використаних джерел містить 96 найменування, з них 32 кирилицею та 64 латиницею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТА ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РАДІАЛЬНОГО БИТТЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ВАЛІВ ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

Гідроенергетика є найбільш технологічно освоєним способом виробництва електроенергії, який широко використовується у світі та є гарантованим енергоресурсом. На сьогодні, гідроелектростанції експлуатуються у 159 країнах та забезпечують виробництво до 20% всієї світової і 75% усієї відновлюваної електроенергії. Гідроенергетика забезпечує найбільш ефективний процес отримання електроенергії, при низьких експлуатаційних затратах та тривалому терміні експлуатації.

В умовах синхронізації об'єднаної енергосистеми України з європейською ENTSO-E, надійне й екологічно безпечне задоволення потреб населення й економіки в енергетичних продуктах є пріоритетним завданням енергетичної політики держави. На сучасному етапі розвитку енергетики, як в світі так і в Україні збільшується доля переходу від використання ядерних та вуглецевих джерел енергії до декарбонізованих та відновлювальних джерел, енергія яких перетворюється на електричну. Одним із таких джерел електроенергії в Україні є гідроелектростанції. У даному контексті гідроенергетика важлива не тільки з точки зору виробництва електричної енергії, але й цілим комплексом додаткових функцій, які забезпечують сталість функціонування енергетичної системи та економіки України.

Тому, гідроенергетика відіграє важливу роль у забезпеченні стійкості об'єднаної енергетичної системи (далі ОЕС) України, оскільки забезпечує енергетичну систему високоманевреними потужностями в регулюванні добових графіків навантаження з покриттям пікової частини та заповненням нічних провалів, а також виконує функцію аварійного резерву потужності.

1.1 Аналіз об'єкту контролю

Аналіз факторів, які спричинили аварії потужних гідроагрегатів і відомі у світовій практиці, показують, що аварійний стан не виникає миттєво, а має досить тривалу передісторію. В процесі експлуатації в елементах конструкції потужних генераторів протікає цілий ряд фізико-хімічних, термічних і механічних процесів, що з плином часу призводять появи дефектів в обертових та необертових елементах конструкції машини [1, 2].

Для кожного типу конструкції гідроагрегатів характерні свої можливі механічні дефекти. На рис. 1.1 представлена конструкція вертикального гідрогенератора, а на рис. 1.2 – капсульного [2]. На рис. 1.1 прийняті наступні позначення по секціям: загальна секція – Генератор і вал в зборі: 1 – збудник (контактне кільце і щітковий механізм); 2 – верхній направляючий підшипник генератора; 3 – верхній опорний кронштейн; 4 – кінцева обмотка статора; 5 – натискна пластина/палець; 6 – обід ротора; 7 – осердя статора; 8 – корпус статора; 9 – полюс ротора; 10 – система охолодження статора; 11 – опора кінцевої обмотки та кільця ланцюга; 12 – головні і нейтральні клеми; 13 – нижній напрямний підшипник генератора; 14 – упорний підшипник; 15 – вал; 16 – направляючий турбінний підшипник; секція А – Радіально-осьова турбіна (турбіна Френсіса): 17 – ущільнення вала; 18 – кришка турбіни; 19 – розподільник; 20 – спіральний корпус; 21 – напрямна лопатка; 22 – робоче колесо; 23 – водовідвід; секція В – Ковшова турбіна (турбіна Пелтона): 24 – робоче колесо; 25 – насадка; 26 – спис; 27 – інжектор; 28 – дефлектор; секція С – Поворотно-лопатєва турбіна (турбіна Каплана): 29 – напрямна лопатка; 30 – пристрій керування потоком; 31 – лопаті робочого колеса; 32 – водовідвод.

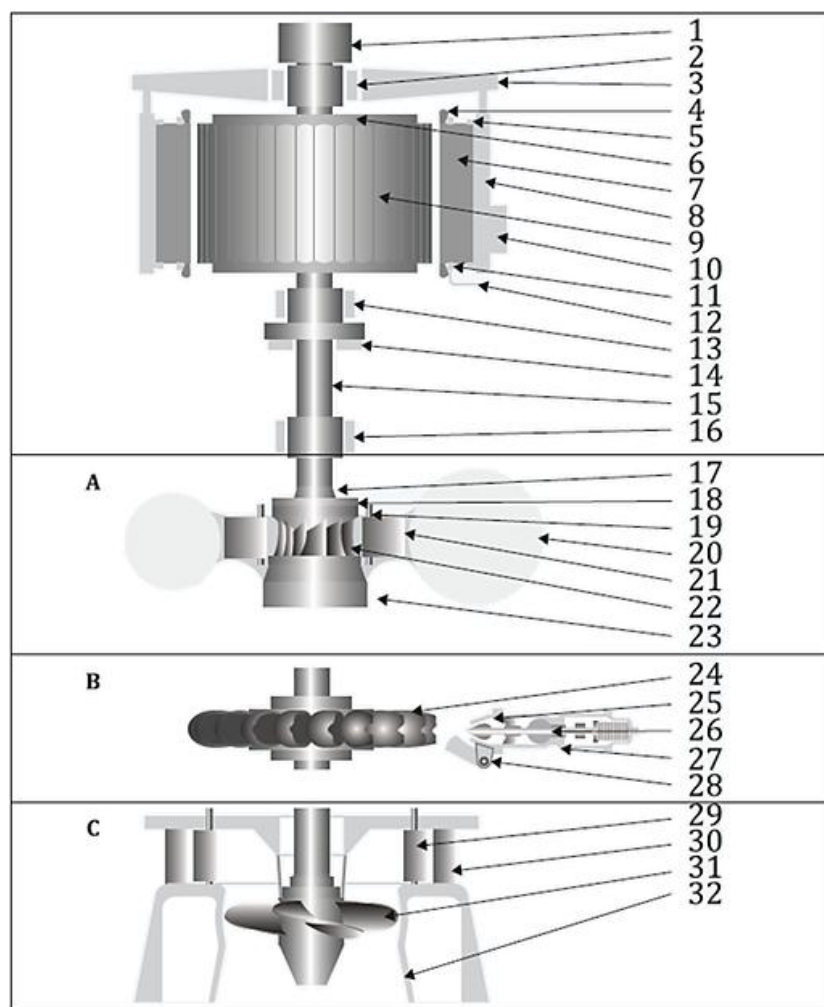


Рис. 1.1 Компоненти гідроагрегатів з турбінами Френсіса, Пелтона та Каплана.

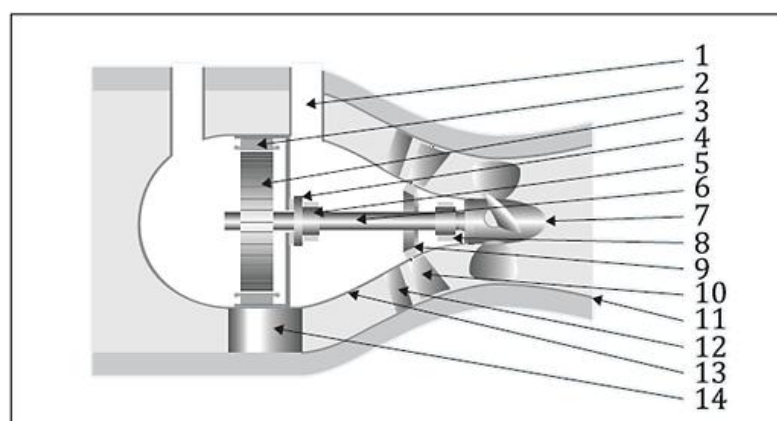


Рис. 2 Компоненти капсульного гідроагрегату: 1 – доступ до вала; 2 – статор; 3 – ротор; 4 – упорний підшипник; 5 – напрямний підшипник генератора; 6 – вал; 7 – турбіна; 8 – напрямний підшипник турбіни; 9 – опора; 10 – напрямний апарат; 11 – тягова труба; 12 – флюгер; 13 – корпус; 14 – нижня опора.

Як відомо з [3–7] вимірювання радіальної вібрації вала вертикального ГА дозволяє з використанням систем контролю і діагностики розпізнати значну кількість його дефектів.

В таблиці 1.1 наведено конструктивні дефекти вузлів ГА, для визначення яких, як діагностичний параметр можуть бути використані дані результатів вимірювання параметрів радіальної вібрації вала [6].

Таблиця 1.1

Конструктивні дефекти вузлів гідроагрегату

Вузол	Дефект	Діагностичний параметр дефекту	Діагностичні ознаки дефекту
1	2	3	4
Робоче колесо	Механічна незрівноваженість	Радіальна вібрація корпусу турбінного підшипника і биття вала в зоні підшипника	Виявляється найкраще на режимі вибігу (після відключення агрегату від мережі) і на режимах холостого ходу з різною частотою обертання. Амплітуда коливань обертової частоти зростає пропорційно квадрату частоти обертання. Зі зміною потужності агрегату величини вібрацій і биття вала не змінюються
	Гідравлічна незрівноваженість	Радіальна вібрація корпусу турбінного підшипника і биття вала в зоні підшипника	Амплітуди вібрацій і биття вала обертової частоти зростають зі збільшенням витрат води (потужності агрегату). Поява в спектрі радіальних вібрацій корпусів підшипників та битті вала власних частот коливань ротора агрегату в поперечному напрямку
	Зачіпання робочого колеса за камеру	Вібрація опорних вузлів і биття вала	битті вала власних частот коливань ротора агрегату в поперечному напрямку
	Поломка лопатей осьових турбін	Радіальна вібрація корпусу турбінного підшипника і биття вала в зоні підшипника	Відбувається раптове зростання биття вала і вібрація турбінного підшипника на обертовій частоті коливань
Турбінний підшипник	Підвищений зазор "вал-вкладиш"	Биття вала	Зростання биття вала на оборотній частоті при збереженні рівня вібрації корпусу підшипника.

Турбінний підшипник	Пошкодження опорного вузла сегментного направляючого підшипника	Вібрація корпусу підшипника і биття вала в зоні підшипника	Коливання частотою $2f_{iа}$ мають місце на всіх режимах роботи агрегата, включаючи режим синхронного компенсатора. При великій жорсткості корпусу підшипника коливання спостерігаються тільки в битті вала .
	Нерівномірність жорсткості "вал-вкладиш" підшипника по периметру.	Биття вала відносно нерухомих частин агрегату.	Виявляється з побудови траєкторії руху центру вала (годографа) за биттям вала за оборот турбіни. Годографи будуються для різних режимів турбіни.
	Механічна незрівноваженість	Радіальна вібрація корпусу генераторного підшипника і биття вала в зоні підшипника.	Дисбаланс ротора виявляється на режимі вибігу і на холостому ході без збудження (при різних частотах обертання машини) по вібраціям і биттям вала генераторного підшипника. Радіальні вібрації корпусу генераторного підшипника і биття вала залишаються незмінними за потужних навантажень.
Ротор генератора	Електрична незрівноваженість	Радіальна вібрація корпусу генераторного підшипника і Биття вала в зоні підшипника	Виявляється спостереженням різкої зміни вібрацій корпусу генераторного підшипника і биття вала в його зоні на режимі холостого ходу при подачі збудження. Величина вібрацій і биття вала від електричної незрівноваженості ротора генератора не залежить від режиму роботи агрегата
	Неточне встановлення ротора розточенні статора генератора.	Биття вала в зоні генераторного підшипника відносно нерухомої частини агрегату	Виявляється з годографів, побудованих за вібраціями корпусу генераторного підшипника і биттям вала

Ротор генератора	Ослаблення посадки втулки ротора генератора (властиво підвісним генераторам, триопорна схема)	Биття вала в зоні генераторного підшипника	Зростання биття вала в зоні верхнього генераторного підшипника (зазору "вал-вкладиш" підшипника) з часом. Вібрації корпусу верхнього генераторного підшипника залишаються при цьому незмінними. Зростання вібрацій нижнього генераторного підшипника і биття вала з часом не спостерігається.
Підп'ятник	Нерівномірне навантаження на сегменти підп'ятника	Биття вала , виміряне сенсорами, що встановлені в зоні підшипників.	На зупиненому агрегаті реєструються зазори "вал-вкладиш підшипника" для двох випадків: - ротор агрегата опирається на підп'ятник - ротор агрегата підп'ятник на гальмах. При нерівномірному навантаженні на сегменти виявиться різниця в зазорах за показниками відповідних сенсорів
Вал турбіни	Злом лінії вала	Радіальна вібрація підшипників; биття вала в зоні підшипників.	В спектрах радіальних вібрацій підшипників і битті вала спостерігаються коливання подвійної обертової частоти.

Визначення найбільш типових параметрів, наведених в таблиці 1.1, відбувається згідно чинних міжнародній стандартів, які наведено в таблиці 1.2. Ці стандарти регламентують способи та засоби виявлення контрольньо-діагностичних параметрів та забезпечують оцінку фактичного технічного стану гідроагрегату.

Узагальнений перелік найбільш типових параметрів контролю гідрогенераторів та відповідні чинні міжнародні стандарти наведено в таблиці 1.2 [3].

Вимірювання параметрів биття дає можливість визначити процеси, які безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики валів генераторів. У цьому разі, одночасне вимірювання вібрації та биття вала в декількох режимах дозволяє підвищити достовірність оцінки та визначити фактори, які викликають підвищення рівня вібрації машини. Ці фактори можуть мати механічне, гідравлічне або електричне походження [8–10].

Перелік методів моніторингу компонентів гідроагрегату

Вузол	Параметр контролю	Відповідні стандарти
Генератор	Повітряний зазор	IEEE 1129 ISO 20816-5
	Магнітний потік	IEEE 1129
	Аналіз часткового розряду	IEEE 1129, IEC/TS 60034-27
	Вібрація корпусу та осердя статора	IEEE 1129, ISO 13373-7
	Температура осердя, кільцевого контуру, системи охолодження та обмотки.	IEEE 1129, ISO 13373-7
	Напруга контактного кільця/щіткового механізму	
Вал і підшипники	Струм і напруга на вала	IEEE 112, IEEE 115, IEEE 1129
	Аналіз масла	Доступно безліч стандартів, наприклад, ASTM D5185 для аналіз залишків зносу та ASTM D6304, ASTM D2896, ASTM D445 для стану мастила. Інші стандарти у розробці.
	Вібрація та биття вала, напрямного підшипника, упорного підшипника та корпусу підшипника	ISO 13373-7, ISO 20816-5 IEEE 1129
	Температура напрямного та упорного підшипників	IEEE 1129, ISO 13373-7
Турбіна	Зазор між лопатями (турбіни Каплана і капсульного генератора)	
	Зазор та температура лабіринтного ущільнення (Турбіни Френсіса)	ISO 13373-7
	Кришка турбіни Френсіса для осьової вібрації	ISO 13373-7
	Моніторинг продуктивності (ефективність, натиск та потік)	IEC 60041
	Контроль кавітації та гідравлічних збурень	

Порівняння виміряного значення биття з номінальним значенням дозволяє обчислити, наскільки поточне значення відхиляється від номінального, характерного для даного типу обладнання.

Порівняння виміряного значення биття із значеннями, отриманими в попередні обстеження, дозволяє простежити динаміку тренду та встановити його зміни. А це, в свою чергу, може бути використано не тільки для визначення технічного стану, а й для визначення дефектів обладнання.

Порівняння виміряного значення биття з гранично допустимим значенням дозволяє визначити обладнання (елементи і окремі вузли), експлуатація яких недопустима. Таке порівняння необхідно проводити не тільки при періодичних обстеженнях, воно повинно здійснюватися безперервно в режимі реального часу [4, 5].

1.2 Методи вимірювання параметрів биття валів

Методи моніторингу вібрації є основними методами моніторингу для виявлення більшості видів дефектів у типовому гідроагрегаті. Вал і підшипник, який передає енергію обертання турбіни на ротор генератора, традиційно є найбільш контрольованим компонентом гідроагрегату. Це пояснюється тим, що симптоми великої кількості механічних, гідравлічних та електромагнітних потенційних дефектів можна розглядати як ознаки вібрації в підшипнику та биття поверхні вала. З цієї причини моніторинг вібрації цих компонентів є найважливішою стратегією моніторингу для гідроагрегатів у відповідності до чинних міжнародних стандартів [3].

Схема розташування первинних вимірювальних перетворювачів, засобів моніторингу та діагностики технічного стану компонентів гідроагрегату, які встановлюються на вал, напрямних та упорних підшипниках, представлено на рис. 1.3, на якому 1 – сенсори для визначення температури напрямних та упорного підшипників; 2 – сенсори абсолютної вібрації корпусу підшипників; 3 – сенсори відносного положення та вібрації вала; 4 – сенсори відносного положення та вібрації упорного підшипника; 5 – сенсори для визначення швидкості обертання та фаз на вала; 6 – сенсори для визначення струму на вала.

Схема наведена на рис. 1.3 дозволяє визначити основні контрольно-діагностичні параметри, які повною мірою можуть охарактеризувати поточний технічний стан гідроагрегату.

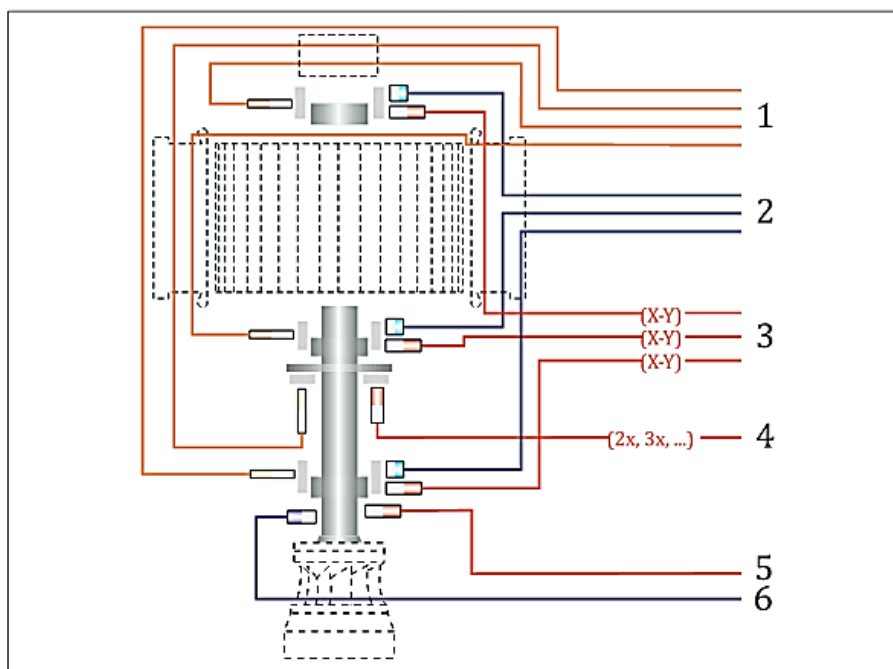


Рис. 1.3 Основні параметри контролю вала та підшипників гідроагрегату

Зауважимо, що загальноприйнятий в вітчизняній технічній літературі термін «радіальне биття циліндричних поверхонь валів» в міжнародних стандартах використовується як термін «vibration on rotating shafts» – вібрація на обертальних валах, або радіальна вібрація вала.

Зазвичай відносне та абсолютне радіальне биття вала вимірюють в районі верхнього та нижнього генераторного підшипників, а також в районі турбінного підшипника. В переважній більшості відносне зміщення між валом і сенсором є малим в порівнянні з абсолютним зміщенням вала [6].

Відносне биття. Вимірюється відносно корпусу відповідного напрямного підшипника. В цьому випадку два безконтактні сенсори, які з кутом 90° між ними прикріплюються до відповідної частини напрямної опори (підшипника) в напрямках X і Y. Сенсори можуть бути закріплені або на корпусі підшипника, або встановлені безпосередньо в напрямних підшипникових вкладках. Таке розміщення сенсорів дозволяє визначити положення вала в зазорі підшипника.

Слід зауважити, що з зазначених вище безконтактних сенсорів на корпусі підшипників можуть встановлюватись як вихрострумові, так і ємнісні сенсори. В той же час в напрямних підшипникових вкладки (всередині підшипника) можуть встановлюватись тільки вихрострумові сенсори, бо на характеристики ємнісних буде впливати плівка масла, яка знаходиться в зазорі підшипника

На рис. 1.4 наведено приклад розміщення на кришці підшипника (показано стрілками) сенсорів відносного биття типу PCS-200 ESB фірми Vibrosystem (Канада) [4, 6, 11].

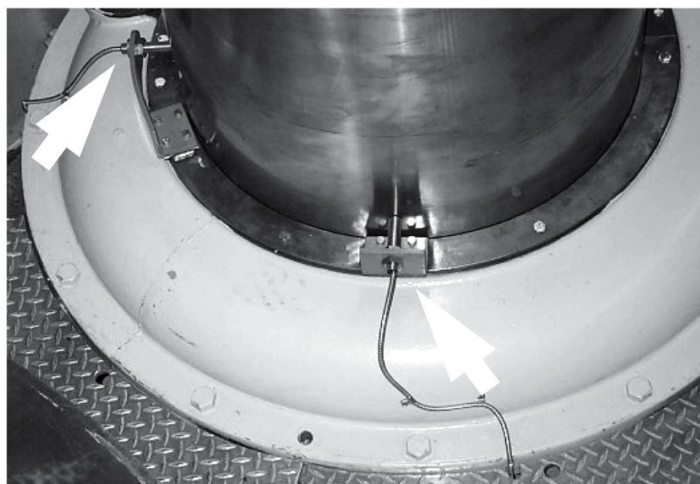


Рис. 1.4 Приклад розміщення сенсорів на кришці підшипника

Зазвичай зазор радіальних підшипників складає приблизно декілька сотень мікрометрів (мікрон). Тому для контролю переміщення вала за допомогою сенсорів як в X -напрямку, так і Y -напрямку, встановлених поряд з напрямними підшипниками, рекомендується використовувати сенсори з діапазоном вимірювання меншим за 2 мм [6].

Абсолютне биття. Вимірюється відносно нерухокої частини ГА, жорстко зв'язаної з фундаментом. Вимірювання абсолютної радіальної вібрації може бути зроблено з використанням тієї ж конфігурації безконтактних XU -сенсорів з додатковими елементами.

Існують два методи вимірювання абсолютного биття вала, які використовуються в системах контролю вертикальних гідроагрегатів.

В *першому методі*, який застосовують на високооберткових гідроагрегатах, використовують систему безконтактних ХУ-сенсорів разом з системою акселерометрів [4, 6, 11]. Схема такого вимірювання показана на рис. 1.5.

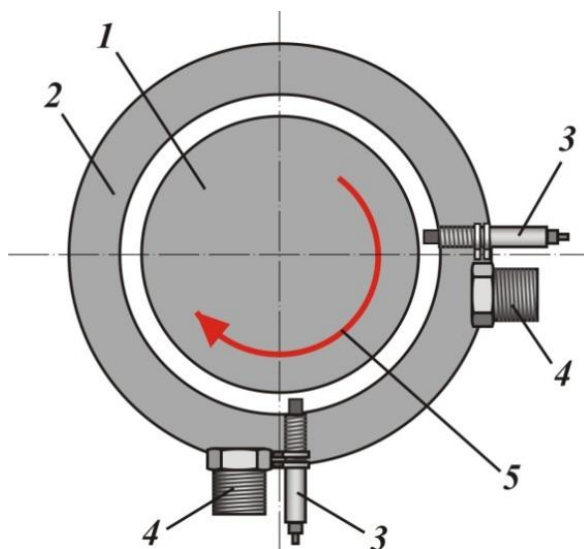


Рис. 1.5 Схема вимірювання абсолютної вібрації вала: 1 – вал гідроагрегату; 2 – корпус підшипника; 3 – безконтактний сенсор відносного радіального биття вала; 4 – сенсори вібрації корпусу підшипника (акселерометр).

Вимоги до акселерометрів встановлюються міжнародними стандартами [4 6, 11]. Виміряне віброприскорення з використанням подвійного інтегрування перетворюють в вібропереміщення, і для визначення абсолютної вібрації для кожної з координат X і Y , ці вібропереміщення векторно сумуються з переміщеннями, виміряними безконтактними сенсорами биття.

В *другому методі*, який застосовують для низькооберткових гідроагрегатів, використовують таку ж саму конфігурацію ХУ-сенсорів, але сенсори встановлюються на стінці гідрогенератора за допомогою ортогонально-орієнтованих жорстких кронштейнів, що дозволяє здійснювати вимірювання абсолютного биття ротора відносно нерухомої частини конструкції.

На рис. 1.6 наведено приклад встановлення на двох жорстких кронштейнах сенсорів абсолютного биття біля напрямного підшипника гідроагрегата, де самі кронштейни зв'язані з нерухомою конструкцією [4, 6, 11].

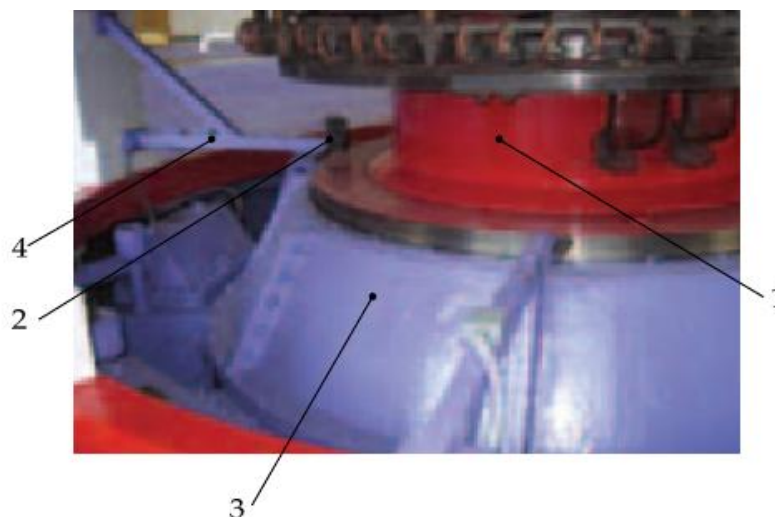


Рис. 1.6 Схема вимірювання абсолютного биття вала з сенсорами на жорстких кронштейнах: 1 – вал; 2 – безконтактний сенсор абсолютного радіального биття вала; 3 – корпус; 4 – жорсткий кронштейн кріплення сенсорів.

Слід зауважити, що необхідно забезпечити надійний механічний контакт кожного сенсора, як відносно так і абсолютної вібрації, з деталлю, на якій він встановлюється. При встановленні сенсорів на полках чи кронштейнах необхідно забезпечити передачу вібрації без спотворень. Власна частота механічних коливань полки або кронштейна з перетворювачами не повинна збігатися з частотою будь-якої складової вимірюваної вібрації.

1.3 Сенсори параметрів биття вала та системи моніторингу на їх основі

Як було визначено в попередньому підрозділі, для вимірювання биття вала використовуються сенсори биття, які розміщуються в одній площині у взаємно перпендикулярних напрямках один відносно іншого. Такі сенсори можуть бути різних типів, серед яких найбільшого поширення набули наступні: струмовихрові та ємнісні. Характеристики різних типів сенсорів наведені в таблиці 1.3.

Принцип дії струмовихрових перетворювачів заснований на зміні індуктивного опору котушки при розміщенні в її електромагнітному полі електропровідного матеріалу. Зазвичай, струмовихровий перетворювач (eddy current probe) складається з безконтактного пробника (сенсора), з'єднувального

кабеля та електронного блоку. Конструктивно струмовихровий пробник – це металевий зонд з діелектричним наконечником (у якому укладена котушка) на одному кінці і відрізком коаксіального кабелю на іншому. Виходом є електричний сигнал, прямо пропорційний відстані від торця вихрового пробника до об'єкта, що контролюється. Вихідним сигналом зазвичай є напруга.

Основні *переваги* струмовихрових сенсорів: простота конструкції, низька вартість, несприйнятливості до зміни вологості і газового складу навколишньої атмосфери. До *недоліків* потрібно віднести залежність вимірювального сигналу від хімічного складу контрольованого об'єкта (у даному випадку вала машини), що викликає необхідність налаштування приладів на кожну конкретну марку сталі, з якої виготовляється вал машини. Окрім того, залишкова намагніченість вала також може спотворити вимірювальний сигнал [4, 5].

В світовій гідроенергетиці для контролю биття валів частіше застосовуються струмовихрові сенсори фірми Bently Nevada (США) [12] та фірми VibroSystem (Канада) [13].

Принцип дії ємнісних перетворювачів (capacitive sensor) заснований на зміні електричної ємності в залежності від зміни відстані між торцем перетворювача і валом. Ємнісні сенсори мають високі хороші метрологічні характеристики, нечутливі до впливу потужних електромагнітних полів, а діапазон їх робочих температур визначається лише стійкістю матеріалів, що застосовуються. Сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню, у тому числі при масовому і серійному виробництві, нескладні у виготовленні, налагодженні і експлуатації.

Серед ємнісних сенсорів биття вала ГА і взагалі потужних електричних машин найчастіше застосовуються сенсори фірми VibroSystem (Канада) [14].

В таблиці 1.3 наведено характеристики сенсорів зазначених фірм [5].

Характеристики сенсорів радіального биття відомих світових фірм

Фірма	Модель	Принцип дії	Діапазон, мм	Похибка, %	Вихідний сигнал	Довжина кабелю	Необхідність калібрування	Чутливість до намагнічування
Bently Nevada (США)	3300XL 8mm probe	Струмовихровий	0,25 ÷ 2,3	±2,5	0÷24	5÷9	+	+
	3300XL 11mm probe		0,5 ÷ 4,6	-4 ÷ +6	0÷20	8	+	+
Vibrato System (Канада)	PES-302	Ємнісний	0,3 ÷ 2,3	1,25	4÷20	300	-	8
	PES-202SB		0,3 ÷ 2,3	1 (30) 3 (70) 6 (100)	4÷20	6	-	8
	PES-200ESB		0,3 ÷ 4,3	1 3 6	4÷20	6	-	4
	PES-200ESB		0,3 ÷ 6,3	1 4 8	4÷20	6	-	2,67
	PES-304		0,5 ÷ 4,5	2,5	4÷20	300	-	4
	PES-103	Струмовихровий	0 ÷ 3	5	5÷20 1÷10	300 100	+	5 3
	PES-106		0 ÷ 6	5	4÷20 0÷10	300 100	+	2,67 1,67
	PES-302		0 ÷ 2	5	10÷20	30	+	5 3
PES-305	0 ÷ 5		5	2,67 1,67	30	+	6,67÷20 1,67÷10	

Як видно з таблиці 1.3, точність вимірювання як струмовихрових, так і ємнісних сенсорів, особливо в великих діапазонах вимірювання недостатня.

На жаль, в паспортних даних всіх сенсорів не вказується швидкодія приладів, а цей параметр разом з точністю вимірювання дозволяє при використанні експертних систем забезпечувати більш достовірний контроль стану машин та їхню діагностику.

Однією з перших таких систем вібраційного контролю стану ГА стала система **VIMOS**, яка розроблена в шведському відділенні компанії ASEA-Brown Boveri [15]. Завдяки універсальності система використовується на багатьох ГЕС Швеції.

В системі **VIMOS** реєструються дані від безконтактних *струмовихрових* сенсорів переміщень напрямних підшипників по осях X і Y ; безконтактних сенсорів переміщень підп'ятників; безконтактних сенсорів переміщень опорних конструкцій підп'ятників; вимірювачів вібрацій (акселерометрів) лобових частин обмотки статора; безконтактних сенсорів переміщень корпусу статора та безконтактних сенсорів контролю повітряного зазору турбіни. За результатами вимірювань (за 32 каналами) аналізуються тенденції зміни вібрації, а також спектр частот вібрації за допомогою цифрових фільтрів і швидкого перетворення Фур'є. Результати вимірювань зберігаються в базі даних.

Під час вводу системи в експлуатацію встановлюються межі спрацювання аварійної сигналізації з урахуванням нормального розсіювання рівня коливань та допустимого для даної конструкції ГА розкиду значень параметрів. Під час перехідних режимів (пуск, зупинка, робота з малим навантаженням) рівень допустимих коливань може бути встановлено набагато більшим.

Система має програму автоматичної перевірки достовірності введених сигналів, що дозволяє відфільтровувати помилкові спрацювання аварійної сигналізації.

За допомогою системи **VIMOS** здійснюється контроль наступних параметрів:

- переміщення напрямних підшипників в напрямках від верхнього б'єфу до нижнього і від правого берега до лівого;
- переміщення сегментів підп'ятника;
- вібрації в лобових частинах обмотки осердя статора;
- вібрації пакету активної сталі статора;
- повітряного зазору між сенсором і валом.

Вимірювання вібрації здійснюється за двома перпендикулярними осями.

Перевагою системи **VIMOS** є безперервний режим роботи.

Недоліками системи *VIMOS* є:

- відсутність засобів відображення параметрів моніторингу та осцилограм биття вала;
- не вимірюється фаза биття і не передбачене автоматичне визначення дефектів;
- застосування в якості сенсорів биття сенсорів струмовихрового типу, характеристики яких залежать від можливих намагнічень вала, а також потребують тарування.

Заслугує на увагу система контролю *MONDIG*, в якій враховані особливості ГА Ітайпу ГЕС (Бразилія, Парагвай) [15, 16]. Вона розроблена відділенням концерну ASEA-Brown Boveri в Швейцарії. Індивідуальність розробки цієї системи визначається унікальністю найбільших в світі гідрогенераторів, виконаних в двох варіантах частоти струму – 50 і 60 Гц. В системі використовується ряд сенсорів, які контролюють механічні величини, що дає можливість ефективного визначення дефектів на ранній стадії їхнього розвитку. Це *струмовихрові* сенсори абсолютної радіальної вібрації (биття) та осьового зміщення вала, *п'єзоелектричні* сенсори відносної вібрації корпусів підшипників, *п'єзоелектричні* сенсори вібрації осердя статора, сенсори зміщення корпусу статора, сенсор вібрації корпусу статора в фундаменті, сенсори переміщень корпусів підшипників та сенсор зазору в турбіні. Клас точності сенсорів вібрації $\pm 5\%$ [17].

Значного поширення в практичному застосуванні на ГЕС та ГАЕС набули системи контролю ГА компанії *Bently Nevada (США)*. Компанія *Bently Nevada* має 60-річний досвід в розробленні та виготовленні систем вібромоніторингу та захисту обладнання електростанцій, переносних пристроїв контролю ГА, а також безконтактних сенсорів механічних величин та програмного забезпечення [P1_C_18, 19]. Особливості застосування і лінійка апаратури компанії для потужних ГА відображені в роботах [20, 21].

1. *BentlyNevada 3500 Series Machinery Monitoring System* [22-24].

До складу системи (блоку BN 3500) входить широкий набір різних модулів з різним функціональним призначеннями, що забезпечує якісний моніторинг і переваги над іншими аналогічними системами та блоками. Загальний вид приладу показано на рис.1.7.



Рис. 1.7 Загальний вид системи 3500 Series Machinery Monitoring System

Набір модулів комплектується в залежності від потреби. Система забезпечує зменшення ризику відключення при некритичних вібраційних діагностичних показниках та при вібраціях перехідних режимів. Практично кожний аспект роботи BN 3500 є програмно регульованим, що надає високу гнучкість системі. На даний час, на різних електростанціях в світі, таких систем встановлено 80000 екземплярів.

2. *3701/46 ADAPT Hydro Monitor* [15, 25].

Малогабаритний прилад, розроблений спеціально для контролю стану та захисту ГА і адаптований для застосування за низьких обертових швидкостей ГА. До пристрою може бути підключено 12 сенсорів різного типу для вимірювання абсолютної та відносної вібрації вала, динамічного тиску води в зоні робочого колеса. Монітор 3701/46 налагоджується і перевіряється з використанням програмного забезпечення Bently Nevada Monitor Configuration (BNMC), яке ліцензується для кожного комп'ютера. Загальний вид приладу показано на рис. 1.8.



Рис. 1.8 Загальний вид системи 3701/46 ADAPT Hydro Monitor

3. *2300 Vibration Monitors* [26, 27].

Малогабаритні монітори 2300 забезпечують економічно ефективний безперервний моніторинг та захист від впливу високого рівня вібрації для менш критичних та ушкоджених машин. Монітор має два входи для акселерометрів, два входи для безконтактних сенсорів відстані та канал сенсора синхронізації вимірювань. Зручним є присутність дисплею на корпусі самого приладу. Загальний вид приладу показано на рис. 1.9.



Рис. 1.9 Загальний вид системи 2300 Vibration Monitors

4. *vbOnline Pro Condition Monitoring System* [28, 29].

Система 4. vbOnline застосовується для економічного автоматизованого моніторингу стану ГА невеликої потужності. Це гнучка та масштабована система з програмним забезпеченням BHGE System 1, що забезпечує легкість налагодження та перевірки. Загальний вид приладу показано на рис. 1.10.



Рис. 1.10 Загальний вид системи vbOnline Pro Condition Monitoring System

Для вимірювання радіальної та аксіальної вібрації вала в приладах 3500, 3701/46, 2300, vbOnlinePro застосовуються струмовихрові сенсори наближення типу BentlyNevada3300 XL Proximity Probes, індуктивні сенсори віброшвидкості Bently Nevada 330505 Low Frequency Velocity Sensor, п'єзоелектричні веломітори (вимірювачі віброшвидкості) BentlyNevada190501 Velomitor CT Transducer та 330500 Velomitor Piezo-velocity Sensor [15].

Перелік типів сенсорів, які застосовуються в приладах компанії BentlyNevada [15], наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Типи сенсорів, які застосовуються в приладах компанії BentlyNevada

Сенсори	Прилади			
	3500	3701/46	2300	vbOnlinePro
Сенсори наближення	Так	Так	Так	Так
Акселерометр	Так	Так	Так	Так
Акселерометр торцевої обмотки статора	Так	Ні	Ні	Ні
Веломітор®	Так	Так	Так	Ні
Низькочастотний сенсор швидкості	Так	Так	Так	Ні
Повітряний зазор	Так	Ні	Ні	Ні
Магнітний потік	Так	Ні	Ні	Ні
Динамічний тиск	Так	Так	Ні	Ні
Терморезистор та термопара	Так	Ні	Так	Ні
Входи 4 ÷ 20 мА	Так	Ні	Так	Ні
Вібраційні входи на монітор	4	6	2	12
Макс. кількість каналів на систему	56	12	3	12

Система безперервного контролю стану ГА типу **SUPER**, яка розроблена канадською енергокомпанією Hydro Quebec (Канада), встановлена на ГЕС Rapid Blanck (Канада) [15, 30]. Система є комплексною системою безперервного контролю, до складу якої входить підсистема вібраційного контролю. В підсистемі з використанням *струмовихрових* сенсорів контролюється биття вала біля верхнього та нижнього генераторних підшипників та зазор в турбіні по осях X і Y , а з використанням *п'єзоелектричних* сенсорів – вібрація цих же підшипників також за двома осями.

В системі один раз за хвилину можуть реєструватись дані 52 механічних параметрів. Дані після оброблення один раз на годину подаються на мікроконтролер, що знаходиться на пульті управління ГЕС, причому дані, що різко змінюються при зміні режиму ГА, відкидаються.

Перевагою підсистеми контролю вібрації системи **SUPER** є можливість визначення спектру вібрації.

Недоліками підсистеми контролю вібрації системи **SUPER** є

- відсутність можливості визначення фази биття вала гідроагрегату;
- відсутність можливості контролювати спектр вібрації в реальному часі (спектр передається тільки один раз на годину);
- не передбачено автоматичне визначення дефектів;
- застосування в якості сенсорів биття сенсорів струмовихрового типу, характеристики яких залежать від можливих намагнічень вала, а також потребують тарування.

Наступною північноамериканською компанією, що має значний досвід в розробці систем вібромоніторингу для ГА є компанія **VibroSystM** Inc (Канада), яка розробила та впровадила в застосування на багатьох гідроелектростанціях систему вібраційного контролю ГА з блоком **ZPU-5000 ZOOM**. Система з багатоканальним блоком оброблення сигналів та моніторингу ZPU-5000 [31] є складовою частиною універсального комплексу безперервного контролю стану вузлів ГА – ZOOM (Zero Outage On-line Monitoring) [32, 33]. Загальну структурну схему системи ZOOM SystM для ГА показано на рис. 1.11[34].

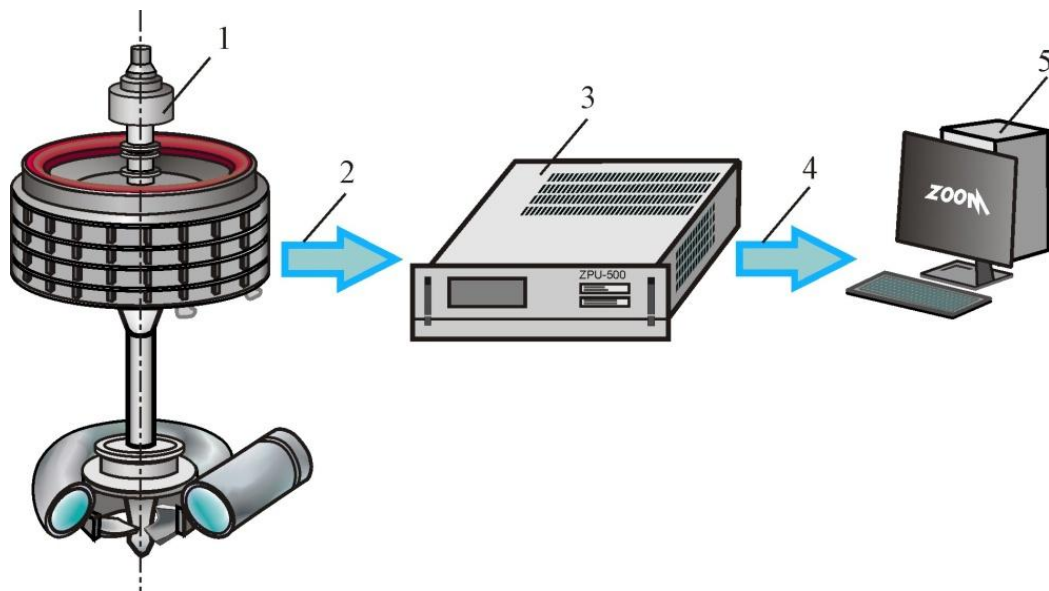


Рис. 1.11 Загальна структурна схема системи ZOOM System

де 1 – гідроагрегат;

2 – контрольні параметри;

3 – блок збирання та оброблення даних;

4 – оброблені дані;

5 – комп'ютер з програмним забезпеченням.

Цією системою вимірюються:

- радіальна та тангенціальна вібрація осердя статора;
- абсолютна вібрація кінцевих частин обмотки осердя статора, фазних виводів, та iso-phase шини;
- відносна та абсолютна вібрація вала;
- відносне радіальне зміщення корпусу статора;
- аксіальна відносна вібрація упорного підшипника;
- відносна радіальна вібрація стержня обмотки осердя статора;
- абсолютна радіальна вібрація корпусу статора, підшипників.

Конфігурацію системи для контролю биття вала ГА з блоком ZPU-5000 та сенсорами показано на рис. 1.12.

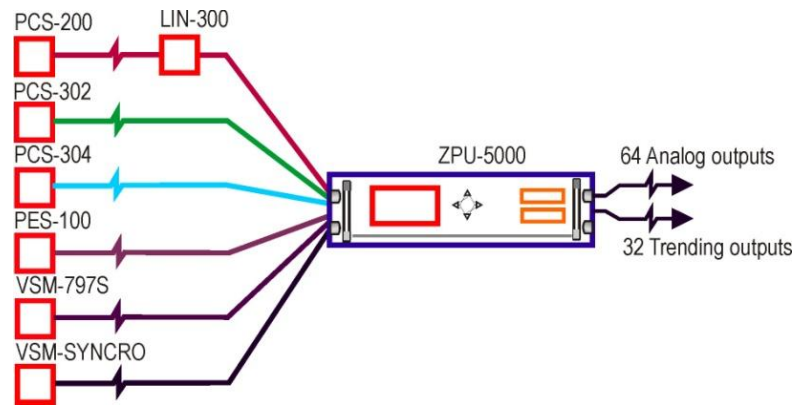


Рис. 12 Конфігурація системи з блоком ZPU-5000

Всього на вхід ZPU-5000 може бути подано 16 аналогових сигналів: $0 \div + 5$ В, $0 \div + 10$ В, ± 5 В, ± 10 В, $- 2 \div -18$ В, $4 \div 20$ мА, що надає змогу користувачам підключати як ємнісні (PCS-200, PCS-302, PCS-304 [35–37]), так і струмовихрові (серії PES-100 [38]) сенсори відносної та абсолютної радіальної вібрації вала ГА. Сенсори типу PCS-200 застосовуються разом з перетворювачем LIN-300 [35]. Окрім того передбачене підключення п'єзоелектричних акселерометрів типу VSM-797S [39], а також індуктивного сенсора синхронізації VSM-SYNCRO [40]. З використанням сенсорів VSM-797S вимірюються параметри абсолютної вібрації складових частин ГА, а з VSM-SYNCRO – здійснюється синхронізація всіх вимірювань. Всі сенсори розроблені компанією VibroSystM, і в них максимально враховані вимоги, яким мають задовольняти вимірювальні прилади, що встановлюються на потужних генераторах.

На виході ZPU-5000 передбачено 64 аналогових сигнали (по 4 на кожний вимірювальний канал): два $4 \div 20$ мА і два $0 \div + 10$ В.

Блок ZPU-5000 складається з плати процесора, модуля аналогових входів/виходів, контрольного модуля та модуля зв'язку. ZPU-5000 виконує різні типи вимірювань в автоматичному та тестовому режимах, обробляє дані, перевіряє стан сигналізації та передає дані до контролера ZOOM і забезпечує швидку та ефективну інтерпретацію даних стану машини за допомогою програмного забезпечення [34]. Для візуальної інтерпретації в ZPU-5000 передбачено вакуумний флуоресцентний дисплей.

Блок або встановлюється в спеціальній шафі, в якій розміщуються всі складові частин системи ZOOM для окремого ГА, або закріплюється на стіні.

Загальний вид ZPU-5000 показано на рис. 1.13.



Рис. 1.13 Загальний вид ZPU-5000

На даний час система вібраційного контролю ГА з блоком ZPU-5000 ZOOM є одною з найбільш досконалих.

У випадках коли застосування стаціонарних систем обмежене або неможливе з ряду причин застосовують портативні системи, однією з таких систем є портативна система **CoDIS**. Система CoDIS (CoDiS PMU Portable Monitoring Unit), розроблена фірмою IRIS Power LP (Канада). Ця система використана на ГЕС Лажсе 1 (Боснія і Герцоговина) для вимірювання абсолютної вібрації вала ГА з турбіною Francis потужністю 31 МВт та швидкістю обертання 300 об/хв. [41].

На рис. 1.14 наведено загальний вид переносного електронного блоку системи, а на рис. 1.15 – структурну схему.



Рис. 1.14 Загальний вид переносного електронного блоку системи CoDIS

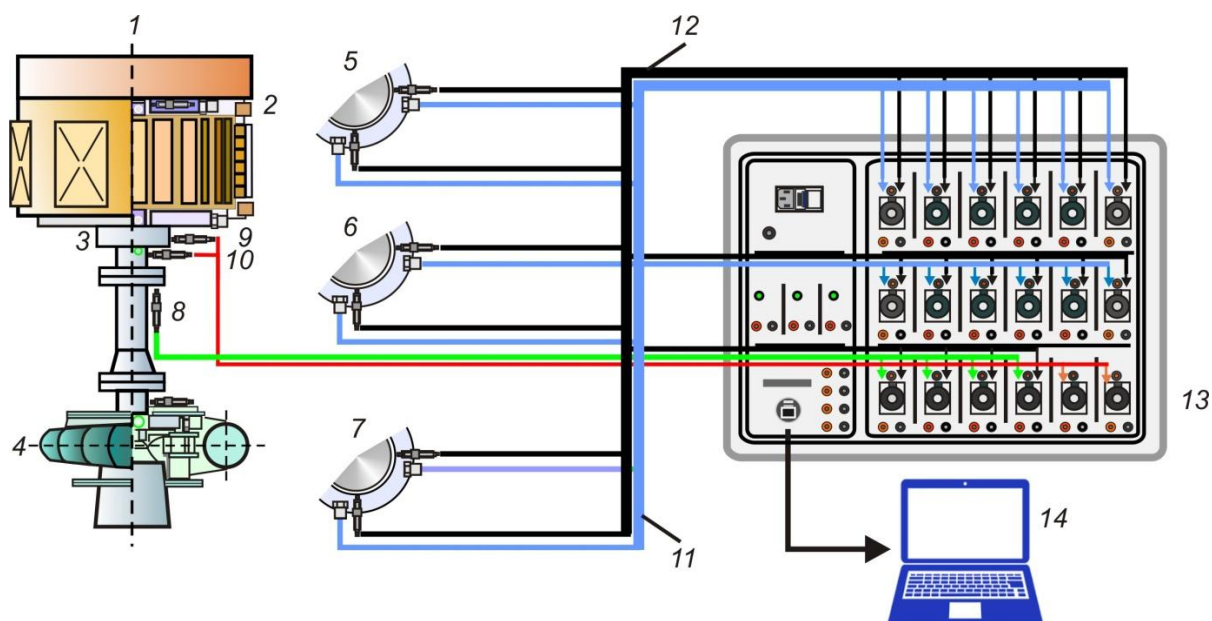


Рис. 1.15 Структурна схема системи CoDIS: 1 – гідрогенератор; 2 – верхній напрямний підшипник; 3 – нижній напрямний підшипник; 4 – турбінний підшипник; 5 – сенсори верхнього напрямного підшипника; 6 – сенсори нижнього напрямного підшипника; 7 – сенсори турбінного підшипника; 8 – сенсор осьового зміщення вала; 9,10 – сенсори міток вала (тригери); 11 – шина сигналів з акселерометрів; 12 – шина сигналів з безконтактних сенсорів відносної вібрації вала; 13 – електронний блок оброблення сигналів; 14 – комп'ютер з програмним забезпеченням.

Схема CoDiS PMU має 16 входів для аналогових сигналів: 1 (один) сигнал мітки вала (від тригера), 6 (шість) сигналів від безконтактних сенсорів відносної радіальної вібрації вала, 6 (шість) сигналів від сенсорів вібрації (акселерометрів) корпусів підшипників, 3 (три) сигнали загального призначення, які включають аналоговий сигнал від сенсора осьового переміщення вала, сигнал від сенсора повітряного зазору між статором та ротором в ГГ і сигнал від сенсора магнітного потоку.

Для роботи з апаратним блоком CoDiS PMU застосовується спеціальне програмне забезпечення CoDiS PDS (Portable Diagnostic System), яке встановлюється на ноутбучі або на стаціонарному комп'ютері. На вимогу замовника ноутбук може бути поставлено в комплекті системи.

Стандартні функції програмного забезпечення CoDiS PDS:

- налагоджування чутливості (зміщення сигналу) для кожного сенсора;
- аналіз історії зміни параметрів при неперервному вимірюванні протягом декількох днів або тижнів;
- аналіз короткострокових тенденцій зміни параметрів з налаштування тривалістю;
- аналіз форми сигналів, отриманих в режимі on-line із DAQ (data acquisition card), або off-line з текстового файлу кодування ASCII (American Standard Code for Information Interchange), залежно від вибору;
- можливість зберігання необроблених даних сигналу у ASCII файлі вручну, або на ALARM/ TRIP, де у файлі дуже об'ємні дані можуть зберігатись;
- розрахунок спектру – FFT (fast Fourier transform) і Waterfall;
- можливість зберігання даних вектора стану у ASCII файлі;
- аналіз орбіти (усереднений, усереднений/ковзний, синтезований/з постійним струмом або без нього) з компенсацією для різних положень сенсора в різних площинах вимірювання;
- можливість аналізу даних, отриманих за дуже низьких швидкостях обертання вала (нижче 5 об/хв.);
- відкрита архітектура, що забезпечує обмін даними через TCP (Transmission Control Protocol) network.

Додаткові функції програмного забезпечення CoDiS PDS:

- аналіз величини повітряного зазору між статором та ротором в ГТ та аналіз магнітного поля в зазорі (аналіз профілю полюсів ротора, аналіз форми статора і ротора, визначення короткозамкнених витків полюсів ротора);
- побудова 3 D моделей биття вала гідроагрегату на трьох підшипниках;
- статистичний аналіз записаних даних у вигляді гістограм.

Абсолютна вібрація ділянок вала гідроагрегата в системі CoDiS PMU вимірюється з використанням безконтактних струмовихвихрових сенсорів (з діапазоном вимірювання 0,5 – 2,5 мм) разом з акселерометрами. Виміряне віброприскорення з використанням подвійного інтегрування перетворюють в вібропереміщення, і для визначення абсолютної вібрації для кожної з координат X

і Y , ці вібропереміщення векторно сумуються з переміщеннями, вимірними безконтактними сенсорами.

Основні переваги системи CoDiS:

- діагностування вібраційного стану декількох гідроагрегатів одним електронним блоком по черзі;
- наявність програмного забезпечення з широкими можливостями.

Недоліком системи CoDiS є приймання інформації у вигляді аналогових сигналів, що не дозволяє використання цифрових ємнісних сенсорів для вимірювання відносної радіальної вібрації вала, враховуючи те, що останні мають переваги перед струмовихровими під час застосування на ГА.

Також уваги заслуговує система "*АЛМАЗ-7010-ГЭС*", яка розроблена компанією ДИАМЕХ 2000 [4, 15]. Для контролю биття біля генераторного та турбінного підшипників в системі використані *струмовихрові* сенсори типу СИЭЛ-1662 виробництва ЗАТ "СИЭЛ"

Перевагами "*АЛМАЗ-7010-ГЭС*" є:

- передавання сигналів по каналам з підвищеною завадостійкістю;
- повне самотестування вимірювальних компонентів (включаючи сенсори та сполучні кабелі);
- автоматичне коригування характеристик каналів.
- програмне забезпечення системи видає дискретний сигнал на сигналізацію і/або відключення агрегату:
 - при перевищенні загального рівня вібрації встановлених уставок;
 - при підвищенні рівня вібрації в заданій полосі;
 - при перевищенні заданих значень биття вала.
- можливість порівняння станів ГА на ідентичних режимах (генераторних, компенсаторно-генераторних);
- можливість формування протоколів, доступних по локальній мережі (з використанням стандартного протоколу TCP / IP) або інших (за погодженням із замовником);
- можливість передавання даних через мережу Інтернет;

— можливість використання декількох комп'ютерів для віддаленої роботи.

Ще однією з таких систем забезпечення безаварійної та безпечної експлуатації ГА є апаратно-програмний комплекс автоматизованого моніторингу биття вала ГА (АПК "ВАЛ") [4, 15]. З використанням АПК "ВАЛ" може здійснюватись безперервний контроль биття вала діючих ГА. Основні технічні характеристики АПК "ВАЛ" наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Основні технічні характеристики АПК «ВАЛ»

Кількість вимірювальних каналів	4÷32
Тип сенсорів биття	індуктивний диференціальний IA2-5 M18 ×1
Робоча зона сенсора, мм	3
Діапазон зміни биття, мм	± 1,0
Розрізнявальна здатність мкм,	5
Лінійність вихідного сигналу в робочому діапазоні, %	1
Тип сенсору мітки вала	оптичний, інфрачервоний
Передавання даних від блоку оброблення до ПК	ETHERNET

З використанням комплексу здійснюється розрахунок і індикація величин амплітуд биття вала (які реєструються кожним сенсором в реальному масштабі часу), індикація та оповіщення про перевищення допустимих величин биття вала, накопичення даних спостереження і передача інформації в АСУТП станції для подальшої обробки та інтерпретації з метою діагностики стану ГА.

Індукційні сенсори реєструють биття вала гідроагрегата (коливання циліндричної поверхні вала щодо несучих конструкцій, тобто абсолютну вібрацію). Сенсори встановлюються в районах верхнього та нижнього підшипників попарно з кутом 90° між ними. В подальшому сигнали биття в аналого-цифрових перетворювачах (входять до пристроїв узгодження) перетворюються в цифрову форму і потім через кабелі передаються до мікроконтролера комплексу. Пристрої узгодження сенсорів з лінією зв'язку

розташовуються в безпосередній близькості від сенсорів. У мікроконтролері проводиться розрахунок максимальної величини амплітуди биття вала, яка реєструється кожним сенсором за один оберт за сигналом оптичного інфрачервоного сенсору мітки вала. Всі параметри контролю відображаються на власному моніторі апаратного блоку, а також на моніторах оперативного персоналу станції, включених в локальну мережу АСУТП. Апаратний блок може використовуватись як окремий пристрій, як показано на рис. 1.16., а може встановлюватись в 19" стійки обладнання АСУТП ГЕС.



Рис. 1.16 Апаратний блок АПК «ВАЛ»

Комплекс "ВАЛ" може працювати в двох режимах: в автоматичному автономному та в автоматизованому (діалоговому).

В автоматичному автономному режимі забезпечується:

- контроль, зберігання і оброблення інформації про биття вала гідроагрегата;
- розрахунок максимальної амплітуди биття;
- відображення контрольованих і розрахункових параметрів;
- самоперевірка працездатності самого комплексу.

В автоматизованому режимі забезпечується:

- управління режимами функціонування комплексу "ВАЛ";

- відображення інформації на всіх етапах обробки даних і її наочна графічна інтерпретація;
- витяг осцилограм биття вала.

Перевагами АПК "ВАЛ" є:

- простота, можливість використання одного апаратного блоку на декількох гідроагрегатах;
- робота в безперервному режимі;
- можливість перегляду осцилограм.

Недоліками АПК "ВАЛ" є:

- не визначається фаза сигналів биття;
- не контролюється спектр вібрації вала гідроагрегату;
- не передбачено автоматичне визначення дефектів (діагностування);
- використання індуктивних сенсорів у вимірювачах биття, які мають значну похибку, зумовлену намагніченістю вала.

Іншою спеціалізованою системою є комплекс неруйнівного контролю **"КНК-32"**. Комплекс призначений для автоматизації вібраційних випробувань і діагностики ГА. Був застосований при проведенні вібровипробувань і динамічного балансування ротора гідроагрегатів на Іркутській ГЕС, Братській ГЕС, Усть-Ілімській ГЕС та ГЕС Вілюйського каскаду [4, 15].

На рис.1.17 наведено заганий вид переносного електронного блоку системи, а на рис. 1.18 – структурну схему.



Рис.1.17 Загальний вид переносного електронного блоку системи КНК-32

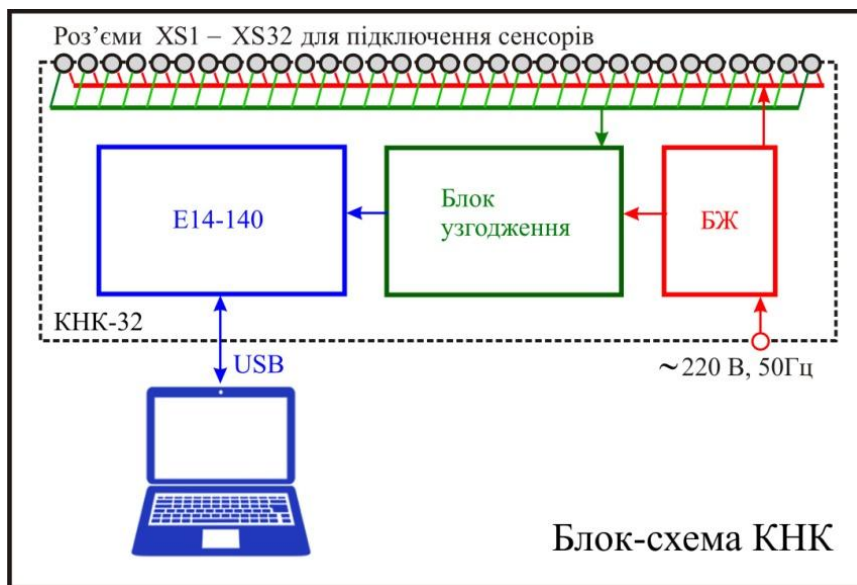


Рис. 1.18 Структурна схема системи КНК-32

В комплекс входять: сенсори вібрації типу ИВП-05 і струмовихрові безконтактні сенсори биття вала типу ИОП-03.

Основні технічні характеристики комплексу:

кількість каналів – 32;

частота дискретизації каналу при застосування модуля E14-140 – $0 \div 2$ кГц.

Вимірювання вібрації:

частотний діапазон – $0,8 \div 200$ Гц;

діапазон розмаху вібропереміщень – $5 \div 1000$ мкм;

нерівномірність АЧХ в робочому діапазоні частот – 10 %.

Вимірювання биття вала:

частотний діапазон – $0 \div 20$ Гц;

діапазон розмаху биття $30 \div 2000$ мкм;

нерівномірність АЧХ в робочому діапазоні частот – 10 %.

Вимірювання частоти обертання:

частотний діапазон – $0 \div 20$ Гц.

Довжина екранованих кабелів залежить від компоновки гідроагрегату.

Програмне забезпечення є інтерфейсом, що дозволяє здійснювати:

- оброблення даних вібрації, биття вала та частоти обертання;
- налагодження сенсорів для кожного каналу, встановлення коефіцієнтів перетворення;
- опис місця встановлення сенсорів, тарування сенсорів биття вала за місцем встановлення;
- побудова форми сигналу, як для одного каналу, так і для одночасного відображення (накладення сигналів) декількох каналів;
- побудова спектра вібрації, биття вала;
- побудову каскаду спектрів вібрації, биття вала;
- побудову траєкторії руху вала;
- табличне і графічне відображення параметрів результатів вимірювань в реальному масштабі;
- фільтрація сигналів;
- конфігурація зчитування даних по всіх каналах;
- збереження і протоколювання отриманої інформації;

У модулі E14-140 закладено потужні функції синхронізації, що дозволяють використовувати їх для запуску комплексу збору інформації в режимах вибігу і розгону ГА.

Перевагами комплексу "КНК-32" є

- простота;
- можливість діагностування вібраційного стану декількох гідроагрегатів одним електронним блоком по черзі.

Недоліком комплексу "КНК-32" є

- використання струмовихвихрових сенсорів биття.

На жаль, в Україні подібні системи не виготовляються.

1.4 Критерії оцінки биття валів потужних ГА

Згідно [5, 42, 43] критеріями оцінки параметрів биття валів є:

Критерій 1: Для забезпечення надійної і безпечної роботи машини в нормальних умовах необхідно, щоб величина биття вала залишалася нижчою певних меж, наприклад, у відповідності до допустимих кінетичних навантажень. Як правило, цей критерій повинен братися за основу для оцінки машин при відсутності будь-яких інших встановлених знань про задовільні експлуатаційні характеристики для машин цього типу (наприклад, для нових типів машин).

Критерій 2: Зміни величини биття щодо еталонного значення також не повинні перевищувати певних меж, через те, що ці зміни, можуть вказувати на початкове пошкодження машини або деякі інші порушення.

Згідно критерію 1 рекомендовані допустимі значення величини биття для сталого режиму роботи при номінальній швидкості обертання вала гідрогенератора наведені на рис. 1.19 і рис. 1.20.

Значення величин биття, показані на рис. 1.19 і рис. 1.20 базуються на статистичному аналізі понад 900 наборів даних для машин різних типів, зібраних в 11 країнах по всьому світу, які представлені на рис. 1.21. Вимірювання проводились на машинах, які довгий час працювали без проблем в нормальному режимі. Проведений аналіз був використаний для встановлення границі між двома основними діапазонами А-В і С-Д.

Основний діапазон А-В: Машини з величинами биття в цьому основному діапазоні вважаються прийнятними для необмеженої тривалої експлуатації.

Основний діапазон С-Д: Параметри биття машини цього основного діапазону мають високі значення. Через це в кожному випадку необхідно перевіряти, чи є виміряні значення допустимими для тривалої безперервної роботи з урахуванням конкретної конструкції і умов експлуатації. У всіх випадках слід проводити оцінку, порівнюючи відносне биття вала щодо діаметрального зазору підшипника і товщини масляної плівки.

Усередині двох основних діапазонів А-В і С-Д межі А / В і С / Д зберігаються для позначення різних статистично обґрунтованих ступенів небезпеки.

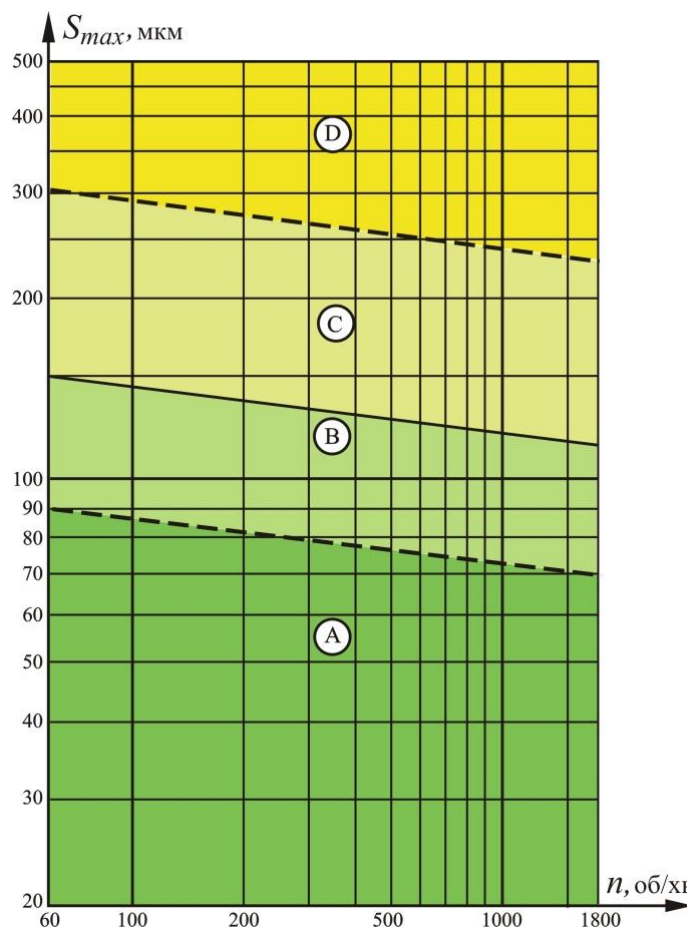


Рис. 1.19 Графік залежності відхилення величини биття S_{max} від кількості обертів на хвилину

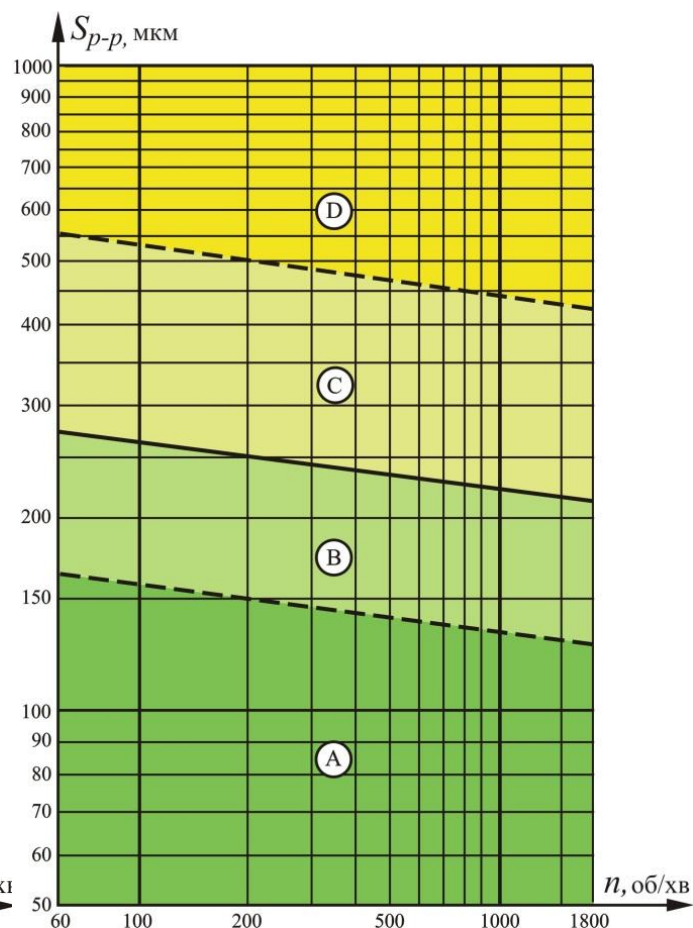


Рис. 1.20 Максимальний розмах биття S_{p-p}

Діапазон А: ГА з величинами биття в межах цього діапазону (нижче межі А / В) в поєднанні з низькими ексцентриситетами вала найімовірніше будуть мати дуже малу масу, малі гідравлічний і електромагнітний дисбаланс, високу якість балансування, необхідну круглість цапфи і експлуатуються в хороших умовах. Пунктирна межа між діапазонами А і В є 50% кумулятивним розподілом ймовірностей в базі даних.

Діапазон D: Машини з величинами биття в межах цього діапазону (вище межі C / D) зазвичай відключаються для огляду і ремонту, оскільки вважається, що ці значення биття являють достатню небезпеку і можуть призвести до аварії машини. Пунктирна межа між діапазонами C і D є 98% сукупного розподілу ймовірностей в базі даних.

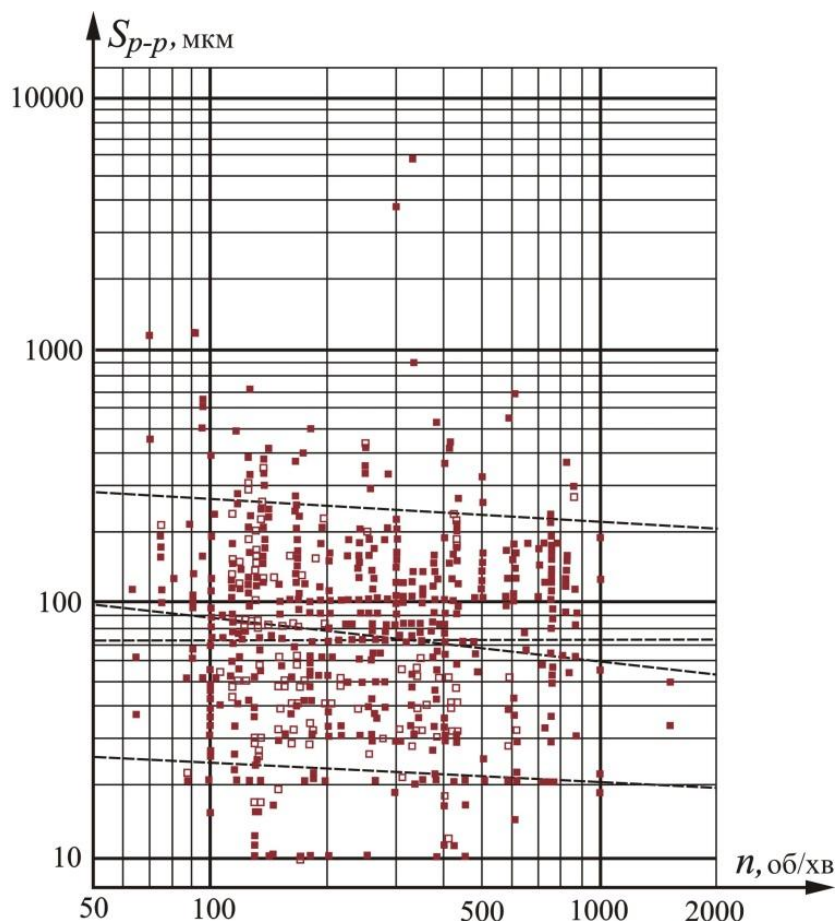


Рис. 1.21 Статистичні дані параметрів биття валів

Числові значення меж діапазонів, не призначені для використання в якості приймальних характеристик, які підлягають узгодженню між виробником ГА і споживачем. Проте, ці значення використовуються для забезпечення того, щоб уникнути грубих недоліків машин або нереалістичних вимог до них.

Величини биття для модернізованих ГА з підвищеною потужністю можуть бути розташовані в діапазоні А або В. Вибір діапазону А або В залежить, однак, від нових режимів збудження та співвідношенням між новими і повторно використаними компонентами машини, щоб витримати довгострокову динамічну експлуатацію.

1.5 Постановка задачі дослідження

Як показано в попередніх розділах, в сучасних умовах експлуатації гідроенергетичного комплексу України є актуальним вирішення задачі забезпечення підвищення якості безперервного контролю їх механічнонавантажених вузлів. Одним із таких вузлів є вал, за допомогою якого механічна енергія потоку води перетворюється в електричну. Тому, з урахуванням підвищених вимог у відповідності із чинними міжнародними стандартами є актуальним вирішення задачі створення нових та вдосконалення існуючих інформаційно-вимірювальних систем. Основним джерелом інформації про стан об'єкту в інформаційно-вимірювальних системах від якого значною мірою залежить якість контролю є первинні вимірювальні перетворювачі, в якості яких використовуються сенсори.

З урахуванням вищенаведеного можливо сформулювати задачі досліджень дисертації, вирішення яких спрямоване на підвищення якості контролю під час вирішення завдань технічного діагностування гідроенергетичних вузлів, які полягають в наступному:

- аналіз існуючих методів та обґрунтування шляхів їх вдосконалення;
- розробка варіантів конструктивного виконання електродів ємнісних сенсорів, призначених для вимірювання відстані до заземленої поверхні валу з урахуванням його параметрів;
- розрахунок функцій перетворення для обраних варіантів конструктивного виконання ємнісних сенсорів шляхом мультифізичного моделювання задля забезпечення точності вимірювань;
- дослідження факторів, що впливають на функцію перетворення ємнісних сенсорів радіального биття, з метою зменшення їхнього впливу шляхом вибору оптимальної геометричної форми електродів сенсорів;
- розробка вторинного вимірювального перетворювача ємнісних сенсорів радіального биття валів, який має малі габарити, високу швидкодію та стабільні метрологічні характеристики;
- проведення експериментальних досліджень створених ємнісних сенсорів з метою оцінки достовірності контролю.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Вимірювання радіального биття валів є одним з основних параметрів, який з використанням систем технічної діагностики дозволяє розпізнати значну кількість дефектів потужних гідроагрегатів.

2. На даний час для оцінки технічного стану гідроагрегатів використовується як постійний, так періодичний моніторинг параметрів биття валів.

3. В якості первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів), в більшості існуючих систем контролю та діагностики використовують струмовихрові та ємнісні сенсори.

4. Більш перспективними за рядом технічних характеристик є ємнісні сенсори. Основною перевагою яких є те, що на їх технічні характеристики не впливають хімічний склад, намагніченість та температура поверхні валу.

Посилання [1-44], див. список використаних джерел стор. 168-178.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В багатьох галузях, в тому числі і в електроенергетиці, для визначення різноманітних фізичних величин знаходять застосування ємнісні сенсори переміщень та відстаней [1, 4-11, 15, 44]. Вони відносно прості у виготовленні, мають високі метрологічні та експлуатаційні характеристики. Метрологічні характеристики ємнісних сенсорів в першу чергу залежать від їхніх конструктивних параметрів, технології виготовлення та умов застосування. Тому задля визначення впливу конструктивних параметрів елементів сенсору та технології їх виготовлення є актуальним побудова моделей ємнісних сенсорів биття різного типу методами комп'ютерного моделювання.

У цьому разі використання засобів комп'ютерного моделювання надає наступні переваги:

- дозволяє використання існуючої бази моделей, що спрощує процес створення конкретної моделі ємнісного сенсора та її дослідження;
- зменшення часових затрат на проведення досліджень;
- можливість розрахунку сенсора з урахуванням впливу заздалегідь визначених факторів;
- можливість отримання візуальних результатів, що надає кращого розуміння властивостей і характеру електричного поля в сенсорі;
- можливість дослідження сенсорів за умов, які неможливо реалізувати експериментально;
- збереження коштів, що необхідні для придбання устаткування, яке необхідне для проведення експериментальних досліджень.

2.1 Аналіз методів комп'ютерного моделювання ємнісних сенсорів

Аналітичний розрахунок математичної моделі методом конформних відображень, який базується на спрощених конфігураціях і ідеалізованих припущеннях вимагає проведення складних розрахунків [44], тому для проведення досліджень доцільнішим буде використання засобів комп'ютерного моделювання.

Задля проведення моделювання фізичних процесів використовуються наступні методи чисельного рішення:

- метод граничних елементів (Boundary Element Method – **BEM**),
- метод моментів (Method of Moments – **MoM**),
- метод кінцевих об'ємів (Finite Volume Method – **FVM**),
- метод кінцевих різниць (Finite Difference Method – **FDM**),
- метод кінцевих елементів (Finite Element Method – **FEM**).

Найбільш потужним методом за критерієм функціоналу є метод граничних елементів (**BEM**). Цей метод в межах граничного елемента передбачає апроксимацію необхідної функції розподілу безпосередньо по вихідному диференціальному рівнянню, яким описується досліджуваний процес (в інших методах апроксимація в рамках дискретної сітки більш штучна) [44].

Використання **BEM** дозволяє знизити просторовий порядок, що теоретично прискорює рішення і знижує вимоги до ресурсів обчислювальної техніки. Однак, при моделюванні цей метод практично не використовується, тому що він вимагає однорідності фізичних властивостей об'єкту дослідження.

Для вирішення завдань із розрахунку струмів в металевих і діелектричних структурах під час їх випромінювання в вільний простір, набув поширення метод **MoM**. Головною перевагою цього методу є те, що дискретизація відбувається тільки для металевих з'єднань в моделюючій структурі, а не для всього вільного простору, так як в якості невідомої величини приймається розподіл струму на металевих поверхнях. У разі використання методу граничні умови можуть не задаватися адже приймаються рівними геометрії об'єкту [44]. Недоліком методу є

його складність, оскільки застосування методу вимагає ретельного розрахунку функцій Гріна, а також його застосування обмежено для довільних тривимірних структур. Особливістю метода є те, що модельовані структури повинні бути "планарними" і утворювати багат шарову структуру.

Іншим чисельним методом інтегрування систем диференціальних рівнянь в похідні, який передбачає дискретизацію розрахункової області на прямокутні паралелепіпеди є **FVM** метод. При моделюванні, **FVM** широкого поширення не отримав, це пов'язано з «проміжним» характером методу. Тобто, для випадків, коли необхідні довільно орієнтовані границі, краще використовувати **FEM**, а коли допустимо уявлення геометрії у вигляді набору паралелепіпедів, то доречніше вирішувати задачу класичним **FDM** методом [44].

Метод **FDM**, є одним з чисельних методів, в якому для вирішення фізичних рівнянь застосовується дискретизація розрахункової області у вигляді сітки вузлів. У цьому разі результати визначаються тільки в вузлах сітки, тобто лише в окремих точках розрахункової області. Такий підхід під час моделювання вимагає меншої обчислювальної потужності для вирішення рівнянь і забезпечує високу швидкість розрахунку, але це призводить до менш «точних» результатів розрахунків в порівнянні з іншими методами, наприклад методом кінцевих елементів (**FEM**) [45].

Метод **FEM** в даний час є найбільш поширеним методом вирішення задач з моделювання об'ємних або неоднорідних діелектричних об'єктів. Ключовою характеристикою методу є використання дискретизації для перетворення безперервної області в набір (сітку) елементів типової (тетраедної) форми діелектричні властивості яких змінюються від елемента до елемента. Чисельні алгоритми часто засновані на представленні початкової задачі у вигляді великого числа невеликих повторюваних задач, що дозволяє спростити проведення розрахунків та підвищити їх ефективність [46, 47].

Основною перевагою **FEM** є вирішення завдань для областей будь-якої форми, в той час як аналітичні методи дозволяють отримувати рішення тільки для задач з досить простою геометрією. Цей факт, а також поява цілого ряду

спеціалізованих програм, що реалізують цей метод, зробили його найбільш доступним інструментом для проведення досліджень.

Враховуючи вищезазначене, для проведення досліджень ємнісних сенсорів, призначених для використання в системах технічної діагностики обладнання електростанцій, найбільш ефективним і доступним є засоби комп'ютерного моделювання на основі методу кінцевих елементів [48].

2.2 Аналітичний огляд засобів мультифізичного моделювання ємнісних сенсорів

Дослідження впливу геометричних параметрів ємнісних сенсорів та їх метрологічних характеристик на функцію перетворення є складною комплексною задачею, вирішення якої дозволить визначити оптимальні параметри сенсорів в залежності від конструктивних параметрів вузлів контролю (діаметру вала), зони розміщення вимірювача, а також або точності, або роздільної здатності, або швидкодії з якою необхідно визначити параметри биття. Як було зазначено в попередньому підрозділі, ефективним методом проведення таких досліджень є застосування апарату вирішення крайових задач методом кінцево-елементного аналізу. Такий апарат присутній в значній кількості спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ), з яких найбільш відомими та поширеними є Ansys [49], Comsol Multiphysics [50], Abaqus [51], Elcut [52] та Elmer [53] які реалізують широкий клас задач. Будь-яке ПЗ має свої переваги та недоліки, та розраховане на вирішення конкретного класу задач. Для вибору оптимального ПЗ з точки зору вирішення електростатичних, термодинамічних та механічних задач проведемо його порівняльний аналіз.

ПЗ кінцево-елементного аналізу можна умовно розбити на кілька груп. До першої групи належить ПЗ яке володіє знаяними можливостями та дозволяє з високою точністю проводити дослідження процесів для широкого класу задач (Ansys, Comsol). Це ПЗ використовується для моделювання процесів з різних областей фізичних явищ.

До другої групи належать ПЗ для вирішення спеціалізованих завдань в обраних областях, це пояснюється прагненням створити більш простий і компактний інструмент для роботи, що істотно звужує їх можливості та робить таке ПЗ виключно спеціалізованим приватним рішенням [54].

Основні характеристики вище перерахованих ПЗ дослідження фізичних процесів, шляхом комп'ютерного моделювання представлені в таблиці 2.1 .

Таблиця 2.1

Порівняльна таблиця характеристик програмних засобів моделювання

Можливості ПЗ	Ansys Multiphysics	Comsol Multiphysics	Abaqus	Elcut	Elmer
Різновид аналізу за законами фізики:					
Електростатичний	+	+	+	+	+
Електромагнітний	+	+	+	+	+
Термодинамічний	+	+	+	+	+
Механічний	+	+	+	+	+
Сумісний	+	+	+	-	-
Опис моделі:					
Диференціальні рівняння в часткових похідних	+	+	+	+	+
Система інтегрально-диференціальних рівнянь	+	+	+	+	+
Звичайні диференціальні рівняння	+	+	+	+	+
Алгебраїчні рівняння	+	+	+	+	+
Тип розрахунку:					
Статичний	+	+	+	+	+
Динамічний	+	+	+	+	+
Відображення розрахункових формул	-	+	-	-	-
Представлення геометричної моделі:					
Двовірна	+	+	+	+	+
Осьова симетрія	+	+	+	+	+
Тривимірна	+	+	+	Обмежена	+
Можливість експорту/імпорту даних до інших програмних пакетів:					
Matlab Simulink	+	+	-	+	-
Solidworks	+	+	-	+	-
Особливості:					
Точність	Висока	Висока	Висока	Низька	Низька
Складність вивчення	Висока	Низька	Висока	Низька	Висока

За результатами проведеного аналізу існуючих програмних засобів моделювання було виявлено, що Comsol Multiphysics має всі засоби та ресурси для повноцінного дослідження обраних типів ємнісних сенсорів, електроди яких формуються з фольгового діелектрика методом фотолітографії.

2.3 Алгоритм побудови моделі

Дослідження характеристик ємнісних сенсорів, шляхом мультифізичного моделювання має відбуватися за алгоритмом, який складається з наступних кроків (рис. 2.1) [48, 50, 55]:

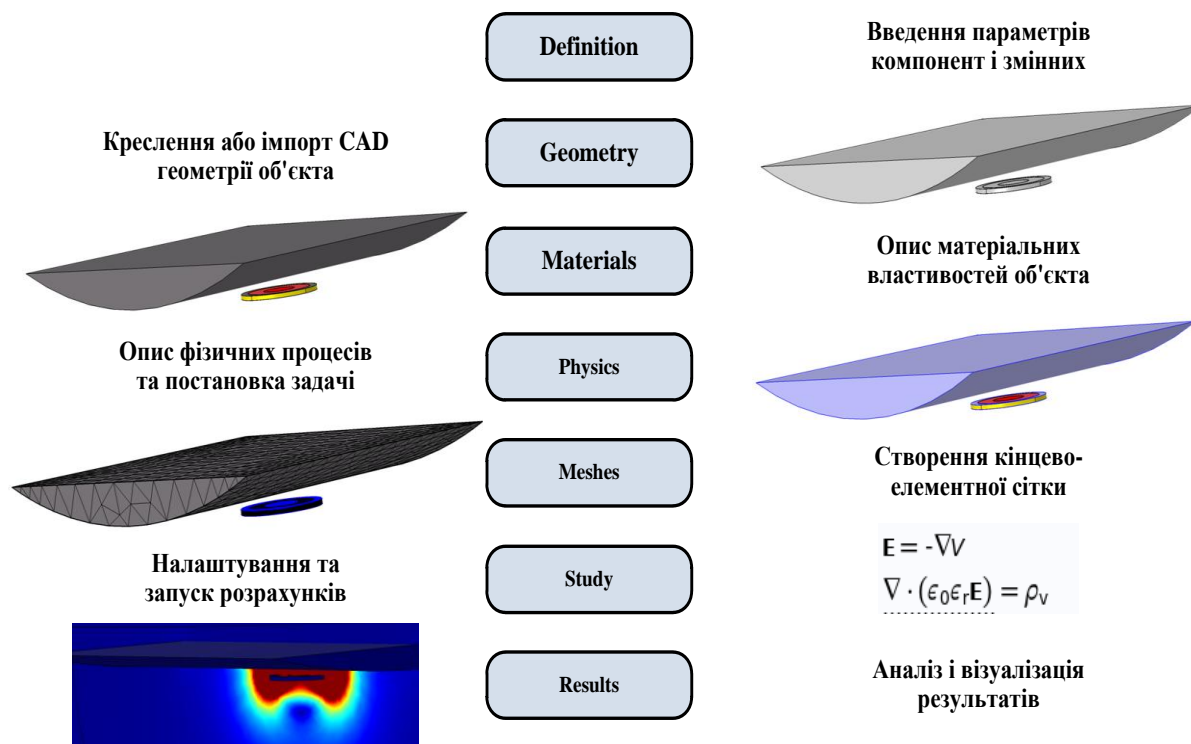


Рис. 2.1 Послідовність дій при мультифізичному комп'ютерному моделюванні

1. Вибір відповідного фізичного інтерфейсу або заздалегідь визначених мультифізичних зв'язків з додаванням фізичного інтерфейсу.

На цьому кроці враховуючи тип поставленої задачі (визначення характеристик ємнісних сенсорів), обираємо інтерфейс *Electrostatics* (знаходиться в галузі *AC/DC* в *Model Wizard*), який знаходить потенціал електричного поля з урахуванням розподілу заряду в області досліджень та напруги на її границях.

Після вибору типу поставленої задачі вона описується в вигляді дерева проекту в розділі *Model Builder*, а установки по всіх позиціях дерева проекту обираються в розділі *Setting*.

Для побудови моделі сенсорів концентричного типу може бути використаний двовимірний вісесиметричний *2D Axisymmetric* або тривимірний *3D* простір, що залежить від складності конструкції досліджуваного об'єкту.

2. Введення параметрів компонент і змінних в гілці *Definitions*

З урахуванням розроблюваної топології сенсорів задаються такі параметри: товщина мідного покриття, товщина діелектричної підкладки, геометричні розміри електродів, ширина міжелектродного проміжку, мінімальний повітряний зазор між площиною електродів та поверхнею вала, геометричні розміри вала.

3. Створення фізичної моделі.

На цьому кроці, для реалізації моделі і/або імпорту геометричних компонентів використовується гілка *Geometry*. Для креслення сенсора використовують плоскі геометричні фігури.

Побудова імітаційної моделі у двовимірному просторі частини вала здійснювалась без врахування його дійсних габаритних розмірів.

4. Завдання рівнянь моделі і граничних умов в гілках фізичного інтерфейсу. Визначення граничних умов моделі.

Властивості матеріалів для усіх фізичних областей моделі задаються в розділі *Materials*.

З урахуванням того, що для формування електродів сенсорів використовується фольгований діелектрик, в моделях було прийнято: а) область між загальною площиною сенсорів і заземленою поверхнею – повітря; б) матеріал електродів – мідь; в) матеріал діелектричної підкладки електродів – FR4.

Електричні властивості створених елементів моделі задаються у гілці *Electrostatics* шляхом вибору значень початкових потенціалів на електродах.

5. Дискретизація фізичної моделі шляхом розбиття сіткою на комірки.

Побудова скінченно-елементної сітки здійснюється в дереві моделі в гілці *Mesh*, де виконується триангуляція обраних областей для подальших розрахунків.

6. Подальша обробка.

Далі для проведення попередніх досліджень розподілення потенціалів зарядів в електричному полі сенсору використовуються матеріали розділу *Study*.

7. Аналіз і візуалізація результатів.

Після виконання обчислень моделі у гілці *Results* створюються групи типу:

- *Electric Potential – 2D Plot Group – Surface1*, що відображає графік розподілу електричного потенціалу сенсору;
- *Electric Potential, Revolved Geometry (es) – 3D Plot Group – Streamline 1*, що відображає контурний графік потенціальних ліній в розрізі.

Для проведення розрахунків використані матеріали розділу *Results – Derived Values – Global Evaluation*.

Результати побудови моделі ємнісного сенсора за описаним алгоритмом в мультифізичному середовищі Comsol Multiphysics наведено на рис. 2.2.

Зауважимо, що на етапі обробки результатів розрахунків можливе повернення на попередні кроки для розширення моделі шляхом додавання не заданих раніше фізичних інтерфейсів, які дозволяють дослідити модель з урахуванням відповідних законів фізики [50].

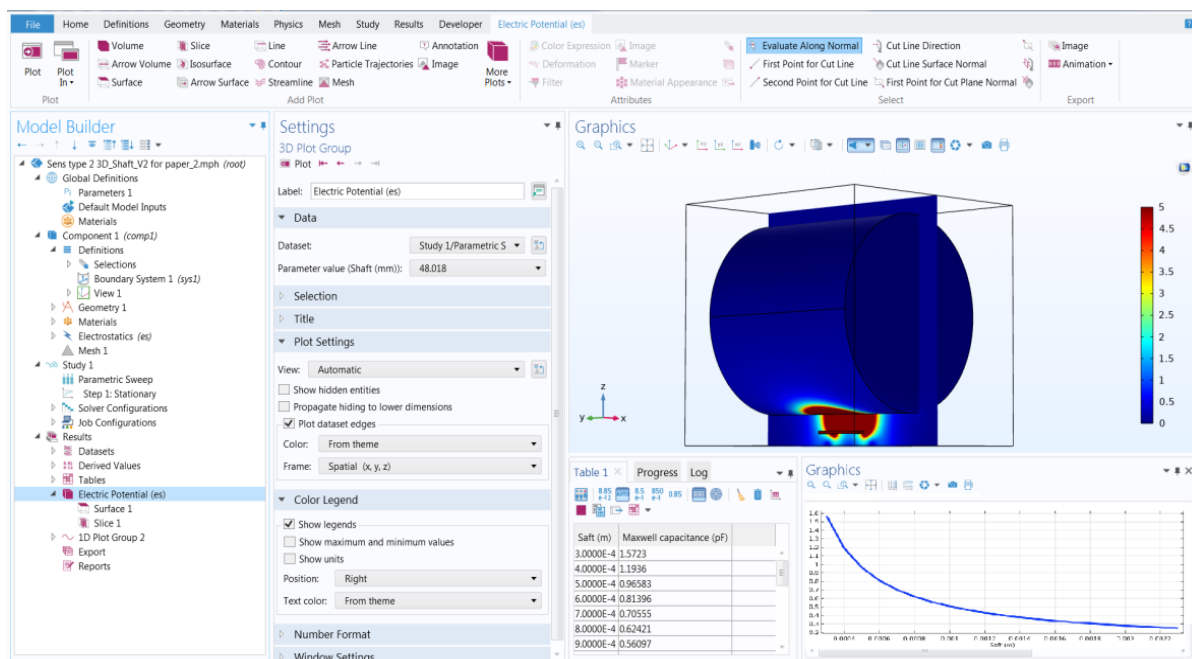


Рис. 2.2 Результат побудови моделі у середовищі мультифізичного моделювання

2.4 Типи ємнісних сенсорів

В ємнісних первинних перетворювачах чутливі елементи сенсорів можуть бути з різною формою електродів [11, 56–66]. Найбільшого поширення набули два типи чутливих елементи: циліндричний та плоский, у яких функціональна залежність визначається через зміну зазору між електродами (рис. 2.3 а) або зміною площі перекриття пластин-електродів (рис. 2.3 б). Для кожного з типів можливе плоскопаралельне і компланарне розташування електродів.

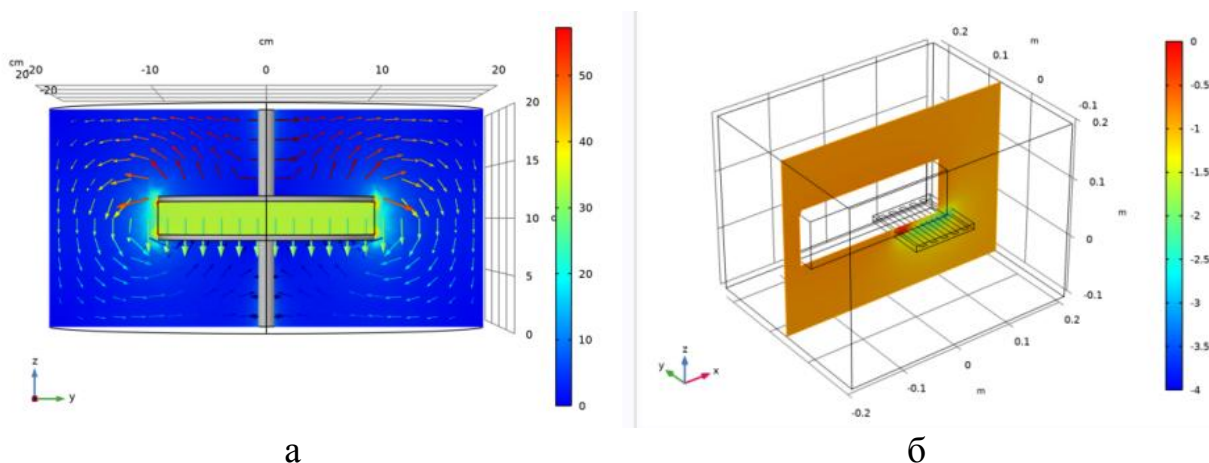


Рис. 2.3 Найбільш поширені типи ємнісних сенсорів за видом функціональної залежності.

Загальна робоча ємність таких сенсорів C у загальному виді є сумою ємностей і визначається за формулою

$$C = C_w + C_d + C_p \quad (2.1)$$

де C_w – робоча ємність через повітряний проміжок між електродами та заземленою поверхнею;

C_d – додаткова ємність через діелектричну підкладку, ϵ постійною ($C_d = \text{const}$);

C_p – паразитна ємність, викликана викривленням екіпотенціальних ліній.

При цьому робоча ємність визначена функціональною залежністю (1) має нелінійний характер, який у практичних випадках необхідно усунути, тобто лінеаризувати функціональну залежність (1).

2.4.1 Сенсор із плоскопаралельними електродами

Найбільшого поширення для вимірювання функції перетворення ємнісних сенсорів набули сенсори, побудовані за класичною конструкцією плоскопаралельного конденсатора [11, 48, 62]. Схему вимірювання відстані до заземленої поверхні з застосуванням цього типу ємнісного сенсору показано на рис. 2.4.

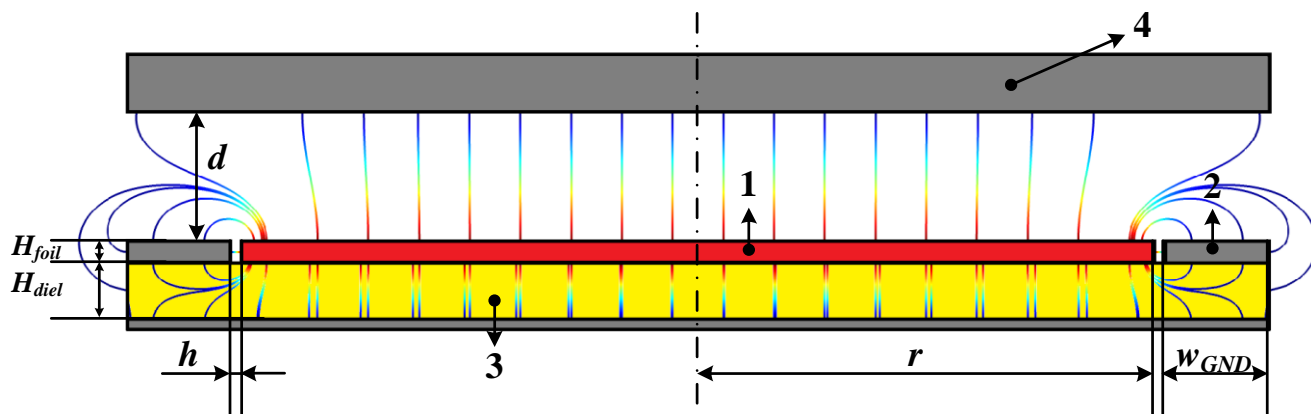


Рис. 2.4 Сенсор із плоскопаралельними електродами

У цьому разі сенсор складається із: високопотенціального електрода **1** радіусом r , заземленого кільця **2** шириною w_{GND} та діелектричної підкладки **3** висотою H_{diel} . Електроди **1** і **2** відокремлені один від одного тонкими діелектричними проміжками шириною h , яка залежить від технології виготовлення. Електроди сенсора формуються в шарі H_{foil} мідної фольги. Поверхня заземленого вала **4** знаходиться на відстані d від загальної площини електродів сенсора.

Для аналітичного визначення функції перетворення сенсора, скористаємося тим, що напруженість електростатичного поля E в плоскопаралельному сенсорі розраховується як

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S}, \quad (2.2)$$

де q – заряд конденсатора сенсора;

ϵ – діелектрична проникність діелектрика між пластинами;

$\varepsilon_0=8,852 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму;

$S=\pi r^2$ – площа одного електрода сенсора;

r – радіус робочої зони електрода сенсора.

Тоді, з урахуванням (1), ємність плоскопаралельного конденсатора між електродами сенсора визначається як

$$C = \frac{q}{E \cdot d} \quad (2.3)$$

де d – відстань між пластинами.

Враховуючи вищезазначене (2) та (3), формула для визначення значення ємності плоскопаралельного конденсатора має наступний вигляд

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (2.4)$$

Як видно з рис. 2.4, система плоскопаралельних електродів призводить до появи на їхніх краях викривлення електричного поля, тобто крайових ефектів, які вносять похибку в функцію перетворення, значення якої залежить від співвідношення r/d . Крім того, на ємність можуть впливати зовнішні електричні поля, що додаються до електростатичного поля на краях електродів сенсора. На рівномірність еквіпотенціальних ліній електростатичного поля впливають також зовнішні об'єкти, через які поле може замикатися, що призводить до виникнення додаткових випадкових похибок вимірювання ємності.

Для зменшення впливу "крайових ефектів" сенсора на результат вимірювання необхідно забезпечити рівномірність еквіпотенціальних ліній електростатичного поля.

2.4.2 Сенсор з охоронним кільцем

Як зазначено в попередньому розділі, результати вимірювання інформативної складової ємнісним сенсором залежить від крайових ефектів. Зазначений недолік практично ліквідується нижченаведеним способом. Для забезпечення рівномірності поля в систему електродів плоскопаралельного

Наявність охоронного електрода забезпечує рівномірне плоско-паралельне поле між потенціальним електродом 1 і заземленою поверхнею вала 4 (рис.2.5 поле між електродом 1 і поверхнею вала 4). Окрім того, усувається вплив сторонніх полів і навколишніх предметів на ємність сенсора. Ще однією перевагою застосування охоронного електрода є можливість вимірювання дуже малих значень ємності [67-71].

Одним із недоліків таких сенсорів є використання досить складного вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) та необхідність застосування триаксіального кабелю між сенсором та ВВП. Зазначений недолік мінімізується за допомогою усунення такого кабелю шляхом розміщення ВВП у безпосередній близькості до електродів сенсора [67]. Приклад схеми ємнісного сенсора з вбудованим ВВП показано на рис. 2.6.

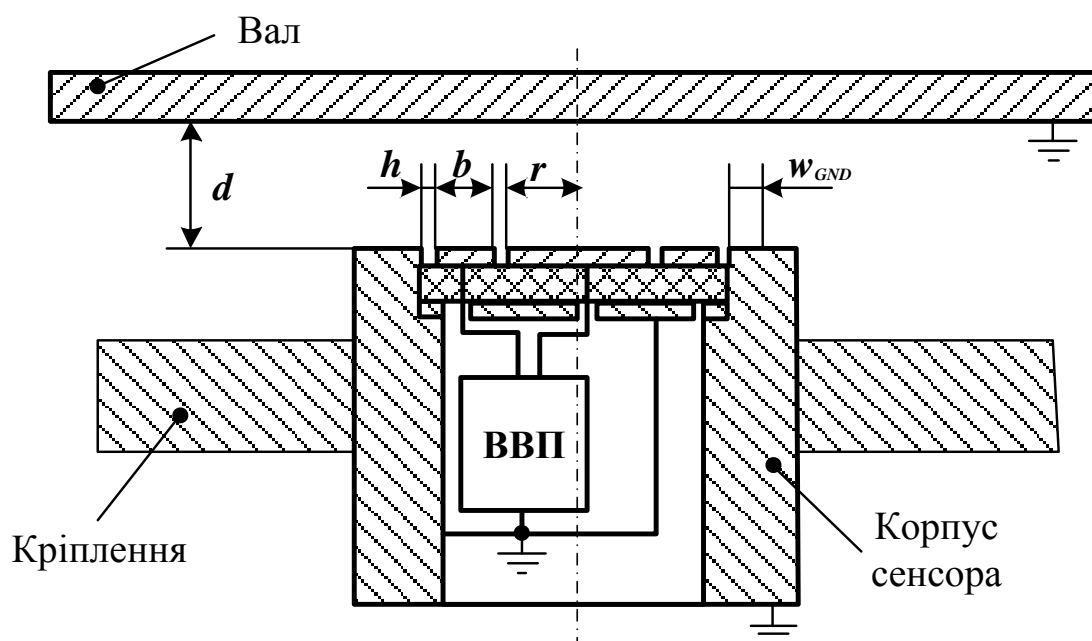


Рис. 2.6 Розміщення ВВП у безпосередній близькості до електродів сенсора:

h – міжелектродний проміжок; b – ширина охоронного кільця «Кельвіна»;

r – радіус робочої зони електрода сенсора; w_{GND} – ширина заземленого кільця;

d – відстань між пластинами.

2.4.3 Сенсор з концентричними компланарними електродами

Застосування відносно простої конструкції ємнісного сенсора з двома концентричними компланарними електродами усуває необхідність використання триаксiального кабелю. У цьому разі, конструкція сенсора складається з двох робочих електродів (один з них – високопотенціальний, а інший – низькопотенціальний), ємність між якими змінюється зі зміною відстані d між площиною електродів сенсора, системами заземлених електродів та заземленою поверхнею вала. Структура ємнісного сенсора з компланарними електродами наведена на рис. 2.7 [11, 62, 72].

В цьому випадку сенсор складається з таких основних частин: активного високопотенціального електрода 1 радіусом r , низькопотенціального електрода 3 шириною b , між якими розташований заземлений охоронний електрод 2 шириною s та зовнішнього заземленого кільця 4 , шириною w_{GND} . Електроди $1, 2, 3$ і 4 відокремлені один від одного тонкими діелектричними проміжками шириною h , яка залежить від технології виготовлення. Товщина провідного матеріалу (мідної фольги) H_{foil} та діелектричної підкладки H_{diel} обирається в залежності від технології виготовлення. Завдяки симетрії електродів і малій величині h електричне поле між електродами 1 і 5 в кожному радіальному перетині набуває однакової форми.

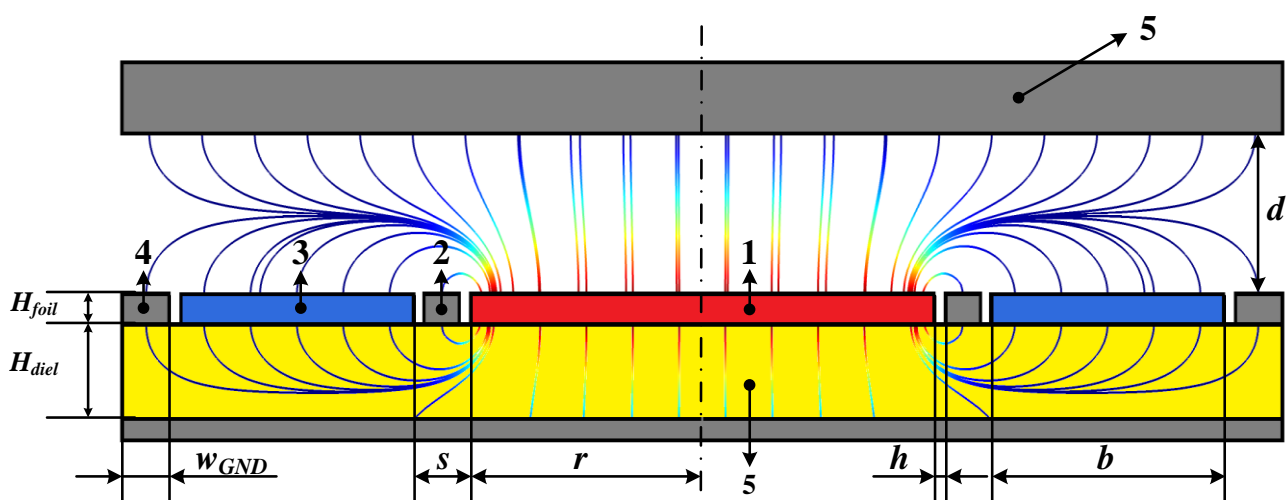


Рис. 2.7 Сенсор з концентричними компланарними електродами

Електрична ємність між електродами **1** і **3** є сумою двох ємностей: робочої C_w через повітряний проміжок та паразитної C_d , через діелектричну підкладку. Оскільки паразитна ємність є постійною ($C_d = \text{const}$), а робоча ємність C_w буде змінюватись зі зміною відстані d , тобто $C_w = f(d)$. Для її розрахунку використаємо результати досліджень визначення ємності C_L на одиницю довжини між двома компланарними паралельними електродами, розділеними низькопотенціальним охоронним електродом [4, 73]. З урахуванням, що $r = b$ отримаємо

$$C_L = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}} \right) \quad (2.6)$$

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

$\varepsilon_r = 1,00056$ – відносна діелектрична проникність повітря;

$r = b$ – ширина електродів **1** і **3**;

s – відстань між електродами **1** і **3**;

d – відстань між площиною електродів **1, 2, 3, 4** і **5**.

Загальна робоча ємність сенсора C_w з урахуванням того, що довжина середньої лінії між електродами **1** і **3** складає $L_{hc} = 2\pi R = 2\pi(b+s/2)$, дорівнює

$$C_{whc} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \left(b + \frac{s}{2} \right) \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (2.7)$$

2.5 Результати визначення функцій перетворення ємнісних сенсорів, шляхом комп'ютерного моделювання

Використовуючи розроблені в попередніх розділах конструкції ємнісних сенсорів, трьох типів, визначимо їх функції перетворення, шляхом моделювання в середовищі комп'ютерного мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics.

Розміри конструктивних елементів сенсорів в створених моделях розраховані з урахуванням припустимих розмірів елементів кріплень у вузлі контролю – вала генератора, а також, з урахуванням забезпечення чутливості й роздільної здатності сенсорів до практично необхідного рівня забезпечення контролю параметрів биття вала гідрогенератора у визначених міжнародним стандартом ISO 19283:2020 точках.

Для розрахунку прийняті наступні розміри.

А. Сенсор з плоскопаралельними електродами (рис. 2.4):

$$r = 4\text{мм}; w_{GND} = 1,9\text{ мм}; h = 0,1\text{ мм}.$$

Б. Сенсор з охоронним кільцевим електродом (рис. 2.5):

$$r = 4\text{мм}; b = 4\text{мм}; w_{GND} = 0,8\text{ мм}; h = 0,1\text{ мм}.$$

В. Сенсор з концентричними компланарними електродами (рис. 2.6):

$$r = 4\text{мм}; s = 0,8\text{ мм}; b = 4\text{мм}; w_{GND} = 0,9\text{ мм}; h = 0,1\text{ мм}.$$

Для перевірки адекватності розроблених моделей порівнюємо значення ємності, отримані за допомогою аналітичних розрахунків, та значення отримані засобами комп'ютерного моделювання для трьох типів сенсорів, описаних в підрозділах 2.4.1. – 2.4.3.

Товщина діелектричної підкладки для всіх типів сенсорів дорівнює $H_{diel} = 1\text{ мм}$.

Отримані результати визначення функції перетворення ємностей для всіх типів сенсорів наведено в таблиці 2.2, де:




C_C – значення ємності, визначені аналітичним способом;

C_M – значення ємності, визначені засобами комп'ютерного моделювання;

ΔC – значення абсолютної похибки.

Графіки функцій перетворення $C_C = f_C(d)$, $C_M = f_m(d)$, показані на рис. 2.8, 2.10, 2.12, для кожного із типів сенсорів відповідно. Графіки абсолютної похибки $\Delta(C) = |C_C - C_M|$ представлені на рис. 2.9, 2.11, 2.13 для кожного із типів сенсорів відповідно.

Результати розрахунків значення ємності отримані засобами комп'ютерного моделювання для трьох типів сенсорів

	 <i>Type 1</i>			 <i>Type 2</i>			 <i>Type 3</i>		
<i>d, мм</i>	<i>C_C, нФ</i>	<i>C_m, нФ</i>	ΔC	<i>C_C, нФ</i>	<i>C_m, нФ</i>	ΔC	<i>C_C, нФ</i>	<i>C_m, нФ</i>	ΔC
0.3	7.72	8.09	0.37	1.93	1.89	0.041	0.040	0.0478	0.008
0.4	6.23	6.77	0.53	1.56	1.55	0.012	0.040	0.0487	0.009
0.5	5.34	5.97	0.63	1.34	1.34	0	0.041	0.0513	0.010
0.6	4.75	5.43	0.68	1.19	1.19	0.006	0.045	0.0561	0.012
0.7	4.33	5.05	0.72	1.08	1.09	0.009	0.050	0.0636	0.014
0.8	4.01	4.76	0.75	1.00	1.01	0.011	0.058	0.0733	0.016
0.9	3.76	4.53	0.77	0.94	0.95	0.012	0.068	0.0852	0.018
1	3.56	4.36	0.79	0.89	0.90	0.013	0.080	0.0987	0.019
1.1	3.40	4.21	0.81	0.85	0.86	0.014	0.093	0.1135	0.020
1.2	3.27	4.09	0.82	0.82	0.83	0.014	0.108	0.1293	0.021
1.3	3.15	3.99	0.84	0.79	0.80	0.014	0.124	0.1458	0.022
1.4	3.05	3.90	0.85	0.76	0.78	0.014	0.141	0.1629	0.022
1.5	2.97	3.83	0.86	0.74	0.76	0.014	0.158	0.1803	0.022
1.6	2.89	3.77	0.87	0.72	0.74	0.014	0.176	0.1978	0.022
1.7	2.83	3.71	0.88	0.71	0.72	0.014	0.194	0.2155	0.022
1.8	2.77	3.66	0.89	0.69	0.71	0.014	0.212	0.2331	0.021
1.9	2.72	3.62	0.90	0.68	0.69	0.014	0.230	0.2506	0.020
2	2.67	3.58	0.90	0.67	0.68	0.014	0.249	0.2680	0.019
2.1	2.63	3.54	0.91	0.66	0.67	0.014	0.267	0.2851	0.018
2.2	2.59	3.51	0.92	0.65	0.66	0.014	0.285	0.3020	0.017
2.3	2.56	3.48	0.92	0.64	0.65	0.014	0.303	0.3186	0.016

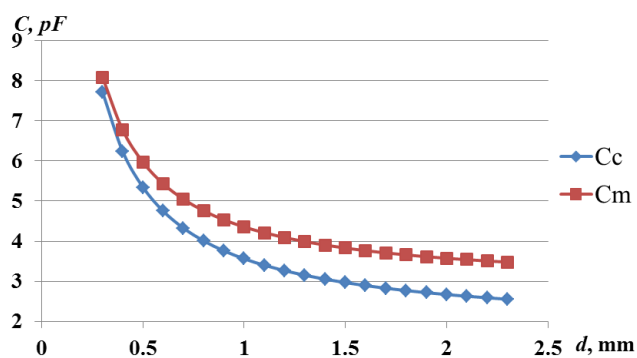


Рис. 2.8 Графіки залежності ємності від відстані до заземленої поверхні для сенсора із плоскопаралельними електродами

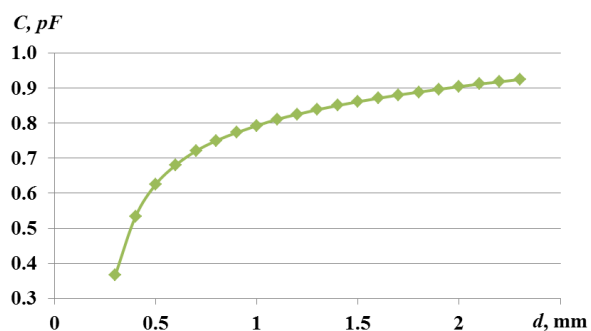


Рис. 2.9 Графік абсолютної похибки для сенсора із плоскопаралельними електродами

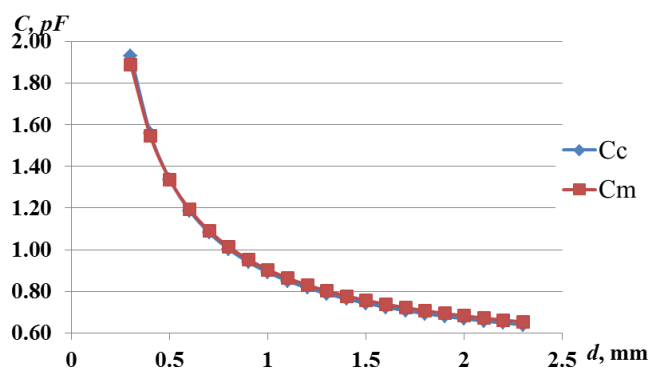


Рис. 2.10 Графіки залежності ємності від відстані до заземленої поверхні для сенсора із охоронним кільцем

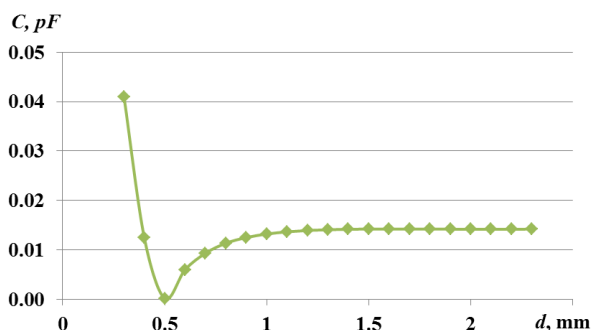


Рис. 2.11 Графік абсолютної похибки для сенсора із охоронним кільцем

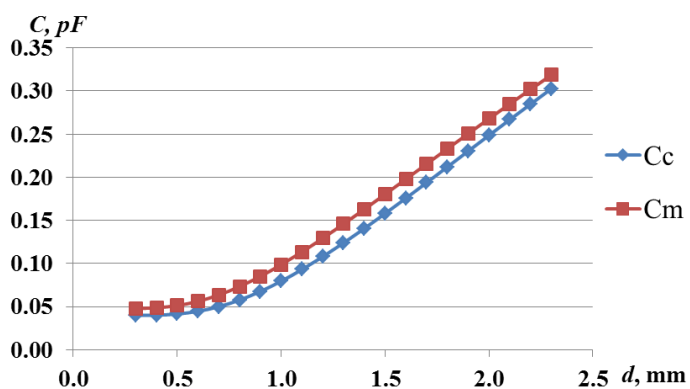


Рис. 2.12 Графіки залежності ємності від відстані до заземленої поверхні для сенсора з концентричними компланарними електродами

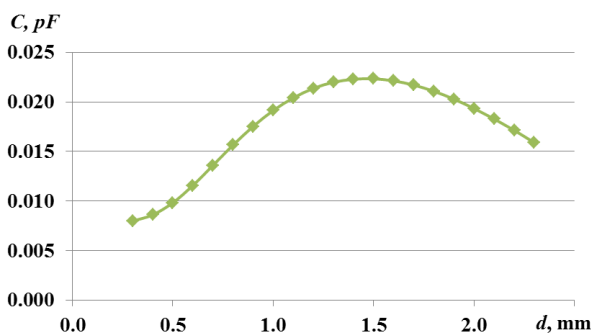


Рис. 2.13 Графік абсолютної похибки для сенсора з концентричними компланарними електродами

З отриманих результатів в таблиці 2.2 та графіків можна зробити висновки, що розбіжність між значеннями ємності визначеними аналітичним способом та засобами комп'ютерного моделювання викликана наявністю паразитної ємності C_p яка виникає через викривлення ліній електричного поля, тобто крайових ефектів.

В результаті проведених обчислень визначено, що для сенсора 1 типу значення найбільшої розбіжності складає близько 1 pF при найбільшій відстані до заземленої поверхні. Для сенсора 2 типу значення паразитної ємності складає 0.04 pF при мінімальній відстані до заземленої поверхні і починаючи з 1 мм є рівномірним по всьому діапазону відстаней до поверхні вала. Для сенсора 3 типу максимальне значення розбіжності дорівнює 0.022 pF. Також, в результаті досліджень було визначено, що на функцію перетворення сенсорів мають вплив і конструктивні параметри сенсорів, які залежать від технології їх виготовлення.

2.6 Вплив технології виготовлення на характеристики ємнісних сенсорів

В реальному випадку, в залежності від конструктивних параметрів вузла контролю, для реалізації ємнісних сенсорів може бути застосована та чи інша технологія виготовлення. Від технології залежать метрологічні і експлуатаційні характеристики, а також вартість виготовлення сенсорів.

2.6.1 Особливості технології виготовлення електродів ємнісних сенсорів

Прецизійні ємнісні сенсори виготовляються шляхом складання із металевих, виготовлених на високоточних станках, деталей. Таку технологію застосовує фірма Micro-epsilon Messtechnik GmbH [74]. Технологія дуже вартісна, тому застосовується виключно під час виготовлення малих серій.

Менш затратною технологією для формування електродів сенсорів є тонкоплівковка [75]. Провідний шар в даному випадку наноситься на діелектричну підкладку у виді тонкої плівки товщиною в декілька мікрон. Тонка

плівка забезпечує високу точність і відтворюваність зразків, що призводить до високої точності сенсорів. Технологія має високу вартість виготовлення сенсорів, адже потребує використання спеціального вакуумного обладнання та відповідних пристосувань задля забезпечення процесу виготовлення сенсорів у вакуумних камерах.

Найбільш розповсюдженою на сьогодні є технологія друкованих плат, яка може застосовуватися для забезпечення виготовлення ємнісних сенсорів, але в процесі виготовлення сенсорів можуть виникати дефекти які впливають на функцію перетворення сенсорів. Це може призвести до появи додаткових похибок визначення інформативних параметрів, а саме параметрів биття валів.

В результаті проведеного аналітичного огляду літературних джерел [4, 58, 76-78], було встановлено, що дослідження впливу дефектів спричинених технологією виготовлення на метрологічні та експлуатаційні характеристики ємнісних сенсорів, які застосовуються в системах контролю та діагностики потужних ГГ, практично відсутні. Тому, виникає необхідність в проведенні досліджень із виявлення впливу технологічних дефектів на метрологічні та експлуатаційні характеристики ємнісних сенсорів. Для визначення граничних умов розглянемо особливості технології виготовлення провідних поверхонь сенсорів як друкованих плат, яка регламентується міжнародними стандартами IPC-2221B [79] та ANSI/IPC A-600H [80].

Використання цієї технології дозволяє:

- гарантувати стабільність і відтворюваність метрологічних характеристик;
- збільшити точності визначення інформаційних сигналів;
- знизити собівартість сенсорів (при виготовленні партії однотипних сенсорів);
- отримати сенсори будь-яких конструкцій в єдиному технологічному циклі;
- уніфікація і стандартизація конструктивних і технологічних рішень при проектуванні та виготовленні сенсорів;

- забезпечити значну стійкість до впливів робочого середовища (підвищений рівень магнітних полів, вібрації, температур, тощо) об'єкту діагностування.

Зазвичай для виготовлення ємнісних сенсорів за технологією друкованих плат використовують адитивний і субтрактивний методи створення електродів сенсора.

За використання субтрактивного метода на фольгованому діелектрику, травленням міді по захисній масці отримують друкований рисунок, який забезпечує отримання електродів, а при адитивному методі, на діелектричній основі, покритій шаром клейкого композиту, проводять вибіркове осадження струмопровідного покриття.

У порівнянні з субтрактивним, адитивний метод має такі переваги:

- однорідність структури провідників, так як провідники і металізовані отвори отримуються в єдиному хіміко–гальванічному процесі;
- усунуте підтравлювання елементів друкованого монтажу;
- підвищена щільність друкованого монтажу;
- відсутні витрати міді та хімікатів для травлення;
- зменшена тривалість виробничого циклу.

Незважаючи на описані переваги, застосування адитивного методу в масовому виробництві обмежено низькою продуктивністю процесу хімічної металізації, шкідливим впливом електролітів на діелектрик, труднощами одержання металевих покриттів з хорошою адгезією. Домінуючою в цих умовах є субтрактивна технологія, особливо з переходом на фольговані діелектрики з тонкошаровою фольгою, нанесеною на базовий матеріал. Найбільш поширеним базовим матеріалом, який використовується в якості діелектрика є - FR-4. Температура експлуатації цього матеріалу 120...130 °С. Діелектрична підкладка стандартного FR-4 сформована із склотекстоліту [81].

В результаті проведеного аналізу [1, 62, 82-84] особливостей виготовлення ємнісних сенсорів субтрактивною технологією із стандартного матеріалу FR-4, були визначені типи технологічних дефектів виготовлення, що впливають на

характеристики та функцію перетворення ємнісних сенсорів, які наведені на рис. 2.14. Основними є дефекти, які впливають на конструктивні параметри сенсорів (на рис.2.14 позначені синім кольором). Всі інші дефекти є похідними від них, тому, далі розглянемо тільки дефекти конструктивного параметру.

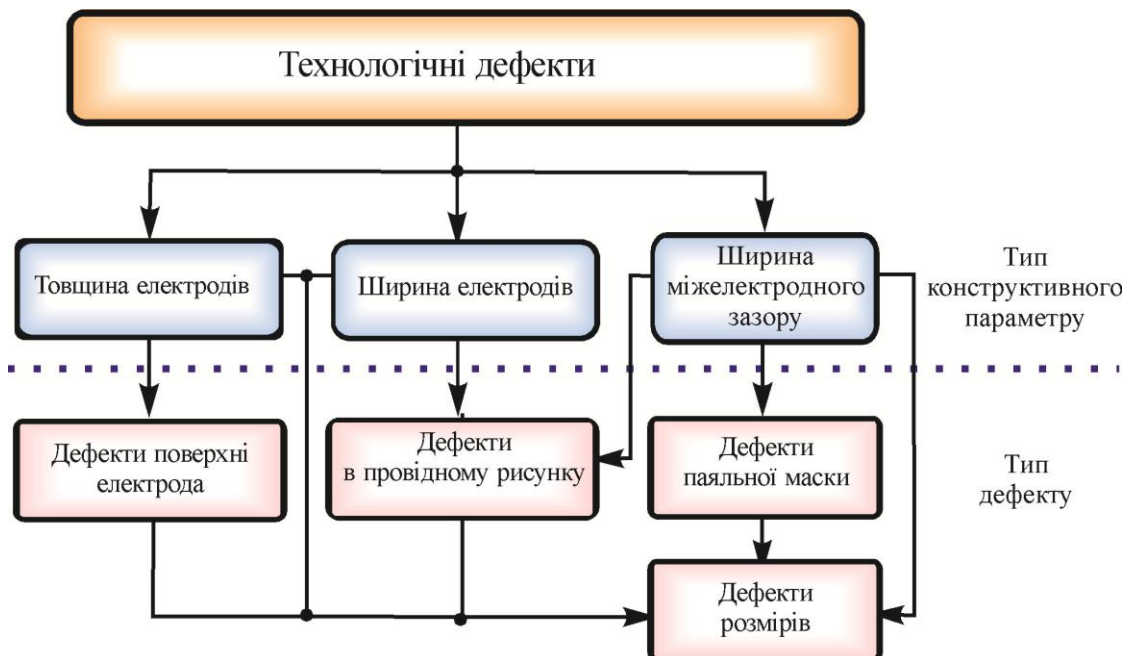


Рис.2.14 Основні технологічні дефекти, що виникають при виготовленні

2.6.2 Дослідження впливу технологічних дефектів на функцію перетворення ємнісного сенсору

Враховуючи те, що електроди ємнісних сенсорів є фактично друкованими платами, що формуються у мідному шарі фольгованого склотекстоліту, тому під час їхнього виготовлення виникають два типи обмежень. Перше – ширина зазорів між електродами не може бути обрана менш ніж 50 мкм. Це пов'язано з необхідністю уникнути можливого повного або часткового замикання між електродами (наприклад, в результаті забруднення). Друге, пов'язано із технологічними обмеженнями, які полягають у важкості досягнення рівномірності зазорів на відносно великих розмірах полігонів.

Розкид ширини електродів залежить від товщини шару металу: при травленні мідної фольги товщиною 18 мкм інтервал розкиду ширини, у відповідності до [82], допустимий близько 30 мкм, при травленні фольги товщиною 35 мкм розкид

складає 50 мкм, а при травленні фольги товщиною 105 мкм – близько 120 мкм. Зауважимо, що спотворення розмірів електродів по відношенню до розмірів ширини їх зображень на фотошаблонах є звуження зазорів між мідними полігонами. Цю особливість технології необхідно враховувати під час проектування сенсорів [81].

Такі параметри як товщина діелектричної підкладки фольгованого матеріалу і товщина його мідного шару задаються в технічних умовах на матеріал, а мінімальна ширина провідника (електрода) і мінімальний зазор для цього матеріалу визначаються у відповідності з чинними стандартами [79, 80]. Характеристики стандартного FR-4 матеріалу та припустимі мінімальні значення провідників і зазорів з їх допусками наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики фольгованих матеріалів

Товщина мідної фольги	Мінімально відтворювана ширина провідників і зазорів, мкм		Граничні відхилення по товщині мідної фольги, мм	Граничні відхилення по товщині базового матеріалу, мм
	lim	h		
H_{foil}			lim	$H_{diel} \pm lim$
18	± 30	100	+0,002 -0,004	$< 1,5 \pm 0,2$ $1,5 \div 3 \pm 0,3$ $3 \div 4,5 \pm 0,5$ $\geq 4,5 \pm 0,65$
35	± 50	150	+0,003 -0,007	
50	± 70	200		
70	± 100	250		
105	± 120	300		

Зазначені параметри технічних характеристик в таблиці 2.3 є значеннями для формування граничних умов під час проведення досліджень впливу технологічних дефектів на функції перетворення досліджуваних конструкцій сенсорів.

В наступних підрозділах наведені результати досліджень впливу технологічних дефектів на функції перетворення ємнісних сенсорів досліджуваних типів [62, 83, 84].

2.6.2.1 Дослідження впливу розкиду розмірів міжелектродних зазорів на функції перетворення ємнісних сенсорів биття

Для визначення впливу ширини міжелектродного зазору на функцію перетворення ємності, для кожного типу сенсорів, створені ідеалізовані моделі в межах граничнодопустимих значень (lim) по товщині мідної фольги (H_{foil} , мкм), що використовуються при виробництві електродів сенсорів за технологією друкованих плат та мінімально відтворюваними ширинами зазорів $h \pm lim$, мм (див. табл. 2.3). Розкид ширини електродів приймається рівномірним з обох сторін електрода $W_{electrode} \pm lim$, мм (див. табл. 2.3).

Ємнісний сенсор з плоскопаралельними електродами

Модель сенсору з плоскопаралельними електродами для дослідження впливу розкиду ширини міжелектродних зазорів на функцію перетворення представлена на рис. 2.15.

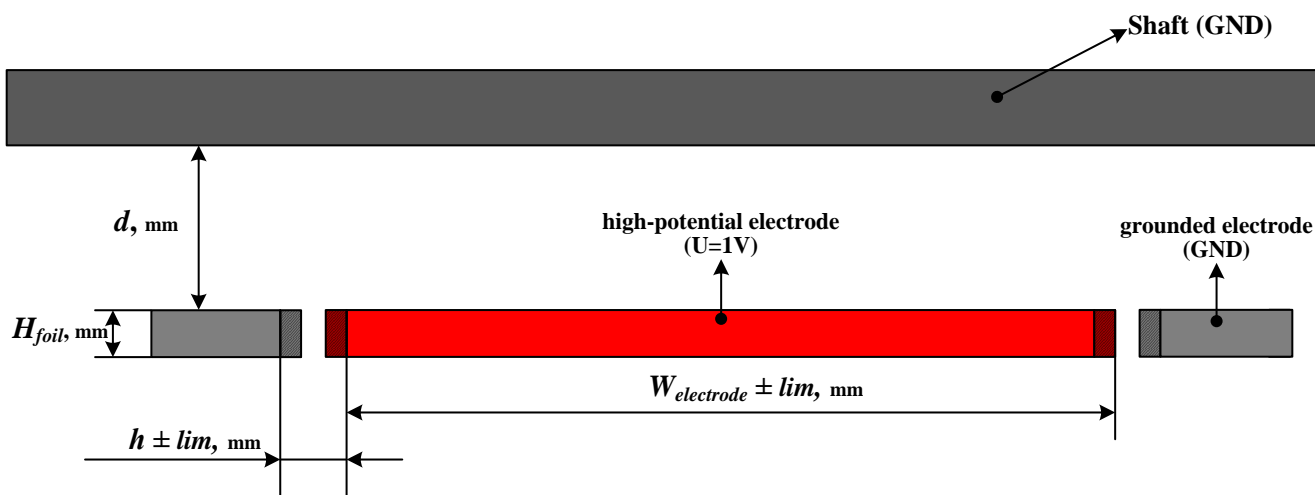


Рис. 2.15 Схема моделі ємнісного сенсора із плоскопаралельними електродами для визначення впливу ширини міжелектродного зазору на функцію перетворення

При проведенні досліджень змінювалася ширина електрода W_{el} та ширина міжелектродного зазора h (за стандартом 0,1 мм) в межах граничнодопустимих значень $lim = \pm 0,3$ мкм з кроком в 0,1 мкм. Товщина мідної фольги в моделі

складає $H_{foil} = 0.018$ мм. Функція перетворення сенсора розраховувалась, як зміна ємності C_m між високопотенціальним електродом сенсора та заземленою поверхнею вала в залежності від зміни значення h і d . Результати розрахунків для сенсора з плоскопаралельними електродами представлені в таблиці 2.4, відповідний графік наведено на рис. 2.16.

Таблиця 2.4

**Результати розрахунку функції перетворення
для сенсора з плоскопаралельними електродами**

$d,$ мм	$h=0.07,$ мм	$h=0.08,$ мм	$h=0.09,$ мм	$h=0.1,$ мм	$h=0.11,$ мм	$h=0.12,$ мм	$h=0.13,$ мм
	C_m, pF						
0.3	7.26	7.20	7.16	7.12	7.08	7.05	7.02
0.4	5.80	5.74	5.70	5.66	5.62	5.59	5.56
0.5	4.93	4.87	4.83	4.79	4.75	4.72	4.69
0.6	4.35	4.30	4.25	4.21	4.18	4.14	4.11
0.7	3.94	3.89	3.84	3.80	3.77	3.74	3.71
0.8	3.64	3.59	3.54	3.50	3.47	3.43	3.40
0.9	3.41	3.35	3.31	3.27	3.23	3.20	3.17
1	3.22	3.17	3.12	3.08	3.05	3.01	2.99
1.1	3.07	3.02	2.97	2.93	2.90	2.86	2.83
1.2	2.95	2.89	2.85	2.81	2.77	2.74	2.71
1.3	2.84	2.79	2.74	2.70	2.67	2.64	2.61
1.4	2.75	2.70	2.65	2.61	2.58	2.55	2.52
1.5	2.68	2.62	2.58	2.54	2.50	2.47	2.44
1.6	2.61	2.56	2.51	2.47	2.44	2.40	2.38
1.7	2.55	2.50	2.45	2.41	2.38	2.35	2.32
1.8	2.50	2.45	2.40	2.36	2.33	2.29	2.27
1.9	2.46	2.40	2.36	2.32	2.28	2.25	2.22
2	2.42	2.36	2.32	2.28	2.24	2.21	2.18
2.1	2.38	2.33	2.28	2.24	2.20	2.17	2.14
2.2	2.35	2.29	2.25	2.21	2.17	2.14	2.11
2.3	2.32	2.26	2.22	2.18	2.14	2.11	2.08

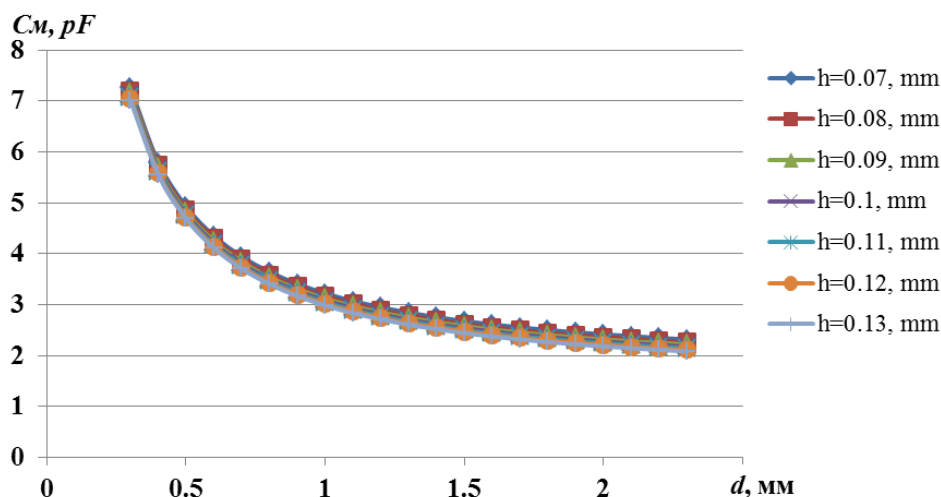


Рис. 2.16 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні ширини міжелектродного зазору.

З отриманих результатів видно, що значення ємності збільшується із збільшенням ширини електродів за рахунок зменшення міжелектродного зазору, однак зміна відбувається на відносно мале значення та майже не впливає на кінцевий результат вимірювань.

Схема ємнісного сенсора з охоронним кільцем

Модель ємнісного сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна для дослідження впливу розкиду ширини міжелектродних зазорів на функцію перетворення представлена на рис. 2.17.

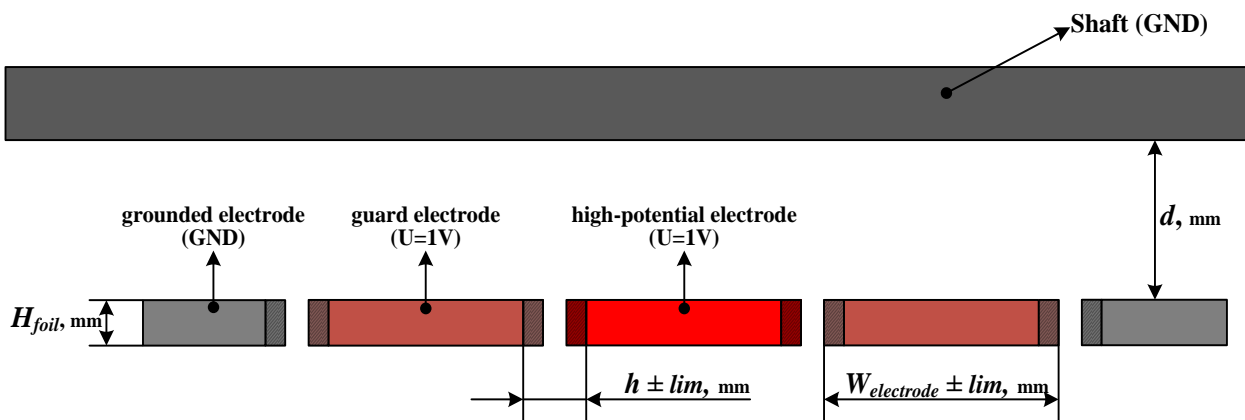


Рис. 2.17 Схема моделі ємнісного сенсора з охоронним кільцем для визначення впливу ширини міжелектродного зазору на функцію перетворення

Результати дослідження впливу ширини міжелектродного зазору на функцію перетворення ємнісного сенсора з охоронним кільцем представлені в таблиці 2.5, відповідний графік наведено на рис. 2.18.

Таблиця 2.5

**Результати розрахунку функції перетворення
для сенсора з охоронним кільцем**

<i>d</i> , мм	<i>h</i> =0.07, мм	<i>h</i> =0.08, мм	<i>h</i> =0.09, мм	<i>h</i> =0.1, мм	<i>h</i> =0.11, мм	<i>h</i> =0.12, мм	<i>h</i> =0.13, мм
	<i>См</i> , pF						
0.3	1.578	1.578	1.578	1.577	1.577	1.576	1.575
0.4	1.199	1.198	1.198	1.198	1.197	1.197	1.197
0.5	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.969
0.6	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818
0.7	0.710	0.710	0.710	0.710	0.709	0.709	0.709
0.8	0.628	0.628	0.628	0.628	0.628	0.628	0.628
0.9	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565
1	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514
1.1	0.473	0.473	0.473	0.473	0.473	0.472	0.472
1.2	0.438	0.438	0.438	0.438	0.438	0.438	0.438
1.3	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409
1.4	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
1.5	0.362	0.362	0.362	0.362	0.362	0.362	0.362
1.6	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343
1.7	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326
1.8	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311
1.9	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298
2	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286
2.1	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275
2.2	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265
2.3	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256

Для сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна вплив зміни ширини міжелектродного зазору в середньому складає $1 \cdot 10^{-5}$ pF. З отриманих результатів, можна зробити висновок, що для такого типу сенсора, параметр ширини міжелектродного зазору має незначний вплив.

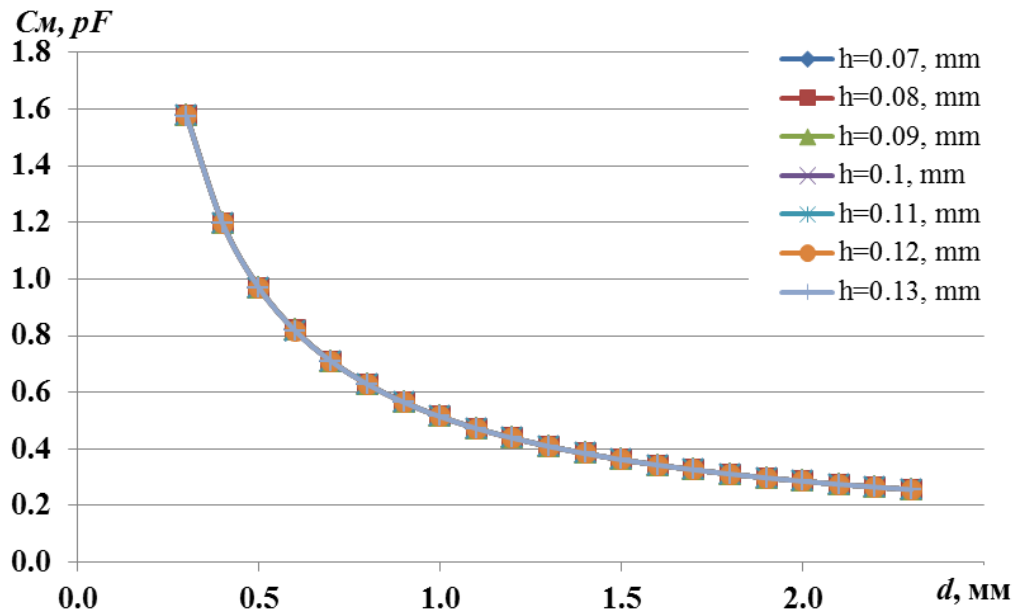


Рис. 2.18 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні ширини міжелектродного зазору

Схема ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами

Модель ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами для дослідження впливу розкиду ширини міжелектродних зазорів на функцію перетворення представлена на рис. 2.19.

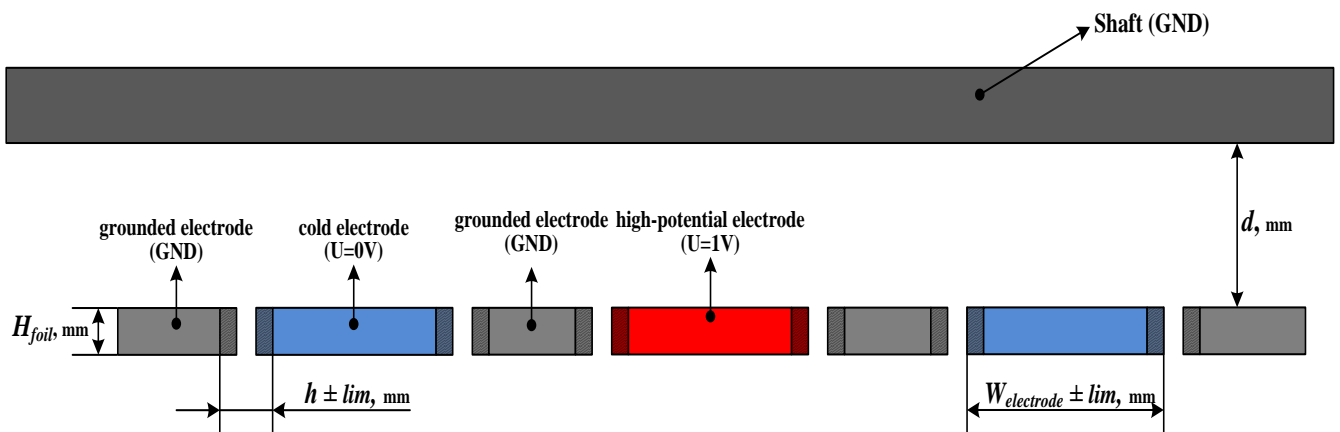


Рис. 2.19 Схема моделі ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами для визначення впливу ширини міжелектродного зазору на функцію перетворення

Результати дослідження впливу ширини міжелектродного зазору на функцію перетворення ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами представлені в таблиці 2.6, відповідний графік наведено на рис. 2.20.

Таблиця 2.6

Результати розрахунку значення ємності між високопотенціальним електродом і низькопотенціальним електродами для сенсора з концентричними компланарними електродами

d , мм	$h=0.07$, мм	$h=0.08$, мм	$h=0.09$, мм	$h=0.1$, мм	$h=0.11$, мм	$h=0.12$, мм	$h=0.13$, мм
См, pF							
0.3	0.04055	0.04054	0.04053	0.04053	0.04052	0.04051	0.04050
0.4	0.04063	0.04062	0.04061	0.04061	0.04061	0.04060	0.04059
0.5	0.04079	0.04078	0.04078	0.04078	0.04077	0.04077	0.04076
0.6	0.04105	0.04105	0.04105	0.04105	0.04105	0.04105	0.04104
0.7	0.04145	0.04145	0.04145	0.04145	0.04145	0.04145	0.04145
0.8	0.04197	0.04196	0.04196	0.04197	0.04197	0.04197	0.04197
0.9	0.04258	0.04258	0.04258	0.04259	0.04259	0.04259	0.04259
1	0.04328	0.04328	0.04328	0.04329	0.04329	0.04330	0.04330
1.1	0.04405	0.04405	0.04405	0.04405	0.04406	0.04407	0.04407
1.2	0.04486	0.04486	0.04487	0.04488	0.04488	0.04489	0.04489
1.3	0.04572	0.04572	0.04572	0.04573	0.04574	0.04574	0.04574
1.4	0.04660	0.04660	0.04660	0.04661	0.04662	0.04663	0.04663
1.5	0.04750	0.04749	0.04750	0.04751	0.04752	0.04752	0.04753
1.6	0.04840	0.04840	0.04840	0.04842	0.04843	0.04843	0.04844
1.7	0.04931	0.04931	0.04931	0.04932	0.04933	0.04934	0.04935
1.8	0.05022	0.05022	0.05022	0.05024	0.05024	0.05025	0.05026
1.9	0.05112	0.05112	0.05113	0.05114	0.05115	0.05115	0.05116
2	0.05202	0.05202	0.05202	0.05203	0.05205	0.05205	0.05206
2.1	0.05290	0.05290	0.05291	0.05292	0.05293	0.05293	0.05294
2.2	0.05377	0.05377	0.05378	0.05379	0.05380	0.05381	0.05382
2.3	0.05462	0.05463	0.05464	0.05465	0.05465	0.05466	0.05467

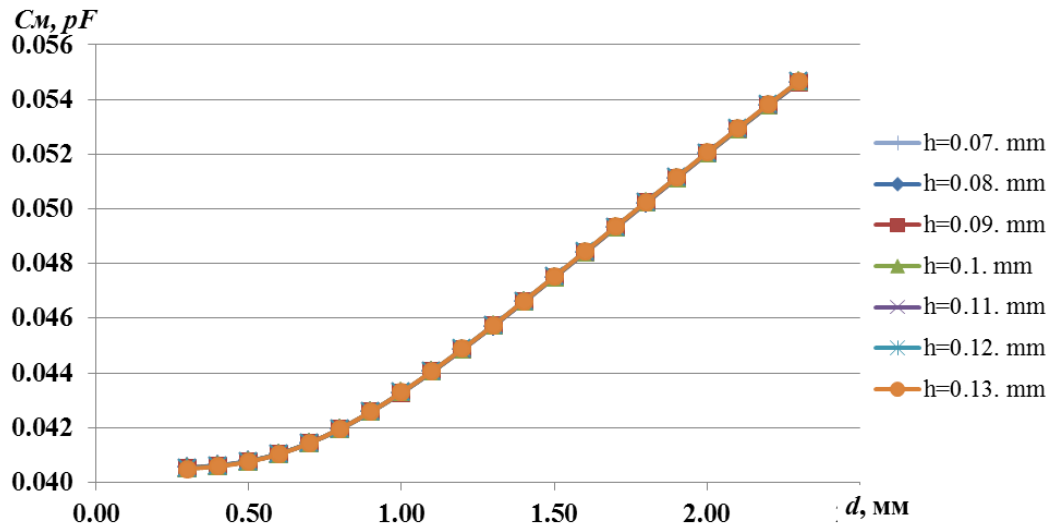


Рис. 2.20 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні ширини міжелектродного зазору

Як видно з рис 2.20 та таблиці 2.6, аналогічно до результатів вимірювань сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна, для сенсора з концентричними компланарними електродами параметр ширини міжелектродного зазору має незначний вплив.

Виходячи з отриманих результатів та проаналізувавши ринок виробництва друкованих плат [61, 82], можливе виготовлення електродів товщиною $H_{foil} = 18$ мкм з інтервалом міжелектродного зазору $h = 100 \div 125$ мкм та для $H_{foil} = 35$ мкм з інтервалом міжелектродного зазору $h = 150 \div 200$ мкм. Виготовлення сенсорів з меншими інтервалами неможливе, оскільки висока ймовірність замикання.

2.6.2.2 Дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення ємнісного сенсору

По аналогії з пунктом 2.6.2.1, для визначення впливу товщини електродів на функцію перетворення сенсорів в програмному середовищі були створені ідеалізовані моделі ємнісних сенсорів.

Відмінність від попередніх моделей полягає в тому, що за змінну величину приймається товщина мідної фольги H_{foil} . Розрахунок проводять для значень H_{foil} ,

рівних 0.018 мм, 0.035 мм, 0.05 мм, 0.07 мм, і 0.105 мм (див. табл. 2.3), а значення міжелектродного зазору приймається рівним $h = 0.1$ мм.

Схема ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами

Модель ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами для дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення представлена на рис. 2.21.

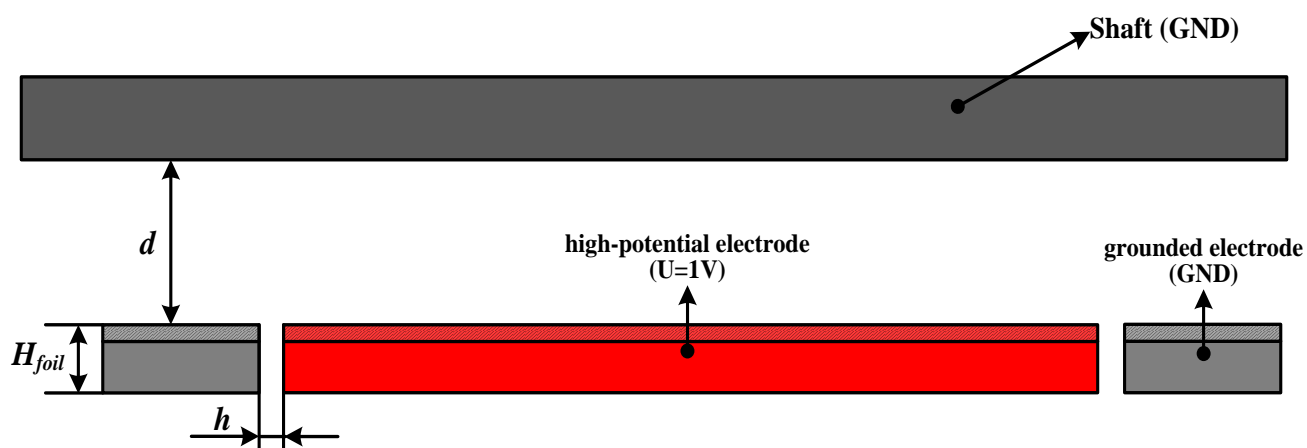


Рис.2.21 Схема моделі ємнісного сенсора із плоскопаралельними електродами для визначення впливу товщини електродів на функцію перетворення

Результати дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення при вимірюванні ємності між високопотенціальним електродом сенсора з плоскопаралельними електродами та заземленою поверхнею валу представлені в таблиці 2.7, відповідний графік наведено на рис. 2.22.

Як видно з отриманих результатів, значення ємності збільшується із збільшенням товщини мідної фольги електродів. Це пов'язано із значним впливом крайових ефектів торцевої поверхні електродів.

**Результати розрахунку функції перетворення для сенсора
з плоскопаралельними електродами**

$H_{foil}, мм$ $d, мм$	0.018	0.035	0.05	0.07	0.105
	<i>См, pF</i>				
0.3	7.12	7.20	7.27	7.37	7.54
0.4	5.66	5.74	5.81	5.91	6.08
0.5	4.79	4.87	4.94	5.04	5.21
0.6	4.21	4.29	4.37	4.46	4.64
0.7	3.80	3.89	3.96	4.06	4.23
0.8	3.50	3.58	3.66	3.75	3.93
0.9	3.27	3.35	3.42	3.52	3.69
1	3.08	3.16	3.24	3.33	3.51
1.1	2.93	3.01	3.09	3.18	3.35
1.2	2.81	2.89	2.96	3.06	3.23
1.3	2.70	2.79	2.86	2.95	3.13
1.4	2.61	2.70	2.77	2.87	3.04
1.5	2.54	2.62	2.69	2.79	2.96
1.6	2.47	2.55	2.63	2.72	2.89
1.7	2.41	2.50	2.57	2.66	2.84
1.8	2.36	2.44	2.52	2.61	2.79
1.9	2.32	2.40	2.47	2.57	2.74
2	2.28	2.36	2.43	2.53	2.70
2.1	2.24	2.32	2.40	2.49	2.66
2.2	2.21	2.29	2.36	2.46	2.63
2.3	2.18	2.26	2.33	2.43	2.60

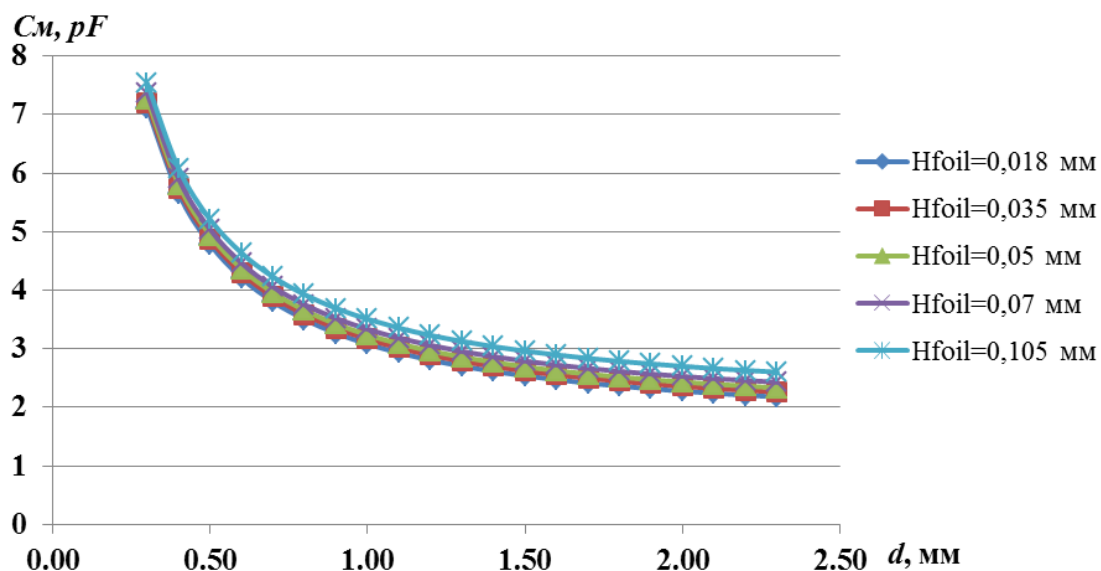


Рис. 2.22 Графік залежності ємності між вископотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні товщини електродів

Схема ємнісного сенсора з охоронним кільцем

Модель ємнісного сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна для дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення представлена на рис. 2.23.

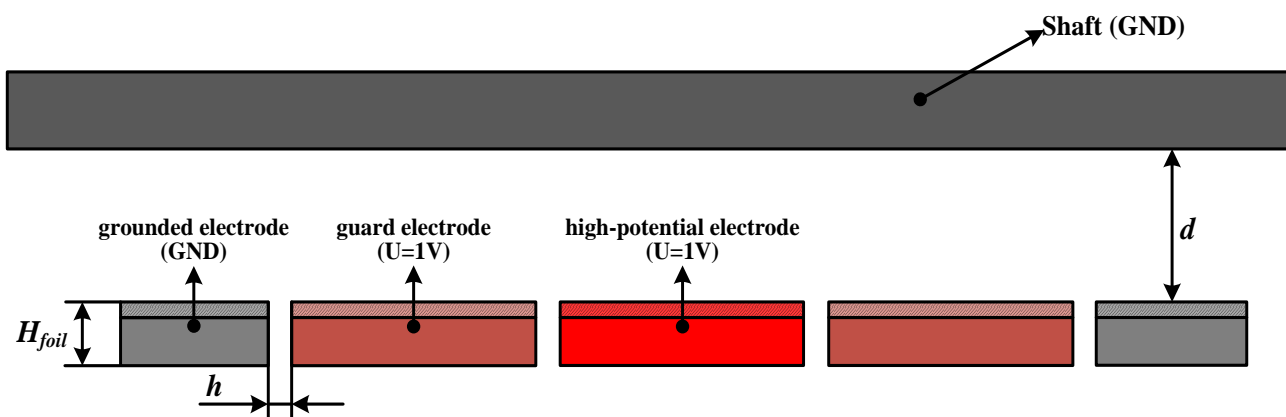


Рис. 2.23 Схема моделі ємнісного сенсора з охоронним кільцем для визначення впливу товщини електродів на функцію перетворення

Результати дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення при вимірюванні ємності між вископотенціальним електродом

сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна та заземленою поверхнею вала представлені в таблиці 2.8, відповідний графік наведено на рис. 2.24.

Таблиця 2.8

**Результати розрахунку функції перетворення
для сенсора з охоронним кільцем**

$H_{foil}, мм$ $d, мм$	0.018	0.035	0.05	0.07	0.105
	C_m, pF				
0.3	1.5771	1.5773	1.5775	1.5774	1.5778
0.4	1.1977	1.1979	1.198	1.198	1.1983
0.5	0.96998	0.97013	0.97014	0.97019	0.97044
0.6	0.81809	0.81819	0.8182	0.81823	0.81838
0.7	0.70954	0.70963	0.70965	0.70965	0.70973
0.8	0.62812	0.62819	0.62821	0.62821	0.62836
0.9	0.56476	0.56483	0.56484	0.56485	0.56495
1	0.51408	0.51414	0.51415	0.51415	0.51425
1.1	0.47259	0.47265	0.47265	0.47266	0.47273
1.2	0.43802	0.43807	0.43807	0.43808	0.43816
1.3	0.40876	0.40881	0.40881	0.40882	0.4089
1.4	0.38368	0.38372	0.38373	0.38373	0.3838
1.5	0.36194	0.36198	0.36199	0.36199	0.36206
1.6	0.34292	0.34296	0.34297	0.34297	0.34304
1.7	0.32614	0.32618	0.32618	0.3262	0.32626
1.8	0.31123	0.31127	0.31128	0.31129	0.31135
1.9	0.2979	0.29794	0.29795	0.29795	0.29801
2	0.28591	0.28595	0.28596	0.28596	0.28602
2.1	0.27508	0.27512	0.27513	0.27513	0.27519
2.2	0.26525	0.26528	0.26529	0.2653	0.26536
2.3	0.25628	0.25632	0.25633	0.25634	0.25639

Як видно з таблиці 2.8 та рис. 2.24, значення ємності збільшується із збільшенням товщини мідної фольги електродів, однак на дуже малу величину. Це свідчить про те, що для даної конфігурації електродів сенсора, товщина мідної фольги електродів значного впливу не має.

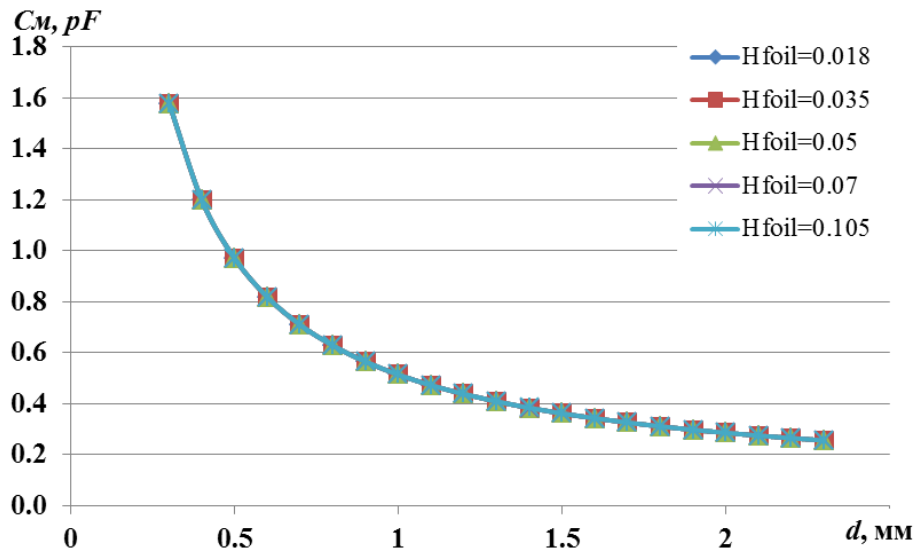


Рис. 2.24 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні товщини електродів

Схема ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродми

Модель ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродми для дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення представлена на рис. 2.25.

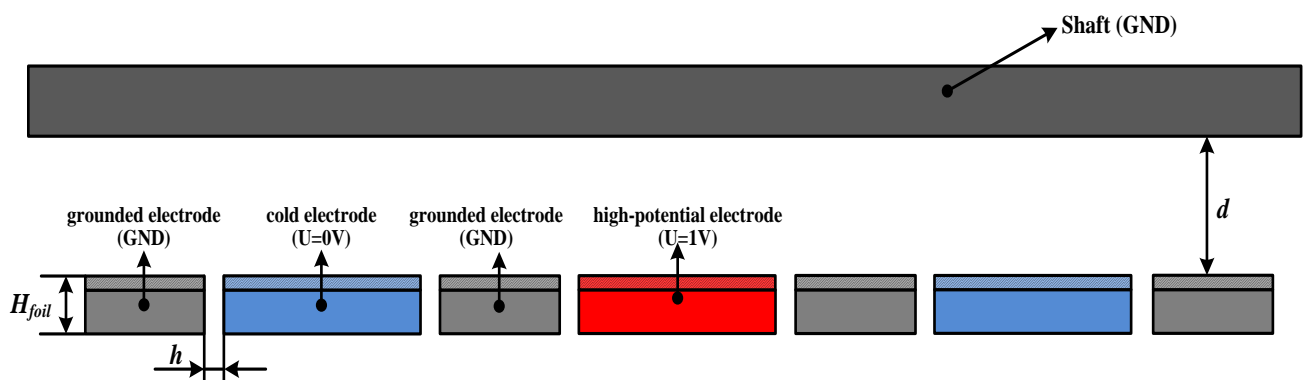


Рис.2.25 Схема моделі ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродми для визначення впливу товщини електродів на функцію перетворення

Результати дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення при вимірюванні ємності між високопотенціальним електродом сенсора з концентричними компланарними електродами та заземленою поверхнею вала представлені в таблиці 2.9, відповідний графік наведено на рис. 2.26.

Таблиця 2.9

**Результати розрахунку функції перетворення вала для сенсора з
концентричними компланарними електродами**

$H_{foil}, \text{мм}$	0.018	0.035	0.05	0.07	0.105
$d, \text{мм}$	C_m, pF				
0.3	0.0477	0.0479	0.0479	0.0479	0.0479
0.4	0.0485	0.0486	0.0487	0.0487	0.0487
0.5	0.0509	0.0510	0.0511	0.0511	0.0511
0.6	0.0556	0.0557	0.0557	0.0557	0.0558
0.7	0.0629	0.0630	0.0630	0.0630	0.0631
0.8	0.0726	0.0727	0.0727	0.0727	0.0727
0.9	0.0844	0.0844	0.0845	0.0845	0.0845
1	0.0978	0.0979	0.0979	0.0979	0.0979
1.1	0.1126	0.1127	0.1127	0.1127	0.1127
1.2	0.1284	0.1285	0.1285	0.1285	0.1285
1.3	0.1449	0.1450	0.1450	0.1451	0.1451
1.4	0.1620	0.1621	0.1621	0.1621	0.1621
1.5	0.1794	0.1795	0.1795	0.1795	0.1796
1.6	0.1970	0.1971	0.1972	0.1971	0.1971
1.7	0.2147	0.2147	0.2148	0.2148	0.2148
1.8	0.2323	0.2324	0.2325	0.2325	0.2325
1.9	0.2499	0.2500	0.2500	0.2500	0.2501
2	0.2673	0.2674	0.2674	0.2674	0.2675
2.1	0.2844	0.2846	0.2846	0.2846	0.2847
2.2	0.3013	0.3015	0.3015	0.3015	0.3016
2.3	0.3180	0.3181	0.3181	0.3182	0.3182

Як видно з таблиці 2.9, значення ємності збільшується із збільшенням товщини мідної фольги електродів, однак на дуже малу величину. Це свідчить про те, що для даної конфігурації електродів сенсора, товщина мідної фольги електродів значного впливу не має.

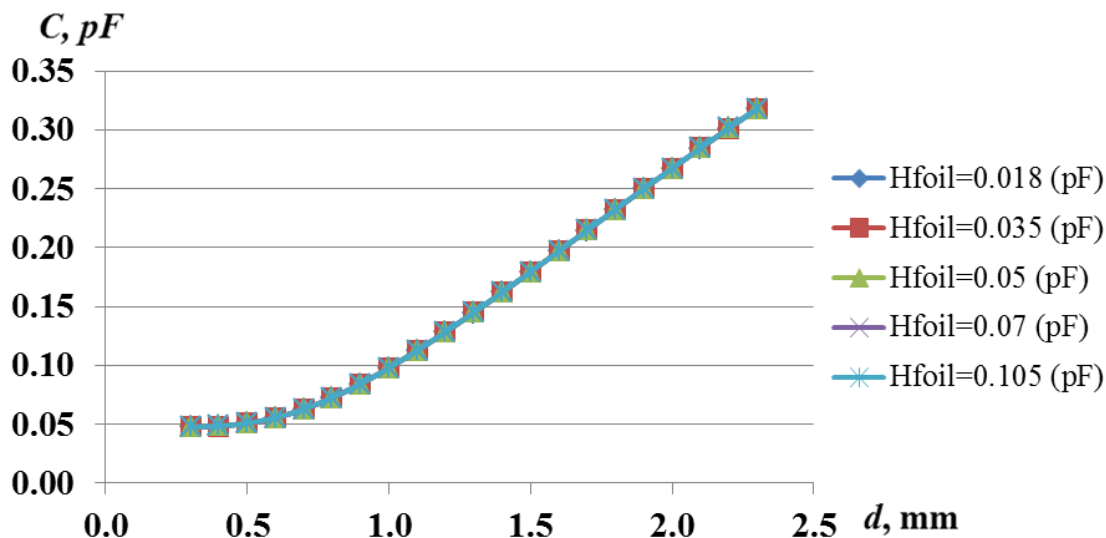


Рис. 2.25 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні товщини електродів

З отриманих результатів, можна сказати, що для сенсорів з охоронним та компланарними електродами, товщина мідної фольги майже не впливає на значення ємності в залежності від відстані до заземленої поверхні. Враховуючи результати проведеного аналізу можливостей виготовлення існуючих виробників сенсорів за технологією друкованих плат, найбільш розповсюдженими є $H_{foil} = 18$ мкм та $H_{foil} = 35$ мкм.

2.6.2.3 Дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення ємнісних сенсорів

Оскільки сенсор представляє собою багат шарову друковану плату, у відповідності до чинного міжнародного стандарту ANSI/IPC A-600H [81], можливі варіанти товщини найбільш поширеного базового матеріалу, який

використовується в якості діелектрика (FR4) складає ряд: 0.2 мм; 0.25 мм; 0.36 мм; 0.51 мм; 0.71 мм; 1 мм; 1.5 мм; 2 мм.

Стандартний FR-4 товщиною 1,6 мм складається з восьми шарів склотекстоліту. На центральному шарі зазвичай знаходиться логотип виробника, колір його відображає клас горючості даного матеріалу (червоний - UL94-VO, синій - UL94-HB). Зазвичай, FR-4 - прозорий, стандартний зелений колір визначається кольором паяльної маски, нанесеної на закінчену плату [81].

Для визначення впливу товщини базового матеріалу на функцію перетворення ємнісного сенсора, по аналогії з попередніми пунктами 2.6.2.1 та 2.6.2.2, були створені ідеалізовані моделі сенсорів, за змінну величину в яких приймається товщина діелектрика із стандартного ряду.

Схема ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами

Модель ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами для дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення представлена на рис. 2.27.

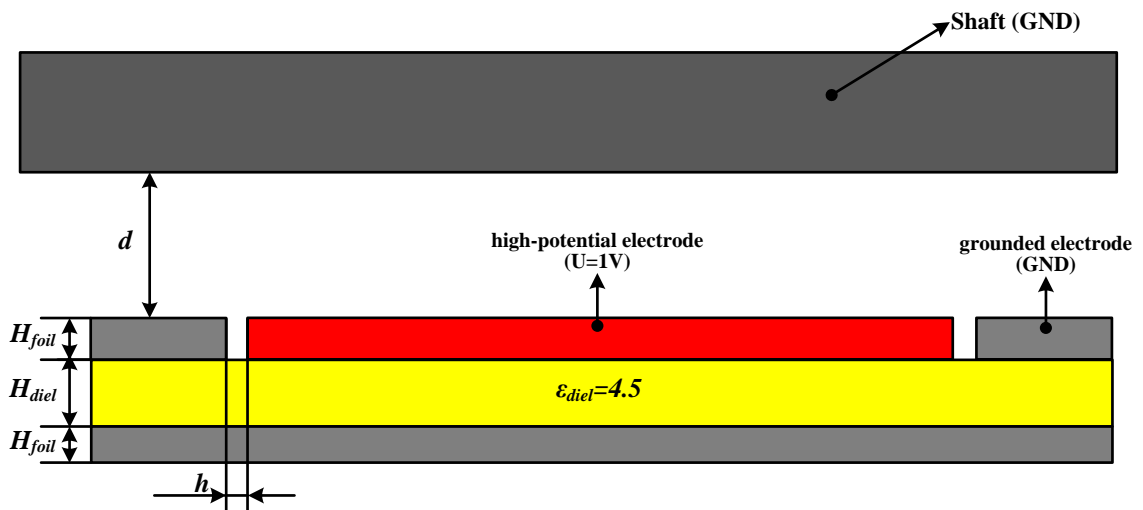


Рис. 2.27 Схема моделі ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами для визначення впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення

В даній моделі змінюється лише товщина діелектричної підкладки H_{diel} , товщина провідного шару електродів обрана з найбільш розповсюджених і

становить $H_{foil} = 18$ мкм, а значення відстані міжелектродного проміжку прийнято рівним $h=0.1$ мм. Окрім шару діелектрика на зворотню сторону сенсора додається ще один шар мідної фольги.

Результати дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення при вимірюванні ємності між високопотенціальним електродом сенсора з плоскопаралельними електродами та заземленою поверхнею вала представлені в таблиці 2.10, відповідний графік наведено на рис. 2.28.

Таблиця 2.10

**Результати розрахунку функції перетворення для сенсора з
плоскопаралельними електродами**

$d,$ мм	$H_{diel}=0.2$	$H_{diel}=0.25$	$H_{diel}=0.36$	$H_{diel}=0.51$	$H_{diel}=0.7$	$H_{diel}=1$	$H_{diel}=1.5$	$H_{diel}=2$
	C_m, pF							
0.3	15.43	13.66	11.52	10.09	9.15	8.46	7.92	7.66
0.4	13.97	12.20	10.06	8.63	7.69	7.00	6.46	6.20
0.5	13.10	11.34	9.19	7.77	6.82	6.13	5.59	5.33
0.6	12.53	10.76	8.61	7.19	6.24	5.56	5.01	4.75
0.7	12.12	10.36	8.21	6.78	5.84	5.15	4.61	4.35
0.8	11.82	10.05	7.90	6.48	5.53	4.85	4.30	4.05
0.9	11.59	9.82	7.67	6.25	5.30	4.61	4.07	3.81
1	11.40	9.63	7.49	6.06	5.12	4.43	3.89	3.63
1.1	11.25	9.48	7.34	5.91	4.97	4.28	3.74	3.48
1.2	11.13	9.36	7.21	5.79	4.84	4.15	3.61	3.35
1.3	11.02	9.26	7.11	5.69	4.74	4.05	3.51	3.25
1.4	10.94	9.17	7.02	5.60	4.65	3.96	3.42	3.16
1.5	10.86	9.09	6.94	5.52	4.57	3.89	3.34	3.08
1.6	10.79	9.03	6.88	5.45	4.51	3.82	3.28	3.02
1.7	10.74	8.97	6.82	5.40	4.45	3.76	3.22	2.96
1.8	10.69	8.92	6.77	5.35	4.40	3.71	3.17	2.91
1.9	10.64	8.87	6.72	5.30	4.35	3.67	3.12	2.86
2	10.60	8.83	6.68	5.26	4.31	3.63	3.08	2.82
2.1	10.56	8.80	6.65	5.23	4.28	3.59	3.05	2.79
2.2	10.53	8.76	6.61	5.19	4.25	3.56	3.01	2.76
2.3	10.50	8.73	6.59	5.16	4.22	3.53	2.99	2.73

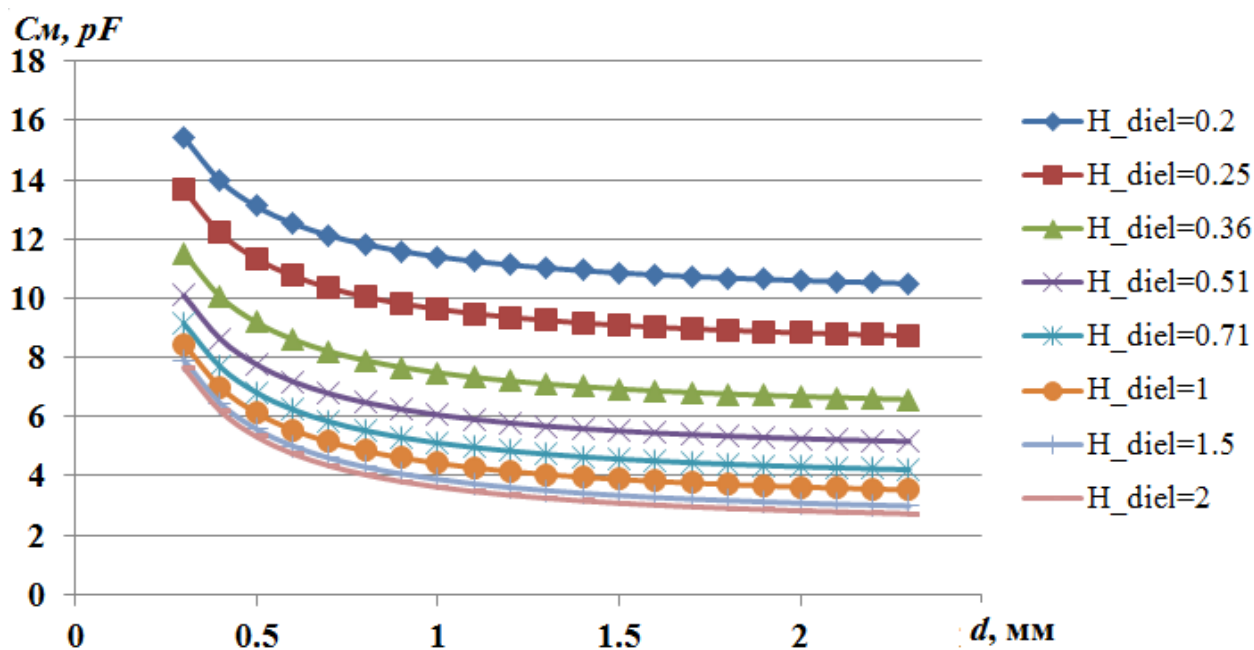


Рис. 2.28 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні товщини діелектричної підкладки H_{diel}

Як показали результати проведених досліджень, зі збільшенням товщини діелектричної підкладки зменшується значення ємності сенсору. Залежність зміни величини ємності від товщини діелектричної підкладки носить адитивний характер та складає 0,54 pF при зміні товщини підкладки з 1 мм до 1,5 мм та 0,26 pF при зміні з 1,5 мм до 2 мм.

Схема ємнісного сенсора з охоронним кільцем

Модель ємнісного сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна для дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення представлена на рис. 2.29.

Результати дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення при вимірюванні ємності між високопотенціальним електродом сенсора з охоронним кільцем та заземленою поверхнею вала представлені в таблиці 2.11, відповідний графік наведено на рис. 2.30.

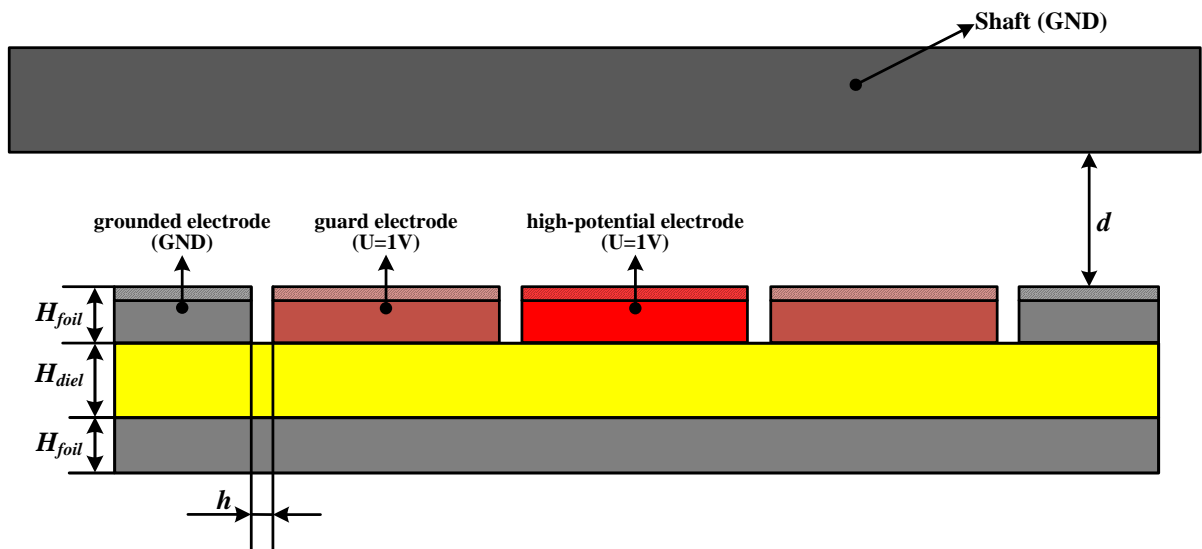


Рис. 2.29 Схема моделі ємнісного сенсора з охоронним кільцем для визначення впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення

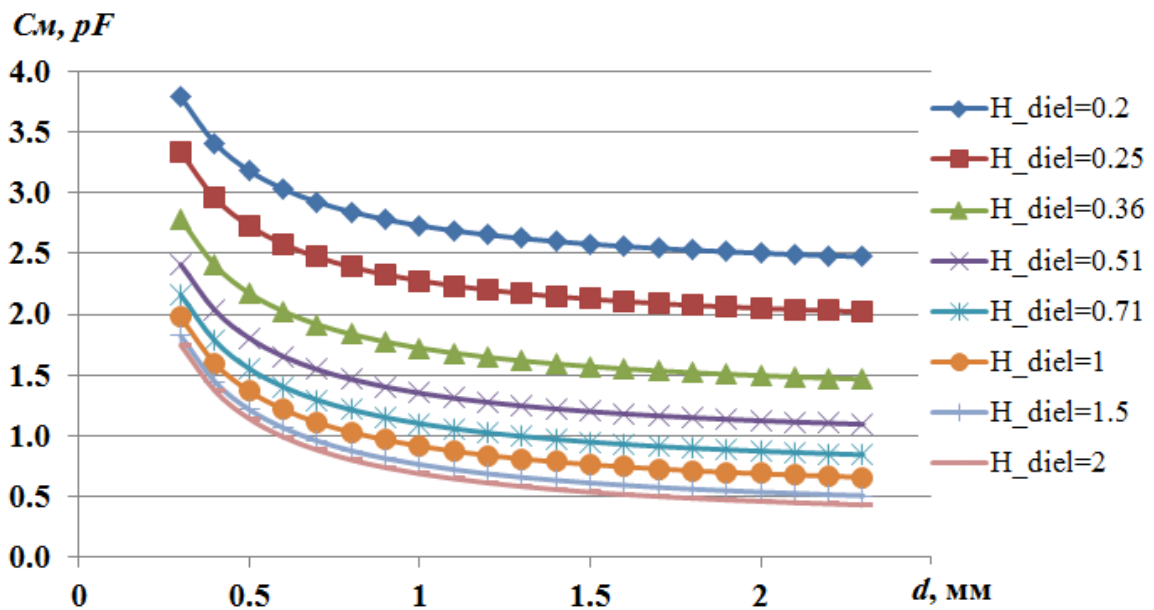


Рис.2.30 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні товщини діелектричної підкладки

Для сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна, товщина діелектричної підкладки має значний вплив на значення ємності при вимірюваннях між високопотенціальним електродом сенсора та заземленою поверхнею вала. При зміні товщини діелектричної підкладки з 1 мм до 1,5 мм, значення ємності зменшується на 0,19 pF.

**Результати розрахунку функції перетворення
для сенсора з охоронним кільцем**

d , мм	$H_{diel}=0.2$	$H_{diel}=0.25$	$H_{diel}=0.36$	$H_{diel}=0.51$	$H_{diel}=0.71$	$H_{diel}=1$	$H_{diel}=1.5$	$H_{diel}=2$
	C_m, pF							
0.3	3.79	3.34	2.78	2.41	2.16	1.97	1.82	1.75
0.4	3.41	2.96	2.40	2.03	1.78	1.59	1.44	1.37
0.5	3.19	2.73	2.18	1.80	1.55	1.37	1.22	1.14
0.6	3.03	2.58	2.02	1.65	1.40	1.22	1.06	0.99
0.7	2.93	2.47	1.92	1.54	1.29	1.11	0.96	0.88
0.8	2.85	2.39	1.84	1.46	1.21	1.03	0.87	0.80
0.9	2.78	2.33	1.77	1.40	1.15	0.96	0.81	0.73
1	2.73	2.28	1.72	1.35	1.10	0.91	0.76	0.68
1.1	2.69	2.24	1.68	1.31	1.06	0.87	0.72	0.64
1.2	2.66	2.20	1.65	1.27	1.02	0.84	0.68	0.61
1.3	2.63	2.17	1.62	1.24	0.99	0.81	0.65	0.58
1.4	2.60	2.15	1.59	1.22	0.97	0.78	0.63	0.55
1.5	2.58	2.13	1.57	1.20	0.95	0.76	0.61	0.53
1.6	2.56	2.11	1.55	1.18	0.93	0.74	0.59	0.51
1.7	2.54	2.09	1.53	1.16	0.91	0.72	0.57	0.50
1.8	2.53	2.07	1.52	1.15	0.90	0.71	0.56	0.48
1.9	2.52	2.06	1.51	1.13	0.88	0.70	0.54	0.47
2	2.50	2.05	1.49	1.12	0.87	0.68	0.53	0.46
2.1	2.49	2.04	1.48	1.11	0.86	0.67	0.52	0.45
2.2	2.48	2.03	1.47	1.10	0.85	0.66	0.51	0.44
2.3	2.47	2.02	1.46	1.09	0.84	0.65	0.50	0.43

Схема ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами

Модель ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами для дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення представлена на рис. 2.31.

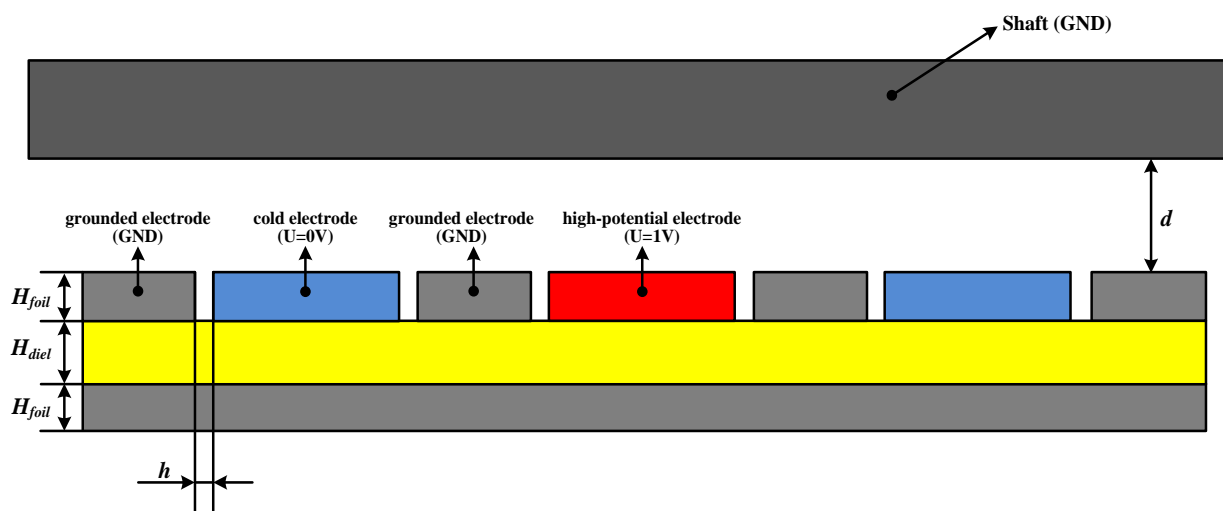


Рис. 2.31 Схема моделі ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами для визначення впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення

Результати дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення при вимірюванні ємності між високопотенціальним електродом сенсора з концентричними компланарними електродами та заземленою поверхнею вала представлені в таблиці 2.12, відповідний графік наведено на рис. 2.32.

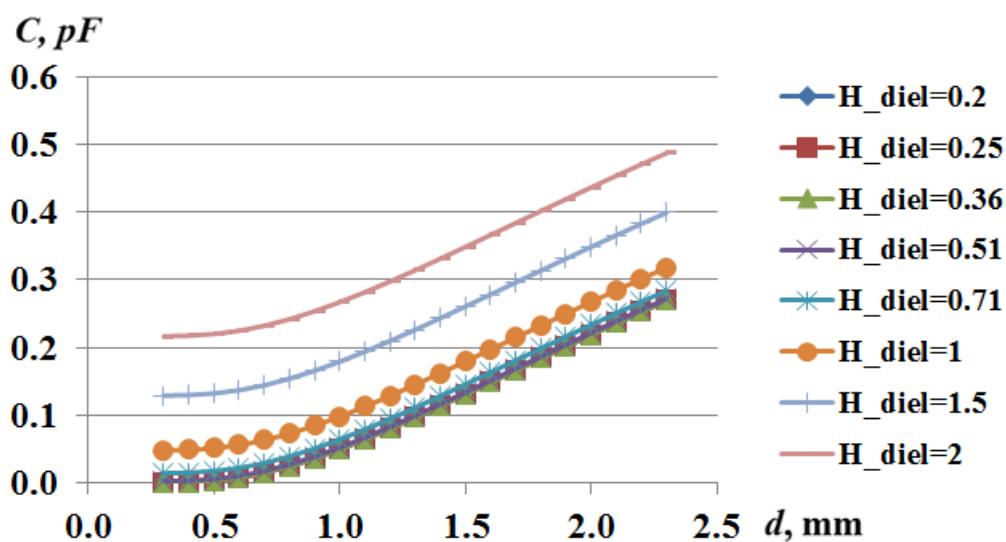


Рис.2.32 Графік залежності ємності між високопотенціальним електродом і заземленою поверхнею вала при зміні товщини діелектричної підкладки

**Результати розрахунку функції перетворення для сенсора
з концентричними компланарними електродами**

<i>d</i> , мм	$H_{diel}=0.2$	$H_{diel}=0.25$	$H_{diel}=0.36$	$H_{diel}=0.51$	$H_{diel}=0.71$	$H_{diel}=1$	$H_{diel}=1.5$	$H_{diel}=2$
	<i>Cm, pF</i>							
0.3	0.0000	0.0001	0.0002	0.0024	0.0141	0.0477	0.1288	0.2166
0.4	0.0008	0.0006	0.0006	0.0031	0.0149	0.0485	0.1296	0.2174
0.5	0.0031	0.0030	0.0029	0.0055	0.0173	0.0509	0.1321	0.2199
0.6	0.0077	0.0076	0.0076	0.0102	0.0220	0.0556	0.1368	0.2247
0.7	0.0150	0.0148	0.0148	0.0174	0.0292	0.0629	0.1441	0.2320
0.8	0.0246	0.0244	0.0244	0.0270	0.0389	0.0726	0.1538	0.2417
0.9	0.0363	0.0361	0.0362	0.0388	0.0506	0.0843	0.1656	0.2535
1	0.0496	0.0495	0.0496	0.0522	0.0640	0.0978	0.1790	0.2670
1.1	0.0643	0.0642	0.0643	0.0669	0.0788	0.1126	0.1938	0.2817
1.2	0.0801	0.0800	0.0801	0.0827	0.0946	0.1283	0.2096	0.2976
1.3	0.0966	0.0965	0.0966	0.0992	0.1111	0.1449	0.2262	0.3141
1.4	0.1136	0.1135	0.1136	0.1163	0.1282	0.1619	0.2432	0.3312
1.5	0.1309	0.1309	0.1310	0.1337	0.1456	0.1794	0.2607	0.3486
1.6	0.1485	0.1484	0.1486	0.1512	0.1632	0.1969	0.2782	0.3662
1.7	0.1661	0.1660	0.1662	0.1689	0.1808	0.2146	0.2960	0.3839
1.8	0.1837	0.1837	0.1838	0.1866	0.1985	0.2323	0.3136	0.4016
1.9	0.2013	0.2012	0.2014	0.2041	0.2160	0.2498	0.3312	0.4191
2	0.2186	0.2186	0.2188	0.2215	0.2334	0.2672	0.3486	0.4365
2.1	0.2358	0.2357	0.2359	0.2387	0.2506	0.2844	0.3658	0.4537
2.2	0.2527	0.2526	0.2528	0.2556	0.2675	0.3013	0.3827	0.4706
2.3	0.2693	0.2692	0.2694	0.2721	0.2841	0.3179	0.3993	0.4873

Для сенсора з концентричними компланарними електродами, зі збільшенням товщини діелектричної підкладки збільшується значення ємності сенсору. При зміні товщини діелектричної підкладки з 1 мм до 1,5 мм, значення ємності збільшується на 0,08 pF при відстані до заземленої поверхні $d=1$ мм. Залежність зміни величини ємності від товщини діелектричної підкладки носить адитивний характер.

ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Застосування моделювання ємнісних сенсорів відстані до заземленої поверхні в мультифізичному середовищі COMSOL Multiphysics має переваги під час дослідження їхніх характеристик в порівнянні з аналітичними методами:

- зменшення часу дослідження функцій перетворення;
- можливість визначення картини розподілу екіпотенціальних ліній електричного поля при зміні відстані між поверхнею робочого електрода сенсора та заземленою поверхнею, що імітує циліндричну поверхню полюса ротора гідроагрегату.

2. Отримані результати моделювання дозволяють оптимізувати конструкції сенсорів безконтактного вимірювання биття для застосування на потужних гідроагрегатах.

3. Результати дослідження впливу технологічних факторів виготовлення провідних поверхонь ємнісних сенсорів на метрологічні характеристики дають змогу оптимізувати технологію виготовлення.

Посилання [4], [11], [16], [44-83], див. список використаних джерел стор. 168-178.

РОЗДІЛ 3

ВТОРИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ВВП) ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ БИТТЯ

3.1 Вторинні вимірювальні перетворювачі для сенсорів биття

Серед вторинних перетворювачів для ємнісних сенсорів найбільш високими метрологічними характеристиками вирізняються перетворювачі на основі мостових зрівноважених або напівзрівноважених кіл [85, 86]. Проте ці перетворювачі достатньо складні, споживають достатньо багато енергії і до нашого часу не реалізовувалися в інтегральному виконанні, що певним чином ускладнює їхнє застосування для вимірювання механічних параметрів потужних генераторів.

Останнім часом завдяки розвитку цифрових технологій і тенденції до мікромініатюризації на ринку з'явилися компактні перетворювачі електричної ємності безпосередньо в цифровий код, розміщені на одному кристалі. Ці пристрої, в яких застосовано архітектуру сигма-дельта АЦП, отримали назву CDC (Capacitance-to-Digital Converter – конвертер "ємність-цифра").

Специфікою існуючих і створюваних сенсорів биття є те, що їхні ємності мають малі значення, які не перевищують декількох pF. Для вимірювання таких ємностей останнім часом почав застосовуватися метод, що полягає у використанні зарядового підсилювача, який перетворює співвідношення ємностей у сигнал напруги. Цей метод знайшов успішне застосування в сигма-дельта перетворювачах ємності – CDC з високою розрізнявальною здатністю, які реалізовані у вигляді інтегральних мікросхем AD7745/AD7746 та AD7747 виробництва Analog Devices, Inc. (Norwood, MA, USA) [87-89], FDC1004 виробництва Texas Instruments, Inc. (Dallas, TX, USA) та інших [90].

Такі перетворювачі забезпечують високу точність вимірювання ємності, мають зручний цифровий інтерфейс, малі розміри, а також при цьому мають відносно низьку вартість в порівнянні із готовими перетворювачами ємність-код.

Мікросхеми AD7747 та FDC1004 призначені для роботи з простими, диференціальними або напівдиференціальними ємнісними сенсорами, і можуть бути використані у випадку, коли одна обкладка підключена до землі. Для роботи з ємнісними сенсорами компланарного типу (див. розділ 2) можуть бути застосовані мікросхеми AD7745 та AD7746, які дозволяють вимірювати ємність по трьох затискній потенційно токовій схемі підключення, яка дозволяє забезпечити захист від впливу взаємних паразитних ємностей та витоків [87].

3.2 Вимоги до вторинних вимірювальних перетворювачів

Основними характеристиками до ВВП, які призначені для побудови засобів вимірювання биття з ємнісними сенсорами, особливо, які використовуються під час роботи обладнання, пред'являються підвищені вимоги, щодо їхніх метрологічних характеристик та функціональних можливостей. Для цього, ВВП мають задовольняти наступним вимогам:

1. Забезпечувати високу точність і роздільну здатність вимірювання, що дозволить визначати типи і місце дефектів в машинах з більшою достовірністю.
2. Мати високу швидкодію для забезпечення контролю биття валів обертових машин.
3. Забезпечувати достатню дистанційність вимірювання при передаванні як аналогових, так і цифрових інформаційних сигналів.
4. За можливості розміщуватись разом з первинним перетворювачем (сенсором) в одному корпусі.
5. Мати мале енергоспоживання.
6. Узгоджуватися за сигналами з системами контролю і діагностики АСУТП електростанцій.

Щоб задовільнити вищенаведені вимоги необхідно провести розробку структур ВВП оптимальних за своїми характеристиками, що можуть бути використані для вирішення задачі визначення параметрів биття валів гідрогенераторів. Цьому присвячені наступні розділи..

3.3 ВВП на основі спеціалізованих мікросхем AD7745/46 для сенсорів з концентричними компланарними електродами

Перетворювачі AD7745 та AD7746 є аналогічними за характеристиками, але мають відмінність в кількості каналів для вимірювання ємності.

Перевагами використання мікросхем AD7745/46 є висока роздільна здатність в 24 біта з максимальною частотою вибірок, що рівна 90 SPS, висока лінійність ($\pm 0,01\%$), споживана потужність на рівні 2,5 мВт, висока розрізнявальна здатність 4 fF із стандартним діапазоном вимірювання до 4пФ. Інтегральна мікросхема AD7745 має один вхідний канал, а AD7746 має два канали. ІС мають вбудований сенсор температури з роздільною здатністю 0,1 °С і точністю ± 2 °С. Вбудоване джерело опорної напруги і вбудований генератор тактових імпульсів усувають необхідність додаткового під'єднання інших зовнішніх компонент для вимірювання ємності. ІС AD7745/46 мають I²C-сумісний серійний інтерфейс і працюють з напругою живлення від 2,7 до 5,25 В. Крім того, діапазон вимірювання може бути розширений до 17 pF за допомогою вбудованого програмованого ємнісного цифро-аналогового перетворювача або до розрахункового значення за методикою, наведеною в [89] за використанням прецизійного резистивного подільника та додаткового повторювача напруги на операційному підсилювачі для забезпечення повної зарядки ємнісного сенсора.

При використанні у якості перетворювача ємність-код інтегральних мікросхем AD7745/46 з'являється можливість розташування перетворювача у безпосередній близькості від сенсора (рис. 2.6 розділ 2), 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.

Розроблена електрична принципова схема ВВП на основі спеціалізованої мікросхеми AD7745 для ємнісних сенсорів биття з концентрично компланарними електродами показана на рис. 3.1.

Вимірювання здійснюється у 2 етапи. На першому етапі мікросхему переводять у режим вимірювання однієї ємності, в результаті отримують перше значення вихідного коду, пропорційне ємності C_1 , яке записують у пам'ять зовнішнього контролера. На другому етапі мікросхему переводять у диференційний режим і отримують друге значення вихідного коду, пропорційне різниці $C_1 - C_2$, яке теж записують у пам'ять. Використовуючи отримані значення обчислюють амплітуду биття використовуючи розрахункову функцію перетворення ємнісного сенсора, який застосовується в якості первинного вимірювального перетворювача в системі контролю параметрів биття валів гідрогенераторів.

Функціональну схему вимірювача на базі конвертора прямого перетворення ємності в код CDC (мікросхема AD7746) показано на рис. 3.2.

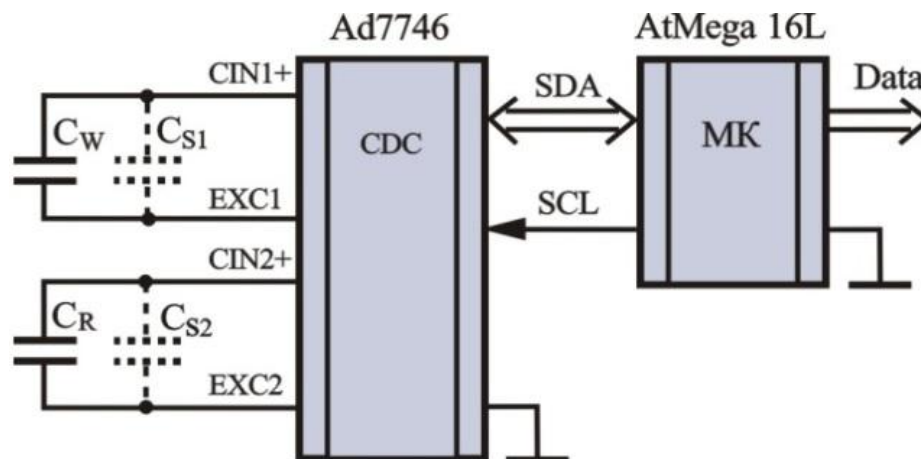


Рис. 3.2 Схема ВВП на основі спеціалізованої мікросхеми AD7746

де C_w – змінна ємність робочого конденсатора,

C_R – постійна ємність зразкового (еталонного) конденсатора [86-88].

З рис. 3.2 видно, що мікросхема AD7746 лініями обміну даними і синхронізації SDA та SCL інтерфейсу I2C з'єднана з мікроконтролером МК, наприклад, типу AtMega 16L, який має мале енергоспоживання, що в робочому режимі становить 1.1 мА, а в режимі очікування – 0,35 мА. В розробленій конструкції ВВП мікросхема AD7746 розташовується в безпосередній близькості до ємнісного сенсора і з'єднується з його електродами короткими провідниками

(прямо на друкованій платі). Здійснити в такій конструкції ретельне екранування проводів, що підводяться, один до одного вельми важко, тому кожен з конденсаторів сенсора шунтується паразитними ємностями. На рис. 3.2 вони позначені як C_{S1} , C_{S2} , і показані пунктирними лініями. Ці ємності невеликі і досить стабільні. Паразитка ємність C_{S1} призводить до спотворення лінійної залежності інформативного параметра C від величини зазору d_X , а C_{S2} призводить – до зміни крутизни характеристики $C = f(d_X)$, не впливаючи на її лінійність. У ІМС AD7746 є інтегровані засоби компенсації зсуву результатів вимірювання ємності C_W і C_R на значення вбудованої ємності C_{DAC} , яка віднімається зі значення зовнішніх ємностей, що складають величини в кілька pF, за допомогою яких вплив паразитних ємностей може бути компенсовано. В результаті врахування значення C_{DAC} під час обчислення ємностей C_W і C_R відновлюється строга пропорційність між приростами зазору Δd_X , і збільшенням вихідний функції $C = f(d_X)$.

У мікроконтролер МК по черзі заносяться код відповідний результату вимірювання ємностей C_W і C_R , далі виконується обчислення параметра C , а також масштабування для отримання результату в одиницях амплітуди. Отримані дані приводяться до зручного для подальшого використання виду (наприклад, в інформаційний сигнал в коді NRZ (зручний для передачі по протоколу Modbus). Отриманні дані по шині Data передаються на зовнішні пристрої, наприклад, засоби обчислення контрольно-діагностичних параметрів даних систем технічної діагностики. По даній шині передаються також і керуючі інформаційні сигнали. Розроблений макет вимірювача параметрів биття із ємнісним сенсором з концентричними компланарними електродами показано на рис. 3.3, де: 1 – ємнісний сенсор з концентричними компланарними електродами; 2 – перетворювач «ємність - цифровий код»; 3 – I2C кабель між перетворювачем і мікроконтролер; 4 – мікроконтролер; 5 – інтерфейсний перетворювач між мікроконтролер та системою збору та обробки даних; 6 – USB кабель до системи збору та обробки даних; 7 – рідкокристалічний індикатор.

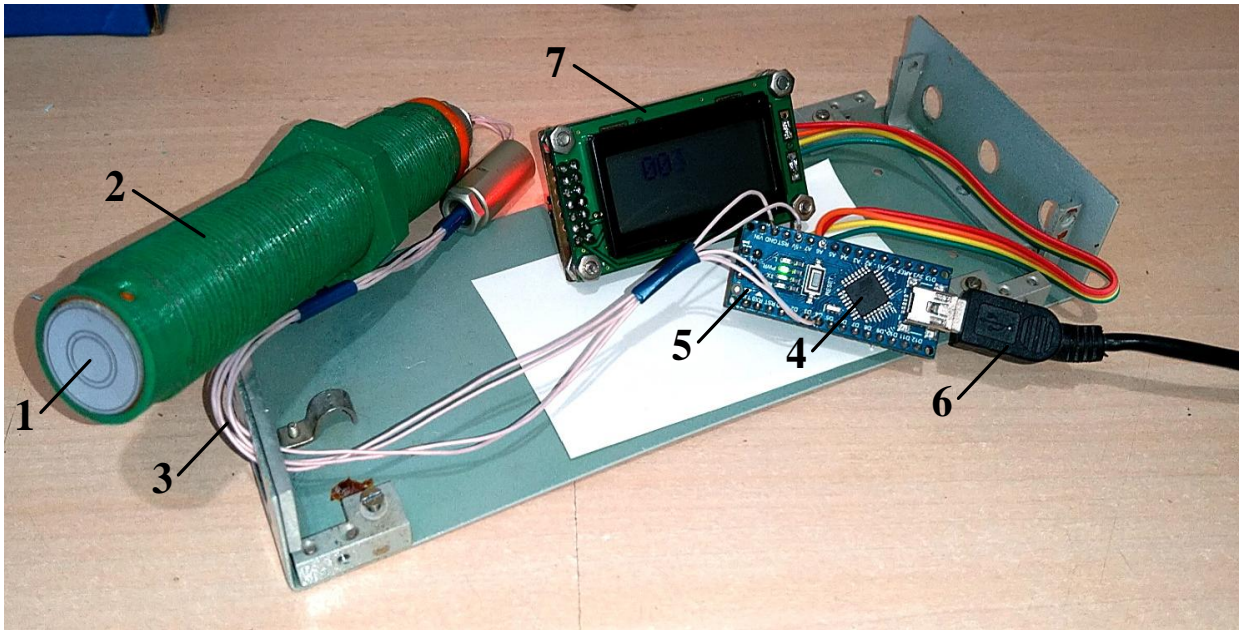


Рис. 3.3 Макет ВВП на основі спеціалізованої мікросхеми AD7746

3.4 ВВП на основі спеціалізованої мікросхеми AD7747 для сенсорів з плоскопаралельними електродами

Останнім часом з'явився перспективний клас вимірювальних перетворювачів на основі «сигма-дельта» модуляторів, які випускаються у вигляді інтегральних мікросхем [87,90], які мають високі метрологічні характеристики і низьку вартість. На рис. 3.4 приведена функціональна схема вимірювального перетворювача на основі «сигма-дельта» модулятора, призначеного для роботи з ємнісним сенсором, що має плоскопаралельні електроди, один з яких заземлений. На рис. 3.4 прийняті наступні позначення: С1 і С2 – конденсатори сенсора; ДПН – джерело постійної напруги; П1 і П2 – перемикачі; ОП – блок віднімання зарядів на операційному підсилювачі з конденсатором C_p в колі негативного зворотнього зв'язку, ТГ – тактовий генератор; СЗЗ – система зрівноваження зарядів; ЦФДМ – блок «цифровий фільтр-дециматор»; U_1 і U_2 – постійні стабільні напруги протилежної полярності; N_x – вихідний цифровий код.

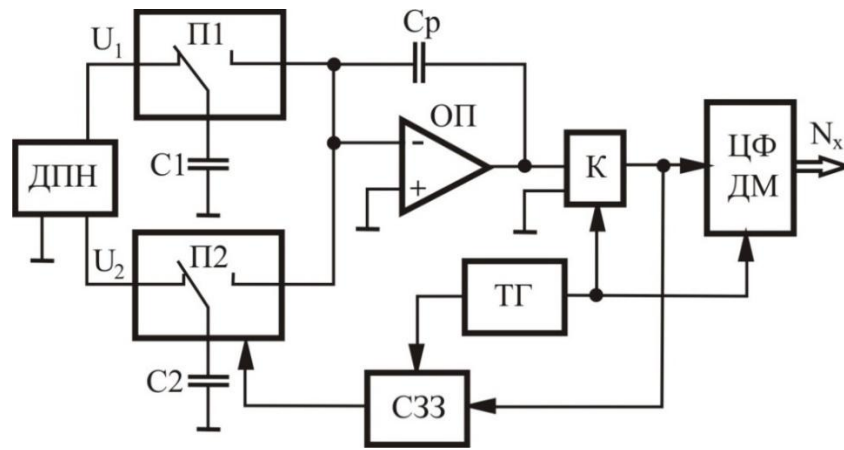


Рисунок 3.4 Функціональна схема вимірювального перетворювача на основі «сигма-дельта» модулятора

Даний перетворювач працює з ємнісним сенсором, який має один конденсатор змінної ємності $C1$. Другий конденсатор $C2$ повинен мати постійну ємність. Він може бути або зовнішнім, або вбудованим в конструкцію сенсора. В останньому випадку зміни ємності $C2$ можуть використовуватися для компенсації впливів неінформативних параметрів сенсора, наприклад, змін температури (т. зв. «напівдиференціальний» ємнісний сенсор). Кожен конденсатор підключається перемикачем по чергово до відповідної постійної напруги, а потім до входу блоку віднімання зарядів. При цьому відбувається передача порцій заряду на конденсатор різницевого заряду Cp . Компаратор K спрацьовує кожного разу в момент появи імпульсу з виходу $ТГ$, якщо напруга на його вході змінює полярність на протилежну, при цьому $СЗЗ$ формує імпульси управління перемикачами. Якщо заряд на конденсаторі $C1$ менше, ніж на $C2$, при постійній частоті комутації конденсатора $C1$ для підтримки балансу зарядів імпульси комутації $C2$ з'являються з меншою середньою частотою. На виході K з'являється нерівномірний потік логічних одиниць і нулів, середня частота яких пропорційна відношенню зарядів на конденсаторах сенсора. Цифровий фільтр виконує складні операції усереднення над потоком 1-бітних даних з метою зменшення шумів квантування і зовнішніх перешкод. Дециматор знижує частоту проходження даних від частоти модуляції до частоти появи вихідних відліків. На виході пристрою з'являється багаторозрядний цифровий код Nx , значення якого

пропорційно середньому значенню відношення ємностей конденсаторів сенсора за інтервал дискретизації.

Недоліком пристрою є низька швидкодія, обумовлена необхідністю виконання великого обсягу операцій обробки 1-бітного потоку даних з виходу компаратора. Мікросхема AD7747, побудована за описаною структурою, не може забезпечити швидкість видачі даних вище 50 відліків в секунду. Крім того, в ній використаний цифровий фільтр третього порядку, що забезпечує достовірне значення вихідного коду при різкій зміні вимірюваної величини не раніше третього такту, що знижує результуючу швидкість ще в три рази, до 16 відліків в секунду. Така швидкодія не може задовольнити вимогам, що висуваються при вимірюванні швидкозмінних механічних величин. Для прикладу визначимо необхідну швидкість вимірювання биття вала турбогенератора ТГВ-200. Діаметр вала становить 435 мм, частота обертання 3000 об / хв. Якщо використовувати ємнісний сенсор, що має діаметр робочого електрода 5 мм, то відношення довжини кола вала до діаметру електрода становить близько 274. Таким чином, за один оберт вала необхідно забезпечити отримання, щонайменше, 274 результатів вимірювань. З урахуванням частоти обертання вала частота видачі результатів вимірювань повинна скласти, як мінімум 13,7 кГц.

3.5 Вторинний вимірювальний перетворювач з підвищеною швидкістю

В даному підрозділі зроблено опис варіантів побудови вимірювального перетворювача, що забезпечує поєднання високої точності з високою швидкістю перетворення інформативних параметрів ємнісних сенсорів із плоскопаралельними електродами [91, 92]. Узагальнена функціональна схема перетворювача показана на рис. 3.5.

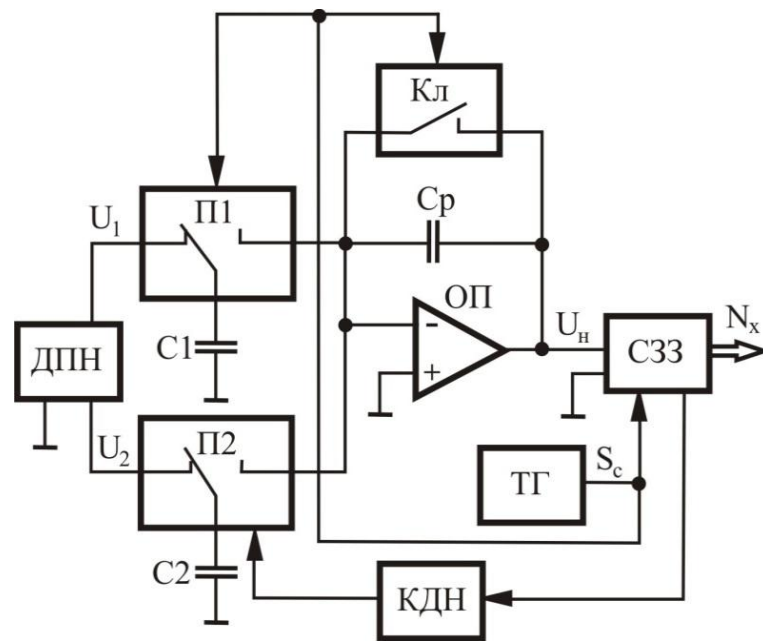


Рис. 3.5 Функціональна схема вимірювального перетворювача з підвищеною швидкістю

Від попередньо описаного, пристрій відрізняється наявністю додаткового ключа Кл, а також керуваного джерела постійної напруги КДН. Ключ забезпечує розряд конденсатора різницевого заряду C_p в кожному періоді керуючих імпульсів ТГ. СЗЗ здійснює урівноваження зарядів не шляхом зміни середньої частоти комутації П2, а завдяки зміні напруги зворотного зв'язку U_x , підключеного до П2. Таким чином, запропонований перетворювач є, по суті, різновидом компенсаційно-мостового вимірювального перетворювача. На відміну від описаного вище пристрою, обидва перемикача працюють синхронно під керуванням періодичних імпульсів S_c прямокутної форми типу «меандр» з виходу ТГ. Кожен період складається з двох тактів. У першому конденсатори підключаються до джерел напруг: C_1 – до джерела постійної напруги U_1 , а C_2 – до регульованої напруги U_x . Полярність цієї напруги протилежна полярності U_1 . В кінці першого такту роботи конденсатори сенсора отримують заряди, значення яких визначаються їх ємностями і напругами джерел. У продовження цього такту контакти Кл замкнуті, завдяки чому конденсатор C_p розряджається, і вихідна напруга блоку віднімання зарядів дорівнює нулю. У другому такті роботи тактового генератора ключ Кл розмикається, а перемикачі перемикають

конденсатори сенсора до негативного входу операційного підсилювача, при цьому на конденсаторі C_p , отже, і на виході ОП, з'являється напруга U_f , пропорційна різниці зарядів C_1 і C_2 . Система автоматичного зрівноваження зарядів регулює напругу U_x до досягнення нульової різниці зарядів на конденсаторах сенсора. В результаті досягається виконання співвідношення:

$$C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_x, \quad (3.1)$$

де C_1, C_2 – ємності конденсаторів сенсора,

U_1 – напруга з виходу ДПН,

U_x – регульована напруга з виходу КДН.

Таким чином, регульована напруга пропорційна відношенню ємностей конденсаторів сенсора:

$$U_x = U_1 \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad (3.2)$$

Конденсатори сенсора підключаються залежно від виду інформативного параметра. Якщо інформативний параметр пропорційний ємності змінного конденсатора, цей конденсатор підключається як C_1 , а постійний конденсатор – як C_2 . Якщо потрібно перетворити величину, обернено пропорційну ємності (наприклад, при вимірюванні зазору між електродами плоскопаралельного конденсатора), то C_1 і C_2 міняють місцями.

Значення вихідного цифрового коду пропорційне значенню регульованої напруги, що визначається виразом (3.2), отже, значенню інформативного параметра сенсора.

Підвищення швидкості вимірювального перетворення досягається завдяки двом факторам. По-перше, в кожному періоді сигналу ТГ конденсатор C_{int} розряджається, після цього він сприймає нове значення різницевого заряду. Завдяки цьому час реакції системи автоматичного зрівноваження зарядів зменшується до тривалості одного періоду сигналу ТГ. По-друге, зрівноваження

зарядів на конденсаторах сенсора відбувається не мінімальними порціями, зумовленими 1-бітнім сигналом, а зміною напруги зворотного зв'язку, ця зміна за один період компенсує повну зміну інформативного параметра сенсора, при цьому немає необхідності у використанні повільно працюючого блоку «цифровий фільтр-дециматор». Пропонується два варіанти реалізації системи автоматичного зрівноважування зарядів.

Перший варіант передбачає аналогове регулювання напруги зворотного зв'язку.

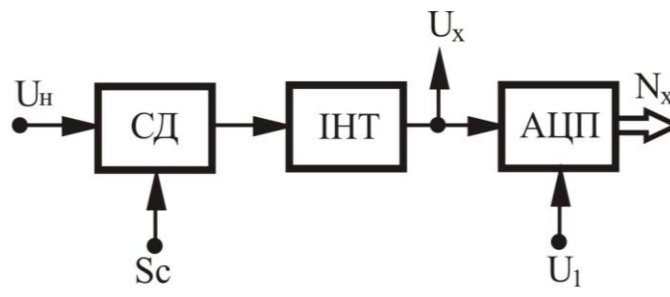


Рис. 3.6 Система автоматичного зрівноважування зарядів з аналоговим регулюванням напруги зворотного зв'язку

На рис. 3.6 показана структурна схема цього варіанту системи автоматичного зрівноважування зарядів, яка містить послідовно з'єднані синхронний детектор (СД), інтегратор (ІНТ) і аналого-цифровий перетворювач (АЦП). В даному випадку здійснюється аналогове урівноваження зарядів на конденсаторах сенсора. Детектор, який управляється сигналом S_C з виходу ТГ, формує на своєму виході напругу, пропорційну різниці зарядів на конденсаторах сенсора. Ця напруга надходить на вхід інтегратора, який регулює напругу негативного зворотного зв'язку перетворювача U_X . Фаза включення ключів СД обрана таким чином, щоб забезпечити протилежну полярність напруги U_X по відношенню до U_I . Вихідний цифровий код N_X формує АЦП, опорним сигналом якого є постійна напруга U_I з виходу ДПН. Таким чином, значення цього коду пропорційно відношенню абсолютних значень напруг U_X / U_I тобто інформативному параметру сенсора.

Швидкодія такого перетворювача визначається частотою сигналу ТГ і постійною часу інтегратора. Її значення обирається з умови достатнього

зменшення комутаційних перешкод з виходу СД. На практиці еквівалентна частота зрізу перетворювача щодо змін інформативно параметра сенсора може бути забезпечена на рівні $1/3 - 1/4$ період сигналу ТГ. Наприклад, при використанні частоти ТГ 20 кГц можна отримувати до 5000 відліків вихідного коду за секунду.

У другому варіанті реалізовано цифро-аналогове урівноваження зарядів, структурна схема якого наведена на рис. 3.7.

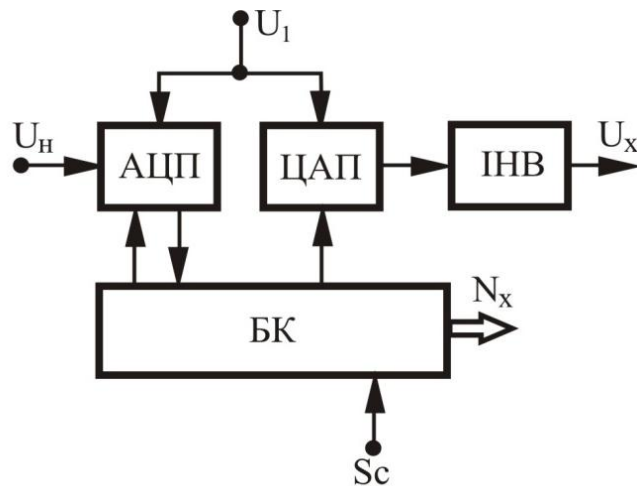


Рис. 3.7 Система цифро-аналогового урівноваження зарядів

Система включає блок керування БК, що керує роботою аналого-цифрового АЦП і цифро-аналогового ЦАП перетворювачів. Інвертор (ІНВ) використаний для зміни полярності вихідної напруги ЦАП. Функція синхронного детектора передана БК, який отримує від АЦП цифрові відліки вихідної напруги операційного підсилювача в першому і в другому тактах періоду сигналу ТГ, після цього обчислює різницю значень цих відліків. Залежно від отриманого результату БК видає на ЦАП керуючий код, на виході ЦАП формується напруга зворотного зв'язку U_x , що забезпечує урівноваження зарядів на конденсаторах сенсора. До входів опорного сигналу АЦП і ЦАП підключена одна і та ж напруга U_1 , завдяки цьому результат перетворення не залежить від значення цієї напруги. БК формує вихідний код N_x , значення якого дорівнює значенню керуючого коду ЦАП, яке для підвищення роздільної здатності пристрою може бути підсумовано з кодом АЦП, яке відповідає залишковій нерівновазі зарядів.

Пристрій, виконаний за другим варіантом, буде більш компактним, якщо його побудувати з використанням мікроконтролер, який включає всі зазначені на рис. 3.7 блоки, крім ІНВ. Тому для реалізації перетворювача потрібна мінімальна кількість електронних компонентів, що дозволить розмістити перетворювач безпосередньо в місці встановлення ємнісного сенсора. Швидкодія пристрою буде ще вища, оскільки частота видачі відліків вихідного коду N_x повністю визначається частотою сигналу S_C . Зокрема, при частоті S_C , що дорівнює 20 кГц, якщо використовувати в якості вихідного коду значення коду ЦАП, пристрій здатний видавати 20000 відліків N_x за секунду. Для корекції вихідного коду за значенням залишкової нерівноваги зарядів знадобиться додатковий період ТГ, в цьому випадку швидкість видачі значень коду складе 10000 відліків за секунду.

Ємнісні сенсори швидкоплинних механічних величин мають, як правило, досить малі значення ємностей конденсаторів. При роботі з такими сенсорами на результат вимірювального перетворення істотно впливають паразитні ємності вимірювальної схеми. Зокрема, в перетворювачі, функціональна схема якого приведена на рис. 3.5, на вигляд функції перетворення впливають значення паразитних ємностей між колами управління і комутованими контактами перемикачів П1 і П2. Через ці ємності заряд з ланцюгів управління передається на вхід операційного підсилювача. Ступінь впливу зазначених ємностей різна. Проникнення паразитного заряду через перемикач, підключений до конденсатора постійної ємності, еквівалентне зміні цієї постійної ємності, що призводить до появи мультиплікативної похибки перетворення. Ця похибка легко може бути скоригована в процесі калібрування пристрою. Проникнення заряду через перемикач, підключений до конденсатора змінної ємності, зумовлює появу адитивної похибки і похибки від нелінійності характеристики перетворення. Перша складова легко коригується при калібруванні, проте корекція другої складової має певні складнощі, оскільки її значення залежить від початкової ємності сенсора. Тому під час реалізації перетворювача особливу увагу було приділено вибору електронних ключів, що мають мінімальні значення паразитних ємностей.

3.6 ВВП на основі частотно-незалежного вимірювального кола

При використанні ємнісних сенсорів з концентричними компланарними електродами, для забезпечення високих метрологічних характеристик, в тому числі точності, роздільної здатності та швидкодії є необхідною розробка вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) «ємність - напруга».

ВВП, реалізований на основі частотно-незалежного вимірювального кола, на базі операційного підсилювача NE5532 (Texas Instruments). Вихідний сигнал такого ВВП пропорційний ємності, що вимірюється та є незалежним від частоти вхідного сигналу. Розроблена структурна схема ВВП [72, 73] представлена на рис. 3.8, де: C_x – ємність, що вимірюється; C_1 – шунтуюча ємність; U1A – операційний підсилювач; R_f та C_f – опір та ємність зворотного зв'язку; XPG1 – генератор тестового сигналу; XBP1 – вимірювач коефіцієнту передачі; V_1, V_2 – джерела живлення.

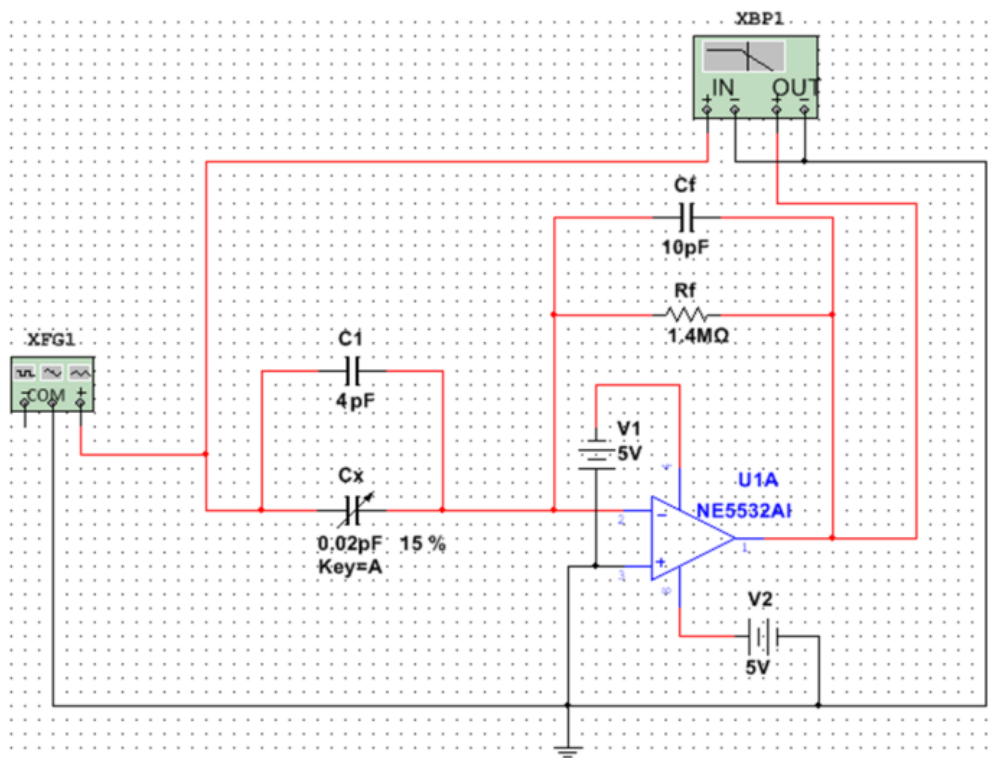


Рис. 3.8 Схема ВВП на основі частотно-незалежного вимірювального кола

У цьому разі вихідна напруга перетворювача розраховується як [86]

$$U_o(t) = -\frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} \cdot U_i(t) \quad (3.3)$$

де $U_i(t)$ та $U_o(t)$ – вхідний та вихідний сигнал, $\omega = 2\pi f$, де f – частота сигналу.

У разі виконання умови $|j\omega C_f R_f| \gg 1$, вираз (3.3) в спрощеному вигляді запишеться як

$$U_o \approx \frac{C_x}{C_f} \cdot U_i \quad (3.4)$$

Для аналізу динамічних характеристик перетворювача, визначимо його функцію перетворення, як відношення вхідного та вихідного сигналів. У цьому разі, скориставшись виразом (3.3) отримаємо зображення коефіцієнта передачі [86]

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{sC_x R_f}{sC_f R_f + 1} = \frac{C_x}{C_f} \left(\frac{1}{sC_f R_f + 1} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Щоб забезпечити точність вимірювання, прийнятну в широкому діапазоні вимірювань, чутливість перетворювача повинна бути високою. Чутливість визначається як

$$S_{cv} = \frac{U_o}{C_x} \quad (3.6)$$

де U_o - абсолютне значення величини $U_o(t)$.

При підстановці у рівняння (3.3) рівняння (3.6), ми отримаємо такі результати

$$S_{cv} = \left| -\frac{j\omega R_f U_i(t)}{j\omega C_f R_f + 1} \right| = \frac{\omega R_f U_i}{\sqrt{(\omega C_f R_f)^2 + 1}} \quad (3.7)$$

де U_i - абсолютне значення вхідного сигналу $U_i(t)$.

Для розрахунку чутливості перетворювача врахуємо те, що вихідний сигнал перетворювача повинен бути нижче діапазону аналогового входу АЦП (наприклад: $3,3 \text{ В}$ або 5 В), а також максимальне значення ємності. Оскільки значення ємності, що вимірюється, є дуже малою величиною, яка становить $0,02 \text{ нФ}$. Визначення ємностей таких порядків потребує використання або додаткових швидкодіючих елементів, які можуть привести до появи похибок перетворення, або використання комбінації ємностей для її масштабування. Для досягнення мети зменшення габаритів ВВП та його розташування в безпосередній близькості до первинного вимірювального перетворювача (як це запропоновано в [67]) використаємо другий шлях – масштабування за допомогою застосування конденсатора $C1$. В такому випадку максимальне значення оберемо близьким до стандартного діапазону вимірювання в 4 пФ перетворювача ємність-код AD7745 / AD7746 та AD7747 виробництва Analog Devices, Inc. (Norwood, MA, USA) [88].

У цьому разі чутливість перетворювача $S_{cv} = 3,3 \text{ В} / 4 \text{ пФ} = 0,83 \text{ В} / \text{пФ}$.

Прийнявши до уваги, що частота генераторів стандартних RLC-метрів становить 10 кГц , и 100 кГц , а напругу частоти вимірювального генератора оберемо рівною напрузі входу АЦП, то для визначення R_f та C_f відповідно опору та ємності зворотного зв'язку операційного підсилювача ВВП, скористаємось тим, що у відповідності до виразу (3.4) $U_o \approx U_i$ при максимальному значенні C_x .

У цьому разі, використовуючи отримані параметри R_f та C_f визначмо АЧХ для схеми ВВП (рис. 3.8). Отриману АЧХ наведено на рис. 3.9. Як видно з рис. 3.9, оптимальним діапазоном для вимірювального генератора, що входить до складу ВВП є діапазон від 100 кГц до 1 МГц . Використання генераторів зазначеної частоти дозволить вимірювати вібраційні складові параметрів биття валів у досить широкому діапазоні.

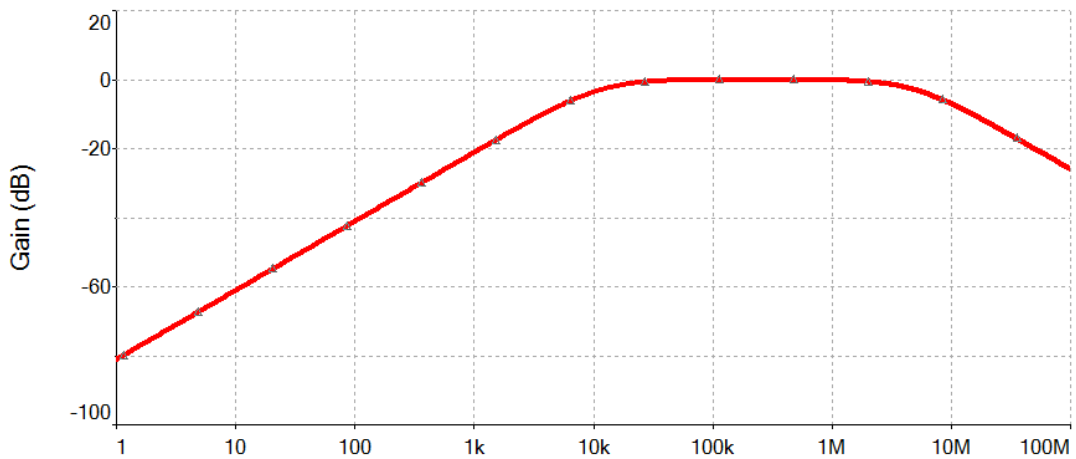


Рис. 3.9 Амплітудно-частотна характеристика ВВП

3.7 ВВП на основі компенсаційно-мостового кола

Існуючі в даний час засоби вимірювань параметрів ємнісних сенсорів не відповідають сучасним вимогам по поєднанню швидкості і точності вимірювань. Застосовуються вимірювальні перетворювачі прямого перетворення ємності сенсора в напругу або за допомогою заряду-розряду на конденсатор відомої ємності [93], або з попереднім перетворенням в частоту генератора імпульсів [94]. Зазначені перетворювачі мають невисоку точність і стабільність характеристики перетворення, зумовлену нестабільністю параметрів додаткових елементів (конденсаторів, резисторів, порогових пристроїв) на результат перетворення.

Кращі параметри мають компенсаційно-мостові вторинні вимірювальні перетворювачі [95], що мають малі похибки перетворення, високі завадостійкість і швидкодію.

В даному підрозділі представлено вторинний вимірювальний перетворювач на основі зрівноваженого компенсаційно-мостового кола з формуванням керуючого впливу по фазі сигналу нерівноваги [95-96] для сенсора биття з концентричними компланарними електродами. Спрощена блок-схема пристрою наведена на рисунку 3.10.

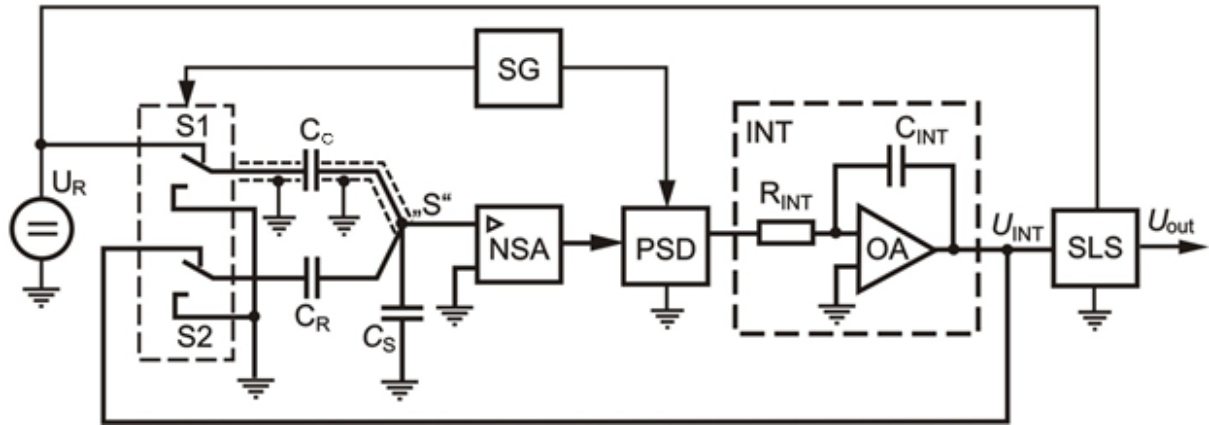


Рис. 3.10. Спрощена блок-схема ВВП на основі компенсаційно-мостового кола.

Блок-схема перетворювача наведена на рис. 3.10 містить: U_R – джерело опорної напруги; $S1$, $S2$ – комутатори; SG – комутаційний генератор; C_c – ємнісний сенсор биття; C_R – зразковий конденсатор; NSA – підсилювач сигналу нерівноваги; C_S – паразитна шунтуюча ємність; PSD – фазочутливий детектор; INT – інтегратор; R_{INT} – резистор інтегратора; C_{INT} – конденсатор інтегратора; SLS – схема лінійного масштабування.

У запропонованому вимірювачі стабілізована постійна напруга U_R опорного джерела за допомогою комутатора $S1$ перетворюється в прямокутну напругу (меандр) з частотою f_{SG} (75 ... 80 кГц) комутаційного генератора SG . Напруга меандру з амплітудою, що дорівнює U_R , подається на сенсор биття C_c , ємність якого є одним з плечей схеми порівняння. Друге плече схеми порівняння – зразковий конденсатор C_R , на який з виходу інтегратора через комутатор $S2$ подається прямокутна напруга амплітудою U_{INT} . Струм, що протікає через ємність сенсора C_c , в точці «s» на вході підсилювача сигналу нерівноваги NSA сумується зі струмом, що протікає через ємність зразкового конденсатора C_R . До цієї ж точки «s» підключена шунтуюча ємність C_S , яка є паразитною ємністю між центральною жилою підвідного екранованого проводу сенсора C_c і землею. Вхідний опір наближається за характером до ємнісного, тому дільник з елементів C_S , C_R і C_c передає меандр напруги без спотворень, а сигнал нерівноваги в точці «s» або синфазний, або протифазний сигналу управління комутаторами $S1$ і $S2$.

Робота цих комутаторів і полярності напруг U_R і U_{INT} узгоджені так, що струми через конденсатори C_c і C_R знаходяться в протифазі один з одним і завдяки цьому взаємно віднімаються. При певному співвідношенні ємностей і напруг сумарний струм стає рівним в нулю, при цьому в точці «s» (на вході NSA) змінна складова з частотою f_{SG} відсутня. Це співвідношення виражається формулою

$$\frac{U_{INT}}{U_R} = \frac{C_c}{C_R} \quad (3.8)$$

звідки

$$C_c = \frac{U_{INT}}{U_R} C_R \quad (3.9)$$

При порушенні співвідношення (3.8) виникає сигнал нерівноваги, який після проходження через підсилювач NSA надходить на фазочутливий детектор PSD. Опорні напруги PSD синхронні і синфазні з напругою комутації ключів S1 і S2, вони надходять від того ж комутаційного генератора SG, який керує роботою ключів. Вихідна напруга детектора PSD містить постійну складову, знак якої залежить від напрямку відхилення схеми від стану рівноваги, а величина – від ступеня цього відхилення. До виходу PSD підключений інтегратор INT, що складається з резистора R_{INT} , конденсатора C_{INT} і операційного підсилювача ОА. Напруга U_{INT} на виході інтегратора є вихідним сигналом схеми, вона пропорційна вимірюваної ємності сенсора C_c (див. вираз (3.9)). Далі він надходить на схему лінійного масштабування SLS, де нормується для приведення до необхідного діапазону зміни, тобто коли $C_c = 0$, то $U_{OUT} = 0$, а коли $C_c = C_{c_max}$, то $U_{OUT} = 10$ В.

На рис. 3.11 показані епюри напруг, що діють в схемі.

При рівновазі напруга U_{INT} виражається наступною формулою

$$U_{INT} = U_R \frac{C_c}{C_R} \quad (3.10)$$

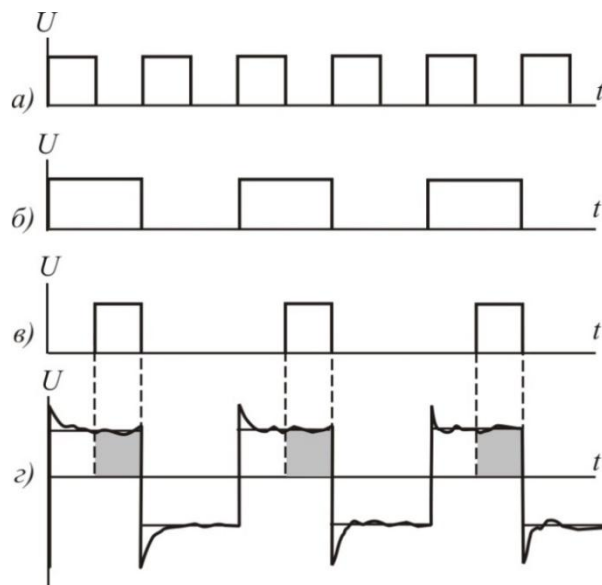


Рис. 3.11 Епюри напруг: *a)* – напруга задаючого генератора в схемі комутаційного генератора; *б)* – напруга, що подається на входи управління комутаторів; *в)* – сигнал керування ключами; *г)* – умовний сигнал нерівноваги на виході.

Якщо врахувати, що в схемі лінійного масштабування U_{INT} перетворюється в U_{OUT} пропорційно коефіцієнту k , то на виході схеми буде постійна напруга, що дорівнює

$$U_{INT} = kU_{INT} = kU_R \frac{C_c}{C_R} \quad (3.11)$$

У моменти спрацьовування комутаторів $S1$ і $S2$ на вході NSA виникають імпульси комутаційної завади, які викликають в підсилювачі значні перехідні процеси. З метою зменшення впливу цих процесів на роботу пристрою, в PSD використовується не весь сигнал нерівноваги, а тільки друга половина кожного його напівперіоду (виділено затемненим фоном), вільна від комутаційної завади, тобто реалізується метод вагової функції. Для спрощення на епюрах показані тільки сигнали прямої дії, хоча в схемі сформовані також ще і інверсні до них напруги (детектування в PSD двонапівперіодне).

На рис. 3.12 представлена принципова схема ВВП на основі компенсаційно-мостового кола. Ємнісний сенсор підключається двома екранованими провідниками. Роль зразкового конденсатора RC виконує Т-подібна схема, що включає конденсатори $C1$, $C2$, $C4$ і підналагоджувач $C3$. Така конструкція зразкової міри прийнята для того, щоб уникнути застосування конденсаторів з

дуже малою номінальною ємністю: еквівалентна ємність C_0 (рис. 3.10) повинна приблизно дорівнювати максимальній ємності сенсора, тобто менше 1 pF.

Як джерело опорної напруги U_R використовується параметричний стабілізатор, виконаний на прецизійному стабілітроні VD1 типу Д818Е, номінальна напруга 9 В. Комутаційний генератор SG містить задаючий мультівібратор (інтегральні мікросхеми (ІМС) DD1А, DD1В), дільник частоти імпульсів на два (ІМС DD2А) і формувач опорних напруг для ФЧД (згідно епюрі рис. 3.11 в) на ІМС DD2В, DD1С і DD1D. Комутатори виконані на ІМС DA6 і DA9 типу DG5043 (K590KH4). Підсилювач сигналу нерівноваги NSA містить два каскади (операційного підсилювача DA1 і DA2), кожен з яких має посилення близько 38, загальне посилення приблизно 1300. Каскад на ОА операційного підсилювача DA3 є звичайним інвертором напруги з коефіцієнтом передачі -1 і служить для забезпечення режиму двонапівперіодного детектування посиленого сигналу нерівноваги. З виходів другого каскаду підсилювача DA2 і інвертора DA3 напруги подаються на фазочутливий детектор PSD, функції якого виконує ІМС DA4 (типу DG5043), і далі випрямлений сигнал нерівноваги надходить на інтегратор, у схемі якого використовується операційний підсилювач DA5, елементи R15, R16, C15 і повторювач напруги на транзисторах VT1, VT2.

Вихідна напруга інтегратора подається на вихід пристрою через схему лінійного масштабування (SLS, рис. 3.10), в якій використані операційні підсилювачі DA3.В і DA3.С. Налаштувальними резисторами R17 і R19 виконується регулювання в невеликих межах нахилу характеристики $U_{\text{вих}} = f(C_{\text{сенс}})$ і корекція нуля відповідно.

Живлення перетворювача здійснюється від стабілізованих джерел +15 В і -15 В, виконаних за традиційною схемою на елементах VD2, DA7, DA8, C18, C19, C21, C22 (силовий трансформатор не показаний).

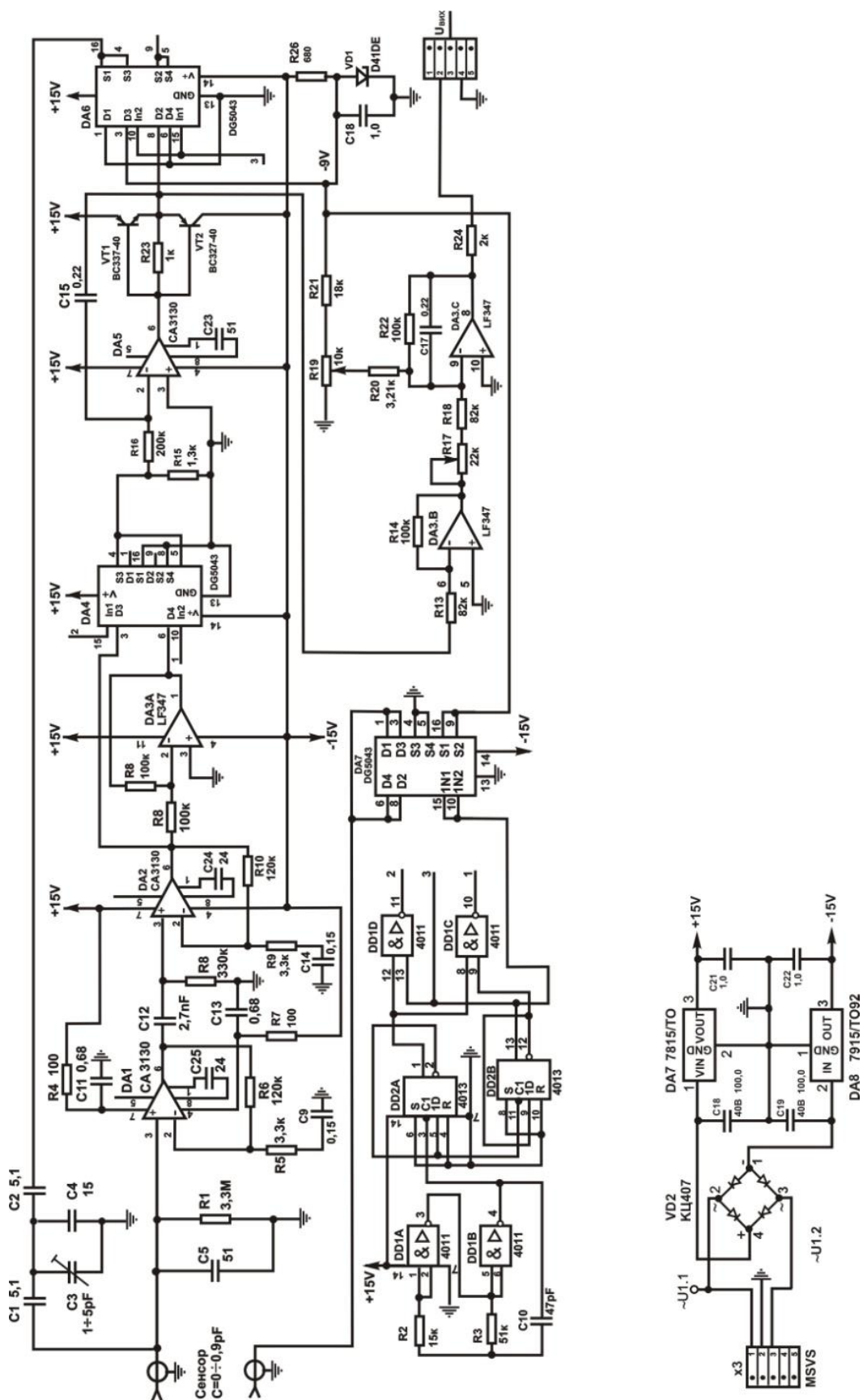


Рис. 3.12 Принципова схема перетворювача

ВИСНОВОКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблені вторинні вимірювальні перетворювачі (ВВП) для ємнісних сенсорів вимірювання відстані до заземленої поверхні (сенсорів биття валів гідроагрегатів) на основі серійних інтегральних мікросхем забезпечують точність вимірювання.

2. Розроблені ВВП на основі серійних інтегральних мікросхем мають невеликі розміри, що дає можливість їхнього розміщення в одному корпусі з сенсором.

3. Швидкодія ВВП на основі серійних інтегральних мікросхем обмежена 100 вибірками на секунду, що робить доцільним їх використання під час проведення технічного обслуговування та ремонтів обладнання.

4. Задля забезпечення визначення параметрів биття вала з застосуванням ємнісних сенсорів з достатньо високою швидкістю і розрізнявальною здатністю на працюючому обладнанні в робочих та перехідних режимах доцільно використання одного з варіантів ВВП на основі компенсаційно-мостового кола з аналоговим або дискретним (цифровим) виходом.

Посилання [85-96], див. список використаних джерел стор.168-178.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ БИТТЯ

З метою уточнення відповідності розрахованих моделей реальним конструкціям та визначення адекватності обраних методик для розрахунків функцій перетворення ємнісних сенсорів були проведені визначення їх основних характеристик, які впливають на результат визначення параметрів биття циліндричних поверхонь валів потужних генераторів. Визначення характеристик здійснювалось для сенсора з плоскопаралельними електродами (тип 1), сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна (тип 2) та сенсора з концентричними компланарними електродами (тип 3) шляхом комп'ютерного моделювання та проведення експериментальних досліджень макетних зразків.

Результати досліджень, які представлені в даному розділі отримані за безпосередньої участі автора і опубліковані в наступних роботах [11, 62, 72, 84], а також представлені у протоколах випробувань та звітах з фундаментальних та прикладних НДР, які виконувались в Інституті електродинаміки НАН України.

4.1 Визначення похибки нелінійності

Оскільки ємнісні сенсори з плоскопаралельним розміщенням електродів (сенсори 1 та 2 типу, див. розділ 2) мають нелінійний характер, на відміну від ємнісного сенсора 3 типу, який має функцію перетворення з лінійною ділянкою робочої характеристики. Тому, для отримання прямопропорційної залежності вихідного інформативного параметру досліджуваних сенсорів від зміни відстані до заземленої поверхні, розрахуємо значення зворотної величини $P_x(d_x)$ до ємності $C_x(d_x)$, яка отримана на основі аналітичних розрахунків та шляхом комп'ютерного моделювання за наступним виразом

$$P_x(d_x) = \frac{1}{C_x(d_x)} = f(d_x) \quad (4.1)$$

Розрахунки функції перетворення проводились за методиками описаними в розділі 2. Розміри конструктивних елементів сенсорів та технологія виготовлення відповідають даним наведеним в тому ж розділі та в додатку В.

Результати розрахунків зворотної величини $P_X(d_X)$ до ємності $C_X(d_X)$, за виразом (4.1) представлено в таблиці 4.1, де:

P_C – значення зворотної до ємності величини, визначені аналітичним способом;

P_M – значення зворотної до ємності величини, визначені засобами комп'ютерного моделювання;

Відповідні графіки отриманої залежності $P_X(d_X)=f(d_X)$ для сенсора з плоскопаралельними електродами (1 типу) наведено на рис. 4.1, а для сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна (2 типу) – на рис. 4.2.

Таблиця 4.1

Результати розрахунків зворотної величини $P_X(d_X)$ до ємності $C_X(d_X)$

<i>d, мм</i>	Тип 1		Тип 2	
	$P_C, 10^{12} 1/F$	$P_M, 10^{12} 1/F$	$P_C, 10^{12} 1/F$	$P_M, 10^{12} 1/F$
0.3	0.13	0.12	0.52	0.51
0.4	0.16	0.14	0.64	0.63
0.5	0.19	0.16	0.75	0.74
0.6	0.21	0.18	0.84	0.83
0.7	0.23	0.19	0.92	0.91
0.8	0.25	0.20	1.00	0.98
0.9	0.27	0.21	1.06	1.04
1	0.28	0.22	1.12	1.10
1.1	0.29	0.23	1.18	1.15
1.2	0.31	0.23	1.22	1.20
1.3	0.32	0.24	1.27	1.24
1.4	0.33	0.25	1.31	1.28
1.5	0.34	0.25	1.35	1.32
1.6	0.35	0.25	1.38	1.35

Продовження таблиці 4.1

1.7	0.35	0.26	1.41	1.38
1.8	0.36	0.26	1.44	1.41
1.9	0.37	0.26	1.47	1.44
2	0.37	0.27	1.50	1.46
2.1	0.38	0.27	1.52	1.49
2.2	0.39	0.27	1.54	1.51
2.3	0.39	0.27	1.57	1.53

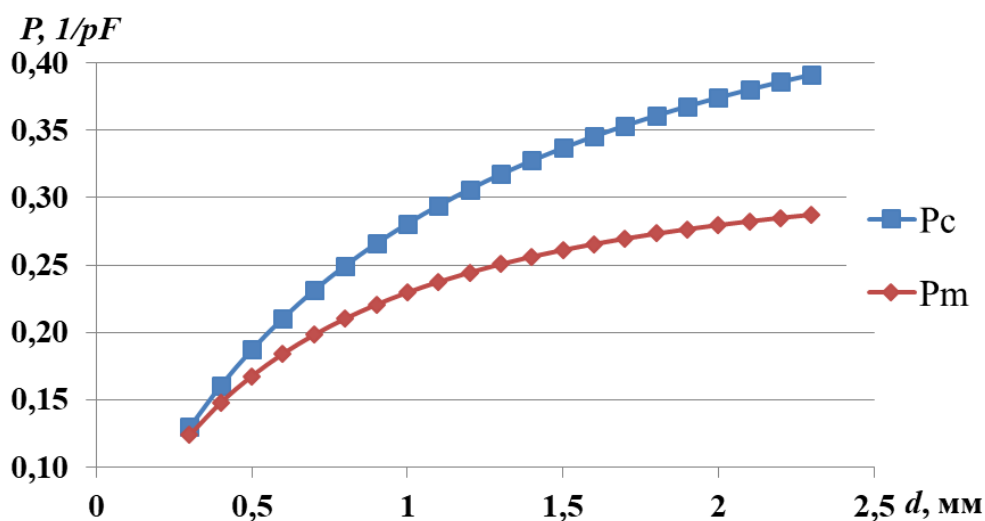


Рис. 4.1 Графіки залежності ємності від відстані до заземленої поверхні для сенсора 1 типу

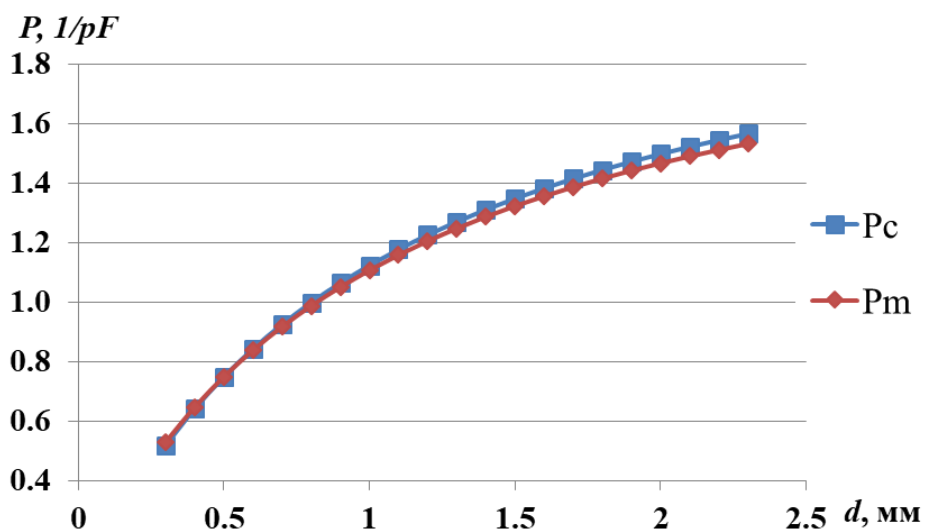


Рис. 4.2 Графіки залежності ємності від відстані до заземленої поверхні для сенсора 2 типу

Для оцінки похибок, зумовлених нелінійністю розрахункової функції перетворення $P_X(d_X)=f(d_X)$ відносно лінійної, апроксимуючої функції, розрахуємо значення абсолютної (Δ) похибки для отриманої залежності. У цьому разі апроксимуюча функція розраховується за значеннями $P_X(d_X)$ в максимальній та мінімальній точках вимірювального діапазону d_X до заземленої поверхні, використовуючи лінійну модель [11], яка може бути представлена, як

$$P_p(d_X) = f(d_X) = K(d_X - d_{\min}) + (C_{XMAX})^{-1}, \quad (4.2)$$

де d_X – поточне значення відстані до заземленої поверхні;

d_{MIN} – мінімальне значення відстані до заземленої поверхні в точці C_{min} ;

$(C_{XMIN})^{-1}$ – мінімальне значення сенсора в точці d_{MIN} (початкова адитивна складова похибки вимірювання, обумовлена впливом ємності з'єднувальних провідників);

K – коефіцієнт перетворення, що розраховується за формулою

$$K = \frac{(C_{XMAX})^{-1} - (C_{XMIN})^{-1}}{d_{MAX} - d_{MIN}} = \frac{(C_{XMIN} - C_{XMAX}) \cdot (d_{MAX} - d_{MIN})}{C_{XMAX} \cdot C_{XMIN}}, \quad (4.3)$$

де d_{MAX} – максимальне значення відстані до заземленої поверхні.

$(C_{XMAX})^{-1}$ – максимальне значення інформативного параметру сенсора в точці d_{MAX} .

Тоді, значення абсолютної похибки Δ , враховуючи результати розрахунків за (4.1) та (4.2), визначається як

$$\Delta(d_X) = P_p(d_X) - P_x(d_X), \quad (4.4)$$

Результат розрахунку $\Delta(d_X)$ представлено в таблиці 4.2

Графік зміни похибки $\Delta(d_X)$ для сенсора 1 типу представлено на рис. 4.3, для сенсора 2 типу – на рис. 4.4 для сенсора 3 типу – на рис. 4.5, відповідно.

Таблиця 4.2

Результати розрахунків значення абсолютної похибки Δ

$d, \text{мм}$	Тип 1			Тип 2			Тип 3		
	P_M 1/pF	P_{PM} 1/pF	Δ , 1/pF	P_{XM} 1/pF	P_{PM} 1/pF	Δ , 1/pF	P_{XM} pF	P_{PM} pF	Δ , pF
0.3	0.12	0.16	0.038	0.51	0.69	0.18	0.048	0.08	0.028
0.4	0.14	0.17	0.021	0.63	0.74	0.11	0.049	0.09	0.042
0.5	0.16	0.17	0.009	0.74	0.79	0.05	0.051	0.10	0.054
0.6	0.18	0.18	0.000	0.83	0.84	0.01	0.056	0.12	0.064
0.7	0.19	0.19	0.006	0.91	0.88	0.02	0.063	0.13	0.071
0.8	0.20	0.19	0.011	0.98	0.93	0.05	0.073	0.15	0.076
0.9	0.21	0.20	0.013	1.04	0.98	0.06	0.084	0.16	0.079
1	0.22	0.21	0.015	1.10	1.02	0.07	0.098	0.18	0.080
1.1	0.23	0.21	0.015	1.15	1.07	0.08	0.113	0.19	0.080
1.2	0.23	0.22	0.015	1.20	1.12	0.08	0.128	0.21	0.079
1.3	0.24	0.23	0.014	1.24	1.17	0.08	0.145	0.22	0.077
1.4	0.25	0.23	0.012	1.28	1.21	0.07	0.162	0.24	0.074
1.5	0.25	0.24	0.010	1.32	1.26	0.06	0.179	0.25	0.071
1.6	0.25	0.25	0.008	1.35	1.31	0.04	0.197	0.27	0.068
1.7	0.26	0.25	0.004	1.38	1.36	0.03	0.215	0.28	0.065
1.8	0.26	0.26	0.001	1.41	1.40	0.01	0.232	0.29	0.062
1.9	0.26	0.27	0.003	1.44	1.45	0.01	0.250	0.31	0.059
2	0.27	0.27	0.007	1.46	1.50	0.03	0.267	0.32	0.056
2.1	0.27	0.28	0.011	1.49	1.54	0.06	0.284	0.34	0.054
2.2	0.27	0.29	0.015	1.51	1.59	0.08	0.301	0.35	0.052
2.3	0.27	0.29	0.020	1.53	1.64	0.11	0.318	0.37	0.050

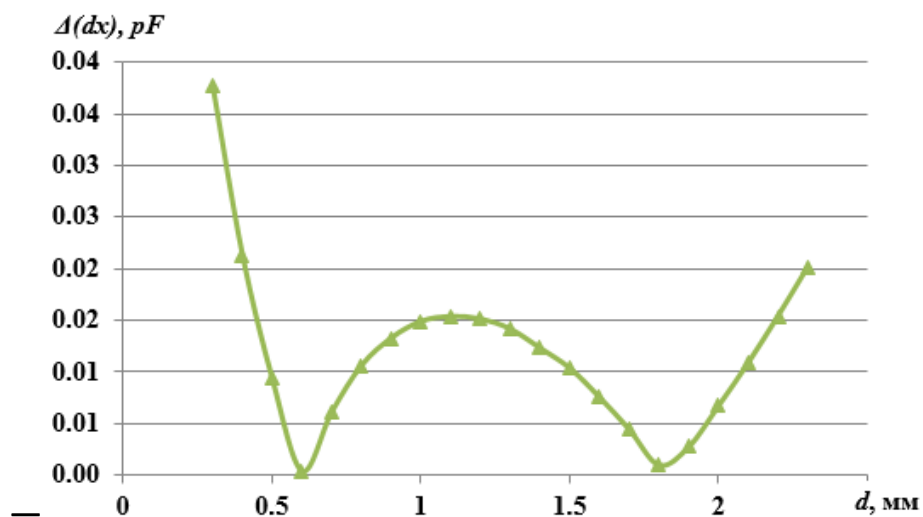


Рис. 4.3 Графіки абсолютної похибки для сенсора 1 типу

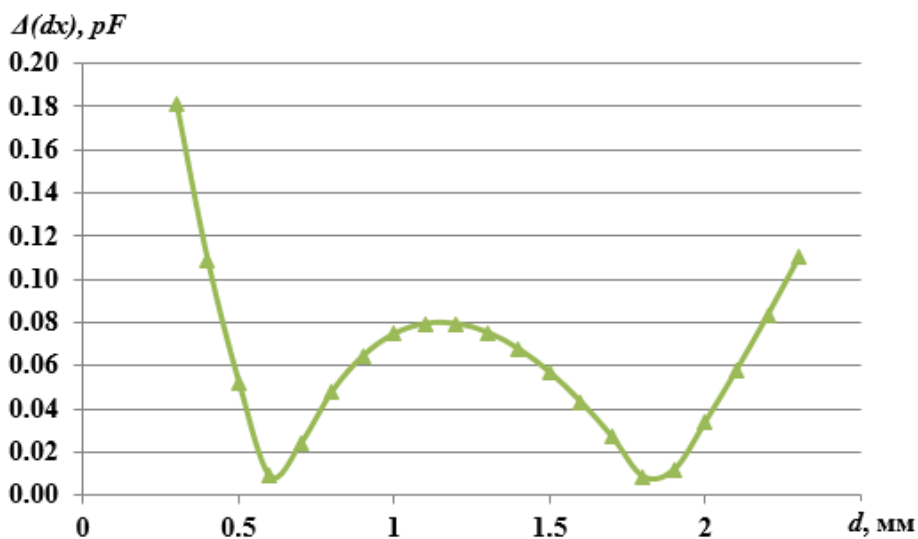


Рис. 4.4 Графіки абсолютної похибки для сенсора 2 типу

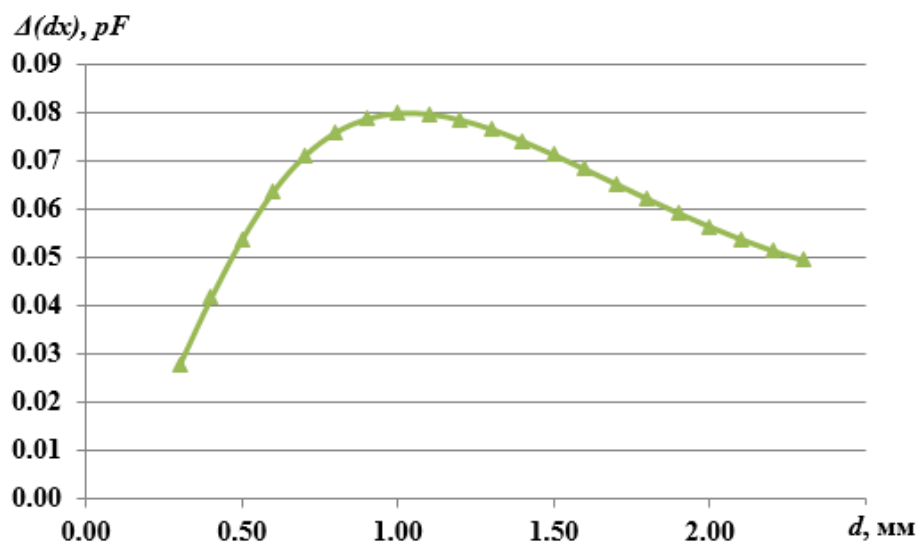


Рис. 4.5 Графіки абсолютної похибки для сенсора 3 типу

З урахуванням отриманих результатів аналітичного розрахунку та проведеного моделювання функцій перетворення обчислено похибку нелінійності. Для сенсорів 1 та 2 типу вона має однаковий характер. Для сенсора 1 типу середнє значення похибки складає 0.01 pF, для другого 0.04 pF. Для сенсора ж 3 типу похибка складає 0,03 pF.

4.2 Лабораторні випробування макетного зразка ємнісного сенсора

1. Об'єкт випробувань

Об'єктом випробувань є макет ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами, для вимірювання відстані до заземленої поверхні, який представлений на рис. 4.6.

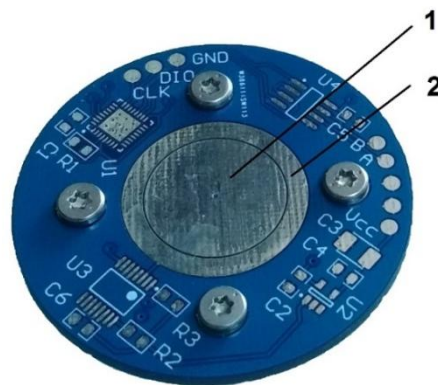


Рис. 4.6 Модель ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами

Сенсор складається з таких основних частин:

- 1 – центрального (високопотенціального) електроду;
- 2 – заземленого електроду.

2. Ціль випробувань

Визначення функції перетворення $C_X(d_X) = f(d_X)$ ємнісного сенсора з плоскопаралельними електродами.

3. Програма випробувань

Визначити залежність електричної ємності $C_X(d_X) = f(d_X)$ від відстані до заземленої поверхні, де d_X – відстань (зазор) між електродом сенсора та заземленою плоскою металевою поверхнею.

4. Прилади і устаткування

При проведенні випробувань використовувалися наступні прилади і устаткування:

- Макет ємнісного сенсора, який встановлюється на стенд – рис. 4.7 позиція 1.
- Пристрій (стенд) з мікрометричною головкою для задавання переміщення металевої поверхні (зміни величини d) – рис. 4.7 позиція 2.
- Міст змінного струму Р5083, зав. №50, рік випуску 1992– рис. 4.7 позиція 3.

Макет стенду для дослідження функції перетворення ємнісного сенсора представлено на рис. 4.7.

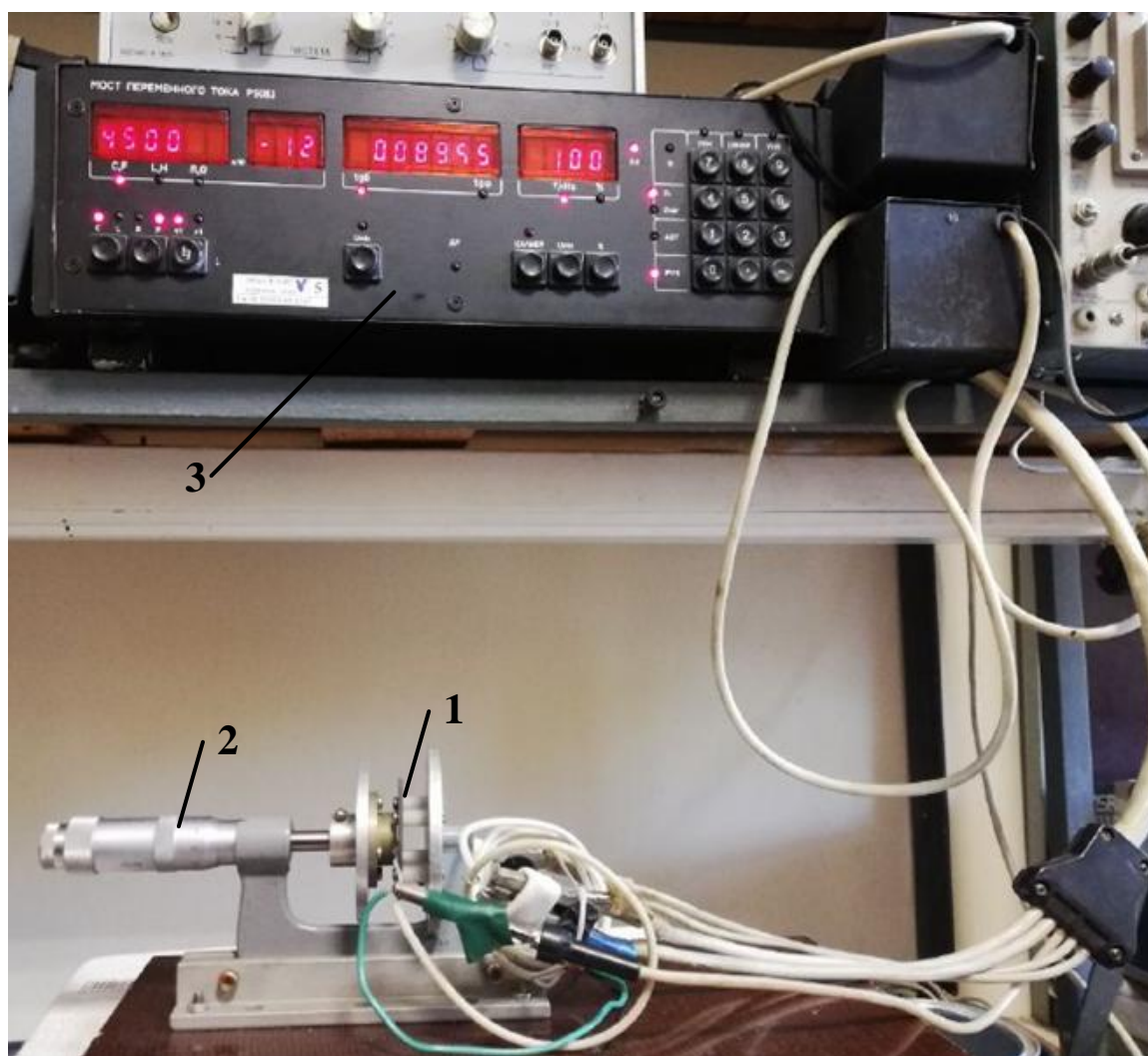


Рис. 4.7 Макет стенду для дослідження функції перетворення ємнісного сенсора

5. Методика випробувань

Випробування проводилося методом вимірювань та зняття відповідних показань з моста P5083 – рис. 4.8 позиція 3 електричної ємності C_X між високопотенціальним електродом – рис. 4.8 позиція 1 та заземленою поверхнею – рис. 4.8 позиція 2 в процесі зміни відстані d_X за допомогою мікрометричної головки стану в діапазоні від 0,01 до 15,0 мм. Схема підключення макету ємнісного сенсора до моста P5083 показана на рис. 4.8.

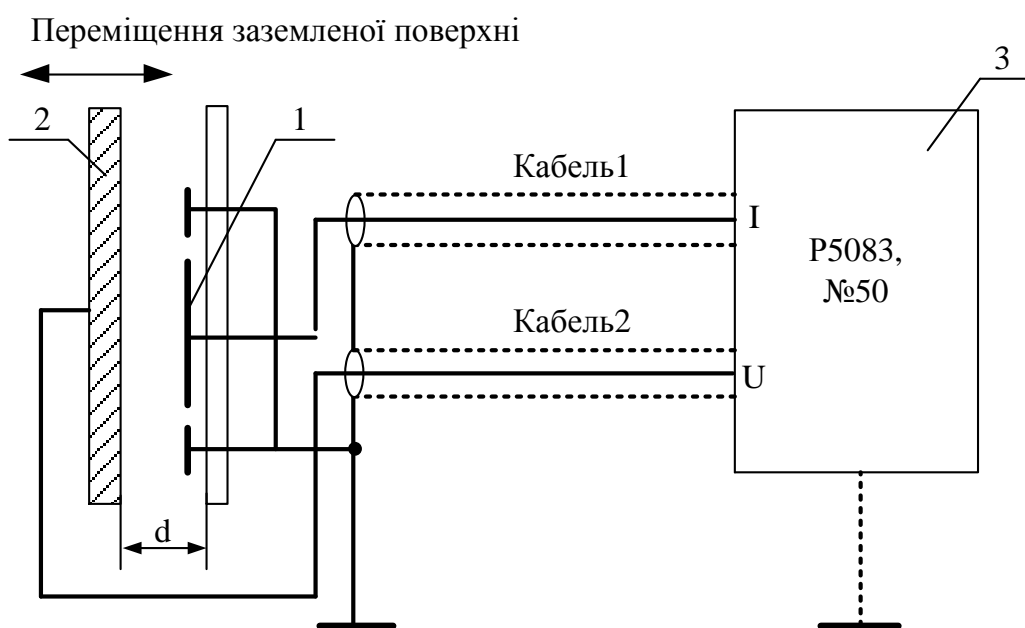


Рис. 4.8 Функціональна схема випробувань

6. Результати випробувань

Результати вимірювань ємності C_X при зміні відстані до заземленої поверхні представлені в таблиці 4.3, а графік отриманої залежності на рис. 4.9.

У цьому разі відстань до заземленої поверхні є різницею між значенням відстані зафіксованим на мікрометрі та мінімальним значенням відстані між електродами при якому не відбувається замикання електродів. Вимірювання ємності C_X відбувалось з урахуванням початкового значення ємності $C_{min} = 12 \text{ pF}$, яка є адитивною складовою похибки вимірювання.

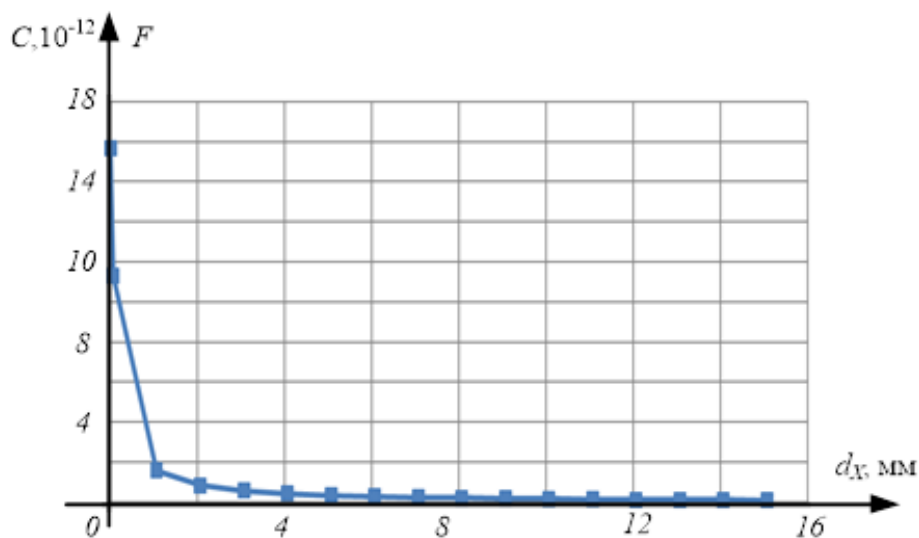


Рис. 4.9 Графік залежності $C(d) = f(d)$.

Для отримання прямопропорційної залежності вихідного інформативного параметру досліджуваного сенсору (значення, що фіксувалося за допомогою моста Р5083) від зміни відстані до заземленої поверхні, розрахуємо за (4.1) зворотною величиною $P_X(d_X)$ до ємності C_X .

Результати розрахунків зворотної величини $P_X(d_X)$ до ємності $C_X(d_X)$, за виразом (4.1) представлено в таблиці 4.3, а графік отриманої залежності $P_X(d_X)=f(d_X)$ на рис. 4.10, графік 2.

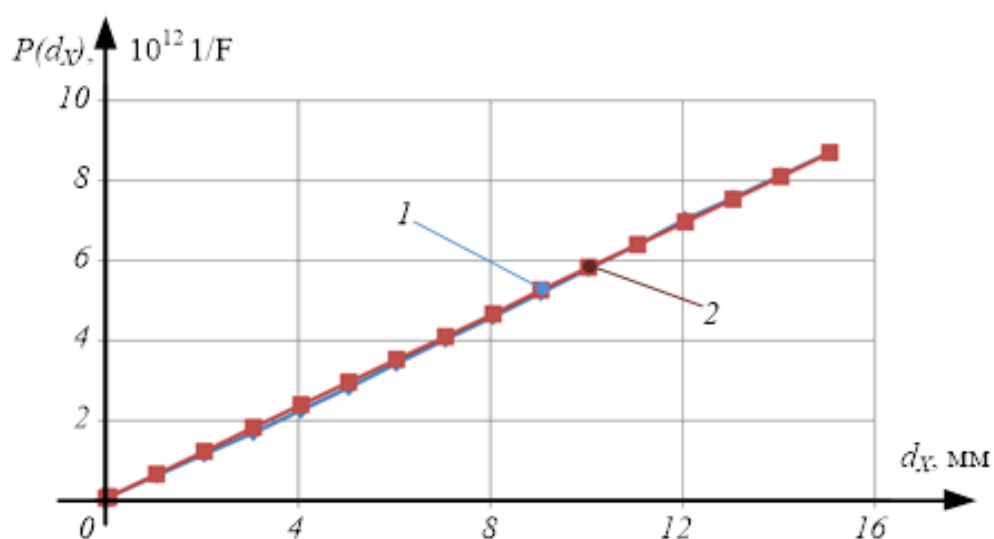


Рис. 4.10 Графіки залежностей: 1 – апроксимуюча залежність – $P_P(d_X) = f(d_X)$; 2 – розрахункова залежність $P_X(d_X) = f(d_X)$

**Результати розрахунків функції перетворення $C_X(d_X)$
та її зворотної величини $P_X(d_X)$**

d, мм	$C_X, 10^{-15} F$	$P_X, 10^{12} 1/F$
0	17663.8	0.06
0.06	11287.4	0.9
1.06	1589.6	6.29
2.06	860	1.16
3.06	585	1.71
4.06	442	2.26
5.06	353	2.83
6.06	293	3.41
7.06	249.2	4.01
8.06	217.2	4.60
9.06	192.2	5.20
10.06	172.1	5.81
11.06	156.1	6.41
12.06	142.1	7.04
13.06	132.1	7.57
14.06	123.1	8.12
15.06	115.1	8.69

По аналогії з попереднім пунктом, для оцінки похибок зумовлених нелінійністю розрахункової функції перетворення $P_X(d_X)=f(d_X)$ відносно лінійної апроксимуючої функції, оцінимо абсолютну (Δ) та приведену (γ) похибки.

У цьому разі апроксимуюча функція розраховується за значеннями $P_X(d_X)$ в максимальній та мінімальній точках вимірювального діапазону d_X до заземленої поверхні, використовуючи лінійну модель (4.2).

Враховуючи результати розрахунків за (4.1) та (4.2), значення абсолютної похибки Δ визначається за (4.4). При цьому значення приведеної похибки γ до нормуючого значення $\hat{P}_X = P_{X_{MAX}} - P_{X_{MIN}} = 4.09 \cdot 10^{12} \text{ 1/F}$, визначається як

$$\gamma = \frac{\Delta}{\hat{P}_X} \cdot 100\% . \quad (4.5)$$

Результат розрахунку $\Delta(d_X)$ та $\gamma(d_X)$ представлено в таблиці 4.4. а графік зміни похибки $\gamma(d_X)$ в процесі зміни d_X за допомогою мікрометричної головки стенду на рис. 4.11 відповідно.

Таблиця 4.4

Результати розрахунків значення абсолютної Δ та приведеної (γ) похибок

$d, \text{ mm}$	$P_X, 10^{12} \text{ 1/F}$	$P_P, 10^{12} \text{ 1/F}$	$\Delta, 10^{12}/F$	$\gamma, \%$
0	0.06	0.06	0.00	0.00
0.06	0.09	0.09	0.00	0.03
1.06	0.63	0.66	0.04	0.40
2.06	1.16	1.24	0.07	0.86
3.06	1.71	1.81	0.10	1.16
4.06	2.26	2.38	0.12	1.40
5.06	2.83	2.96	0.12	1.42
6.06	3.41	3.53	0.12	1.34
7.06	4.01	4.10	0.09	1.04
8.06	4.60	4.68	0.07	0.83
9.06	5.20	5.25	0.05	0.53
10.06	5.81	5.82	0.01	0.14
11.06	6.41	6.40	0.01	0.12
12.06	7.04	6.97	0.07	0.79
13.06	7.57	7.54	0.03	0.32
14.06	8.12	8.12	0.01	0.10
15.06	8.69	8.69	0.00	0.00

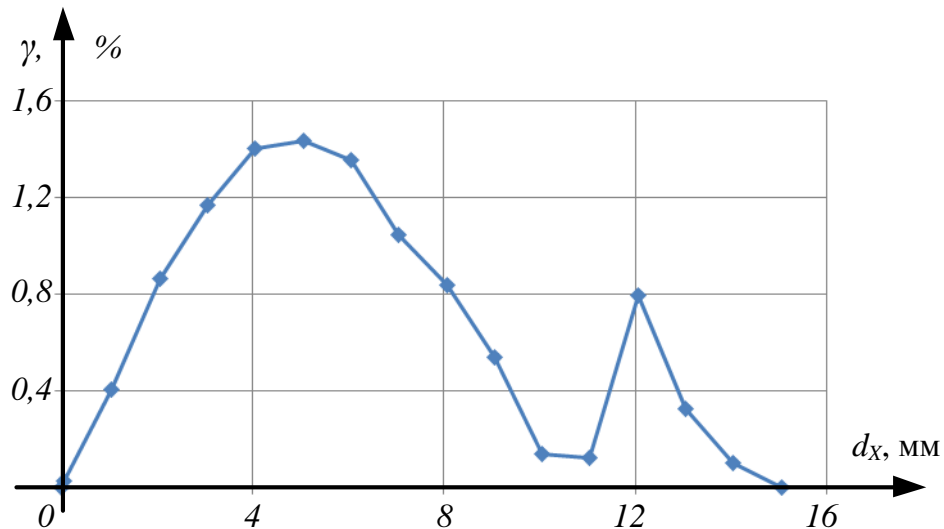


Рис.4.11 Графік приведеної похибки $\gamma(d_x)$

7. Висновки по випробуванням

1) В результаті проведених досліджень та розрахунків отримано, що максимальне значення приведеної похибки, що обумовлена нелінійністю становить 1,4%, а її середнє значення – 0,62% у діапазоні вимірювання відстані до заземленої поверхні від 0,01 до 15,0 мм.

2) Розбіжність отриманих даних з урахуванням конструктивних розмірів сенсора із даними отриманими в попередніх розділах становить до 5%, що підтверджує адекватність прийнятих теоретичних припущень.

3) Отримані результати свідчать про те, що використання вимірювача у діапазоні від 0 до 16 мм є доцільним тільки у випадках коли похибка вимірювання є рівною або більшою 3σ , тобто 1,86%.

4) При визначенні функціональної залежності $P_X(d_X)=f(d_X)$ на основі експериментально отриманих даних показано, що вона є майже лінійною з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,994$. Для можливості застосування отриманої функціональної залежності, як функції перетворення ємнісного сенсора є необхідним та доцільним застосування цифрових методів лінеаризації функції перетворення (використання програмної компенсації похибки нелінійності табличним методом або апроксимацією функціональної залежності)

4.3 Експериментальні дослідження вимірювача радіального биття валів ємнісним сенсором з концентричними компланарними електродами

Для перевірки відповідності результатів досліджень, проведених в попередніх розділах, засобів визначення параметрів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних генераторів, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання, реальним, був розроблений та створений макетний зразок. Макетний зразок призначено для експериментальної перевірки ємнісних сенсорів биття з різною конфігурацією електродів. Розроблені зразки ємнісних сенсорів наведені на рис. 4.12.

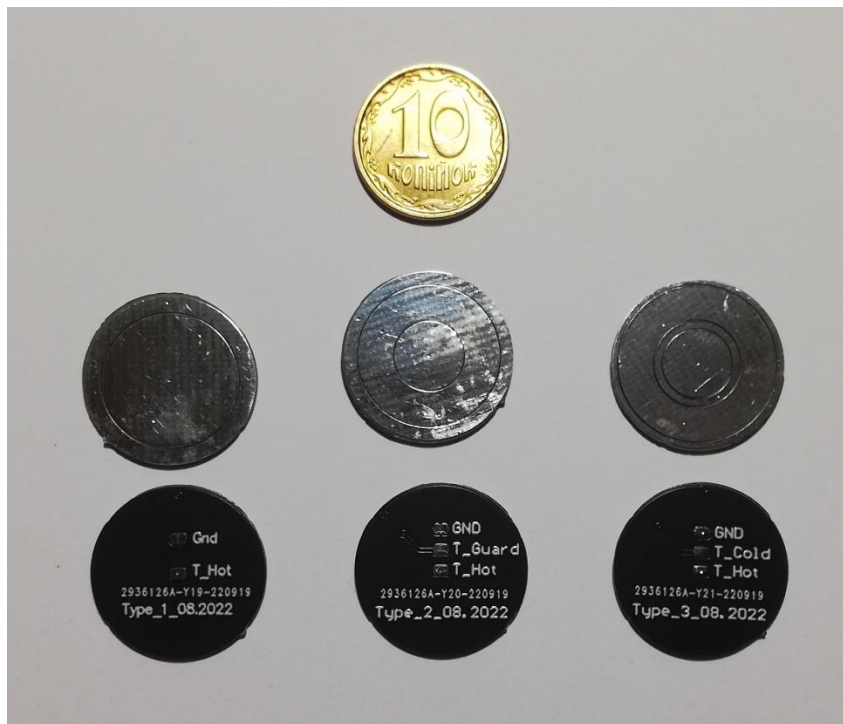


Рис. 4.12 Розроблені зразки ємнісних сенсорів радіального биття валів:
1 – ємнісний сенсор з плоскопаралельними електродами; 2 – ємнісний сенсор з кільцевим охоронним електродом Кельвіна; 3 – ємнісний сенсор з концентричними компланарними електродами.

Далі розглядаються результати експериментальних досліджень тільки для одного типу сенсора, а саме для сенсора 3 типу – з концентричними компланарними електродами.

Функціональна схема розробленого випробувального стенду вимірювача радіального биття валів із ємнісним сенсором представлена на рис. 4.13, на якому: 1 – ємнісний сенсором з концентричними компланарними електродами; 2 – заземлена поверхня, що імітує поверхню вала; 3 – коаксіальний кабель між сенсором та перетворювачем; 4 – вторинний вимірювальний перетворювач; 5 – мікроконтролер; 6 – інтерфейсний перетворювач між мікроконтролером та системою збору та обробки даних; 7 – персональний комп'ютер; 8 – USB кабель до системи збору та обробки даних; 9 – стенд з мікрометричною голівкою для задавання відстані від сенсора до заземленої металевої поверхні (зміни величини d).

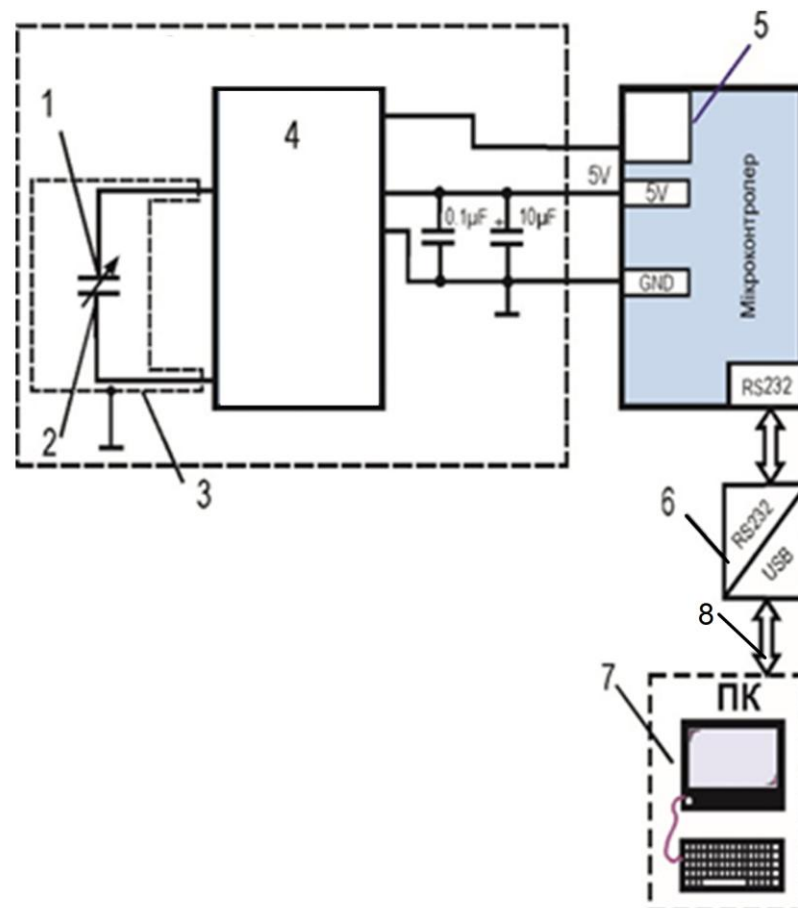


Рис. 4.13 Функціональна схема вимірювача радіального биття валів ємнісним сенсором з концентричними компланарними електродами

Загальний вид створеного випробувального стенду вимірювача радіального биття валів із ємнісним сенсором 3 типу представлено на рис 4.14.

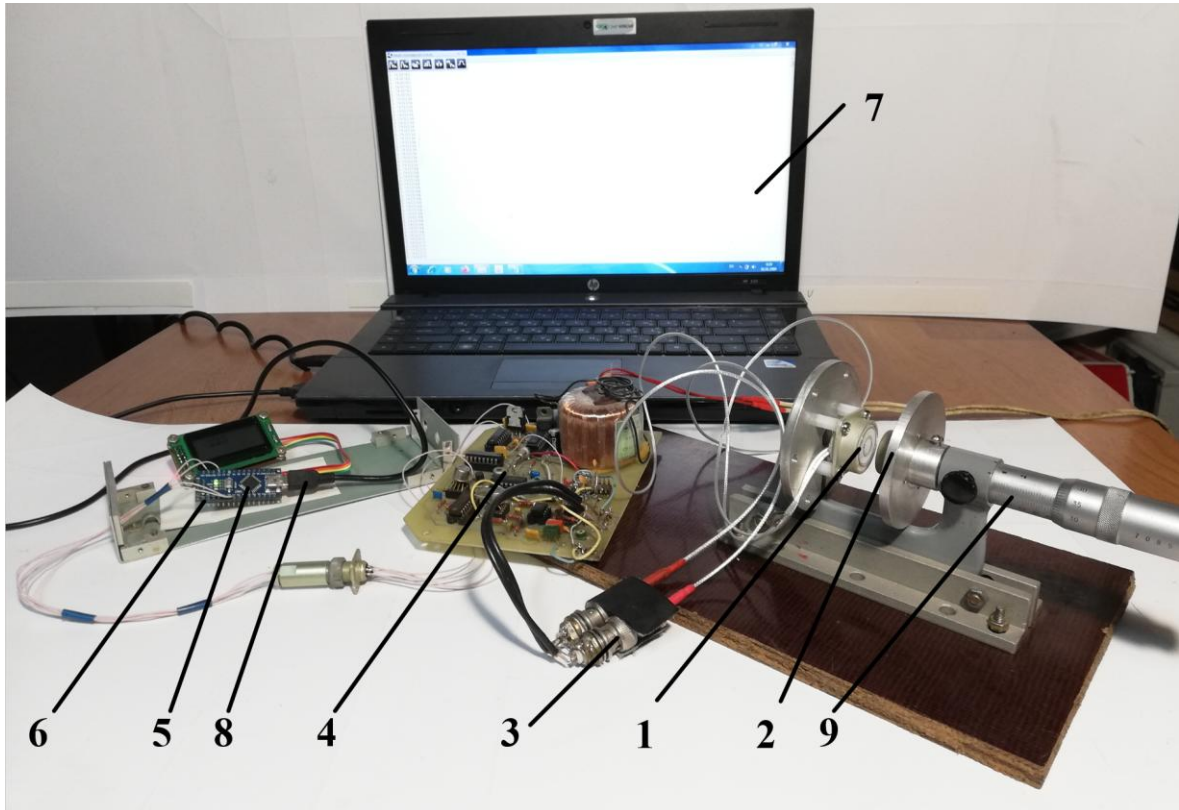


Рис. 4.14 Загальний вид вимірювача радіального биття валів ємнісним сенсором з концентричними компланарними електродами

4.3.1 Параметри та технічна характеристика вимірювача радіального биття валів

1. Тип сенсора – безконтактний, ємнісний, з концентричними компланарними електродами.

– призначені для безконтактного вимірювання відстані між поверхнею сенсора і циліндричною поверхнею вала потужних електричних машин. Величина биття визначається як різниця між найбільшою та найменшою відстанню, виміряних за один оберт вала у відповідності до [4, 5].

– функція перетворення сенсора не залежить від металургійних та хімічних властивостей матеріалу вала, незначних мікронерівностей контрольованої поверхні вала.

2. Випробувальний стенд (рис. 4.14) складається з: ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами та вторинного вимірювального перетворювача «ємність-код», який у разі використання сучасних smd елементів може бути легко інтегровано в конструкцію; стенду вимірювача радіального биття валів (див. рис. 3.3 розділ 3); апаратури, для реєстрації та контролю результатів вимірювань у вигляді персонального комп'ютера; з'єднувальних кабелів.

3. Конструкція сенсора з інтегрованим вторинним перетворювачем забезпечує мінімізацію паразитних ємностей, які можуть впливати на з'єднувальні провідники між сенсором і вторинним перетворювачем, а також між робочими електродами.

4. Габаритні розміри ємнісного сенсора – $\varnothing 20\text{мм} \times 1\text{мм}$.

5. Технічні характеристики:

– Діапазон вимірювання від 0,3 до 2,3 мм.

– Похибка вимірювання – не більше $\pm 1\%$.

– Номінальна швидкість обертання гідрогенератора СГК-538/160-70М 85,7 об/хв.

– Вихід вимірювача – цифровий сигнал рівня TTL.

– Відстань від сенсора до системи контролю – до 10 м.

6. Вимірювач зберігає робоздатність за впливу таких параметрів зовнішнього середовища:

а) температури в діапазоні:

– для сенсора: від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– для вторинного перетворювача: від $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

б) відносній вологості до 100% за температури $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$;

в) радіальній складовій індукції магнітного поля 1 Тл для первинного та вторинного вимірювальних перетворювачів;

г) вібрації від 0 Гц до 20 кГц, амплітудою 40 мкм (для сенсора);

д) ударних навантажень – 30g , 11мс (для сенсора).

4.3.2 Експериментальне визначення функції перетворення сенсора

Для експериментального визначення залежності електричної ємності сенсора з концентричними компланарними електродами та заземленою металевою поверхнею була використана методика, яка описана в попередніх розділах.

Вимірювання електричної ємності C_x здійснювалося між високопотенціальним електродом 1 і низькопотенціальним електродом 2 сенсора в процесі зміни відстані до поверхні вала d (за допомогою мікрометричної головки станда) в діапазоні від 0,3 мм до 2,3 мм, зняттям відповідних показань за допомогою інформаційно-вимірювальної системи з наступним виведенням даних на дисплей персонального комп'ютера.

Функціональна схема випробувань представлена на рис. 4.15.

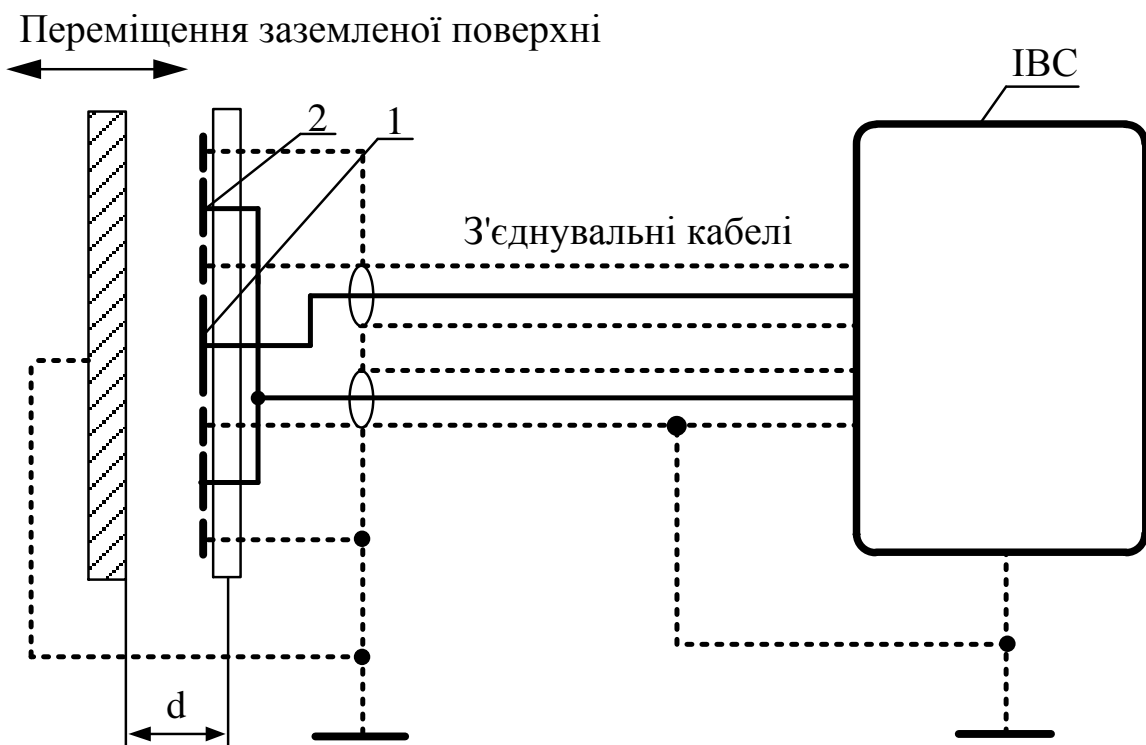


Рис. 4.15 Функціональна схема випробувань представлена

Результати випробувань відображені в таблиці 4.5. Отримана функція перетворення сенсора при вимірюванні відстані до заземленої поверхні в залежності від величини зазору d приведена на рис. 4.16.

Таблиця 4.5

Результати розрахунків функції перетворення $C_X(d_X)$

$d, \text{мм}$	C_G, pF	C_m, pF	C_X, pF
0.3	0.040	0.048	0.072
0.4	0.040	0.049	0.075
0.5	0.041	0.051	0.081
0.6	0.045	0.056	0.091
0.7	0.050	0.064	0.102
0.8	0.058	0.073	0.112
0.9	0.068	0.085	0.120
1	0.080	0.099	0.140
1.1	0.093	0.113	0.156
1.2	0.108	0.129	0.172
1.3	0.124	0.146	0.190
1.4	0.141	0.163	0.210
1.5	0.158	0.180	0.225
1.6	0.176	0.198	0.242
1.7	0.194	0.215	0.259
1.8	0.212	0.233	0.276
1.9	0.230	0.251	0.292
2	0.248	0.268	0.307
2.1	0.266	0.285	0.322
2.2	0.284	0.302	0.346
2.3	0.302	0.319	0.360

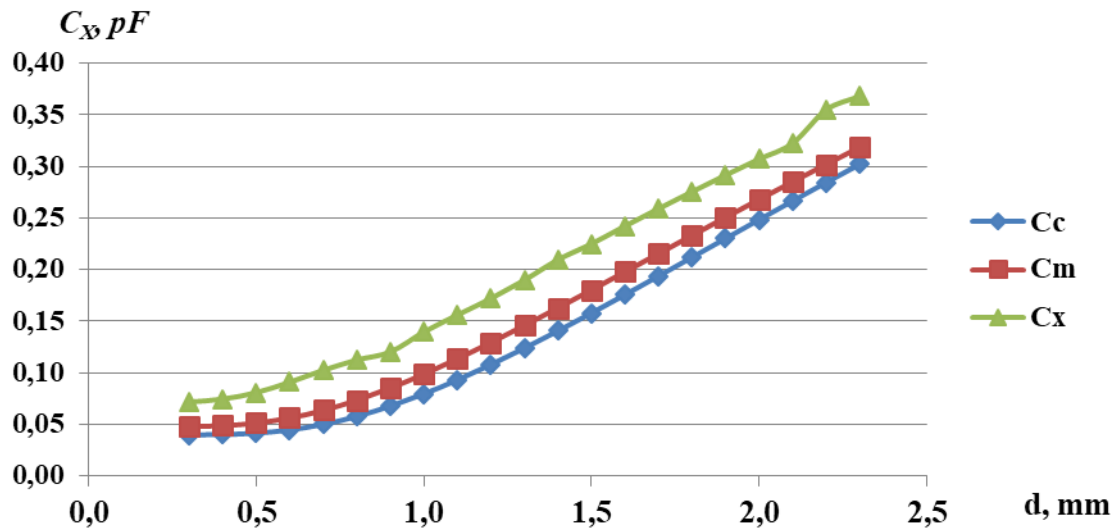


Рис. 4.16 Графік експериментально отриманої залежності: C_C – графік залежності значення ємності від відстані до заземленої поверхні вала отриманий шляхом аналітичних розрахунків; C_m – графік залежності значення ємності від відстані до заземленої поверхні вала отриманий шляхом моделювання; C_x – графік залежності значення ємності від відстані до заземленої поверхні вала отриманий експериментально.

8. Висновки по випробуванням

Отримані результати підтверджують працездатність ємнісного сенсора биття вала з концентричним компланарними електродами та адекватність обраних раніше методів. Розходження між результатами експериментальних, аналітичних та отриманих шляхом моделювання розрахунків обумовлені паразитною ємністю фольгованого склотекстоліту товщиною, яка у відповідності до проведеного розрахунку в розділі 2, складає 0,04 пФ для товщини $H_{diel} = 1$ mm. Врахувавши паразитну ємність, похибка вимірювання ємності між розрахунковим значенням та отриманим експериментально є постійною величиною і зумовлена кривизною вала, величина якої мало змінюється в діапазоні вимірювання і зі зміною зазору наближається до деякої константи, яка за умови обчислення величини биття за формулою $\delta = d_{max} - d_{min}$ компенсується.

4.3.3 Дослідження впливу температури на ємнісний сенсор

Для дослідження впливу температури на функцію перетворення ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами, по аналогії з попереднім підрозділом, було використано компоненти макетного зразка представленого на рис. 4.14. Параметри та технічні характеристики вимірювача радіального биття валів ємнісним сенсором не змінювалися.

Випробування здійснювалося методом вимірювання електричної ємності C_X між високопотенціальним електродом 1 і низькопотенціальним електродом 2 сенсора в процесі зміни температури T всередині кліматичної камери, в діапазоні від -10 до $+80^{\circ}\text{C}$ мм, із зняттям відповідних показань за допомогою інформаційно-вимірювальної системи з наступним виводом даних на дисплей ПК.

Функціональна схема випробувань представлена на рис. 4.17.

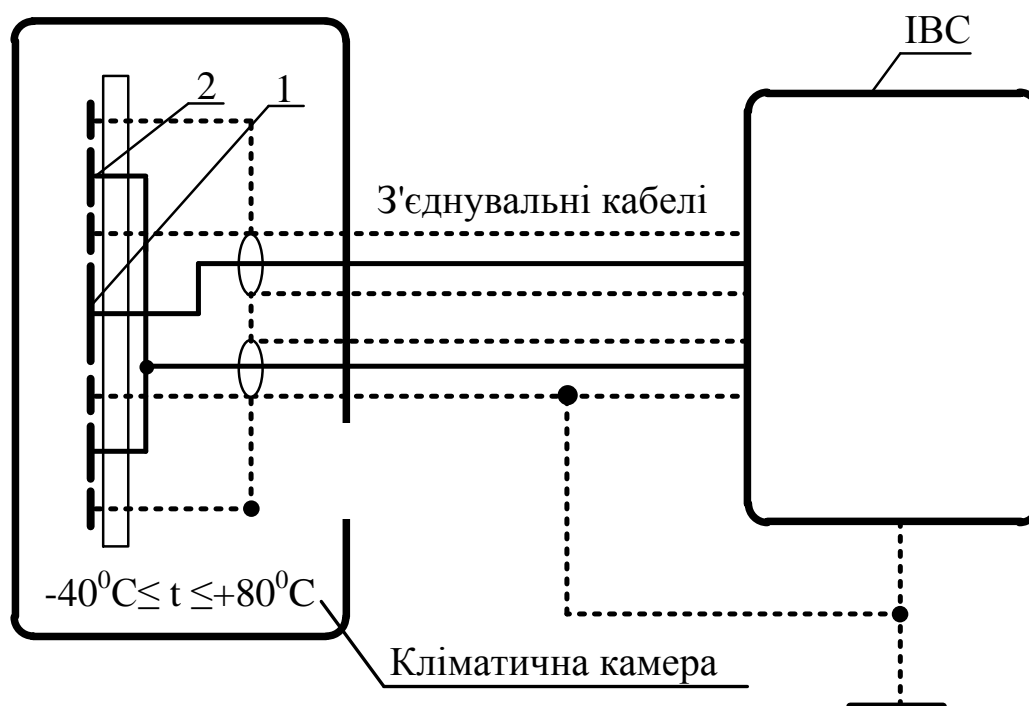


Рис. 4.17 Функціональна схема випробувань впливу температури на ємнісний сенсор

Результати вимірювань з осередненням результату 100 однократних вимірювань ємності $C_X \uparrow$ при прямій зміні температури T та ємності $C_X \downarrow$ при

зворотній зміні температури T показані в таблиці 4.6. Графіки залежностей $C_{X\uparrow} = f(T)$ і $C_{X\downarrow} = f(T)$ показані на рис. 4.18 (відповідно крива 1 та 2).

Таблиця 4.6

Результати випробувань впливу температури на ємнісний сенсор

T	$C_{X\uparrow}$, pF	$C_{X\downarrow}$, pF	$\Delta C_{X\uparrow}$, pF	$\Delta C_{X\downarrow}$, pF	$\delta C_{X\uparrow}$, %	$\delta C_{X\downarrow}$, %
-10	0.9263	0.9258	0.0011	0.0006	0.12	0.07
-5	0.9262	0.9260	0.0010	0.0008	0.11	0.08
0	0.9261	0.9257	0.0009	0.0005	0.09	0.06
5	0.9262	0.9260	0.0010	0.0008	0.10	0.09
10	0.9258	0.9252	0.0006	0.0000	0.06	0.00
15	0.9256	0.9248	0.0004	-0.0004	0.04	-0.04
20	0.9258	0.9249	0.0006	-0.0003	0.07	-0.03
25	0.9255	0.9251	0.0003	-0.0001	0.03	-0.01
30	0.9255	0.9246	0.0003	-0.0006	0.03	-0.06
35	0.9255	0.9248	0.0003	-0.0004	0.04	-0.04
40	0.9254	0.9252	0.0002	0.0000	0.02	0.00
45	0.9254	0.9250	0.0002	-0.0002	0.02	-0.02
50	0.9256	0.9246	0.0004	-0.0006	0.05	-0.06
55	0.9256	0.9253	0.0004	0.0001	0.05	0.01
60	0.9264	0.9256	0.0012	0.0004	0.13	0.05
65	0.9264	0.9255	0.0012	0.0003	0.13	0.03
70	0.9262	0.9254	0.0010	0.0002	0.10	0.02
75	0.9260	0.9259	0.0008	0.0007	0.09	0.08
80	0.9263	0.9263	0.0011	0.0011	0.12	0.12

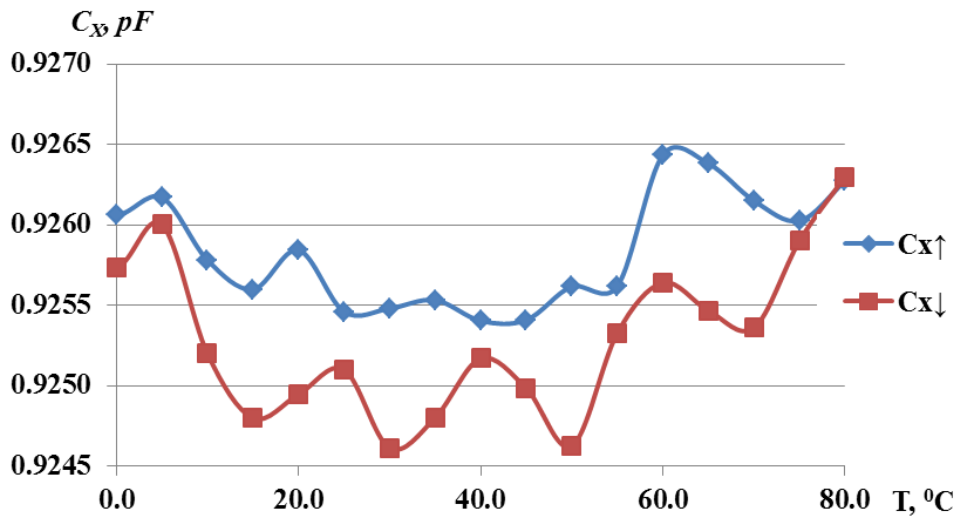


Рис. 4.18 Графіки залежності функції перетворення ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами від температури

Значення абсолютної похибки $\Delta C_{X\uparrow}$ при прямій зміні температури T та ємності $\Delta C_{X\downarrow}$ при зворотній зміні температури T , вимірювані при дослідженні впливу температури на функцію перетворення ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами розраховувалось за (4.6) і (4.7) відповідно

$$\Delta C_{X\uparrow} = C_{X\uparrow} - C_H \quad (4.6)$$

$$\Delta C_{X\downarrow} = C_{X\downarrow} - C_H \quad (4.7)$$

де $C_H = 0,925$ pF – ємність сенсора при температурі в приміщенні до початку випробувань $T = 20$ °C

Графіки розрахованих залежностей $\Delta C_{X\uparrow}$ та $\Delta C_{X\downarrow}$ показані на рис. 4.19.

При цьому значення приведеної похибки δ до нормуючого значення $C_H = 0,925$ pF, $\delta C_{X\uparrow}$ при прямій зміні температури T та ємності $\delta C_{X\downarrow}$ при зворотній зміні температури T визначається як (4.8) і (4.9) відповідно

$$\delta_{C_{X\uparrow}} = \frac{C_{X\uparrow} - C_H}{C_H} \cdot 100\% \quad (4.8)$$

$$\delta_{C_{X\downarrow}} = \frac{C_{X\downarrow} - C_H}{C_H} \cdot 100\% \quad (4.9)$$

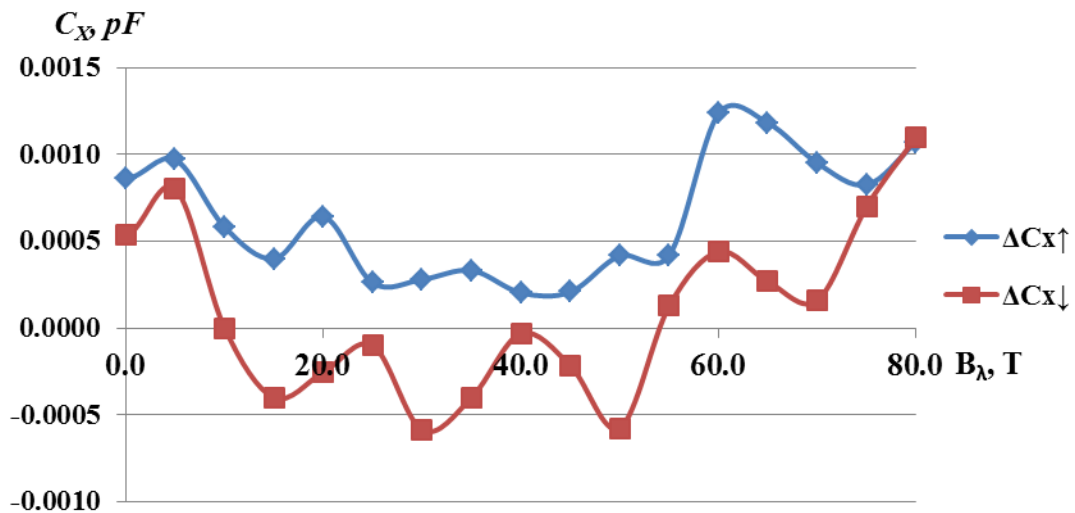


Рис. 4.19 Графіки залежності $\Delta C_{x\uparrow}$ і $\Delta C_{x\downarrow}$

Графіки відносної похибки $\delta C_{x\uparrow}$ і $\delta C_{x\downarrow}$ показані на рис. 4.20.

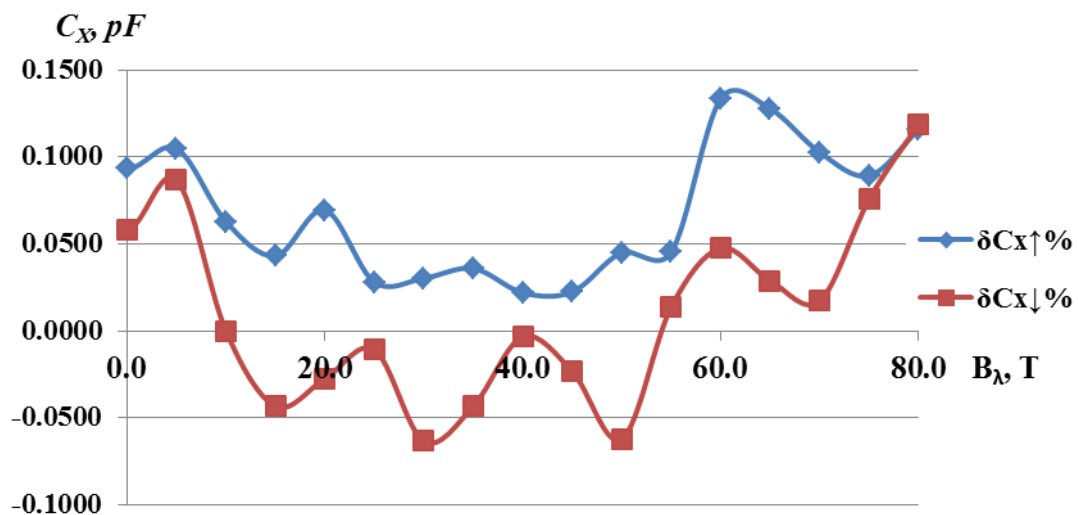


Рис. 4.20 Графіки відносної похибки $\delta C_{x\uparrow}$ і $\delta C_{x\downarrow}$

Висновки по випробуванням

1. Похибка вимірювача радіального биття валів з ємнісним сенсором з концентричними компланарними електродами в діапазоні температур від -15 до $+80$ °C не перевищує $0,4$ % .

2. Отримані результати підтверджують можливість застосування ємнісного сенсора з запропонованою системою електродів для вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних генераторів.

4.3.4 Дослідження впливу магнітного поля на ВВП

По аналогії з попереднім підрозділом, для оцінки впливу магнітного поля промислової частоти на ВВП було реалізовано та використано спеціальний стенд, функціональна схема якого показана на рис. 4.21. Параметри та технічні характеристики вимірювача радіального биття валів емнісним сенсором не змінювалися.

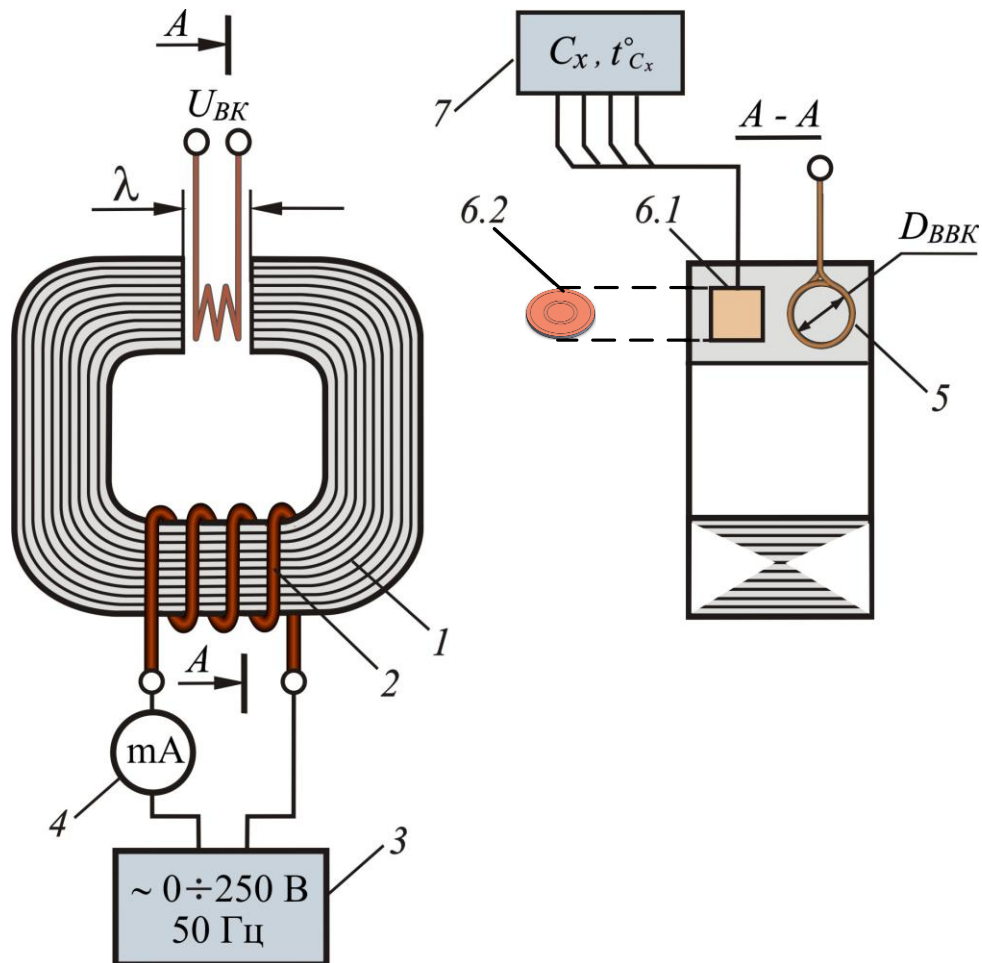


Рис. 4.21 Функціональна схема випробувань магнітного поля на ВВП:

1 – осердя; 2 – котушка; 3 – джерело живлення; 4 – вимірювач сили струму;
5 – спеціальна вимірювальна котушка; 6.1 – вторинний вимірювальний перетворювач «ємність–код» (AD7746); 6.2 – емнісний сенсор;

Випробування здійснювалося методом вимірювання електричної ємності C_x між високопотенціальним електродом 1 і низькопотенціальним електродом 2 сенсора в процесі зміни індукції B_λ магнітного поля від 0 до 0,67 Т, зняттям

відповідних показів за допомогою інформаційно-виміральної системи з наступним виведенням даних на дисплей персонального комп'ютера.

Загальний вид створеного стенду для випробувань магнітного поля на ВВП представлено на рис 4.22.

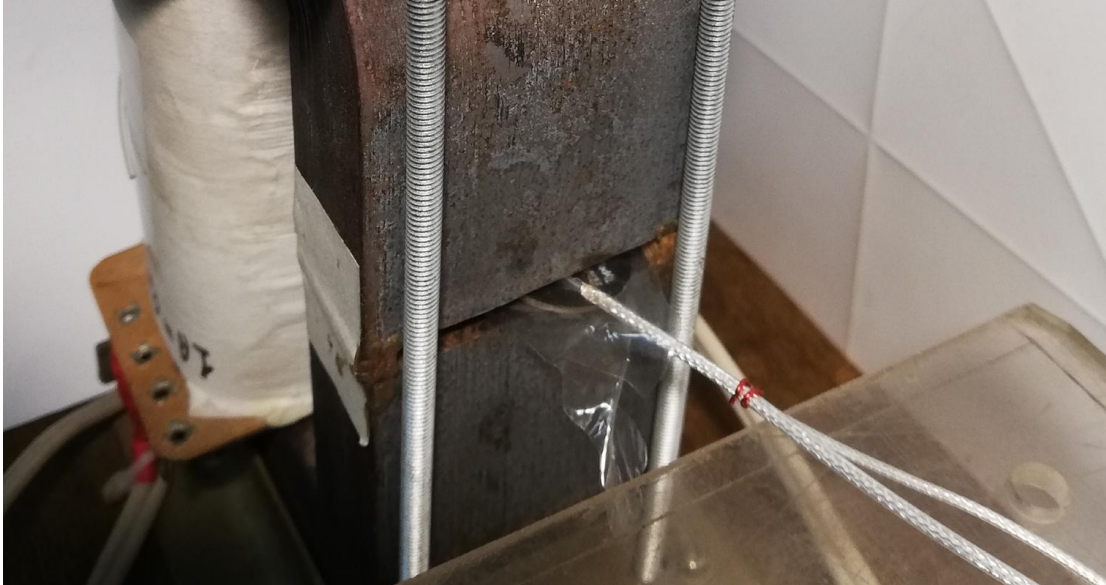


Рис. 4.22 Загальний вид стенду для випробувань магнітного поля на ВВП

За подання змінної напруги U від джерела 3 на котушку 2 в повітряному зазорі λ осердя 1 виникало змінне магнітне поле з індукцією B_λ . Індукція B_λ викликала в спеціальній вимірвальній котушці 5, також розміщеній в зазорі λ , напругу U_{BK} , функціонально залежну від індукції B_λ . Вторинний вимірвальний перетворювач «ємність–код» 6.1 (AD7746) розміщувався в зазорі поруч з вимірвальною котушкою 5 (рис. 4.18). Ємнісний сенсор 6.2, що конструктивно виконаний як частина плати вимірвача, розміщувався поза межами зазору λ . Відлік ємності C_X та температури t здійснювався за допомогою інформаційно-вимірвальної системи.

У відповідності до описаної в [4] методики випробувань, спочатку була досліджена калібрована вимірвальна котушка 5 для визначення функціональної залежності $U_{BK} = f(B_\lambda)$. Визначення U_{BK} в котушці 5 проводилося за наступною залежністю

$$U_{BK} = B_{\lambda} \cdot S \cdot N \cdot \omega \quad (4.10)$$

де B_{λ} – магнітна індукція в зазорі λ ; S – площа котушки 5, через яку проходить магнітний потік; $N = 10$ – кількість витків котушки 5; $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{c}^{-1}$ – частота.

В свою чергу

$$S = \frac{\pi}{4} (D_{BK} + 2d_{II})^2, \quad (4.11)$$

де $D_{BK} = 10,4$ мм – внутрішній діаметр вимірювальної котушки 5; $d_{II} = 0,1$ мм – діаметр проводу вимірювальної котушки 5.

Використовуючи (4.10) і (4.11), з урахуванням числових значень, визначимо, що

$$U_{BK} = 0,267 \cdot B_{\lambda}, \quad (4.12)$$

$$B_{\lambda} = \frac{U_{BK}}{0,267}. \quad (4.13)$$

Результати вимірювань для визначення функціональної залежності $U_{BK} = f(B_{\lambda})$ приведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

**Результати вимірювань для визначення
функціональної залежності $U_{BK} = f(B_{\lambda})$**

U, В	I, А	U_{BK}, В	B_{λ}, Т
31	0.2	2.45	0.09
61	0.45	5.05	0.19
86	0.65	7.15	0.27
120	0.95	9.65	0.36
149	1.2	11.9	0.45
185	1.4	14.75	0.55
210	1.6	17	0.64
224	1.8	17.95	0.67

На рис. 4.23 приведено графічне відображення отриманої функціональної залежності з визначеною лінійною функціональною залежністю, яка апроксимує отриманні експериментальні данні.

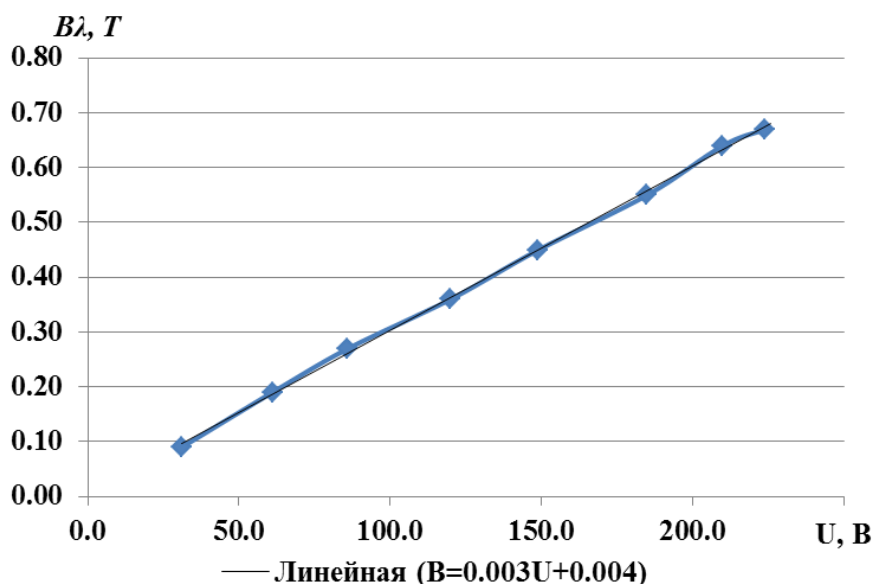


Рис. 4.23 Графічне відображення функціональної залежності $U_{BK} = f(B_{\lambda})$

Результати вимірювань ємності C_X з осередненням результату вимірювання з 10 однократних вимірювань для ємностей $C_{X\uparrow}$ – при прямій зміні значення $B_{\lambda\Pi}$ електромагнітного поля від 0 до 0,67 Т та $C_{X\downarrow}$ – при зворотній зміні значення $B_{\lambda\Sigma}$ наведені в таблиці 4.8.

На рис. 4.24 представлено графіки залежності ємностей $C_{X\uparrow} = f(B)$ та $C_{X\downarrow} = f(B)$ від зміни індукції електромагнітного поля.

Таблиця 4.8

Результати вимірювань ємності при зміні магнітного поля

$B_{\lambda\Pi}$, Т	$C_{X\uparrow}$, pF	t , °С.	$B_{\lambda\Sigma}$, Т	$C_{X\downarrow}$, pF	t , °С
0.1	0.9239	20.1	0.1	0.9234	23.3
0.15	0.9241	20.2	0.148	0.9238	23.3
0.18	0.9235	20.3	0.151	0.9235	23.3
0.22	0.924	20.4	0.19	0.9242	23.3
0.26	0.9236	20.5	0.27	0.9236	23.3
0.3	0.9239	20.7	0.29	0.9235	23.4
0.34	0.9237	20.9	0.33	0.9233	23.4
0.39	0.9232	21	0.38	0.9236	23.5
0.43	0.9234	21.3	0.42	0.923	23.6
0.47	0.9235	21.8	0.48	0.9235	23.7
0.54	0.924	21.9	0.53	0.9238	23.7
0.6	0.9241	22.7	0.59	0.9234	23.7
0.66	0.9236	23.2	0.63	0.9237	23.7

Як видно з таблиці 4.8 та рис. 4.24 вплив індукції B_λ магнітного поля величиною до 0,63 Т на зразок ємнісного вимірювача зазору з цифровим виходом викликає незначне максимальне відхилення вимірюваних величини від їх середнього значення на 0,0006 рF і відповідно не призведе до похибки в вимірюванні радіального биття валів.

Результат розрахунку значення похибок $\delta_{\Pi; B=0,1 \text{ Т}}$ (у випадку підвищення індукції) за (4.14) та $\delta_{3; B=0,1 \text{ Т}}$ (при зниженні індукції) за (4.15) відповідно, відносно початкового значення ємності C_0 (значення індукції $B_\lambda = 0 \text{ Т}$) при зміні індукції магнітного поля B_λ (від 0,1 до 0,63 Т) приведено в табл. 4.9.

$$\delta_{\Pi} = \frac{C_0 - C_{x\uparrow}}{C_0} \cdot 100\% \quad (4.14)$$

$$\delta_3 = \frac{C_0 - C_{x\downarrow}}{C_0} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

Графіки відносної похибки δ_{Π} і δ_3 показані на рис. 4.25.

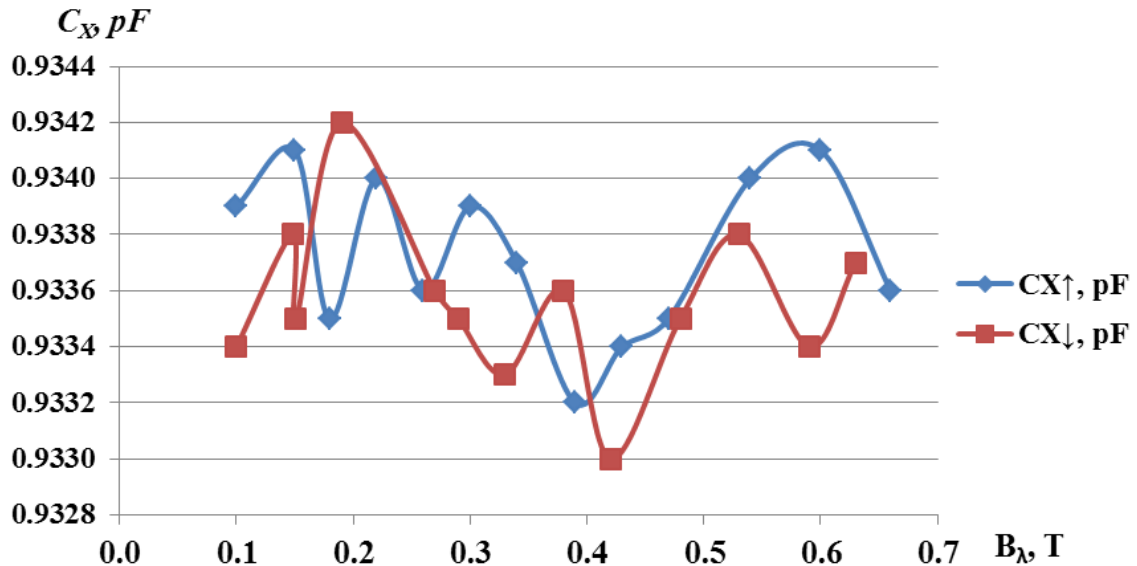
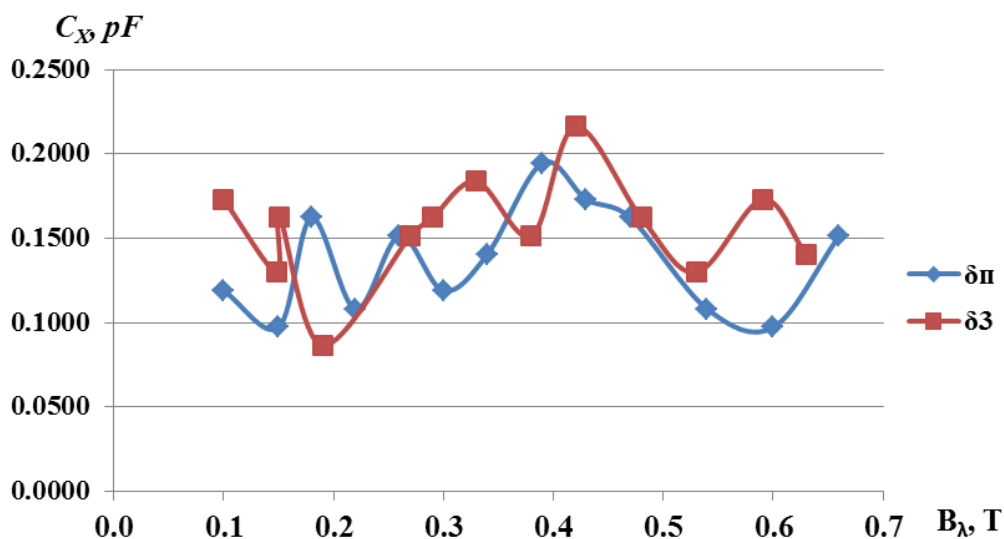


Рис.4.24 Графіки залежності ємностей від зміни індукції електромагнітного поля

Рис. 4.25 Графіки відносної похибки δ_{Π} і δ_3

Таблиця 4.9

Результати розрахунку похибок від впливу магнітного поля

$B_{\lambda\Pi}, T$	δ_{Π}	$B_{\lambda 3}, T$	δ_3
0.1	0.12	0.1	0.17
0.15	0.10	0.148	0.13
0.18	0.16	0.151	0.16
0.22	0.11	0.19	0.09
0.26	0.15	0.27	0.15
0.3	0.12	0.29	0.16
0.34	0.14	0.33	0.18
0.39	0.19	0.38	0.15
0.43	0.17	0.42	0.22
0.47	0.16	0.48	0.16
0.54	0.11	0.53	0.13
0.6	0.10	0.59	0.17
0.66	0.15	0.63	0.14

Висновки по випробуванням

Отримані результати продемонстрували, що внесення вторинного вимірювального перетворювача вимірювача радіального биття валів в магнітне поле величиною від 0,1 до 0,61 Т викликає зміщення показів на адитивну складову, яка виникає в момент дії поля, є постійною в першому наближенні і зникає при винесенні вимірювача із поля, та може бути компенсована

програмними методами. Це підтверджує можливість застосування ємнісного сенсора з цифровим виходом для вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів в капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М при дії індукції магнітного поля від 0,1 до 0,63 Т.

4.4 Дослідження похибки нелінійності ВВП

Для дослідження похибки нелінійності ВВП, був виготовлений експериментальний зразок вимірювального перетворювача з цифро-аналоговою системою врівноваження, принцип якої описано в попередніх розділах.

Пристрій реалізовано на базі мікроконтролера STM32F103RCT, в якості перемикачів використані електронні ключі – мікросхеми ADG1233. Пристрій також містить підсилювач різницевого заряду на операційному підсилювачі ОР37 і інвертор напруги на ОР27. Для оцінки рівня похибки від нелінійності характеристики перетворення був використаний імітатор сенсора – конденсатор С2 типу К10-43А номінальною ємністю 50 пФ.

Визначення похибки від нелінійності характеристики перетворення здійснювалося методом рівних збільшень ємності змінного конденсатора. Перше значення вихідного коду було отримано при відсутності С1. Потім був підключений конденсатор типу К10-43А номінальною ємністю 6.2 пФ. і визначено друге значення коду. Після цього замість цього конденсатора був включений конденсатор змінної ємності і відрегульований до отримання другого значення вихідного коду. Потім паралельно йому знову був включений конденсатор ємністю 6.2 пФ. і було отримано третє значення вихідного коду. Повторюючи зазначені операції. були визначені інші значення вихідного коду.

Параметри характеристики перетворення наведені в табл. 4.10. Графіки похибки від нелінійності характеристики перетворення, по відношенню до кінця діапазону представлено на рис. 4.27. Як видно з даних таблиці 4.10, похибка від нелінійності характеристики перетворення не перевищує 0.15%. що задовольняє практичні вимоги до швидкодіючих вимірювальних перетворювачів для ємнісних сенсорів, що мають заземлені електроди.

Результати випробувань ВВП

№ точки	С1, пФ	Nx	δ_{NL} , %
1	0	732	0
2	6.2	1209	0.064
3	12.4	1684	0.069
4	18.6	2161	0.13
5	24.8	2636	0.14
6	31.0	3111	0.14
7	37.2	3583	0.056
8	43.4	4056	0

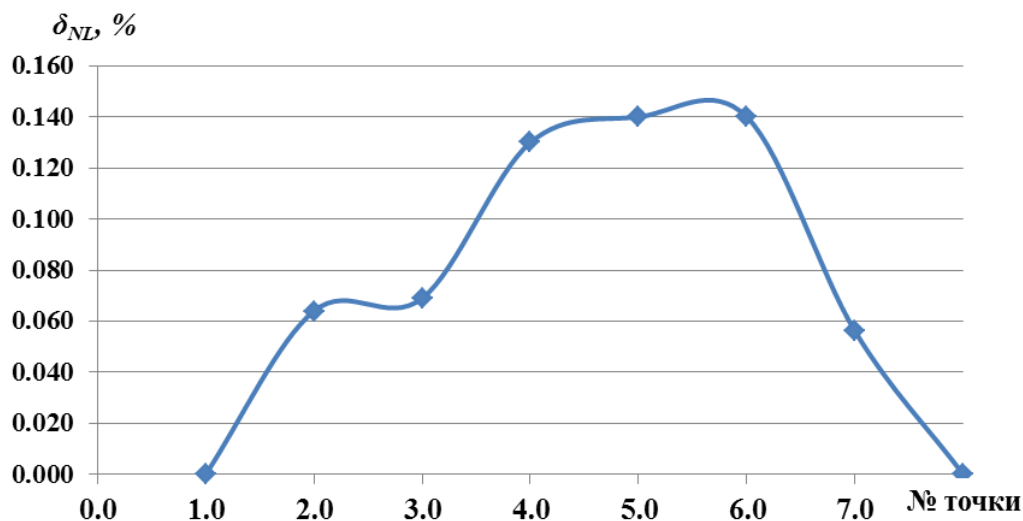


Рис. 4.27 Графіки похибки від нелінійності

Запропонований вторинний вимірювальний перетворювач забезпечує швидкість перетворення інформативних параметрів ємнісних сенсорів в кілька тисяч результатів в секунду, що дозволяє істотно знизити динамічну похибку перетворення в порівнянні з відомими пристроями. Проведені випробування експериментального зразка підтвердили низьку похибку від нелінійності характеристики перетворення.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Теоретичні та експериментальні результати з визначення функції перетворення сенсорів з різною формою електродів, а саме для сенсора з плоскопаралельними електродами (тип 1), сенсора з охоронним кільцевим електродом Кельвіна (тип 2) та сенсора з концентричними компланарними електродами (тип 3), підтверджують можливість їх практичного використання.

2. Експериментальні дослідження ємнісного вимірювача радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних генераторів із концентричними компланарними електродами, показали можливість створення приладів з високою точністю і роздільною здатністю вимірювання параметрів.

3. Експериментальні дослідження вимірювача радіального биття показали, що ємнісні сенсори є ефективним засобом визначення дефектів потужних гідрогенераторів і, як результат, покращення контролю технічного стану машин.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-прикладне завдання створення вимірювачів радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів, які забезпечать підвищення точності, роздільної здатності та дистанційності вимірювання, що надасть змогу одержувати достовірну та оперативну інформацію в режимі реального часу про поточний і прогнозований стан потужних гідрогенераторів. Основні наукові та практичні результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень полягають в наступному.

1. На основі аналізу параметрів гідроагрегату було визначено конструктивні дефекти основних вузлів контролю, одним із яких є вал. Проаналізовано методи вимірювання параметрів биття валів та їх особливості. Спираючись на результати аналітичного огляду існуючих систем контролю та діагностики потужних гідрогенераторів визначено, що оптимальним шляхом покращення їх якості є застосування додаткових ємнісних сенсорів параметрів механічних дефектів.

2. Враховуючи складність та обмеженість можливостей аналітичних розрахунків для реальних конструкцій ємнісних сенсорів биття, визначено доцільним проведення подальших досліджень з визначення функції перетворення ємнісних сенсорів з різною конфігурацією електродів шляхом комп'ютерного моделювання. Аналітичний огляд методів та засобів мультифізичного моделювання дозволив визначити, що для вирішення електростатичних задач, кращим є програмне забезпечення Comsol Multiphysics на основі методу кінцевих елементів, який надає можливість моделювання і дослідження областей будь-якої форми.

3. В дисертаційній роботі набув подальшого розвитку метод проектування та комп'ютерного моделювання ємнісних сенсорів вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідрогенераторів ГЕС та ГАЕС, що дозволило забезпечити покращення вихідних метрологічних характеристик ємнісних сенсорів з урахуванням конструктивних характеристик вузла контролю.

4. Проведені теоретичні дослідження дозволили розробити нові ємнісні засоби вимірювання параметрів биття з більш високими метрологічними характеристиками, що дозволяє виявляти дефекти машин на більш ранній стадії їх появи і розвитку, а значить покращити якість контролю і діагностики.

5. Запропонований новий ємнісний сенсор биття з концентричними компланарними електродами під час роботи в динамічному режимі в порівнянні з аналогами є більш точним за рахунок того, що струм інформаційного сигналу не проходить через підшипники і корпус машини та є більш стабільним. Окрім того, для такого сенсора можна створити вимірювальний перетворювач, який розміщується в одному корпусі з сенсором.

6. Проведені дослідження впливу конструктивних параметрів фольгованого діелектрика на функції перетворення ємнісних сенсорів биття з трьома видами конфігурації електродів дають можливість оптимізувати технологію виготовлення сенсорів методом друкованих плат.

7. Результати досліджень вимірювачів параметрів биття впроваджено в ТОВ «Політон-Україна» (м. Полтава) задля покращення ефективності визначення параметрів процесів вібрації, що виникають під час випробувань зразків на ударному стенді (Акт впровадження, 2021 р.);

8. Комплект технічної документації та макетний зразок ємнісного вимірювача биття з компенсаційно-мостовим вторинним вимірювальним перетворювачем впроваджено на підприємстві АТ "Завод "Електроважмаш" (м. Харків), що дало змогу підвищити достовірність контролю параметрів биття валів потужних генераторів під час їх виготовлення (Акт впровадження, 2021 р.);

9. Подальше використання теоретичних і практичних результатів дисертаційної роботи передбачено шляхом виготовлення експериментальних зразків вимірювачів радіального биття валів з різними типами ємнісних сенсорів для їх випробувань та впровадження на АТ "Українські енергетичні машини" (м. Харків) та ПрАТ «Укргідроенерго».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зайцев Є.О. Розвиток теорії і практична реалізація оптоелектронних систем діагностування механічних параметрів потужних турбо- та гідрогенераторів: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.05/ Ін-т. електродинаміки НАН України. Київ, 2021. 424 с.
2. Зайцев Є.О., Березниченко В.О. Система контролю биття валів потужних генераторів: дефекти та їх прояви в залежності від механічних сил. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020)*: матеріали XV міжнар. конф., Вінниця, 8-10 жовтня 2020. Вінниця: ВНТУ, 2020.
3. ISO 19283:2020 Condition monitoring and diagnostics of machines – Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 с.
4. Левицький А.С., Федоренко Г. М., Грубой О. П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.
5. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Березниченко В. О. Особливості вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату. *Гідроенергетика України*. 2019. №1-2. С. 39–44.
6. Левицький А.С., Зайцев Є. О. Березниченко В. О. Відносна та абсолютна радіальна вібрація вала вертикального гідроагрегата. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3-4. С. 68–72.
7. Nowicki R., Macvaugh R., XY-Measurements for radial position and dynamic motion in hydro turbine generators. *Orbit*. 2010. Vol. 30, No. 1. P. 32
8. ISO 7919-5:2005. Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants [Released: 2005-04]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2005. 16 p.

9. ISO 20816-5:2018. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants [Released: 2018-07-24]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2018. 60 p.

10. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines ISO79 [Released: 2016-11-30]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2016. 46 p.

11. Zaitsev I., Berezhnychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V. Kamel S. Calculation of Capacitive-Based Sensors of Rotating Shaft Vibration for Fault Diagnostic Systems of Powerful Generators. *Sensors* 2022, Vol. 22(1634). P. 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041634> ***Index in SCOPUS, Q1, IF 3.847.***

12. Bently Nevada 3300 XL Series Proximito System. URL: https://www.protectivesupplies.com/item/Brand_BentlyNevada3300XLSeriesProximitoSystem_0_0_3783_1.html (дата звернення 18.03.2021).

13. Lin J., Bissonnette M.R.. A new proximity probe to overcome eddy current probe limitations. URL: <https://fliphtml5.com/dqqr/wmeo/basic> (дата звернення 18.03.2021).

14. Complete Monitoring Solutions. URL: <https://www.vibrosystem.com/en/industry/hydro/info> (дата звернення 18.03.2021).

15. Левицький А.С., Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Сучасні системи вібродіагностики гідроагрегатів з вимірювачами абсолютної та відносної вібрації валів. *Гідроенергетика України*. 2021. № 1-2. С. 57–66.

16. Левицький А.С., Березниченко В.О. Інформаційно-вимірювальні системи вібродіагностики гідроагрегатів: сучасний стан. *Приладобудування: стан і перспективи*: матеріали ХХ міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 18–19 трав. 2021. Київ. 2021. С. 252.

17. Junior G.C.B., Machado R. D., Neto A.C., Martini M.F. Experimental aspects in the vibration-based condition monitoring of large hydrogenerators. *International Journal of Rotating Machinery*. 2017. 14 p. DOI: doi.org/10.1155/2017/1805051

18. Bently Nevada. Защита и мониторинг состояния оборудования. URL: <https://www.bakerhughesds.com/ru/zaschita-i-monitoring-sostoyaniya-oborudovaniya-bentli-nevada> (дата звернення 05.01.2021).

19. Bently Nevada – Product Datasheets. URL: <http://www.fr-eps.com/EN/portfolio/bently-nevada-product-datasheets/> (дата звернення 05.01.2021).

20. Condition Management System for Hydro-Turbine Generators. An Application Guide. URL: <http://www.fr-eps.com/docs/Bently-Nevada-CMS-HydroTurbine-brochureEN.pdf> (дата звернення 05.01.2021).

21. Condition monitoring solutions for hydroelectric power generation. URL: https://dam.bakerhughesds.com/m/65bbcaf2f9e27e6a/original/BHCS13978Hydro_Brochure_R2-pdf.pdf. (дата звернення 05.01.2021).

22. Bently Nevada 3500 Series Machinery Monitoring System. URL: <https://www.instrumart.com/productsets/425/bently-nevada-3500-series-machinery-monitoring-system> (дата звернення 05.01.2021)

23. 3500 Machinery Monitoring System. URL: https://www.scenicacoustic.com/product/3500_machinery_protection_systems/ (дата звернення 05.01.2021).

24. Bently Nevada 3500 Vibration Monitoring System. URL: https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/upgrade-documents/GEA32070ABentlyNevada3500-US-R1-LR.pdf (дата звернення 05.01.2021).

25. 3701/46 ADAPT Hydro Monitor. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. URL: <https://dam.bakerhughesds.com/m/2bc3a7ac4020b4bf/original/3701-46-ADAPT-Hydro-Monitor-Datasheet-103M9138-pdf.pdf> (дата звернення 05.01.2021).

26. 2300 Vibration Monitors. Product Datasheet. Bently Nevada Asset Condition Monitoring. URL: <https://www.instrumart.com/assets/2300-Datasheet.pdf> (дата звернення 05.01.2021).

27. Bently Nevada 2300 Vibration Monitor Series. URL: <http://www.shurhay.com/pdf/2300-fact-sheet-gea31447d.pdf> (дата звернення 05.01.2021).

28. vbOnline Pro Condition Monitoring System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. URL: <https://www.instrumart.com/assets/vbonline-pro-Datasheet.pdf> (дата звернення 05.01.2021).

29. vbOnlineProFact Sheet. URL: <https://www.instrumart.com/assets/vbonline-pro-quick-specs.pdf> (дата звернення 05.01.2021).

30. Randall R.B. Vibration Signals from Rotating and Reciprocating Machines. *Vibration-Based Condition Monitoring*. 2011. New York. P. 25-62.

31. Protection, Monitoring & Analysis Units ZPU-5000 URL: <https://www.vibrosystem.com/en/product/zpu-5000> (дата звернення 21.12.2020).

32. Complete Monitoring Solutions. URL: <https://www.vibrosystem.com/en/industry/hydro/info> (дата звернення 18.03.2021).

33. ZOOM System for Hydroelectric Generators. URL: <https://www.vibrosystem.com/en/documents/pdf?f=en/Datasheets/96VT-HYD1A-101.pdf&d=ZOOM%20System%20for%20Hydroelectric%20Generators&n=Datasheet%20%7C%20VSM-ZOOM%2FHIDRO> (дата звернення 18.03.2021).

34. ZOOM Software Suite. URL: <https://www.vibrosystem.com/en/product/zoom-software-hydro> (дата звернення 18.03.2021).

35. PCS-200 Series Capacitive Non-Contact Measuring Chains. URL: <https://library.vibrosystem.com/en/Datasheets/9628-25D3A-101.pdf> (дата звернення 18.03.2021).

36. PCS-302 Capacitive proximity sensor. URL: <https://www.vibrosystem.com/en/documents/pdf?f=en/Datasheets/9638-09D1A-104.pdf&n=Datasheet%20|%20PCS-302> (дата звернення 21.12.2020).

37. PCS-304 Capacitive proximity sensor. URL: <https://library.vibrosystem.com/en/Datasheets/9638-09D2A-104.pdf> (дата звернення 21.12.2020).

38. Eddy Current Proximity Sensor PES-110. URL: <https://www.vibrosystem.com/en/product/pes-110> (дата звернення 21.12.2020).

39. VSM-797S Low Frequency Piezoelectric Accelerometer. URL: <https://library.vibrosystem.com/en/Datasheets/9600-09D4A-112.pdf> (дата звернення 21.12.2020).

40. Synchronization Probe. URL: <https://library.vibrosystem.com/en/Datasheets/9601-15D1A-110.pdf> (дата звернення 21.03.2021).

41. CoDiS PMU Portable Monitoring Unit. URL: <https://irispower.com/products/codis-pmu/> (дата звернення 01.10.2019).

42. ISO 13381-1:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines. Prognosis .Part 1: General guidelines. [Released: 2015-09]. ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems, 2015. 21p.

43. ISO 13374:2007. Condition monitoring and diagnostics of machines. Data processing, communication and presentation [Released: 2007-07]ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems , 2007. 70p.

44. Березниченко В.О. Дослідження методів комп'ютерного моделювання ємнісних сенсорів. *XXXIX Науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. г.с. Пухова НАН України* (до 40-річчя інституту). 12 травня 2021 р., м. Київ, Україна С. 33–38.

45. Сравнение методов конечных элементов и конечных разностей. URL: <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/639-difference-between-fem-and-fdm.html#> (дата звернення: 11.04.2021).

46. 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.*, Київ, 20–21 трав. 2021. Київ: Інтерсервіс, 2021. С.199–202.

47. 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>

48. Левицький А.С., Березниченко В. О. Дослідження моделі сенсору радіального биття циліндричних поверхонь вала гідроагрегату засобами комп'ютерного моделювання. *Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : Матеріали XIX міжнародної науково-практичної конференції, 14-15 травня 2020 р., м. Київ, НТТУ КПІ, Інститут відновлювальної енергетики НАНУ, 2020. – С. 500–505.

49. ANSYS Maxwell. URL: <https://cadfem.com.ua/software/ehlektromagnetizm/ansys-maxwell/> (дата звернення 01.06.2020).

50. COMSOL Multiphysics URL: <https://www.comsol.com/> (дата звернення 01.06. 2020).

51. Abaqus URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/> (дата звернення 01.06. 2020).

52. Elcut URL: https://www.procureinc.com/manufacture/ELCUT_Uchihashi_Estec/ (дата звернення 01.06. 2020).

53. Elmer. URL: <http://www.elmerfem.org/blog/> (дата звернення 01.06. 2020).

54. Підчібій О.Є. Спеціалізована інформаційно-вимірювальна система контролю повітряного зазору між ротором та статором електричних машин. КПІ імені Ігоря Сікорського. 2020. Київ. 158 с.

55. Березниченко В. О. Розрахунок функції перетворення ємнісного сенсора радіального биття валів засобами комп'ютерного моделювання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 107–114. DOI:<https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.107>

56. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Bereznychenko V.O., Smyrnova A.M. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. No.78(2):5-18 P.173-180. (**Index in SCOPUS, Google Scholar**).

57. Zaitsev Ie.O. Levytskyi A.S. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. *Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators* (London: Intechopen) 2020pp 25-42

58. Gorbova G., Gorbov M. Meyer M. Precise capacitance calculation of sensing elements capacitive sensors by method of direct field strength determination. *Proc. Int. Conf. on FLEPS*. 2002 , Orlando, USA. P. 1239-1243

59. Bao M.H. Electrostatic driving and capacitive sensing *Handbook of Sensors and Actuators*. 2008. Vol.1. P. 139-198.

60. Gorbova G. M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor. *World Congress: Proceeding XVII IMEKO 22–27 June 2003 Dubrovnic, Croatia, 2003*. P.1965–1968.

61. Evstigneev V. V., Khomutov O. I., Gorbova G. M. Prospective directions of design and principles of calculation of non-contact capacitive microdisplacement meters *Polzunovsky Almanac*. 1999. Vol.2. pp 45-58

62. 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: 10.1007/978-3-030-82926-1_4. **Index in SCOPUS**.

63. Chen T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multi-layered dielectric structures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17, №4. P.1307–1318. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5539703.

64. Sheiretov Y., Zahn M. Modeling of spatially periodic dielectric sensors in the presence of a top ground plane bounding the test dielectric *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*. 2005. Vol.12(5). P. 993-1004.

65. Li X., Larson S., Zyuzin A., Mamishev A. V. Design principles for multicuhannel fringing electric field sensors *IEEE Sensors jornal*. 2006. Vol. 6(2). P. 434-440.

66. Chen T., Bowler N. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multi-layered dielectric structures *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17(4). P. 1307-1318.

67. 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. DOI: 10.15407/publishing2020.57.081.

68. Нестеренко А.Д. Введение в теоретическую электротехнику. Київ: Наукова думка, 1969. 352 с.

69. Baxter L.K. Capacitive Sensors: design and applications. *IEEE Press*. 1997. 320 p.

70. Baikie. D., Venderbosch E., Meyer J.A., Estrup P.J.Z., Analysis of stray capacitance in the kelvin method, *Review of Scientific Instruments*. 1991. Vol. 62. No 3. P. 725–735.

71. Webster J. G. The Measurement, instrumentation and sensors handbook. *IEEE Press*. 1999. 2630 p.

72. Березниченко В.О. Вимірювач биття циліндричних поверхонь валів гідрогенераторів із ємнісним компланарно концентричним сенсором. *I науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, м. Київ, 15 березня 2021 р. Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2021. С. 33-37.

73. Zaitsev I., Levytskyi A., Bereznichenko V. Development shaft run-out measurement transducers for powerful generators fault control system with capacitive coplanar concentric sensor. *Theory and practice of science: key aspects: Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference*. February 19-20, 2021. Rome, Italy: Dana, 2021. P. 1014-2021. DOI: 10.51582/interconf.19-20.02.2021.103.

74. CapaNCDT. Capacitive displacement sensors and systems URL: <https://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--capaNCDT--en-us.pdf>. (дата звернення 25.09.2021).

75. Гриневич Ф.Б., Сурду М.Н., Левицкий А.С.. Исследование прецизионного многосекционного емкостного датчика угловых перемещений (ЕДУ). *Техническая электродинамика*. 2003. №1. С. 72-76.

76. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А., Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 43. С. 134–136.

77. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Похибки ємнісного вимірювача зазору в гідрогенераторі. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. №44. С.50–55.

78. Bao M.H. Chapter 4 - Electrostatic driving and capacitive sensing. *Handbook of Sensors and Actuators*. 2000. Vol. 8. P. 139-198. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1386276600800183>

79. IPC-2221B. Generic Standard on Printed Board Design. 2012. 207p. URL: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf) (дата звернення 12.11. 2021).

80. ANSI/IPC A-600H. Acceptability of Printed Boards. 2010. 168p. URL: <https://www.ipc.org/TOC/IPC-A-600J.pdf> (дата звернення 12.11. 2021).

81. Яцюк Л.А., Косогін О.В., Ущাপовський Д.Ю., Лінючева О.В., Фатеев Ю.Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу: підручник. Київ: Політехніка, 2018. 330с

82. Aguilar B J. R., Beadle M., Thompson P. T. and Shelley M. W. The microwave and RF characteristics of FR4 substrates. *IEE Colloquium on Low Cost Antenna Technology*. 1998. 24 February. No. 206. P. 2/1-2/6. DOI: 10.1049/ic:19980078

83. Березниченко В.О., Підчібій О. Є. Аналіз впливу технологічних факторів на функцію перетворення компланарного ємнісного сенсора биття. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. вип. 59. С. 93–97.

84. Zaitsev I.O., Levytskyi A., Berezhnychenko V. Analysis of the technological production defects influence on response function of shaft run-out sensor for generator fault diagnosis system. *Ukraine International Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON-2021)*: Proc. of the International conference, Ukraine, Lviv, 26 – 28 August, 2021 Lviv, 2021. P. 435–438. **(Index in SCOPUS, IEEE)**

85. Гриневич Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками: учебное пособие. Київ: Наукова думка, 1987. 112с.

86. Гриневич Ф.Б., Сурду М.Н., Левицкий А.С. Емкосины. Київ: Наукова думка, 1990. 168 с.

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

88. AD7745/46 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. 2019. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (дата звернення: 20.10.2019).

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

90. MAS6512. Micro Analog System. Capacitive Sensor Signal Interface IC MAS6512. Data Sheet DA6512.000. 2012. 26 p. URL: https://www.mas-ou.com/wp-content/uploads/2017/02/DA6512_003.pdf (дата звернення 10.10. 2021).

91. Борщов П. И., Левицкий А. С. Быстродействующий измерительный преобразователь для емкостных датчиков с заземленными электродами. *Технічна електродинаміка*. 2019. №6. С. 88 – 92.

92. Борщов П.І., Левицький А.С. Вимірювальний перетворювач неелектричних величин з ємнісним сенсором з заземленими електродами: пат. 122167 Україна: МКИ G01R27/26. № а 201808319; заявл. 30.07.2018; опубл. 10.02. 2020, Бюл. №18.

93. Roth B., E.G.O GmbH. Method and apparatus for determining a capacitance and/or change in capacitance of a capacitive sensor element: United States Patent No.20120092030. Int. Cl. G01R 27/26. Appl. No. 13271/900; Date of Patent Apr. 19, 2017. 4 p.

94. CAV444 – C/V transmitter IC with adjustable output voltage for capacitive input signals. URL: https://www.analog-micro.com/_pages/ics/cav444/cav444-datasheet.pdf (дата звернення 18.03.2021)

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

96. Новик А.И., Колупаев Ю.П., Нужненко В.В., Стадник А.В. Особенности построения измерительных цепей для работы с емкостными датчиками. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 1.С. 66–70.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Zaitsev Ie., Levytskyi A., Bereznychenko 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: 10.1007/978-3-030-82926-1_4. **Index in SCOPUS**. (Особистий внесок – брала участь у визначенні впливу технології виготовлення на функцію перетворення ємнісних сенсорів, узагальненні результатів та підготовці розділу монографії).

2. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Bereznychenko V.O., Smyrnova A.M. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. No.78(2):5-18 P.173-180. **Index in SCOPUS, IF 0.408**. (Особистий внесок – брала участь в функції перетворення ємнісних сенсорів, узагальненні результатів та підготовці статті).

3. Zaitsev I., Bereznychenko V., Bajaj M., Taha I.B.M., Belkhier Y., Titko V., Kamel S. Calculation of capacitive-based sensors of rotating shaft vibration for fault diagnostic systems of powerful generators. *Sensors*. 2022. vol. 22(1634). 19 p. DOI: 10.3390/s22041634. **Index in SCOPUS, Q1, IF 3.847**. (Особистий внесок – брала участь в плануванні експерименту, визначенні функцій перетворення сенсорів, розрахунку похибок).

4. Березниченко В.О. Розрахунок функції перетворення ємнісного сенсора радіального биття валів засобами комп'ютерного моделювання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. № 58. С. 107–112. DOI: 10.15407/publishing2021.58.107.

5. Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. № 57. С. 81 – 88. (Особистий внесок – брала участь розроблення принципів побудови вторинного ємнісного вимірювача та розрахунку функції перетворення ємнісного сенсора).

6. Левицький А. С., Зайцев Є. О., Березниченко В. О. Особливості

вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валу гідроагрегату. *Гідроенергетика України*. 2019. № 1-2. С. 39 – 44. (Особистий внесок – брала участь у визначенні дефектів вузлів гідроагрегатів, які можуть бути визначенні через параметри биття валів та підготовці статті).

7. Левицький А. С., Березниченко В. О., Зайцев Є. О. Відносна та абсолютна радіальна вібрація вала вертикального гідроагрегата. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3-4. С. 68 – 72. (Особистий внесок – брала участь у визначенні критеріїв оцінки вібрації валів потужних гідроагрегатів).

8. Левицький А.С., Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Сучасні системи вібродіагностики гідроагрегатів з вимірювачами абсолютної та відносної вібрації валів. *Гідроенергетика України*. 2021. № 1-2. С. 57 – 66. (Особистий внесок – брала участь в проведенні аналітичного огляду та аналізі методів та засобів вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів).

9. Zaitsev I., Levytskyi A., Bereznichenko V. Development shaft run-out measurement transducers for powerful generators fault control system with capacitive coplanar concentric sensor. *Theory and practice of science: key aspects: Proc. of the I Int. scientific and practical conference. February 19-20, 2021. Rome, Italy: Dana, 2021. Pp. 1014 – 2021. DOI: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2021.103>.*

10. Березниченко В.О. Вимірювач биття циліндричних поверхонь валів гідрогенераторів із ємнісним компланарно концентричним сенсором. Збірник матеріалів І науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 15 березня 2021 р. , м. Київ, Україна, 2021. С.33 – 37.

11. Березниченко В.О. Дослідження методів комп'ютерного моделювання ємнісних сенсорів. Збірник матеріалів XXXIX Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (до 40-річчя інституту). 12 травня 2021 р., м. Київ Україна, 2021. С.35 – 38.

ПРОДОВЖ. ДОД. А
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Міжнародна науково-практична конференція "Theory and practice of science: key aspects" (Italy, Rome 19-20 February 2021, форма участі – публікація тез);

2. І науково-технічної конференції "молодих вчених та спеціалістів Інституту електродинаміки Національної академії наук України" (Київ, 15 березня 2021 р., форма участі – публікація тез);

3. XXXIX Науково-технічної конференції "молодих вчених та спеціалістів інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (до 40-річчя інституту)" (Київ, 12 травня 2021 р., форма участі – публікація тез)

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.

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт складено про те, на АТ «Завод «Електроважмаш» під час проектування нових і модернізації існуючих турбогенераторів (ТГ) будуть використані науково-практичні результати науково-дослідної роботи «Розвиток наукових засад методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів обладнання електростанцій» (шифр "ПАРАМЕТР", номер держреєстрації 0116U007285, науковий керівник – докт. техн. наук А.С. Левицький, відповідальний виконавець – докт. техн. наук Є.О. Зайцев, виконавець – аспірантка В.О. Березниченко), яка виконувалась в Інституті електродинаміки НАН України в 2017–2021 рр., зокрема:

- принципи побудови та структурні схеми гібридних волоконно-оптичних вимірювачів механічних параметрів потужних турбогенераторів (ТГ);
- удосконалений метод вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних ТГ;
- теорія, комп'ютерні моделі та результати практичних досліджень ємнісних сенсорів биття з різним геометриями робочих електродів;
- принципи побудови та електричні схеми електронних перетворювачів ємнісних сенсорів биття з підвищеною швидкістю;
- принципи побудови та схеми гібридних комп'ютеризованих волоконно-оптичних вимірювачів биття;
- макетний зразок ємнісного вимірювача биття з компенсаційно-мостовою схемою перетворення;
- макетний зразок електронно-оптичного перетворювача інформаційних сигналів гібридного волоконно-оптичного вимірювача биття.

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

К.О. Кобзар

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «Політон-Україна»



Клименко А.В.

«__» _____ 2021 р.

АКТ
впровадження результатів науково-дослідної роботи

«__» _____ 2021,

Чинний акт складено про те, що на ТОВ «Політон-Україна» під час модернізації засобів випробувань елементів гнучкого захисту ударного стенду будуть використані результати теоретичних та експериментальних досліджень вимірювачів биття для покращення ефективності визначення параметрів процесів, що виникають під час випробувань зразків елементів захисту на ударному стенді, які отримані д.т.н., с.н.с. Левицький А.С., д.т.н., с.н.с. Зайцев Є.О. та інж. Березниченко В.О. в рамках виконання прикладної науково-дослідної роботи «Розвиток наукових засад методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів обладнання електростанцій» (шифр "ПАРАМЕТР", номер держреєстрації 0116U007285)

Інженер-конструктор
ТОВ «Політон-Україна»

 Шпилька А.М.