

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця

на правах рукопису

МАРКОВИЧ ВІКТОР ЙОСИФОВИЧ

УДК 681.586

ДИСЕРТАЦІЯ

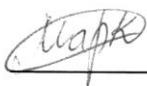
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СЕНСОРИ ТИСКУ

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології

(галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації)

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. Й. Маркович.

Науковий керівник:

Тихан Мирослав Олексійович

доктор технічних наук, професор

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Маркович В.Й. Інтелектуальні сенсори тиску – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 175 Інформаційно-вимірювальні технології (галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації). – Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розвитку принципів інтелектуалізації сенсорів, нових способів вимірювання тиску в нестаціонарних середовищах, здатних працювати в режимі реального часу з високою точністю.

Вимірювання тиску є критично важливою складовою у функціонуванні систем керування, моніторингу в таких сферах, як аерокосмічна, автомобільна, військова та фундаментальні наукові дослідження. У багатьох із цих сфер виникає потреба вимірювання швидкоплинного тиску в складних температурних умовах, де класичні сенсори та методи виявляються недостатніми — як за точністю, так і за швидкістю.

На тлі зростання вимог до метрологічної достовірності та стабільності у реальному часі, особливо актуальними стають інтелектуальні сенсори тиску. В таких пристроях фізичний сенсор тиску інтегрується з цифровими алгоритмами, що дозволяє реалізувати новий клас вимірювальних засобів.

Поточний рівень розвитку засобів вимірювання тиску свідчить, що ефективне вирішення задачі високоточного вимірювання нестаціонарного тиску можливе лише за умови комплексного підходу — поєднання новітніх методів аналізу динамічних процесів вимірювального перетворення з удосконаленням конструкції первинних перетворювачів.

Таким чином, розвиток інтелектуалізованих сенсорів тиску є не лише важливим науково-технічним завданням, але й відповіддю на реальні запити

сучасної промисловості й науки, що потребують точних, надійних та швидкодіючих вимірювальних рішень.

Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки.

У *вступі* обґрунтовано необхідність і актуальність дисертаційного дослідження, зазначено предмет та об'єкт дослідження, методологію дослідження, а також сформульовано мету, основні завдання, наукову новизну і практичну цінність здобутих наукових результатів. Підкреслено особистий внесок здобувача, надано інформацію про публікації та апробацію основних результатів дисертаційного дослідження, висвітлено відомості про їх впровадження і зазначено структуру роботи.

У *першому розділі* подано системний аналіз сучасного стану та проблем вимірювання тиску за умов температурного впливу, з особливою увагою до поведінки сенсорних елементів у нестационарних температурних полях. Розглянуто традиційні методи компенсації температурної похибки у тензорезистивних сенсорах тиску, зокрема фізико-конструктивні підходи, використання компенсаційних структур та вибір матеріалів із мінімальними температурними коефіцієнтами. Здійснено критичний огляд схемотехнічних рішень, що забезпечують температурну стабілізацію вихідного сигналу, включно з використанням термокомпенсаційних ланцюгів, алгоритмічної корекції та цифрової обробки даних у мікропроцесорних системах.

Аналіз показав, що традиційні методи компенсації температурної похибки є ефективними лише в обмежених умовах експлуатації, а при наявності динамічного впливу температури значно знижується точність вимірювань.

Показано, що перспективним шляхом до вирішення актуальних завдань вимірювання нестационарного тиску є шлях інтелектуалізації сенсорів тиску.

За результатами аналізу сформульовано наукову гіпотезу, згідно з якою перспективним напрямом є розробка нової архітектури інтелектуального сенсора

тиску, здатного компенсації температурного впливу нестационарних середовищ. Такий сенсор має об'єднувати конструктивну стійкість, чутливу мембранну структуру, мікропроцесорний блок обробки даних і алгоритмічну модель компенсації в умовах реального середовища.

Отримані результати першого розділу слугували теоретичним і методологічним підґрунтям для формування технічних вимог до сенсора, а також визначення напрямів подальших експериментальних і конструкторських досліджень.

У *другому розділі* запропоновано класифікацію інтелектуальних сенсорів тиску, що охоплює апаратну, програмну інтелектуалізацію, та їх поєднання.

На підставі аналізу динамічних характеристик мембрани побудовано динамічну модель у вигляді інтегрального рівняння, що відображає причинно-наслідкові зв'язки між прикладеним тиском і відгуком сенсора. Розв'язання оберненої задачі вимірювання дало змогу сформулювати принципово новий метод цифрового фільтрування сигналів, який забезпечує програмну інтелектуалізацію сенсорів тиску та дозволяє відтворювати швидкоплинні зміни тиску в реальному часі в межах заданої статичної точності.

Розроблений алгоритм протестовано на апробованих моделях тестових сигналів, що відтворюють умови експлуатації сенсорів. Результати моделювання засвідчили високу ефективність та стійкість запропонованого методу щодо впливу нестационарних динамічних компонент, шумів.

Особливу увагу приділено дослідженню термомеханічних явищ у мембрані сенсора в умовах дії нестационарного термовпливу. На основі розв'язання осесиметричного рівняння теплопровідності з урахуванням теплообміну на робочих поверхнях та по периметру мембрани визначено просторово-часову еволюцію температурного поля. Показано, що температурні градієнти по радіусу та товщині мембрани спричиняють її термопрогин і

зумовлюють появу додаткових динамічних коливань, які істотно впливають на точність перетворення тиску.

Запропоновано рішення апаратної інтелектуалізації, орієнтовані на мінімізацію температурних похибок. Зокрема, обґрунтовано застосування сенсорної конструкції з компенсаційним кільцем із нітинолу, яке забезпечує термокомпенсоване заземлення мембрани та знижує термонапруження більш ніж у 30 разів. Розроблено аналітичні залежності, що визначають оптимальне співвідношення параметрів мембрани та компенсаційного елемента. Визначено раціональну схему розташування тензорезисторів, яка забезпечує можливість незалежного вимірювання згинальних і температурно зумовлених деформацій та корекції сигналу в реальному часі.

Розроблено метод самодіагностики сенсорів тиску, побудований на аналізі інтегральної діагностичної функції симетрії мостової схеми. Метод забезпечує оперативне виявлення деградації або виходу з ладу окремих тензорезисторів без порушення безперервності вимірювального процесу.

У *третьому розділі* розглядається процес присвоєння метрологічних характеристик тензорезистивним сенсорам тиску в умовах масового виробництва. Розглянуто основні етапи метрологічної атестації сенсорів, включаючи їх градування, визначення класу точності. Особливу увагу приділено групуванню, де ключовим завданням є забезпечення однорідності градувальних характеристик сенсорів одного типоміналу, в межах допустимих відхилень.

Представлено методику групування сенсорів за класом точності та параметрами статичних характеристик із використанням показників однорідності, таких як евклідові відстані між статичними характеристиками сенсорів та внутрішньогрупова дисперсія, що дозволяє формувати групи з максимально подібними характеристиками.

Реалізовано запропоновану методику групування сенсорів із застосуванням нейронних мереж (багатошарових персептронів), для автоматизації процесу групування. Наведено архітектуру нейронної мережі, включно з прихованими та вихідними шарами, функцією активації ReLU для нелінійного перетворення сигналів та функцією Softmax для оцінки ймовірності належності сенсора до конкретної групи. Описано процес навчання мережі, використання алгоритмів зворотного поширення помилки та методів регуляризації для забезпечення стабільності та узагальнюваності моделі на різних партіях сенсорів.

У *четвертому розділі* проведено повний комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на визначення статичних, динамічних та інтелектуальних характеристик тензорезистивного сенсора тиску. За результатами калібрування встановлено лінійну статичну характеристику перетворення $U(p) = 4,98p$, що підтверджує лінійність сенсора в діапазоні $0 \dots 0,25$ МПа. Статистична обробка даних восьми циклів градуювання показала $M(\delta)=0,0886$, $\sigma(\delta)=0,0516$ та основну похибку $\delta = 0,1548$, що відповідає класу точності 0,2.

На основі математичного моделювання процесів деформації мембрани при дії реального й ідеального стрибка тиску отримано аналітичні вирази для оцінювання похибки динамічного тестування та виведено критерій достовірності $t_1 < (8 \cdot \delta_{\max})/\omega$. Це дозволило кількісно обґрунтувати вимоги до тривалості фронту тестового впливу та визначити межі застосовності різних типів імпульсних методів.

Розроблено та створено експериментальну установку для динамічного калібрування сенсорів тиску, що забезпечує генерацію коротких імпульсів із тривалістю фронту $t_1 = 2$ мкс. Параметри тестового імпульсу задовольняють отриманим теоретичним обмеженням, що забезпечує можливість достовірного визначення динамічних характеристик. У процесі випробувань встановлено

власну частоту сенсора 39,57 кГц і час загасання 80 с, що узгоджується з теоретичним значенням 40 кГц та підтверджує коректність методики.

Експериментальна перевірка апаратної інтелектуалізації показала, що сенсор стабільно функціонує при одночасній дії різких стрибків тиску і температури, а максимальна відносна похибка не перевищує 3 %. Це демонструє ефективність закладених конструктивних рішень та підвищення термостійкості сенсора.

Дослідження програмної інтелектуалізації на зашумлених експериментальних сигналах підтвердило її здатність забезпечувати відновлення динамічних характеристик навіть за дії широкосмугового та гармонічного шуму. Максимальна похибка відновлення становила 0,2 %, середня — 0,05–0,1 %, що узгоджується з класом точності сенсора і доводить ефективність застосованого алгоритмічного підходу.

Ключові слова: тиск, сенсор тиску, інтелектуальний сенсор, чутливий елемент, мембрана, температура, термонапруження, температурна похибка, нестационарність, похибка вимірювання, динамічна похибка, коригування похибки, метрологічні характеристики.

ABSTRACT

Markovych V.Y. Intelligent pressure sensors. – Qualification research paper as a manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 175 – Information and Measurement Technologies (field of knowledge 17 – Electronics, Automation and Electronic Communications). – Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

The dissertation is dedicated to the development of principles for the intellectualization of sensors, new methods for measuring pressure in non-stationary environments, capable of operating in real-time with high accuracy.

Pressure measurement is a critically important component in the operation of control and monitoring systems in such fields as aerospace, automotive engineering, defense, and fundamental scientific research. In many of these areas, there is a need to measure rapidly changing pressure under complex temperature conditions, where classical sensors and methods prove insufficient—both in terms of accuracy and response speed.

Given the increasing requirements for real-time metrological reliability and stability, intelligent pressure sensors are becoming particularly relevant. In such devices, the physical pressure sensor is integrated with digital algorithms, enabling the implementation of a new class of measurement instruments.

The current state of pressure-measurement technologies indicates that the effective solution to the problem of high-accuracy measurement of non-stationary pressure is possible only through a comprehensive approach—combining advanced methods of analyzing the dynamic processes of measurement conversion with improvements to the design of primary transducers.

Thus, the development of intelligent pressure sensors is not only an important scientific and technical task but also a response to the real demands of modern industry and science, which require accurate, reliable, and high-speed measurement solutions.

The dissertation contains an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, and appendices.

The **introduction** substantiates the necessity and relevance of the research, outlines the subject and object of study, the research methodology, and formulates the aim, key tasks, scientific novelty, and practical significance of the obtained results. The author's personal contribution is emphasized, information about publications and the approbation of the main results is provided, as well as data on their implementation and the structure of the dissertation.

The first chapter presents a systematic analysis of the current state and problems of pressure measurement under temperature influence, with particular attention to the behavior of sensing elements in non-stationary temperature fields. Traditional methods of temperature-error compensation in piezoresistive pressure sensors are considered, including physical and design approaches, the use of compensation structures, and the selection of materials with minimal temperature coefficients. A critical review of circuit-design solutions ensuring temperature stabilization of the output signal is provided, including thermal-compensation networks, algorithmic correction, and digital signal processing in microprocessor systems.

The analysis showed that traditional temperature-compensation methods are effective only under limited operating conditions, and in the presence of dynamic temperature variations, measurement accuracy is significantly reduced.

It is shown that the most promising direction in solving the problem of measuring non-stationary pressure is the development of intelligent pressure sensors.

Based on the analysis, a scientific hypothesis is formulated, according to which a promising direction is the development of a new architecture of an intelligent pressure sensor capable of compensating temperature influences in non-stationary environments. Such a sensor must combine structural robustness, a sensitive membrane element, a microprocessor-based data-processing unit, and an algorithmic

compensation model adapted to real operating conditions

The results of the first chapter served as the theoretical and methodological basis for forming the technical requirements for the sensor and for determining the directions of further experimental and design research.

The second chapter proposes a classification of intelligent pressure sensors, covering hardware, software, and combined forms of sensor intellectualization.

Based on an analysis of the dynamic characteristics of the membrane, a dynamic model in the form of an integral equation was constructed, representing the causal relationships between the applied pressure and the sensor response. Solving the inverse measurement problem made it possible to develop a fundamentally new method of digital signal filtering that provides software-level intellectualization of pressure sensors and enables real-time reconstruction of rapidly varying pressure within the limits of static accuracy.

The developed algorithm was tested on verified sets of test signals that reproduce real operating conditions of the sensors. The results demonstrated high effectiveness and robustness of the proposed method against non-stationary dynamic components and noise.

Special attention is given to the study of thermomechanical effects in the sensor membrane under non-stationary thermal loads. Based on a solution to the axisymmetric heat-conduction equation with boundary heat-exchange conditions, the spatiotemporal evolution of the temperature field was determined. It is shown that radial and thicknesswise temperature gradients cause thermal deflection of the membrane and induce additional dynamic oscillations, which significantly affect pressure-measurement accuracy.

Hardware-level intellectualization solutions aimed at minimizing temperature-induced errors are proposed. In particular, the use of a sensor design with a nitinol compensation ring is substantiated; this structure provides thermocompensated clamping of the membrane and reduces thermally induced stresses by more than 30

times. Analytical relationships defining the optimal ratio between membrane and compensation-ring parameters are derived. A rational strain-gauge layout is proposed to independently measure bending-related and temperature-induced strains and correct the output signal in real time.

A method of self-diagnosis for pressure sensors is developed, based on analyzing an integral diagnostic function of Wheatstone-bridge symmetry. The method allows real-time detection of degradation or failure of individual strain gauges without interrupting the measurement process.

The third chapter examines the process of assigning metrological characteristics to piezoresistive pressure sensors in mass production. The main stages of sensor metrological certification are considered, including calibration and accuracy-class determination. Special attention is devoted to grouping, where the key task is ensuring homogeneity of calibration characteristics among sensors of the same typenominal within permissible deviations.

A method for grouping sensors by accuracy class and static-characteristic parameters is presented using homogeneity indicators such as Euclidean distances between the static characteristics and intragroup variance, enabling the formation of groups with maximally similar characteristics.

The proposed grouping method is implemented using neural networks (multilayer perceptrons) to automate the grouping process. The neural-network architecture is described, including hidden and output layers, the ReLU activation function for nonlinear transformations, and the Softmax function for estimating the probability of a sensor belonging to a specific group. The training process, error-backpropagation algorithms, and regularization methods used to ensure model stability and generalization across different sensor batches are presented.

The fourth chapter presents a comprehensive set of experimental studies aimed at determining the static, dynamic, and intelligent characteristics of the piezoresistive pressure sensor. Calibration results showed a linear static characteristic of conversion

$U(p) = 4.98p$, confirming linearity within the range 0–0.25 MPa. Statistical processing of eight calibration cycles yielded $M(\delta)=0.0886$, $\sigma(\delta)=0.0516$, and a maximum error $\delta=0.1548$, corresponding to accuracy class 0.2.

Based on mathematical modeling of membrane deformation under real and ideal pressure steps, analytical expressions for estimating dynamic-testing error were obtained, and a reliability criterion $t_1 < (8 \cdot \delta_{max})/\omega$ was derived. This allowed quantitative justification of the requirements for the rise time of test impulses and the applicability limits of various impulse-testing methods.

An experimental setup for dynamic calibration of pressure sensors was developed, capable of generating short impulses with a rise time of $t_1 = 2 \mu s$. The test-pulse parameters satisfy the theoretical constraints, enabling reliable determination of dynamic characteristics. Experimental tests established the sensor's natural frequency as 39.57 kHz and its decay time as 80 μs , which agrees with the theoretical value of 40 kHz and confirms the correctness of the methodology.

Experimental verification of hardware-level intellectualization showed that the sensor functions stably under simultaneous rapid pressure and temperature jumps, with a maximum relative error not exceeding 3%. This demonstrates the effectiveness of the implemented structural solutions and the improved thermal stability of the sensor.

Studies of software-level intellectualization using noisy experimental signals confirmed its ability to restore dynamic characteristics even under broadband and harmonic noise. The maximum reconstruction error was 0.2%, with an average error of 0.05–0.1%, which corresponds to the sensor's accuracy class and validates the effectiveness of the algorithmic approach.

Keywords: pressure, pressure sensor, intelligent sensor, sensing element, membrane, temperature, thermal stress, temperature error, non-stationarity, measurement error, dynamic error, error correction, metrological characteristics.

СПИСОК ПРАЦЬ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Tykhan M., Dilay I., Markina O., **Markovych V.** Investigation of thermomechanical processes in miniature membrane elastic elements / Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering - 2020 - Volume 98 - Issue 1 - Pages 24-31. DOI: [10.5604/01.3001.0014.0814](https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0814)

2. Tykhan M., Repetylo T., Dilay I., **Markovych V.** Study of the influence of a fast-changing temperature on metrological characteristics of the tensorresistive pressure sensor / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2018 - Volume 1 - Issue 7-91 - Pages 30-37. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.123391](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123391)

3. **Маркович В.**, Тихан М. Використання штучних нейронних мереж для опрацювання даних вимірювання тиску / Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 2024 - №1, Сторінка 160-165, DOI: [10.31891/2219-9365-2024-77-20](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-20)

4. Tykhan M., **Markovych V.**, Heneralov V., Milian M., Device for dynamic calibration of pressure sensors / Metrology and measurement systems, Vol. 31 (2024), No. 4, DOI: [10.24425/mms.2024.150293](https://doi.org/10.24425/mms.2024.150293)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. **Маркович В.**, Тихан М. Застосування ншм для коригування температурної похибки сенсора тиску за умов нестационарного термовпливу. VI міжнародної науково-практичної конференції “Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи” – Україна, Львів, 16–17 листопада 2023 року – Сторінка 245

2. **Markovych V.**, Tykhan M., Milian M. The change in the dynamics of the membrane of a piezoresistive pressure sensor during stationary processes of temperature change. XX International Scientific and Practical Conference “Problems

of solving global problems of humanity” – Greece, Athens, May 20-22, 2024 – Pages 353-356.

3. **Markovych V.**, Tykhan M., Markovych R. Analysis of hardware architecture of intelligent pressure sensors. XX International Scientific and Practical Conference “Trends in the development of quality training of future specialists” - Oslo, Norvegia, May 21-24, 2024 – Pages 308-310. DOI: [10.46299/ISG.2024.1.20](https://doi.org/10.46299/ISG.2024.1.20)

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	17
Вступ.....	18
Розділ 1. Аналіз проблеми. задачі дослідження.....	24
1.1. Специфіка вимірювальної задачі.....	24
1.1.1. Проблеми вимірювання тиску в умовах впливу змінної температури ...	26
1.2. Існуючі сенсори тиску та методи вимірювання.....	29
1.2.1. Відомі методи вимірювання нестационарного тиску.....	34
1.2.2. Відомі методи вимірювання тиску за умов температурного впливу.....	38
1.3. Сучасні тенденції розвитку інтелектуальних сенсорів тиску.....	41
1.4. Висновки Розділу 1.....	43
Розділ 2. Інтелектуалізація сенсорів тиску.....	44
2.1. Принципи інтелектуалізації сенсорів тиску.....	44
2.2. Реалізація програмної інтелектуалізації сенсорів нестационарного тиску для вимірювання в реальному часі. Розроблення способу вимірювання.....	45
2.2.1. Динамічна модель мембранного сенсора тиску.....	45
2.2.2. Спосіб вимірювання нестационарного тиску в реальному часі.....	52
2.2.3. Способи фільтрації вихідного сигналу сенсора.....	55
2.2.4. Теоретична апробація методу фільтрації на моделях вхідних сигналів.....	59
2.2.5. Аналіз потенційної швидкодії методу.....	67
2.3. Реалізація апаратно-програмної інтелектуалізації сенсора тиску для умов з нестационарним термовпливом.....	67
2.3.1. Дослідження термомеханічних процесів у мембрані сенсора тиску.....	67
2.3.2. Спосіб вимірювання тиску в умовах нестационарного термовпливу.....	78
2.3.3. Розрахунок співвідношення параметрів компенсуючого кільця і мембрани і методу їх з'єднання.....	85
2.4. Самодіагностика тензорезисторів в сенсорі тиску.....	92
2.5. Висновок до розділу 2.....	96

Розділ 3. Присвоєння метрологічних характеристик тензорезистивним сенсорам тиску під час масового виробництва.....	99
3.1. Загальні поняття при метрологічній атестації сенсорів.....	100
3.2. Встановлення статичних характеристик і параметрів точності сенсорів..	101
3.3. Групування сенсорів тиску.....	104
3.4. Автоматизація процесу групування сенсорів тиску.....	108
3.5 Висновки до розділу 3.....	112
Розділ 4. Експериментальні дослідження.....	114
4.1. Встановлення класу точності сенсора тиску.....	114
4.2 Розроблення методу тестування сенсорів тиску.....	118
4.3. Розробка установки для створення тестового впливу для динамічного тестування сенсорів тиску.....	125
4.4. Встановлення динамічних харатеристик тензорезистивного сенсора тиске.....	127
4.5. Експериментальна перевірка ефективності апаратної інтелектуалізації.....	130
4.6. Експериментальна перевірка ефективності програмної інтелектуалізації.....	132
4.5. Висновки до розділу 4.....	135
Висновки.....	137
Список використаної літератури	140
Додатки.....	151

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЕ - пружний елемент,

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика,

ФЧХ - фазо-частотна характеристика,

АЦП - аналого-цифровий перетворювач,

КТР - коефіцієнт температурного розширення,

ІоТ - Інтернету речей ,

ЗНМ - Згорткові нейронні мережі

ІІ - штучний інтелект

ІІНМ - штучна нейронна мережа

ВСТУП

Актуальність роботи. Тенденції сучасного розвитку високотехнологічної промисловості — зокрема в галузях аерокосмічної техніки, енергетики, автомобілебудування та наукових досліджень — вимагають впровадження інноваційних підходів до моніторингу та контролю стану складних технічних систем. Одним із ключових напрямів у даному контексті виступає вимірювання тиску, особливо в умовах нестационарного впливу.

Попри широкий асортимент наявних сенсорів тиску, більшість із них не забезпечують достатнього рівня точності. Традиційні сенсори характеризуються обмеженими показниками точності та швидкодії, що є критично важливим для вирішення багатьох прикладних задач.

Для вирішення цих викликів необхідним є перехід від класичних вимірювальних сенсорів до інтелектуальних сенсорів тиску, які інтегрують фізичні перетворювачі з програмними алгоритмами обробки у режимі реального часу.

В результаті, інтелектуалізація сенсорів тиску є не лише перспективним напрямом розвитку вимірювальної техніки, а й об'єктивною необхідністю для забезпечення надійної та високошвидкісної роботи критичних технічних систем у складних динамічних умовах. У зв'язку з викладеним дослідження, спрямоване на розробку інтелектуалізації сенсорів тиску та підвищення їх точності в умовах нестационарних впливів, є актуальним, своєчасним і має важливе прикладне значення.

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

Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри інтелектуальної мехатроніки та роботики Національного університету «Львівська політехніка»: "Теоретичні та прикладні основи метрології і вимірювань в ІТ (інформаційно-вимірювальних, кібер-фізичних, робототехнічних та інших системах) та у межах пріоритетних напрямків

розвитку науки і техніки України, визначених Законами України “Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки” та “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», згідно плану виконання науково-дослідної роботи МОН України за фаховим напрямом “Метрологія та інформаційно вимірювальна техніка”

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи полягає у підвищенні точності і ефективності вимірювання нестационарного тиску в умовах змінних термовпливів шляхом інтелектуалізації тензорезистивних сенсорів.

Для досягання поставленої мети, необхідно було розв'язати такі наукові **завдання:**

- проаналізувати особливості вимірювання нестационарного тиску та дослідити сучасні сенсори й методи його вимірювання, з врахування сучасних тенденцій інтелектуалізації;
- розробити математичні моделі динаміки сенсора та підходи до вимірювання нестационарного тиску з врахуванням термовпливів, включно з фільтрацією та обробкою сигналів у реальному часі;
- створити конструктивно-функціональні рішення для сенсорів, стійких до термомеханічних збурень, з урахуванням моделювання теплопередачі та термопружності;
- запропонувати методику присвоєння метрологічних характеристик сенсорам у серійному виробництві шляхом групування за класом точності та статичними характеристиками;
- розробити метод динамічного тестування тензорезистивних сенсорів тиску в умовах реального часу та експериментальну установку для його реалізації.

Об'єкт дослідження - процес вимірювання нестационарного тиску в умовах змінних термовпливів.

Предмет дослідження – тензорезистивні сенсори нестационарного тиску і методи його вимірювання.

Методи дослідження. Дослідження виконано із застосуванням комплексного підходу, що поєднує теоретичні, чисельні та експериментальні методи. Для побудови динамічних моделей тензорезистивних сенсорів та розробки методів вимірювання нестационарного тиску в режимі реального часу використовувалися методи математичної фізики, теорії пружності та коливань. Дослідження термомеханічних процесів, що відбуваються в конструктивних елементах сенсорних пристроїв, а також розробка методів вимірювання тиску в умовах нестационарних термовпливів проводились з використанням підходів теплопровідності, термопружності, теорії диференціальних рівнянь та числового моделювання. Для удосконалення процедур метрологічної атестації застосовувалися методи теорії похибок та статистичного аналізу. Методи інтелектуальної обробки сигналів і автоматичного групування сенсорів базувалися на алгоритмах цифрової фільтрації, оптимізації та машинного навчання.

Наукова новизна. У дисертаційному дослідженні отримані такі наукові результати:

1. Вперше сформульовано принципи інтелектуалізації сенсорів тиску, які поділяються на: апаратну (конструкційну) та програмну інтелектуалізацію, а також їх інтеграцію в апаратно-програмну інтелектуалізацію.

2. Набули розвитку теоретичні аспекти динаміки вимірювального перетворення сенсорами тиску, що дозволило розробити спосіб фільтрації вихідного сигналу, що загалом реалізує програмну інтелектуалізацію сенсорів та забезпечує можливість вимірювання нестационарного тиску в реальному часі в межах статичної похибки.

3. Запропоновані нові підходи для вимірювання тиску в умовах нестаціонарних термовпливів, що дозволило розробити спосіб автоматичного коригування температурної похибки сенсора при нестаціонарному термовпливі з реалізацією у реальному часі і розробити конструкцію сенсора тиску для втілення способу, що загалом створює основу для побудови інтелектуальних сенсорів тиску нового покоління.

4. Запропоновано метод апаратної інтелектуалізації сенсорів шляхом їхньої самодіагностики, що базується на оцінці симетрії мостової схеми через інтегральну діагностичну функцію, який дозволяє в режимі реального часу виявляти та локалізувати деградацію або відмову окремих тензорезисторів, підвищуючи їхню функціональну надійність.

5. Запропоновано підхід для ідентифікації метрологічних характеристик сенсорів тиску в умовах масового виробництва, який полягає у автоматизованому групуванні тензорезистивних сенсорів за близькістю статичних характеристик з використанням багатосарової нейронної мережі, що підвищує ефективність виробництва сенсорів.

6. Розроблено теоретичні основи і створено метод динамічного тестування сенсорів тиску та розроблено установку для реалізації методу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці нового тензорезистивного сенсора, який забезпечують точне вимірювання нестаціонарного тиску за умов змінних термовпливів у реальному часі. Запропоновані математичні моделі, методи обробки сигналів і процедури метрологічної атестації дозволяють підвищити точність і надійність вимірювань, що робить можливим їхнє застосування у високоточних і швидкодіючих системах керування. Розроблений метод динамічного тестування та експериментальна установка сприяють впровадженню ефективних технологій контролю якості сенсорів під час виробництва та експлуатації. Це відкриває перспективи для широкого використання запропонованих рішень у промислових

і технологічних процесах із жорсткими вимогами до точності і стабільності вимірювань.

Використання результатів дослідження. Результати отримані в ході дисертаційного дослідження, успішно впроваджені і застосовуються в ТзОВ “Елпор Інжиніринг Юкреін”, м. Львів, Акт про впровадження від 14.04.2025 р.; ТзОВ “Спектографіка”, м. Львів, Акт про впровадження від 29.04.2025 р.; ПП “Захід-Львів” м. Львів, Акт про впровадження від 06.05.2025 р. у навчальному процесі та при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі «Інтелектуальної мехатроніки та роботи», Національного університету «Львівська політехніка», Акт про впровадження від 19.06.2025 р.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто розроблено ключові ідеї та отримано основні наукові результати. З робіт що виконанні у співавторстві використано результати, що були отримані здобувачем особисто. У роботах [1,2] що виконувались у співавторстві здобувач брав участь у визначенні задач, [3] визначеннях цілей та задач дослідження, моделювання штучної нейронної мережі, [4] розробленні методу тестування а також його експериментальній перевірці та реалізації результатів досліджень. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить провідна роль у формуванні наукових ідей, розробці підходів та інтерпретації результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації були апробовані на міжнародних науково-практичних конференціях, а саме: “Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи” – Україна, Львів, 16–17 листопада 2023; XX International Scientific and Practical Conference “Problems of solving global problems of humanity” – Greece, Athens, May 20-22, 2024; XX International Scientific and Practical Conference “Trends in the development of quality training of future specialists” - Oslo, Norvegia, May 21-24, 2024.

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковані у **7** наукових працях, з яких **3** статті – у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних **Scopus**, **1** стаття – у науковому фаховиому виданні України, **3** публікацій – у матеріалах міжнародних і українських наукових конференцій.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається із анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків списку використаних джерел, що налічує 118 найменувань та додатків. Основна частина роботи займає 158 сторінок тексту, на яких представлено 57 малюнки, та формули. Текст роботи виконано українською мовою.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вимірювання тиску рідин чи газів є однією з ключових процедур у багатьох технічних системах, включаючи аерокосмічну промисловість, енергетичних системах, автоматизованих виробничих процесах і транспортній інфраструктурі. Особливої важливості набуває вимірювання нестационарного тиску, у системах, де необхідна висока точність для забезпечення безпеки, ефективності та надійності їх функціонування. У таких галузях, як авіація та космонавтика, точні вимірювання тиску є важливим елементом для коректного функціонування бортових систем управління, двигунів та інших критичних елементів. Технічні системи повинні забезпечувати не лише точність, але й надійність при вимірюванні тиску, щоб оперативно реагувати в реальному часі і підтримувати стабільність роботи всіх підсистем [1].

Однак, попри значний прогрес у вимірювальних технологіях, існують серйозні труднощі, пов'язані з вимірюванням нестационарного тиску. Однією з проблем є забезпечення необхідної точності вимірювань в реальному часі та в умовах температурних впливів[2]. Існуючі типи такі як п'єзоелектричні, ємнісні та тензометричні сенсори, мають низку обмежень, зумовлених їх конструктивними та технологічними особливостями, які визначають точність вимірювань, особливо в умовах температурних впливів і швидких змін тиску. Це ставить нові виклики для розвитку новаторських підходів до проектування сенсорів, що повинні забезпечити більшу точність і стабільність вимірювань за змінних умов експлуатації [3].

1.1. Специфіка вимірювальної задачі

Розвиток сучасних промислових технологій супроводжується зростанням складності виробничих процесів, що висуває специфічні вимоги до засобів вимірювання. Однією з ключових задач є забезпечення надійного та точного вимірювання швидкозмінного тиску в умовах термовпливу, з обов'язковою

реалізацією вимірювання в режимі реального часу.

У таких експлуатаційних умовах вхідна інформація про стан середовища здебільшого обмежується граничними значеннями основних параметрів (тиск, температура тощо), тоді як характер їхньої зміни в часі залишається невизначеним або випадковим. Вплив змінних температур, динамічного тиску та конструктивних обмежень ускладнює моделювання сенсора, що обумовлює необхідність застосування гнучких технічних рішень спрямованих для забезпечення стабільності його функціонування в заданому діапазоні робочих режимів.

У межах одного вимірювального процесу тиск може змінюватися за складною часовою функцією: від різких імпульсних збурень (ударного типу) з можливими повтореннями, до згладжених коливань із сталою або змінною частотою. Можливе також виникнення квазістатичних ділянок, протягом яких тиск практично не змінюється. Такі режими можуть чергуватися в довільному порядку, супроводжуючись амплітудними варіаціями, що унеможлиблює їх однозначну класифікацію.

Нестаціонарний тиск, окрім часової змінності, характеризується значною різноманітністю форм. За певних умов нестаціонарний тиск може набувати пульсуючого, полігармонічного, стрибкоподібного характеру або змінюватися за довільними законами. У багатьох практичних застосуваннях — зокрема в авіаційній, ракетно-космічній техніці, силових установках, військових та експериментальних системах — амплітудні значення тиску можуть досягати десятків мегапаскалів.

Загалом, нестаціонарність вимірювального середовища зумовлена одночасною дією змінного тиску та температури. Враховуючи це, можна виділити кілька характерних комбінацій умов експлуатації сенсорів:

- суттєво нестационарні тиск і температура (поєднання ударних і полігармонічних навантажень з квазістатичними ділянками тиску і температури);
- нестационарні тиск в поєднанні з температурою ударного характеру;
- нестационарні тиск та температура полігармонічним характером;
- нестационарний тиск і квазістационарна та високоамплітудна температура;
- квазістационарний тиск і значно нестационарна температура;
- змінний тиск і температура, за відомими законами;
- “слідкуючий” характер тиску в умовах неоднорідного температурного поля (коли на фоні високої амплітуди основного тиску необхідно реєструвати його незначні відхилення, які можуть відзначатися більшою нестационарністю порівняно з основним процесом.)

Крім того, у процесі вимірювання можливе виникнення стаціонарних ділянок, на яких тиск залишається практично незмінним упродовж певного інтервалу часу.

1.1.1. Проблеми вимірювання тиску в умовах впливу змінної температури.

Однією з ключових особливостей функціональних середовищ у сучасних технічних системах є великі нестационарні температури. Розглянемо особливості вимірювання тиску в таких умовах.

Кожен компонент сенсора піддається впливу температури у різних ступенях. Зі стаціонарним характером температури не виникає особливих проблем як теоретичного, так і експериментального характеру у встановленні наслідків цього впливу. Однак, у разі нестационарності термічного впливу виникають інші якісно завдання.

Оскільки механічні пружні елементи виступають як первинні перетворювачі, вони зазнають впливу різних дестабілізуючих факторів вимірювального середовища. Одним із таких факторів є температура. Під впливом температури у пружних елементах відбуваються термомеханічні процеси, що призводить до виникнення температурних похибок.[4,...6].

Дія нестаціонарної температури на ці пружні елементи призводить до значних термонапружень, які змінюються з часом [7,9]. Наприклад, під дією термоудару напруження в пружному елементі можуть змінюватись з часом навіть до зміни їхнього знаку. Такі явища роблять статичні та динамічні характеристики змінними, що ускладнює вимірювання та призводить до появи складних похибок сенсора.

За наявності впливу термонапружень елементи сенсора тиску можуть зазнавати термодеоформацій, що безпосередньо впливають на параметри тензорезисторів. Це пов'язано з температурною залежністю геометричних і фізико-механічних властивостей матеріалів, з яких виготовлено як пружні елементи, так і тензорезистивні структури. Внаслідок теплового розширення або стискання, зумовленого ненульовим коефіцієнтом лінійного теплового розширення, в сенсорі виникають додаткові деформації, що не пов'язані з дією вимірюваного тиску.

Більш того, рівень термодеоформацій або термонапружень може перевищувати деформації пружного елемента, що виникають внаслідок вимірюваної величини. Це означає, що тензорезистори реагують на геометричну суму двох нестаціонарних процесів: інформативного - деформацію від тиску і спотворюючого - деформацію від температури.

Отже, кожен з вищезазначених факторів, а також їх поєднання, призводять до складності вимірювального перетворення і динамічної температурної похибки. З практики вимірювань відомо, що амплітуда такої похибки у деяких випадках може сягати десятків відсотків. У зв'язку з цим, вимірювання тиску в

реальному часі у сучасних вимірювальних системах стає досить складною проблемою.

Зазначимо, при вимірюванні тиску в умовах нестаціонарних термовпливів виникає ще одна проблема. Суть її полягає в тому, що термомеханічні процеси в конструкційних елементах, які не включені до складу вимірювального ланцюга, мають також значний вплив на вимірювальне перетворення.

Конструкції сучасних сенсорів тиску передбачає закріплення пружних елементів у масивних корпусах. Внаслідок цього, термомеханічні процеси, що мають місце в корпусі та пружних елементах під час нестаціонарної температури, мають відмінний перебіг через геометричні форми та фізико-механічні властивості корпусу. Ця різниця впливає на динаміку пружних елементів і, відповідно, на вимірювальне перетворення у цілому.

Нестационарна температура суттєво впливає на роботу механоелектричних перетворювачів - тензорезисторів, особливо напівпровідникових [4–10]. Попри те, що ці ефекти вивчаються в межах фізики напівпровідників, вплив температури значною мірою зумовлений фізико-конструктивними особливостями сенсорів. Це, своєю чергою, впливає на точність вимірювання тиску в умовах термовпливів.

Загалом, для успішного вимірювання тиску в умовах нестаціонарних температур необхідно вирішити кілька ключових завдань:

По-перше, варто виділити типи сенсорів, які мають оптимальні конструкційні, технологічні та фізичні характеристики для роботи при термовпливах. Ці сенсори можуть слугувати базою для розробки методів та засобів, що забезпечують можливість вимірювання тиску у визначених умовах експлуатації.

По-друге, необхідно отримати достовірні моделі термомеханічних процесів у пружних елементах і корпусному оформленні. На основі цих моделей

можна розробити ефективні методи вимірювання тиску при нестационарних термовпливах.

1.2. Існуючі сенсори тиску та методи його вимірювання

Тензорезистивні сенсори тиску широко використовуються в сучасних вимірювальних системах завдяки поєднанню високої чутливості, надійності та здатності працювати в складних умовах експлуатації. Їх ключова перевага полягає в можливості інтеграції з мікроелектронними компонентами, що дозволяє створювати компактні, ефективні пристрої. Тензорезистори чутливо реагують на малі деформації, що дає змогу точно фіксувати зміни тиску навіть за короткий проміжок часу.

Крім того, такі сенсори характеризуються достатнім температурним діапазоном роботи, що забезпечує їх застосування в автомобілебудуванні, аерокосмічній техніці, медичній діагностиці та промисловій автоматизації. У літературі описано значну кількість конструктивних варіацій тензорезистивних сенсорів, серед яких можна виокремити моделі з напівпровідниковими тензорезисторами і фольговими. Сенсори з напівпровідниковими тензорезисторами на основі кремнію характеризуються найвищою ефективністю у різноманітних сферах застосування [10,..., 14].

Сьогодні, крім потреби у високій точності вимірювань, набуває дедалі більшої актуальності необхідність збільшення ресурсу роботи та довготривалої стабільності характеристик. Це особливо важливо для систем вимірювання в енергетиці та аерокосмічній галузі, де заміна несправних елементів може призвести до часткової або повної зупинки контрольованих об'єктів. У випадку сенсорів тиску, забезпечення довготривалої стабільності характеристик в основному залежить від впливу двох основних дестабілізуючих факторів - температури і вібрації.

У практиці вимірювань застосовується різноманітні сенсори тиску, кожен із яких відрізняється конструкцією та призначенням [15–17]. Водночас, незважаючи на різноманітність, ці сенсори розвиваються у відповідності з загальними технологічними тенденціями, які визначають сучасні підходи до проєктування та вдосконалення конструкцій сенсорів.

Конструкції тензорезистивних сенсорів змінного тиску можна розділити на наступні два типи:

Перший тип - це сенсори з одним пружним елементом у формі мембрани, яку жорстко фіксують в корпусі. На поверхні цієї мембрани спеціальним способом розташовані тензорезистори. (рис.1.1.);

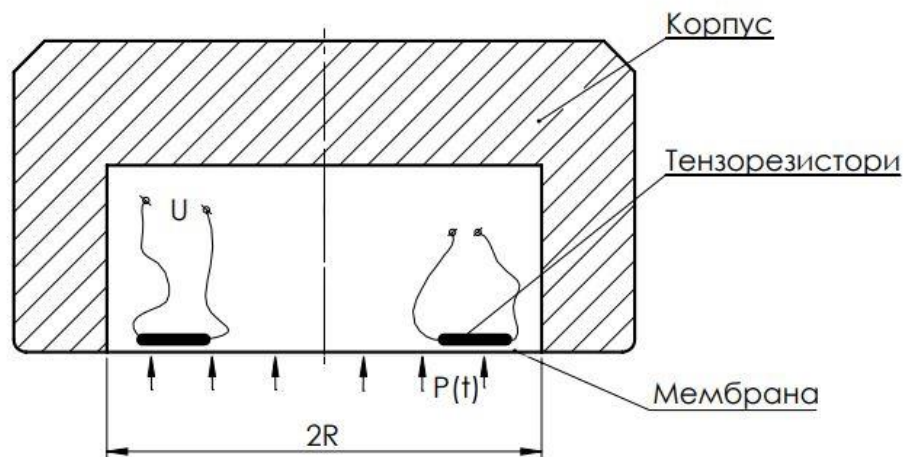


Рис. 1.1. Одномембранний сенсор

Другий тип двопружні, в яких деформація мембрани через проміжний елемент передається на вторинний пружний елемент (ПЕ) які у свою чергу за типом вторинних пружних перетворювачів поділяються на:

- двоопорні балки (рис. 1.2)

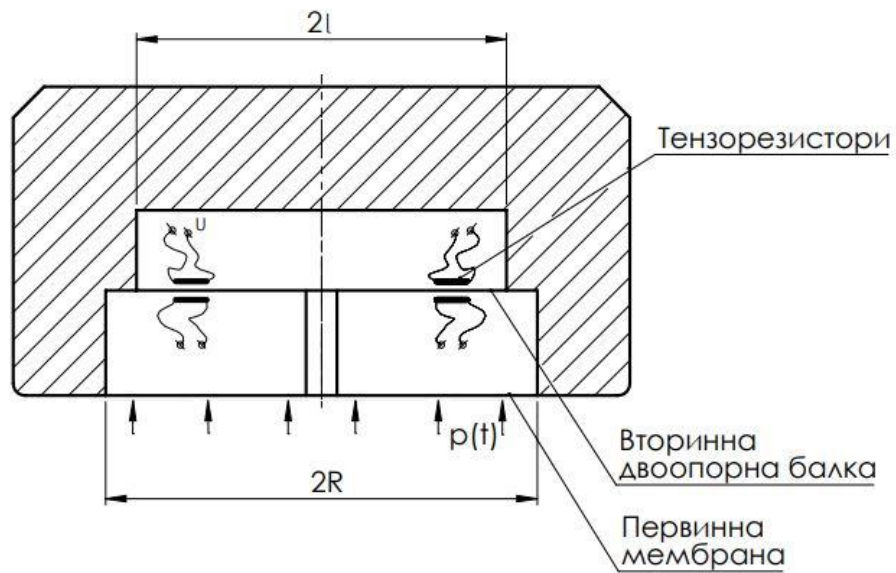


Рис. 1.2. Сенсор з вторинною двоопорною балкою

- консольні балки (рис. 1.3)

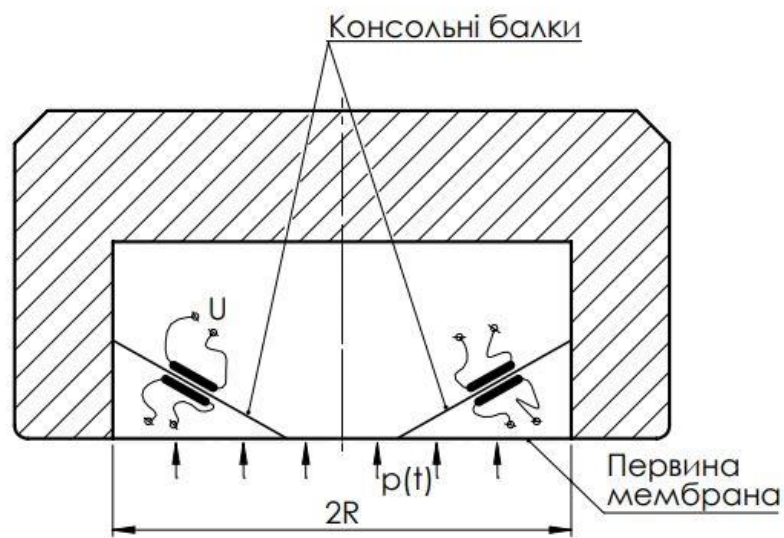


Рис. 1.3. Сенсор з вторинними консольними балками

- стержневі елементи (рис. 1.4)

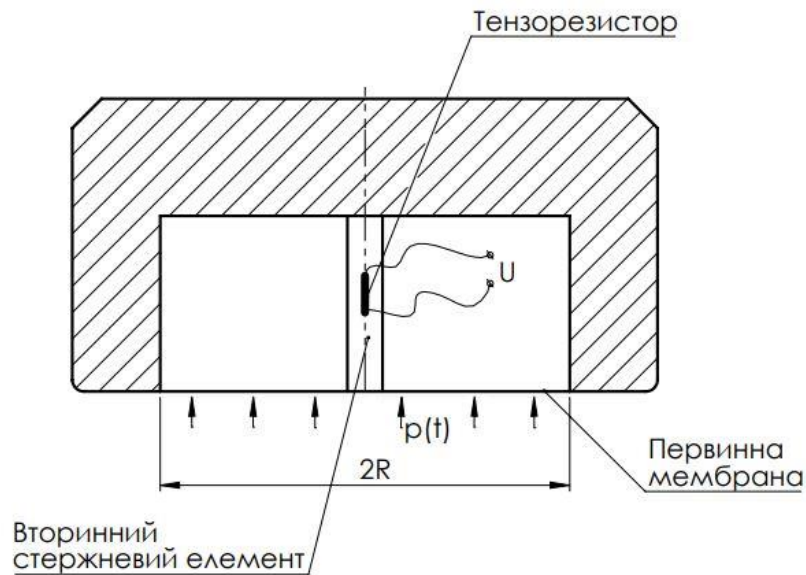


Рис. 1.4. Сенсор з вторинним стержневим елементом

- вторинні пружні елементи-мембрани (рис. 1.5)

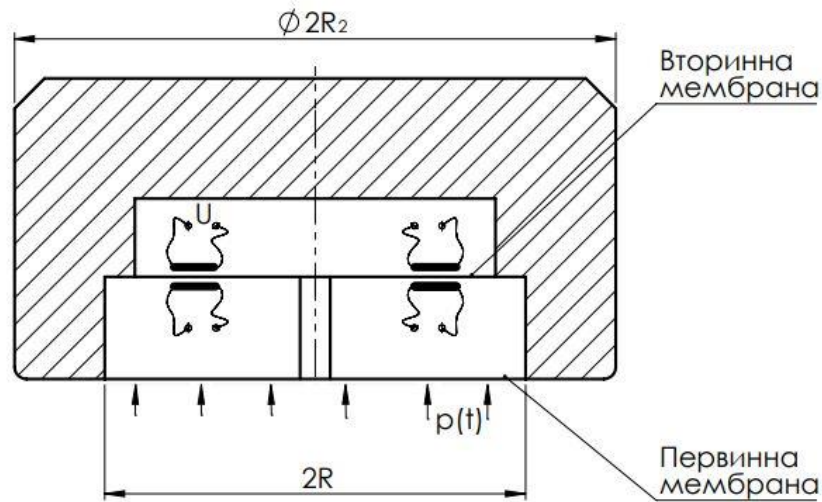


Рис. 1.5. Сенсор з вторинною мембраною

Оскільки ефективність вторинних перетворювачів більш складної конфігурації, в сенсорах нестационарного тиску, особливо при різкозмінних значеннях тиску і температури є досить низькою, тому розглядатись не будуть.

Використання двопружних систем перетворювачів дозволило помітно зменшити вплив температури на результати вимірювання тиску. Проте з появою

потреби вимірювання при дедалі більш швидкозмінних температурах, конструкційні заходи вже не надавали бажаного результату. Тому в практиці конструювання сенсорів тиску стала актуальною тенденція суміщення функцій або багатофункціональності [18...21].

Використовуючи принцип розділення функцій[22], застосовують метод пасивної термокомпенсації, що полягає у включенні додаткових термозалежних елементів з протилежними температурними коефіцієнтами до вимірювальної схеми. Це дозволяє певним чином компенсувати вплив температури на результати вимірювання.

Метод активної термокомпенсації використовує додаткові перетворювачі для безпосереднього вимірювання значень дестабілізуючої величини, після чого виконується обробка отриманого сигналу. На сьогодні існують розробки сенсорів, які об'єднують вимірювання тиску та температури[23, 24]. Ці сенсори демонструють досить високу ефективність у коригуванні статичної температурної похибки в широкому діапазоні температур.

У останні роки спостерігається зростаюча тенденція до розвитку спеціальних сенсорів так званих інтелектуалізованих сенсорів з вбудованими мікропроцесорами для обробки сигналу[25, 26]. Деякі сучасні сенсори вже оснащуються мікропроцесорами, що дозволяє здійснювати компенсацію статичних похибок і реалізовувати температурну корекцію в режимі реального часу. Втім, навіть з цими покращеннями, проблема підвищення точності вимірювання швидкоплинного нестационарного тиску в умовах нестационарної температури залишається актуальною.

Тенденції у фізико-конструкційному вдосконаленні сенсорів тиску залишаються стійкими протягом останнього десятиліття і, ймовірно, будуть актуальними на протязі тривалого часу, оскільки вони обумовлені особливостями виробництва сенсорів і перспективами базових наукових досліджень. Наразі металоплівкові тензорезистивні сенсори вважаються

найбільш перспективними для вимірювання нестационарного тиску в умовах змінної температури [27,...,30]. Незважаючи на наявність сенсорів і методів вимірювання тиску для таких умов, їх ефективність залишається обмеженою, особливо в частині швидкодіючої компенсації похибок.

1.2.1. Існуючі методи вимірювання нестационарного тиску

Методи вимірювання нестационарного тиску, що використовуються на сьогодні, базуються на різних підходах до розв'язання оберненої задачі вимірювання [31,..., 40]. Основне призначення цих методів полягає у відновленні істинного значення тиску $p(t)$ на основі виміряного сигналу сенсора $y(t)$, що описується рівнянням:

$$y(t) = \Psi\{p(t)\} \oplus \xi(t) \text{ де:}$$

Ψ — оператор, що описує фізичні властивості сенсора;

$\xi(t)$ — приведений до входу вплив дестабілізуючих факторів.

Таким чином, обернена задача полягає у відшуванні оператора H , що мінімізує функціонал похибки:

$$H = \arg \min_H F\{\tilde{\Psi}^{-1}(y(t)) - p(t)\}$$

$\tilde{\Psi}^{-1}$ — наближений обернений оператор до Ψ ,

$F\{\cdot\}$ — це міра відхилення від істинного значення тиску, яка залежить від стаціонарності процесів $p(t)$ та $\xi(t)$.

Відомі підходи до вирішення цієї оберненої задачі є такими.

- Методи розв'язання задачі у вигляді операторного рівняння:

$$\Psi(p(t)) = y(t)$$

де Ψ — нелінійний або лінійний оператор, який відображає вхідний сигнал $p(t)$ у вимірюваний сигнал $y(t)$.

Для розв'язання такого рівняння застосовуються два основних підходи:

Мінімізація функціоналу похибки.

У даному випадку формулюється функціонал як міра відхилення між значенням моделі та еталонним сигналом:

$$J[p(t)] = \int | \Psi(p(t)) - y(t) |^2 dt$$

і далі здійснюється мінімізація цього функціоналу за допомогою чисельних або аналітичних методів оптимізації.

Мінімізація розбіжності між лівою та правою частинами рівняння.

Даний підхід передбачає побудову таких параметрів або функціональної форми $p(t)$, які забезпечують мінімальну норму різниці між обома частинами рівняння:

$$\min_{p(t)} \| \Psi(p(t)) - y(t) \|$$

- Методи цифрової фільтрації — при припущенні про лінійність та стаціонарність оператора Ψ , рівняння набуває вигляду:

$$y(t) = \int_0^t g(t - \tau)p(\tau)d\tau + \delta(t)$$

у частотній області:

$$y(j\omega) = K(j\omega)p(j\omega) + \delta(j\omega)$$

де $K(j\omega)$ — частотна характеристика сенсора. Проте такий підхід є обмеженим через невизначеність при $K(j\omega) \rightarrow 0$.

- Методи мінімізації дисперсії похибки з побудовою оператора H за критерієм:

$$\delta(t) = \int_{-\infty}^t g(t - \tau)y(\tau)d\tau - p(t)$$

що приводить до частотного представлення:

$$H(j\omega) = \frac{S_{pp}(\omega)K(-j\omega)}{S_{pp}(\omega)|K(j\omega)|^2 + S_{\delta\delta}(\omega)}$$

де $S_{pp}(\omega)$ та $S_{\delta\delta}(\omega)$ — спектральні щільності відповідних процесів. Фізична реалізація ускладнена через наявність компонент зі зворотнім відліком часу.

- Метод мінімального модуля — використовується для обмеження невизначеності шляхом задання меж апіорної інформації:

$$\underline{S}_{pp}(\omega) \leq S_{pp}(\omega) \leq \bar{S}_{pp}(\omega)$$

$$\underline{S}_{\delta\delta}(\omega) \leq S_{\delta\delta}(\omega) \leq \bar{S}_{\delta\delta}(\omega)$$

де $\bar{S}$ та $\underline{S}$ - нижні та верхні межі спектральної щільності, визначені на основі апіорного аналізу або експериментальних даних.

Такий підхід дозволяє забезпечити робастність системи до варіацій вхідних впливів і похибок, що є критично важливим при наявності невизначеностей.

- Факторизація Вінера, метод невизначених коефіцієнтів — застосовуються для мінімізації середньої питомої потужності похибки:

$$F\{\delta(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\delta\delta}^T(\omega)d\omega$$

де $S_{\delta\delta}^T(\omega)$ - спектральна щільність потужності похибки, яка визначається як

$$S_{\delta\delta}^T(\omega) = E\left\{\frac{1}{T}|\delta(j\omega)|^2\right\}$$

Даний підхід дає змогу побудувати модель або фільтр, що забезпечує мінімізацію середньої спектральної потужності похибки, що критично для підвищення точності сенсорів в умовах впливу флуктуацій і зовнішніх збурень.

- Фільтр Калмана дає змогу реалізувати розв'язання оберненої задачі в реальному часі без необхідності припущення про стаціонарність процесів.

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}),$$

де $\hat{x}_{k|k}$ — апостеріорна оцінка стану, K_k — матриця Калмана, y_k — вектор вимірювань, H_k — матриця спостереження.

Водночас він є чутливим до точності апіорної інформації та статистичних характеристик вхідних даних, що може впливати на стабільність і достовірність оцінювання в умовах невизначеності.

- Дискретні методи статистичної оцінки — з апроксимацією неперервного оператора системою рівнянь:

$$\vec{y} = A\vec{p} + \vec{\delta}$$

де A — матриця дискретизованого оператора. Використовується, коли $p(t)$ представлено у вигляді кусково-лінійної функції. Вимагає апіорної інформації про закони розподілу процесів.

- Метод регуляризації Тихонова є одним із найбільш поширених підходів до розв'язання некоректно поставлених обернених задач. Його застосування дозволяє стабілізувати розв'язок за рахунок введення додаткового регуляризуючого члена, що враховує апіорну інформацію про систему.

$$\hat{x} = \arg_{min}^x (\|Ax - b\|^2 + \lambda \|Lx\|^2)$$

A — матриця системи, b — вектор спостережень, x — шуканий вектор розв'язку, L — оператор, що застосовується для регуляризації, λ — параметр регуляризації, який контролює компроміс між точністю наближення і стабільністю розв'язку.

Однак ефективність методу суттєво залежить від точності цієї апіорної інформації, зокрема від правильного вибору параметра регуляризації. Крім того,

реалізація методу часто потребує розв'язання складних інтегро-диференціальних рівнянь, що зумовлює високі обчислювальні витрати.

- Швидке перетворення Фур'є є ефективним інструментом для відновлення вхідного сигналу за відомого операторного представлення системи у частотній області.

Перетворення Фур'є для сигналу $x(t)$ можна записати як:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt,$$

де $X(f)$ — спектр сигналу, f — частота, $x(t)$ — сигнал у часовій області

Метод забезпечує високу точність реконструкції завдяки спектральному аналізу, однак його практичне застосування у режимі реального часу є обмеженим. Це зумовлено значною обчислювальною складністю алгоритму, а також необхідністю наявності достовірної апіорної інформації про характеристики сигналу та системи.

1.2.2. Існуючі методи вимірювання тиску за умов температурного впливу

Забезпечення високої точності вимірювання тиску в умовах змінної температури залишається актуальним завданням на теперішній час. Залежність вихідного сигналу сенсорів тиску від температури, зумовлена як фізичними властивостями матеріалів, так і конструктивними особливостями, що знижує достовірність результатів вимірювань. У зв'язку з цим розроблено низку технічних рішень, спрямованих на компенсацію температурної похибки. Існуючі підходи можна умовно класифікувати на фізико-конструктивні та схемотехнічні. [41,... 60].

Фізико-конструктивні методи компенсації температурної похибки

Фізико-конструктивні методи спрямовані на зменшення температурної

залежності вже на рівні первинного перетворювача, зокрема через:

- оптимізацію розташування тензорезисторів;
- впровадження охолоджувальних або тепловідвідних елементів;
- розробку складних пружних систем з покращеними термостійкісними характеристиками.

Одним із прикладів є інтегральний сенсор на базі структури «кремній на сапфірі, у якому реалізовано два тензомости та два кремнієвих терморезистори, розташованих поза зоною механічного деформування. Один з терморезисторів використовується для компенсації початкового температурного зсуву. Подібна конструкція забезпечує ефективну компенсацію лише за умов сталого температурного режиму.

У сенсорах на основі монокристалічного кремнію [55,..., 58] застосовано схему з двома активними тензорезисторами, розташованими в зонах з протилежними механічними напруженнями. Завдяки цьому реалізовано первинну термокомпенсацію сигналу шляхом використання температурного каналу, проте також лише в умовах усталеного теплового поля.

У ряді конструкцій передбачено інтеграцію додаткового термочутливого елемента [50,..., 52], сигнал якого використовується для корекції вихідного сигналу основного тензомосту у складі диференціального підсилювача. Застосування такого підходу сприяє певному зменшенню вплив температури, але його ефективність обмежена точністю калібрування термокомпенсуючого каналу.

Схемотехнічні методи компенсації

Схемотехнічні методи реалізуються на рівні вторинної електроніки й передбачають:

- використання термокомпенсуючих ланцюгів;

- застосування паралельних каналів вимірювання тиску і температури;
- цифрову обробку сигналів за допомогою мікроконтролерів або мікропроцесорів.

У роботі [58] представлено двоканальний сенсор з двома незалежними мостами, сигнали з яких обробляються спеціалізованим мікропроцесором з метою компенсації температурної похибки. За рахунок обчислювального алгоритму враховується відмінність у поведінці мостів за змінної температури, що дозволяє досягти підвищеної точності.

Сучасні мікропроцесорні сенсори [55,..., 60] дозволяють реалізовувати адаптивні алгоритми термокомпенсації, включно з використанням апроксимаційних моделей або таблиць корекції. Водночас ефективність таких рішень значно залежить від умов проведення калібрування, і за нестаціонарних температурних процесів вона помітно знижується.

Окрім зазначених методів, у літературі описано низку технологічних рішень, спрямованих на зменшення температурного впливу, зокрема:

- *Оптимізація геометрії розташування тензорезисторів.* У [52, 53] запропоновано розміщення тензочутливих елементів по периферії мембрани, що дозволяє забезпечити рівномірніші температурні умови для всіх елементів мосту.
- *Використання термозахисних плівок* [61,..., 63] дає змогу зменшити градієнт температури між активними і пасивними елементами сенсора.
- *Силовa термокомпенсація*, описана у [45,..., 46], реалізується шляхом встановлення опорних кілець, що створюють додаткові механічні напруження з компенсуючим характером.
- *Двопружні системи* [56,..., 60] передбачають перенесення тензорезисторів на вторинний пружний елемент, віддалений від нагрітої зони, що зменшує тепловий вплив.

- *Багатошарові мембрани*, запропоновані в [47,...,49], дають можливість компенсувати температурні деформації за рахунок протилежного розширення шарів з різними коефіцієнтами температурного розширення. Такі конструкції складні у виготовленні, але можуть забезпечити додаткову стабільність.
- *Металоплівкові тензорезистори з самокомпенсацією* [62] формуються шляхом послідовного з'єднання сегментів з різними ТКО, що дозволяє зменшити загальну температурну залежність опору.
- *Модифіковані конструкції мембран*, як-от мембрани з жорстким центром і конічним потовщенням [64, 65], створюють умови для внутрішньої компенсації термодеоформацій. Такі структури проявляють підвищену термостійкість навіть за нестационарного температурного впливу.

1.3. Сучасні тенденції розвитку інтелектуальних сенсорів тиску

У сучасних інформаційно-керуючих системах спостерігається стрімке зростання ролі т.зв. інтелектуальних сенсорів. На сьогодні інтелектуальний сенсор (smart sensors) визначається як багатофункціональний пристрій, що може містити поєднання таких елементів як: сенсорний елемент, перетворювач, вбудований мікропроцесор або мікроконтролер, а також модулі пам'яті й комунікаційні інтерфейси, які забезпечують попередню обробку сигналу, його калібрування, лінеаризацію, фільтрацію, прийняття простих рішень та передавання результатів у цифровій формі [69, 70]

Згідно з визначенням IEEE 1451, інтелектуальний сенсор — це сенсор, який має стандартний інтерфейс і здатен до самокалібрування, самоідентифікації та зв'язку з іншими пристроями через відкриті цифрові протоколи. Стандарт IEEE 1451 запроваджує концепцію TEDS (Transducer Electronic Data Sheets), яка дозволяє сенсору зберігати власні параметри калібрування, ідентифікатори, а також метадані, що полегшує інтеграцію в складні мережі. [71,..., 74]

Традиційно сенсори тиску складаються з первинного чутливого елемента - мембрани, яка деформується під дією тиску. На поверхні мембрани розміщуються перетворювальні елементи (тензорезистори), які реагують на зміну деформації зміною електричного опору. електричний сигнал, сформований сенсором у відповідь на дію тиску, надалі підлягає обробці та оцифруванню за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що забезпечує представлення фізичної величини у цифровому форматі. Втім цього недостатньо, щоб сенсор можна було вважати «інтелектуальним». Необхідно створити такі спеціальні функціональні можливості, що дозволяють пристрою забезпечувати точність вимірювань в умовах реального часу та нестаціонарності температурних впливів.

Інтелектуалізація сенсорів також повинна давати можливість інтеграції сенсора в більш складні автоматизовані системи, зокрема в системи моніторингу, управління і автоматичного коригування процесів. Це дозволяє сенсорам взаємодіяти з іншими складовими системи, зокрема такими як контролери, мережеві інтерфейси та інші сенсори, створюючи таким чином більш складну і функціональну систему вимірювання та контролю.

Однією з ключових переваг інтелектуальних сенсорів повинна бути їх здатність до оперативної обробки даних. Завдяки здатності до швидкої обробки даних на місці, сенсори можуть надавати актуальну інформацію, що має критичне значення для прийняття оперативних рішень. Зокрема, у промислових процесах або у складі систем моніторингу екологічної ситуації, інтелектуальний сенсор може не лише вимірювати параметри, але й безпосередньо інформувати про будь-які відхилення або аномалії, що виникають у процесі роботи системи.

Інтелектуальні сенсори також можуть бути оснащені можливістю для віддаленого моніторингу та управління. Завдяки інтеграції з технологією Інтернету речей (IoT), вони можуть передавати зібрані дані через мережу в централізовану систему або на інші пристрої, що дає можливість здійснювати моніторинг і контроль з будь-якої точки світу. Це сприяє значному покращенню

ефективності управління великими і складними системами, такими як енергетичні мережі, транспортні системи або інші інфраструктурні об'єкти.

Таким чином, інтелектуальний сенсор є не лише звичним пристроєм вимірювання фізичної величини, але стає ключовим засобом для забезпечення точності, надійності та ефективності вимірювання в новітніх технічних системах з особливими умовами експлуатації та специфічними вимірювальними завданнями.

1.4. Висновки Розділу 1

1. Проаналізовано сучасний стан проблеми вимірювання нестационарного тиску, особливості функціонування сенсорів в умовах впливу нестационарних термовпливів. Проведено аналіз характеристик та конструктивних особливостей існуючих тензорезистивних сенсорів тиску, а також розглянуто теоретичні основи їх побудови.
2. Обґрунтовано концепцію інтелектуального сенсора тиску як функціонально розширеного вимірювального приладу. Проаналізовано структуру та функціональні можливості інтелектуальних сенсорів відповідно до стандарту IEEE 1451.

Результати РОЗДІЛУ 1 та отримані висновки стали основою для обґрунтуванні актуальності та доцільності дисертаційної роботи, а також дозволили сформулювати мету та завдання дослідження, які викладено у ВСТУПІ.

РОЗДІЛ 2. ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ СЕНСОРІВ ТИСКУ.

2.1. Принципи інтелектуалізації сенсорів тиску

Для підвищення функціональних характеристик сенсорів тиску в сучасних умовах застосовується інтелектуалізація. Інтелектуалізація сенсорів тиску поділяється на два взаємодоповнюючих напрями: апаратну та програмну інтелектуалізацію.

Апаратна, або конструкційна інтелектуалізація сенсорів тиску передбачає впровадження конструкційних та функціональних елементів, які забезпечують розв'язання таких завдань:

- вимірювання нестаціонарного (динамічного) тиску в реальному часі;
- автоматичне коригування температурних похибок;
- самодіагностику.

Програмна інтелектуалізація сенсорів тиску передбачає впровадження алгоритмічних та цифрових рішень, які забезпечують виконання таких завдань:

- цифрова обробка та фільтрація вимірювального сигналу в реальному часі;
- температурна компенсація шляхом алгоритмічного коригування;
- автоматизація градуювання сенсорів.

Апаратно-програмна інтелектуалізація сенсорів тиску передбачає впровадження конструкційних та функціональних елементів, алгоритмічних та цифрових рішень, які забезпечують взаємодію апаратної та програмної інтелектуалізацій та їхнє взаємодоповнення.

2.2. Реалізація програмної інтелектуалізації сенсорів нестационарного тиску для вимірювання в реальному часі. Розроблення способу вимірювання.

2.2.1. Динамічна модель мембранного сенсора тиску

В тензорезистивних сенсорах тиску механічні перетворювачі (пружні елементи) мають масу, яка на кілька порядків більша за масу механоелектричних перетворювачів (тензорезисторів), тому при вимірюванні нестационарного тиску саме пружні елементи формують і визначають всю динаміку вимірювального перетворення.

Для реалізації принципів інтелектуалізації сенсорів першочергово здійснено аналіз динаміки мембрани сенсора, як первинного механічного перетворювача.

На сьогодні при проектуванні сенсорів тривалий час утримуються певні конструктивно-технологічні тенденції, а саме. З погляду механіки первинний пружний елемент - мембрана, здебільшого круглої форми, з одного боку (контактуюча сторона) сприймає нестационарний вимірюваний тиск $p(t)$, а з протилежної сторони (внутрішня сторона) може діяти зосереджена в центрі мембрани сила, яка є протидією вторинного пружного елемента, яка дорівнює (рис.2.1):

$$\chi^2 w_0(t)$$

де $w_0(t)$ -переміщення центра мембрани,

χ^2 - жорсткість вторинного пружного елемента.

Крім цього, в площині мембрани можуть діяти стискуючі/розтягуючі зусилля $\pm N$ (рис.2.1), які є наслідком термомеханічних процесів у сенсорі.

$$F(t) = \chi^2 \cdot w_0(t)$$

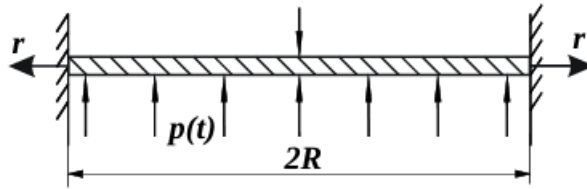


Рис. 2.1. Схема розподілу навантажень на мембрану

Для забезпечення лінійності характеристики сенсора, для мембрани повинні виконуватись умови [8]

$$\frac{1}{25} < \frac{h}{R} < \frac{1}{5}, \quad (2.1)$$

$$\frac{w_{max}}{h} \quad (2.2)$$

де h і R відповідно товщина і радіус мембрани; w_{max} – максимальний прогин мембрани від дії вимірювального тиску $p(t)$.

При вимірюванні нестационарного тиску $p(t)$ вимірювальне перетворення, яке здійснює мембрана представлятиме собою вимушені коливання, які у випадку дії на її внутрішній стороні зосередженої сили і зусиль у площині описуються рівнянням

$$c^4 \Delta^2 w(r, t) \pm \frac{N(t)}{\gamma} \Delta w(r, t) + \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = \frac{p(t)}{\gamma} - \frac{\chi^2 \cdot w_0(t)}{\gamma} \cdot \frac{\delta(r)}{2\pi r} \quad (2.3)$$

$$c^4 = \frac{D}{\gamma} = \frac{Eh^2}{12(1 - \nu^2)\rho}$$

де D - циліндрична жорсткість мембрани,

$\gamma = \rho h$ - питома вага площі мембрани,

ρ , E - густина та модуль пружності матеріалу мембрани,

ν - коефіцієнт Пуассона,

$w(r, t)$ - прогин мембрани в точці з координатою r , в момент часу t

β - коефіцієнт демпфування,

$\delta(r)$ - функція Дірака,

$$\nabla = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r},$$

де N -стискуючі/розтягуючі зусилля в площині мембрани.

Розв'язок рівняння (2.3) представляємо у вигляді розкладу за власними функціями $\Phi_n(r)$

$$w(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(r) \cdot T_n(t), \quad (2.4)$$

при граничних і початкових умовах

$$w(r, t) = \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = R, \quad (2.5)$$

$$w(r, t) = \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = 0 \quad \text{при } t = 0 \quad (2.6)$$

Власну функцію $\Phi_n(r)$ представимо у вигляді [216]

$$\Phi_n(r) = A \cdot J_0(k_n \cdot r) + B \cdot I_0(k_n \cdot r), \quad (2.7)$$

де A і B – деякі сталі,

$J_0(k_n \cdot r)$ і $I_0(k_n \cdot r)$ – функції Бесселя обох родів — першого і другого,

$k_n = \frac{\mu_n}{R}$, μ_n – власні значення граничної задачі.

Беручи до уваги умови (2.5-2.6) для (2.7), маємо

$$\left. \begin{aligned} A \cdot J_0(k_n \cdot R) + B \cdot I_0(k_n \cdot R) &= 0 \\ -k_n \cdot A \cdot J_1(k_n \cdot R) + k_n \cdot B \cdot I_1(k_n \cdot R) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.8)$$

звідки

$$J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n) + J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) = 0 \quad (2.9)$$

З рівняння (2.9) визначаємо власні значення $\mu_n = k_n \cdot R$.

В якості власних функцій беремо [216]

$$\Phi_n(k_n \cdot r) = J_0(k_n \cdot r) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_0(k_n \cdot r) \quad (2.10)$$

Як відомо [217] система розв'язків рівняння (2.10) на відрізьку $(0, R)$ є ортогональністю із коефіцієнтом r , тобто

$$\int_0^R r \cdot \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \Phi_m(k_m \cdot r) = \begin{cases} 0 & \text{при } m \neq n \\ R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) & \text{при } m = n \end{cases} \quad (2.11)$$

Для функцій Бесселя і Дірака маємо залежності [218]

$$\int_0^R r \cdot J_0(k_n \cdot r) dr = \frac{R^2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n}, \quad (2.12)$$

$$\int_0^R r \cdot I_0(k_n \cdot r) dr = \frac{R^2 \cdot I_1(\mu_n)}{\mu_n}, \quad (2.13)$$

$$\int_0^R \delta(r) \cdot f(r) dr = f(0), \quad (2.14)$$

де $f(r)$ – деяка функція.

Підставляючи (2.10) в (2.4) а після цього в (2.3), отримуємо

$$\begin{aligned} c^4 \cdot k_n^4 \cdot \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot T_n(t) + \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot T_n''(t) + 2\beta \cdot \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot T_n'(t) = \\ = \frac{p(t)}{\gamma} - \frac{\chi^2}{\gamma} T_n(t) \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n)) \cdot \frac{\delta(r)}{2\pi r} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Застосувавши множення рівняння (2.15) на $r \cdot \Phi_m(k_m \cdot r)$ і подальше інтегрування від 0 до R , враховуючи ортогональність (2.10) і залежностей (2.12-2.14), отримаємо:

$$\begin{aligned} R^2 J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) \cdot \left[c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^4} \cdot T_n(t) + T_n''(t) + 2\beta \cdot T_n'(t) \right] = \\ = \frac{p(t)}{\gamma} \frac{R^2}{\mu_n} [J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n)] - \frac{\chi^2}{2\pi\gamma} T_n(t) \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2 \end{aligned}$$

Звідки

$$T_n''(t) + 2\beta \cdot T_n'(t) + \xi_n^2 \cdot T_n(t) = p(t) \cdot \zeta_n, \quad (2.16)$$

де

$$\tilde{\xi}_n^2 = c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^2} \pm \frac{N(t)}{\gamma} + \frac{\mu_n^2}{R^2} \frac{\chi^2 \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2}{2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)} \quad (2.17)$$

β - частота власна коливань мембрани у центрі якої діє зосереджена сила

$F = \chi^2 w_0(t)$ та стискуючі/ротягуючі зусилля у площині мембрани,

$$\tilde{\zeta}_n = \frac{J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot \gamma \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)} \quad (2.18)$$

З врахуванням (2.17) і (2.18) розв'язок (2.16) запишеться у вигляді

$$T_n(t) = \frac{\tilde{\zeta}_n}{\tilde{\eta}_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\tilde{\eta}_n(t-\tau)) d\tau, \quad (2.19)$$

де

$$\tilde{\eta}_n = \sqrt{\tilde{\xi}_n^2 - \beta^2} \quad (2.20)$$

Тоді динаміка прогину мембрани описуватиметься таким інтегральним рівнянням

$$w(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\tilde{\zeta}_n}{\tilde{\eta}_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\tilde{\eta}_n(t-\tau)) d\tau \quad (2.21)$$

Отримане рівняння (2.21) представляє собою інтегральне рівняння Вольтерра і моделює вимірювальне перетворення, яке здійснює кругла мембрана у найбільш загальному випадку, тобто при вимірюванні тиску $p(t)$ довільної нестационарності. Тому це рівняння є найкраще придатними для аналізу вимірювального перетворення при тому, чи іншому конкретному часовому характері вимірювального тиску $p(t)$.

Отримані рівняння динаміки мембрани є підставою для побудови динамічної моделі сенсора тиску загалом. При її створенні враховуємо, що інерційні властивості пружних елементів набагато вищі ніж у всіх решта перетворювачів, котрі входять у вимірювальний ланцюг. Тому інерційністю цих перетворювачів можна знехтувати.

Рівняння динаміки круглої мембрани (2.21) подамо в узагальненій формі, а саме

$$w(r, t) = \int_0^t p(\tau) \cdot g(r, t - \tau) d\tau, \quad (2.22)$$

де r -узагальнена координата,

$g(r, t - \tau)$ -локальна імпульсна перехідна функція, яка для круглої мембрани має вигляд

$$g(r, t - \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\tilde{\zeta}_n}{\tilde{\eta}_n} e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\tilde{\eta}_n(t - \tau)).$$

Тому, імпульсна перехідна функція мембранного перетворювача ($r = 0$) є

$$g(t - \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(0) \cdot \frac{\tilde{\zeta}_n}{\tilde{\eta}_n} e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\tilde{\eta}_n(t - \tau)), \quad (2.23)$$

де величини, що входять у (2.23) визначаються (2.17, 2.20).

При практичному застосуванні наведених вище виразів, цілком достатньо обмежитися одним членом ряду, що з погляду динаміки означає обмеження головною частотою коливань.

Як відомо [75], відносні деформації на поверхні круглої мембрани становлять (рис.2.2):

-радіальні

$$\varepsilon_r(t) = \frac{2w_0(t)h}{R^2} \left(3 \frac{r^2}{R^2} - 1 \right); \quad (2.24)$$

-дотичні (тангенціальні)

$$\varepsilon_\theta(t) = \frac{2w_0(t)h}{R^2} \left(\frac{r^2}{R^2} - 1 \right). \quad (2.25)$$

$$U(t) = U_0 \left[\frac{2hb_1b_2}{R^2B} \int_{r_1}^{r_2} \left(3 \frac{r^2}{R^2} - 1 \right) dr \right] \times \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(0) \cdot \frac{\tilde{\xi}_n}{\tilde{\eta}_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\tilde{\eta}_n(t-\tau)) d\tau \quad (2.29).$$

Отримана динамічна модель сенсора саме у вигляді інтегрального рівняння слугуватимуть підставою для вирішення оберненої задачі вимірювання і розроблення методів вимірювання нестационарного тиску.

Крім цього, отримана модель має універсальний характер, оскільки при її створенні покладалось, що вимірюваний тиск може змінюватися в часі довільним чином. А тому вони мають істотну практичну доцільність, бо дозволяють ефективно досліджувати характер та особливості вимірювального перетворення при будь-якому конкретному виді вхідної величини.

2.2.2. Спосіб вимірювання нестационарного тиску в реальному часі

Як зазначалося раніше, що найбільш дієві методи вимірювання змінних величин базуються на обчислювальних процедурах з застосуванням методу регуляризації Тихонова. Але, для вимірювання нестационарного тиску вже при існуючих потребах у швидкодії сучасних систем автоматичного керування ці методи мають суттєво обмежене застосування. На наш погляд така ситуація виникла саме через намагання вирішити проблему “в загальному”, або ж як виключно математичну проблему. Тобто без врахування особливостей як самої вимірюваної величини, так і динаміки вимірювального перетворення, яка відбувається у сенсорах, які застосовуються при цьому. Тому пропонується розроблення способу вимірювання нестационарного тиску у реальному часі базується на отриманій у п.2.2.1 динамічній моделі сенсора.

У п.2.2.1, показано, що вимірювальне перетворення нестационарного тиску, яке здійснюється тензорезистивними сенсорами описується інтегральними рівняннями виду

$$U(t) = k \int_0^t p(\tau) g(t, \tau) d\tau = k \cdot \int_0^t p(\tau) e^{-\beta(t-\tau)} \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau, \quad (2.30)$$

k - статичний коефіцієнт перетворення;

$g(t, \tau)$ - імпульсна перехідна функція.

Для реальних сенсорів та сигналів маємо, що $g(t, \tau) \neq 0$, а $\ddot{g}_t(t, \tau)$ і $\ddot{U}(t)$ існують і неперервні.

Для розв'язання оберненої задачі, тобто отримання рівняння типу

$$p(t) = f(U(t))$$

у явному вигляді, двічі диференціюємо по часу Отримаємо

$$\begin{aligned} \dot{U}(t) &= k \int_0^t \eta_0 e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \cos(\eta_0(t - \tau)) d\tau \\ &\quad - k \int_0^t \beta e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0(t - \tau)) d\tau = \\ &= -\beta U(t) + k \int_0^t \eta_0 \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \cos(\eta_0(t - \tau)) d\tau; \quad (2.31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{U}(t) &= -\beta \cdot U(t) + k \cdot \eta_0 \cdot p(t) - \\ &- k \cdot \int_0^t [\eta_0 \beta \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \cos(\eta_0 \cdot (t - \tau)) + \eta_0^2 e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0(t - \tau))] d\tau \end{aligned} \quad (2.32)$$

Враховуючи (2.125) і (2.126) в (2.127), маємо

$$\ddot{U}(t) = -2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + k \cdot \eta_0 \cdot p(t) - (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t).$$

З останнього рівняння отримуємо

$$p(t) = \frac{\ddot{U}(t) + 2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t)}{k \cdot \eta_0}. \quad (2.33)$$

Вираз (2.33) представляє собою розв'язок оберненої задачі і є базовим рівнянням для розроблення методів вимірювання нестационарного тиску в реальному часі.

При вимірюванні нестационарного тиску тензорезистивними сенсорами, для отримання значення тиску у відповідності до розв'язку оберненої задачі (2.33) необхідно мати першу ($\dot{U}(t)$) і другу ($\ddot{U}(t)$) похідні вихідного сигналу. Отримання таких величин шляхом безпосереднього диференціювання вихідного сигналу $U(t)$ призводить до некоректного результату.

Теоретичне підґрунтя для пропонованого способу полягає на такому.

Реальний вихідний сигнал сенсора через дестабілізуючі впливи отримується з деякою похибкою $\delta(t)$, тобто

$$U_p(t) = U(t) + \delta(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau + \delta(t),$$

де $U(t)$ - точне значення сигналу.

Розв'язуючи це інтегральне рівняння за допомогою перетворення Фур'є [76], маємо

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty P_T(\omega) \exp(jt\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\Delta(\omega)}{G(\omega)} \exp(jt\omega) d\omega, \quad (2.34)$$

де $P_T(\omega)$ - Фур'є-образ точного значення вхідного сигналу, $G(\omega)$ і $\Delta(\omega)$ - спектри

передавальної функції і функції похибки $\delta(t)$.

Другий доданок у рівнянні (2.34) є похибкою точного розв'язку рівняння (2.17) з наближеною лівою частиною. Оскільки похибка $\delta(t)$ загалом є випадковим процесом, то дисперсія розв'язку задачі становитиме

$$\sigma_\delta^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{|\Delta(\omega)|^2}{|G(\omega)|^2} d\omega \quad (2.35)$$

де $|\Delta(\omega)|^2$ - спектральна густина потужності похибки.

Оскільки при $\omega \rightarrow \infty$ $G(\omega) \rightarrow 0$, а $|\Delta(\omega)|^2$ прямуватиме до скінченної границі чи нуля (якщо $\delta(t)$ міститиме, чи не міститиме компоненту білого

шуму), то внаслідок випадкового характеру $\delta(t)$ дисперсія розв'язку задачі відновлення сигналу буде або безмежною, або неприпустимо великою.

Отже, розбіжність інтегралу (2.35) відбувається через наявність у вихідному сигналі високочастотних складових. Ця обставина є базовою при розробленні способу, який побудований на відповідному математичному опрацюванні вихідного сигналу. Тобто, якщо б вдалося тим чи іншим чином погасити високочастотні складові, то розв'язок задачі відновлення сигналу міг би бути стійким. Тому пропонується спосіб вимірювання який полягає на здійсненні таких процедур.

1. Вихідний сигнал сенсора $U(t)$ з одного боку піддається фільтрації через числові фільтри, з іншого боку віконному усередненню та інтерполяції. Далі два отримані сигнали усереднюються.

2. Усереднений сигнал піддається числовому диференціюванню, що дає значення $\dot{U}(t)$ і $\ddot{U}(t)$.

4. Знаючи параметри $\eta_0, \beta, k, U(t), \dot{U}(t), \ddot{U}(t)$ і використовуючи залежність (2.32), отримуємо значення вимірюваного тиску $p(t)$.

Оскільки запропонований спосіб вимірювання реалізується число-програмними алгоритмами, то цей спосіб є втіленням програмного рівня інтелектуалізації сенсора.

2.2.3. Способи фільтрації вихідного сигналу сенсора.

Фільтрація вихідного сигналу сенсора є необхідною для усунення шуму та покращення якості сигналу. Залежно від типу шуму та характеру сигналу застосовуються різні методи фільтрації, які забезпечують ефективне видалення небажаних компонентів сигналу.

Спосіб фільтрації сигналу за допомогою медіанного фільтра.

Медіанний фільтр є нелінійним методом фільтрації, що полягає у заміні кожного значення сигналу на медіану значень, які містяться в певному вікні навколо цього значення. Медіана — це величина, яка розташовується посередині відсортованого набору чисел, що дозволяє зменшити вплив екстремальних значень, таких як імпульсні шуми. Цей метод ефективний при видаленні одиничних імпульсних шумів, оскільки медіанний фільтр замінює кожен спотворений елемент на центральне значення вікна, яке не піддається впливу випадкових сплесків шуму. Алгоритм фільтрації передбачає вибір фіксованого розміру вікна, для кожного значення сигналу створюється вікно розміру N , яке складається з сусідніх значень. Відсортовані значення цього вікна замінюються на медіану. Математично це можна записати як:

$$y(t) = \text{median}(\{x(t - \frac{N}{2}), \dots, x(t + \frac{N}{2})\})$$

де $\text{median}(\cdot)$ — це операція пошуку медіанної величини в наборі чисел.

Медіанний фільтр є ефективним при обробці сигналів з імпульсними та спорадичними шумами, але менш ефективним при фільтрації сигналів з високочастотним гаусівським шумом.[89].

Спосіб фільтрації сигналу на основі вейвлет-перетворення.

Вейвлет-фільтрація базується на методах вейвлет-перетворення, які дозволяють локалізувати сигнал як в часі, так і в частоті. Це корисно для сигналів, що мають неоднорідні або нестационарні характеристики, де частоти змінюються в часі. Завдяки вейвлет-перетворенню можна виділяти як низькочастотні, так і високочастотні компоненти сигналу, що робить цей метод надзвичайно ефективним для обробки сигналів, де частотні компоненти варіюються в часі. Перевага вейвлет-фільтрації полягає в її здатності адаптуватися до змін сигналу в часі, що робить її набагато більш гнучкою порівняно з традиційними методами, такими як фільтрація Фур'є, яка орієнтована лише на глобальні частотні характеристики [90, 92, 93]. Вейвлет-

фільтрація зазвичай включає в себе три основних етапи: перетворення сигналу у вейвлет-подання, фільтрацію вейвлет-коефіцієнтів шляхом зменшення високочастотних компонентів або застосування порогових значень, і відновлення сигналу через зворотне вейвлет-перетворення.

Спосіб фільтрації сигналу з адаптивним коригуванням параметрів фільтра

Адаптивні фільтри є методами, які змінюють свої параметри в залежності від характеристик сигналу та шуму. Ці фільтри здатні автоматично коригувати свої параметри відповідно до характеристик вхідного сигналу і забезпечувати більш точну фільтрацію в реальному часі, що є надзвичайно важливим в практичних застосуваннях. Один із найпоширеніших методів адаптивних фільтрів — це алгоритм найменших квадратів, в якому фільтр оновлює свої коефіцієнти на основі різниці між бажаним та фактичним виходом [91]. Алгоритм найменших квадратів можна описати рекурентною формулою:

$$w(k + 1) = w(k) + \mu \cdot e(k) \cdot x(k)$$

де: $w(k)$ — вектор коефіцієнтів фільтра на ітерації k ,

μ — крок навчання (швидкість оновлення),

$e(k) = d(k) - y(k)$ — помилка фільтра (різниця між бажаним і фактичним виходом),

$x(k)$ — вхідні значення сигналу.

Адаптивні фільтри широко використовуються в умовах, де характеристики шуму змінюються, наприклад, в комунікаційних системах або в реальному часі, де важливий баланс між швидкістю обробки і точністю.

Спосіб фільтрування сигналу за допомогою фільтра Калмана

Фільтр Калмана — математичний алгоритм, який використовують для оцінки стану динамічних систем, де є невизначеність або шуми. Він комбінує

математичні моделі системи та статистичні методи для мінімізації похибки оцінки стану, шляхом прогнозування та корекції оцінок на основі нових вимірювань. Основні етапи алгоритму Калмана включають прогнозування нового стану на основі попередніх даних і коригування прогнозу після отримання нових вимірювань [94]. Математично це можна виразити як:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_k - 1 + Bu_k$$

де $\hat{x}_k^-$ — прогнозований стан,

A — матриця стану,

B — матриця керування,

u_k — вхідний сигнал.

Після отримання нових вимірювань коригується прогнозований стан за допомогою рівняння:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

де K_k — коефіцієнт Калмана (матриця, що визначає важливість нових вимірювань),

H — матриця вимірювань.

Калманівський фільтр є оптимальним для лінійних систем з гаусівським шумом.

Спосіб віконного усереднення вихідного сигналу сенсора.

Спосіб базується на згаданому раніше припущенні, що високочастотний шум, який спотворює вихідний сигнал є стохастичним процесом з нульовим значенням математичного сподівання. Це означає, що на деякому доволі короткому інтервалі часу (вікно) шум представлятиме собою симетричні коливання відносно деякого середнього значення, яке і є незашумленим, «чистим» вихідним сигналом. Саме тому усереднення отриманого в результаті вимірювання зашумленого вихідного сигналу на послідовних коротких

інтервалах (вікнах) часу дасть множину значень, інтерполяція яких дає «чистий» вихідний сигнал.

2.2.4. Теоретична апробація методу фільтрації на моделях вхідних сигналів

Теоретична апробація розробленого методу полягає в тому, що при наявності точно заданого вхідного сигналу, за залежністю (2.16) отримуємо вихідний сигнал, після чого здійснюємо його «примусове зашумлення» вихідного сигналу додаванням високочастотних шумів, проводимо фільтрацію цього сигналу і віконне усереднення і використовуючи залежність (2.19) отримуємо відновлений вхідний сигнал. За допомогою порівняння різниці між відновленим сигналом і заданим вхідним оцінюється ефективність запропонованого методу.

Теоретичну апробацію проводимо на цифровій моделі мембранного сенсора (рис. 2.1) і для цього задаємося його конструкційними параметрами: частота власних коливань- $\eta_0 = 129,8 \times 10^3 \text{ рад/с}$ (20,66кГц) (мембрана з радіусом $R = 5\text{мм}$, товщиною $h = 0,25\text{мм}$, виконана з сплаву 36НХТЮ), $\beta = 0,4\eta_0, k = 1,3\text{МВ/МПа}$.

Дослідимо працездатність методу сумісного вимірювання тиску, якщо він змінюється відповідно до гармонічного закону

$$p(t) = \frac{p_0}{2} (1 - \cos(\omega_0 \cdot t)), \quad (2.36)$$

а вихідний сигнал спотворений шумовими завадами

$$Y(t) = Y_0 \cdot \cos(f \cdot t), \quad (2.37)$$

де $p_0=1,0$ МПа-амплітуда тиску з частотою ω_0 ,

Y_0 і f - амплітуда і частота завад.

Дослідження на прикладі гармонічного сигналу доцільне тим, що навіть при вимірюванні тиску у вигляді послідовністю ударів (найбільш “тяжкий” режим вимірювання), вихідний сигнал буде послідовністю перехідних коливань, які є згасаючими гармоніками з частотою власних коливань пружної системи. А при дії гармонічного тиску вихідний сигнал теж буде гармонічним.

Шумом імітуємо наслідок дії нестаціонарних дестабілізуючих чинників, оскільки якщо похибка вимірювання, яка загалом є випадковим процесом, міститиме компоненту білого шуму, то дисперсія розв’язку оберненої задачі буде або безмежною, або неприпустимо великою, що максимально наблизить моделювання до реальної вимірювальної ситуації [77].

Виходячи з практики вимірювань, для моделювання задаємо амплітудою шуму Y_0 , яка може сягати 5...10% амплітуди корисного сигналу, частота шуму f може варіюватися в діапазоні $0 \div 10^2 \eta_0$.

Таким чином, у відповідності до (2.16), неспотворений вихідний сигнал становитиме

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \frac{p_0}{2} (1 - \cos \omega \tau) \cdot \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau. \quad (2.36)$$

Накладемо на неспотворений вихідний сигнал дестабілізуючий шум, отримаємо дійсний вихідний сигнал

$$U_\delta(t) = U(t) + Y(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \frac{p_0}{2} (1 - \cos \omega \tau) \cdot \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau + Y_0 \cdot \cos(f \cdot t) \quad (2.37)$$

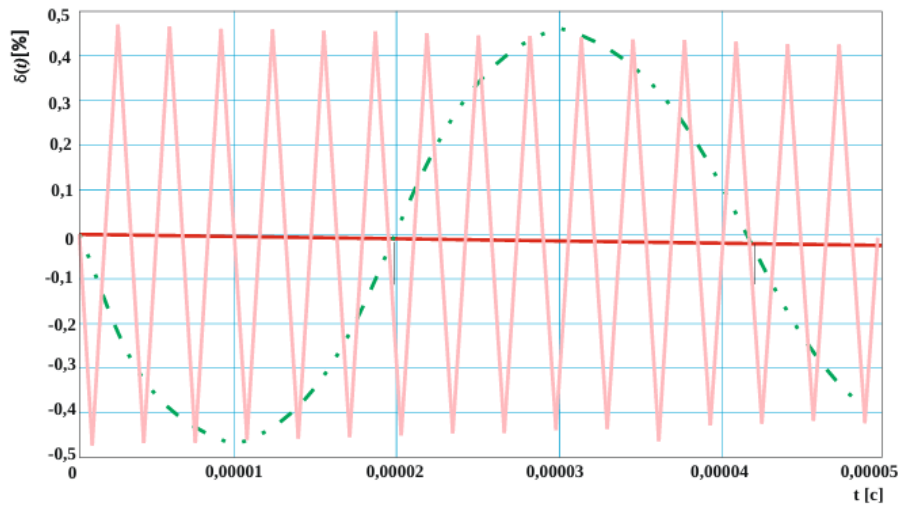
У відповідності до (2.19) вимірюваний тиск становитиме

$$p_\delta(t) = \frac{\ddot{U}_\delta(t) + 2 \cdot \beta \cdot \dot{U}_\delta(t) + (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U_\delta(t)}{k \cdot \eta_0}$$

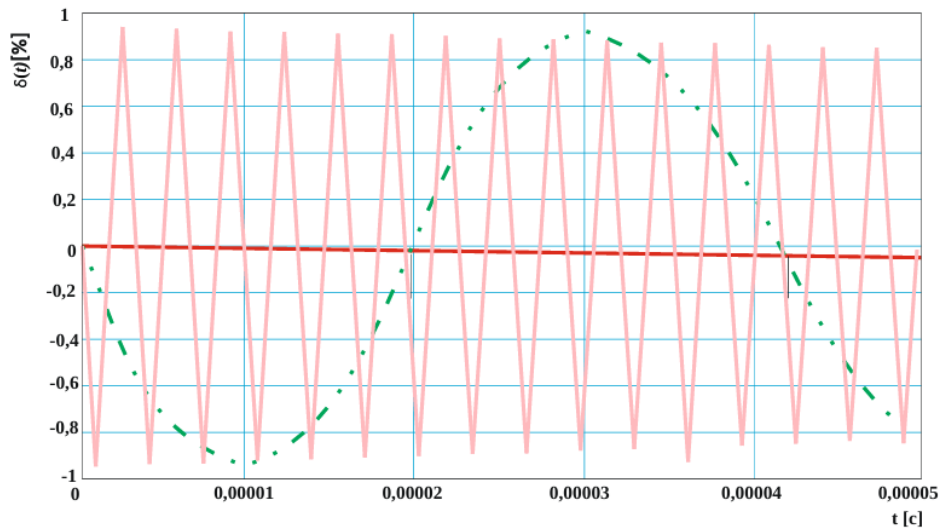
Відхилення між заданим тестовим сигналом $p_0(\tau)$ і відновленим тестовим сигналом $p(t)$, за запропонованим методом проводимо оцінку на основі відносної похибки

$$\delta(t) = \frac{p_0(\tau) - p(t)}{p_0(\tau)} \quad (2.37)$$

Візуалізація отриманих результатів наведена на рис. 2.3 а) і б) .



а)



б)

Рис. 2.3. Відносна похибка відновлення сигналу за наявності дестабілізуючого фактору

а) – з амплітудою 5% від амплітуди вхідного сигналу; б) – з амплітудою 10% від амплітуди вхідного сигналу.

● - частота шуму $0,5\eta_0$; ● - частота шуму $1\eta_0$; ● - частота шуму $3\eta_0$; ● - частота шуму $5\eta_0$

Згідно з результатами досліджень, відносна похибка відновлення сигналу збільшується по мірі зростання частоти дестабілізуючого фактору, але навіть при

його частоті у 200 разів більшої за власну частоту сенсора амплітуда похибки не перевищує амплітудного значення шуму. З практичного погляду це означає, що запропонований метод є працездатним та стійким при дії високочастотних дестабілізуючих факторів. Проте необхідно знати і регламентувати їхнє амплітудне значення.

Вибірка реальних сигналів (рис. 2.4) формується шляхом спотворення сигналу $U(t)$ із додаванням до нього шуму (2.135) різної частоти, маємо

$$U_p(t) = U(t)(1 + Y_0 \cos(f \cdot t)) \quad (2.38)$$

У виразі (2.38) $Y_0 = 0,02U(t)$ - амплітуда шуму, відхилення якого може бути на рівні кількох відсотків від амплітуди сигналу $U(t)$, частоту шуму f варіюватимемо параметри в межах діапазону, який відповідає власній частоті сенсора η_0 , тобто $f = (0.5, 1.0, 3.0, 5.0)\eta_0$.

Сигнали $U'1(t) = \frac{dU_p(t)}{dt}$ (рис. 2.5) знаходимо за допомогою числового диференціювання експериментального сигналу (2.38), а сигнали $U'2(t) = \frac{d\tilde{U}_p(t)}{dt}$ (рис. 2.6) - диференціюванням відфільтрованого реального сигналу ((2.38)).

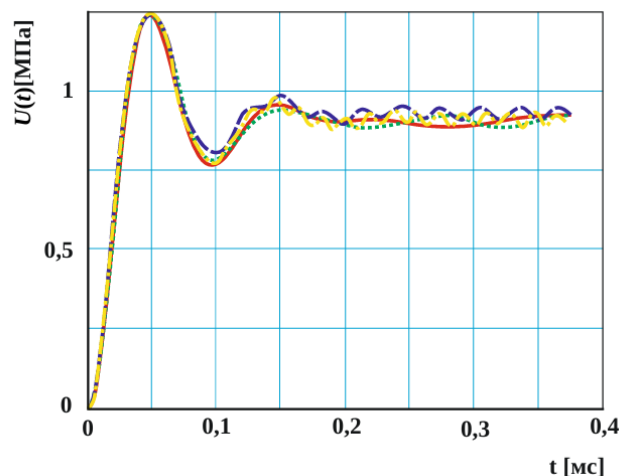


Рис.2.4. Реальний вихідний сигнал спотворений білим шумом

● - частота шуму $0,5\eta_0$; ● - частота шуму $1\eta_0$; ● - частота шуму $3\eta_0$; ● - частота шуму $5\eta_0$

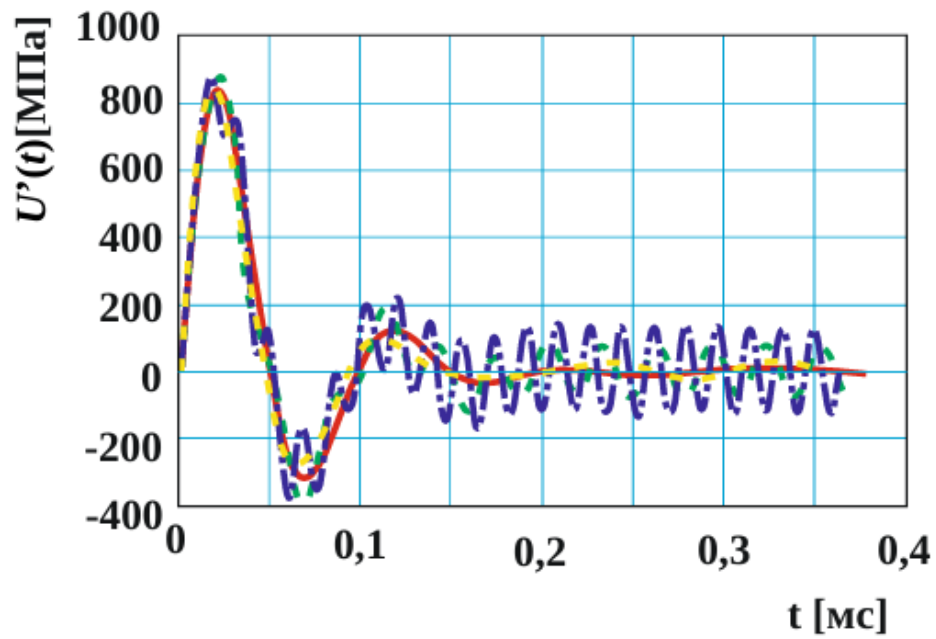


Рис.2.5. Відповідні похідні вихідного сигналу сенсора тиску

● - частота шуму $0,5\eta_0$; ● - частота шуму $1\eta_0$; ● - частота шуму $3\eta_0$; ● - частота шуму $5\eta_0$

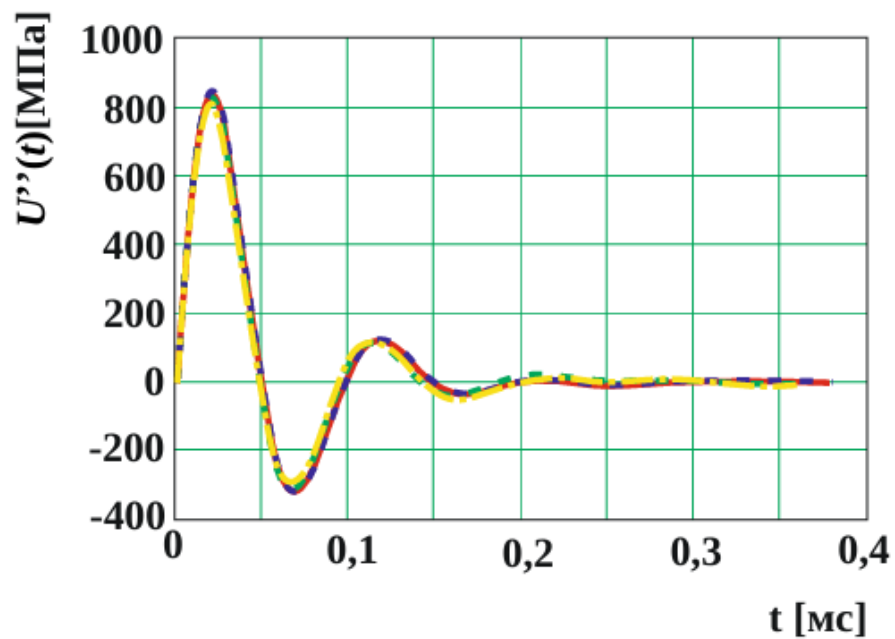


Рис.2.6. Похідні відфільтрованого вихідного сигналу сенсора

● - частота шуму $0,5\eta_0$; ● - частота шуму $1\eta_0$; ● - частота шуму $3\eta_0$; ● - частота шуму $5\eta_0$

Сигнал $U'(t)$ розглядатимемо як взірцевий, а відхилення сигналу $U'_1(t)$ і $U'_2(t)$ від взірцевого трактуватимемо як показник точності методу диференціювання. Відносні похибки використовуватимемо для оцінки таких відмінностей (рис.2.7 і рис.2.8)

$$\delta_1(t) = \frac{U'(t) - U'_1(t)}{U'(t)} \cdot 100\%, \quad \text{і} \quad \delta_2(t) = \frac{U'(t) - U'_2(t)}{U'(t)} \cdot 100\%$$

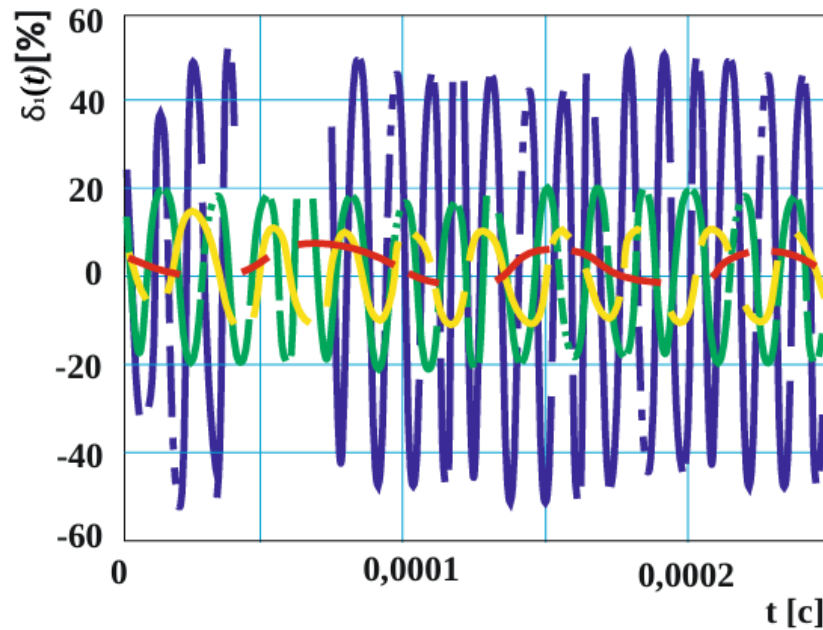


Рис.2.7. Похибки при диференціюванні вихідного сигналу сенсора

● - частота шуму $0,5\eta_0$; ● - частота шуму $1\eta_0$; ● - частота шуму $3\eta_0$; ● - частота шуму $5\eta_0$

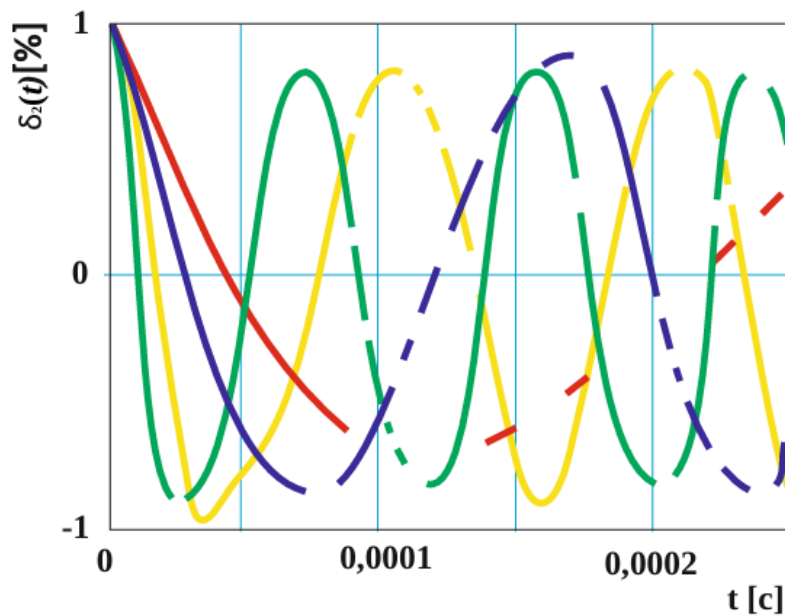


Рис.2.8. Похибки при диференціюванні відфільтрованого вихідного сигналу сенсора

- - при частоті шуму $0,5\eta_0$; ● - при частоті шуму $1,0\eta_0$; ● - при частоті шуму $3,0\eta_0$; ● - при частоті шуму $5,0\eta_0$

Числове моделювання демонструє, що пряме числове диференціювання вимірювального сигналу, який містить дестабілізуючий шум із частотою, близькою до власної частоти сенсора η_0 , призводить до суттєвих похибок і некоректних результатів.

Як наслідок, результати диференціювання відфільтрованого вимірювального сигналу свідчать про достовірність отриманих результатів, а похибка диференціювання не перевищує статичну похибку сенсора. Зумовлено тим, що амплітуду залишкового шуму можна розглядати як граничну похибку вихідного сигналу.

З'ясуємо, при якому частотному співвідношенні шум/сигнал і апіорних даних все таки можливе безпосереднє диференціювання вихідного сигналу без його додаткового числового опрацювання.

У роботі [77] показано, що максимум похибки розв'язку оберненої задачі (2.29) у випадку отримання величин $\dot{U}(t)$ і $\ddot{U}(t)$ шляхом безпосереднього

диференціювання вихідного сигналу $U(t)$ досить точно апроксимується залежністю (рис.2.9)

$$\delta 0\left(\nu / \eta_0\right)_{\max }^3, \quad (2.39)$$

де Y_0 - амплітуда шуму, яка задається у відсотках від амплітуди корисного сигналу $U(t)$ і може бути потрактована як його похибка, а частота шуму ν може змінюватись в певному діапазоні відносно власної частоти сенсора η_0 .

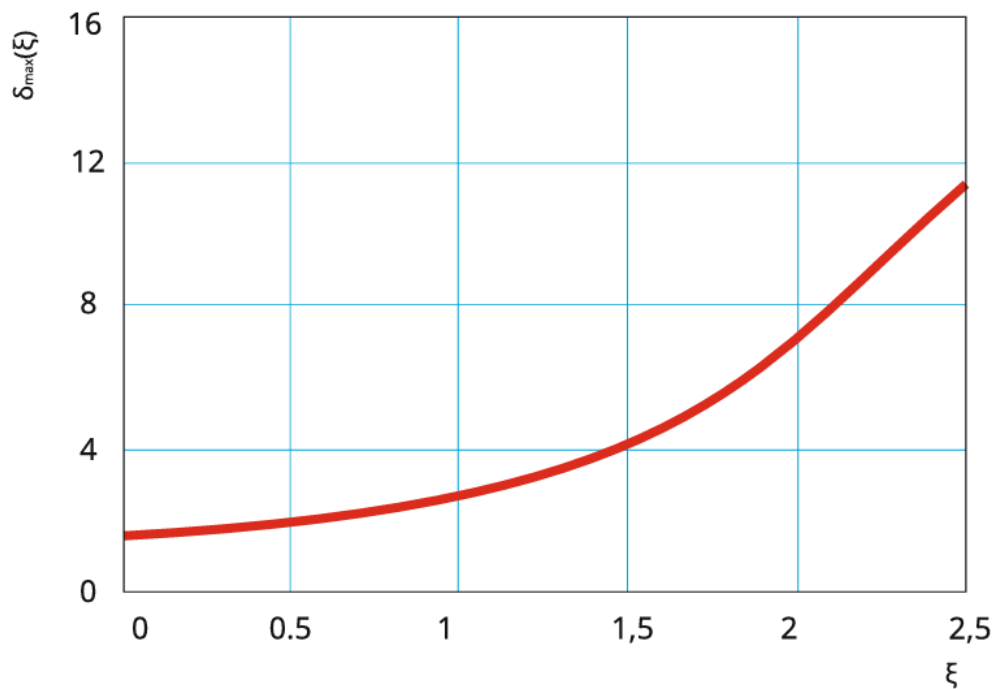


Рис. 2.9. Відносна похибка розв'язку оберненої задачі за методом безпосереднього диференціювання ($\xi = \nu/\eta_0$ -співвідношення частот шум/сигнал)

З погляду способу вимірювання нестационарного тиску означає наступне.

Якщо існує апіорна інформація про можливі дестабілізуючі фактори за якою можна оцінити ступінь їхнього впливу на вихідний сигнал параметром шум/сигнал ($\xi = \nu/\eta_0$), то для сенсора можна окреслити область застосування де він використовуючи метод безпосереднього диференціювання вимірюватиме нестационарний тиск в реальному часі із заданою точністю. Або ж за значенням

допустимої похибки вимірювання можна підібрати такий сенсор тиску, який забезпечить необхідну точність його вимірювання.

2.2.5. Аналіз потенційної швидкодії методу

Розроблені методи вимірювання передбачають отримання похідних вихідного сигналу: $\dot{U}(t)$ і $\ddot{U}(t)$ з розв'язку оберненої задачі.

У методі диференціювання сигнали $\dot{U}(t)$ і $\ddot{U}(t)$ отримується шляхом числового диференціювання відфільтрованого сигналу $\tilde{U}(t)$.

Таким чином, швидкодія запропонованого методу визначення тиску обумовлюється переважно швидкістю аналогово-цифрового перетворення та цифрової обробки сигналу, яка в сучасних мікропроцесорних системах досягає значень, що повністю задовольняють вимоги до реєстрації швидкозмінних тискових сигналів у динамічних режимах. Завдяки високій частоті дискретизації та малому часу затримки АЦП, метод дозволяє забезпечити необхідну часову роздільність для достовірної фіксації миттєвих значень тиску в умовах нестационарного середовища. [78].

2.3. Реалізація апаратно-програмної інтелектуалізації сенсора тиску для умов з нестационарним термовпливом

2.3.1. Дослідження термомеханічних процесів у мембрані сенсора тиску

На сучасному етапі вимірювання тиску в умовах нестационарного термовпливу залишається актуальним завданням у багатьох технічних системах. Існуючі методи і сенсори вже не задовільняють вимог по точності вимірювань. Удосконалення сенсорів і методів вимірювання традиційними шляхами не дає бажаних результатів. Саме тому для розроблення більш ефективних сенсорів і методів вимірювання тиску в умовах нестационарних температур пропонується

шлях інтелектуалізації пристроїв, причому як на апаратному так і на програмному рівні.

Для цілеспрямованої інтелектуалізації сенсорів дослідимо характер та особливості термомеханічних процесів у конструкційних елементах сенсорів, а також ступінь впливу цих процесів на вимірювальне перетворення. Відповідно, насамперед дослідимо розподіл температурного поля $T(r, z, t)$ у площині мембрани при умові, що контактна площа зазнає конвективного теплообміну з вимірювальним середовищем із нестационарною температурою $T(t)$ (Рис. 2.10). При цьому вважатимемо, що мембрана є круглою із радіусом R , товщиною h , та виконана із ізотропного матеріалу та має наступні сталі: питома теплоємність - c , коефіцієнт теплопровідності - K , температурний коефіцієнт теплопровідності - $\chi = \frac{K}{\rho \cdot c}$.

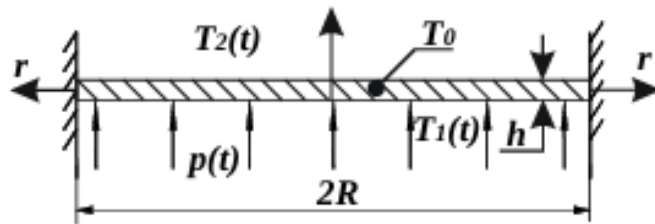


Рис. 2.10. Схема теплообміну між поверхнями мембрани

Визначення температурного поля зводиться до знаходження розв'язку наступного рівняння [176]

$$\frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\chi} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = 0, \quad (2.40)$$

при граничних і початкових умовах

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} + l_3(T(r,z,t) - T_1) &= 0 \text{ при } r = R \\ \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} - l_1(T(r,z,t) - T(t)) &= 0 \text{ при } z = 0 \\ \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} + l_2(T(r,z,t) - T_1) &= 0 \text{ при } z = h \\ T(r,z,t) &= T_0 = \text{const при } t = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.41)$$

де l_1, l_2, l_3 - відносні коефіцієнти теплообміну для контактної, внутрішньої поверхонь і периметра мембрани;

T_1 - температура теплообмінного середовища, з яким контактує периметр і внутрішня поверхня конструктивного елемента;

T_0 - початкове значення температури мембрани, однорідно розподілена в усьому її тілі.

Ввівши нову змінну [78]

$$\Theta(r, z, t) = T(r, z, t) - T_1, \quad (2.42)$$

рівняння (2.40) запишеться

$$\frac{\partial^2 \Theta(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Theta(r,z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\chi} \frac{\partial \Theta(r,z,t)}{\partial t} = 0, \quad (2.43)$$

при початкових і граничних умовах

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Theta(r,z,t)}{\partial r} + l_3 \Theta(r,z,t) &= 0 \text{ при } r = R \\ \frac{\partial \Theta(r,z,t)}{\partial z} - l_1(\Theta(r,z,t) - \Delta T(t)) &= 0 \text{ при } z = 0 \\ \frac{\partial \Theta(r,z,t)}{\partial z} + l_2 \Theta(r,z,t) &= 0 \text{ при } z = h \\ \Theta(r,z,t) &= T_0 = \text{const при } t = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.44)$$

Застосувавши до (3.43) перетворення Лапласа [79], отримаємо

$$\frac{\partial^2 \tilde{\Theta}(r,z,p)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{\Theta}(r,z,p)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \tilde{\Theta}(r,z,p)}{\partial z^2} - \frac{p}{\chi} \tilde{\Theta}(r,z,p) = 0, \quad (2.45)$$

де $\Theta(r, z, t) = \tilde{\Theta}(r, z, p)$.

Граничні умови при цьому набудуть вигляду

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \tilde{\theta}(r,z,p)}{\partial r} + l_3 \tilde{\theta}(r,z,p) &= 0 \text{ при } r = R \\ \frac{\partial \tilde{\theta}(r,z,p)}{\partial z} - l_1 (\tilde{\theta}(r,z,p) - \Delta T(t)) &= 0 \text{ при } z = 0 \\ \frac{\partial \tilde{\theta}(r,z,p)}{\partial r} + l_2 \tilde{\theta}(r,z,p) &= 0 \text{ при } z = h \end{aligned} \right\}, \quad (2.46)$$

Подаючи функцію $\tilde{\theta}(r, z, p)$ у вигляді добутку

$$\tilde{\theta}(r, z, p) = \Psi(r)Z(z, p)$$

і підставляючи цей вираз у (2.45), отримаємо

$$\frac{\partial^2 \Psi^2(r)}{\partial r^2} Z(z, p) + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi(r)}{\partial r} Z(z, p) + \frac{\partial^2 Z(z, p)}{\partial z^2} \Psi(r) - \frac{p}{\chi} \Psi(r) Z(z, p) = 0$$

Розділяючи змінні, маємо

$$\frac{\partial^2 \Psi^2(r)}{\partial r^2 \Psi(r)} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi(r)}{\partial r \Psi(r)} = - \left[\frac{\partial^2 Z(z, p)}{\partial z^2 Z(z, p)} - \frac{p}{\chi} \right] = -a^2 \quad (2.47)$$

звідки

$$\frac{\partial^2 \Psi^2(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi(r)}{\partial r} + a^2 \Psi(r) = 0, \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial^2 Z(z, p)}{\partial z^2} - \left(\frac{p}{\chi} + a^2 \right) Z(z, p) = 0 \quad (2.49)$$

Розв'язками рівнянь (3.48) і (3.49) є функції

$$\Psi(r) = A_1 J_0(ar),$$

$$Z(z, p) = B_1 ch(bz) + B_2 sh(bz),$$

де $b^2 = \frac{p}{\chi} + a^2$, $J_i(ar)$ -функції Бесселя, а A_1, B_1, B_2 -сталі.

Тому

$$\tilde{\theta}(r, z, p) = A_2 J_0(ar) (ch(bz) + B_3 sh(bz)). \quad (2.50)$$

Підставивши (2.50) у друге рівняння з (2.46), отримаємо

$$\frac{\Delta T(t)l_1}{l_1 - B_3 b} = A_2 J_0(ar) . \quad (2.51)$$

Як показано в [79], для визначення сталих A_2, B_3 праву частину у цьому рівнянні необхідно подати у вигляді ряду $\sum_{n=0}^{\infty} A_n J_n(a_n r)$. Тоді рівняння (2.51) запишеться

$$\frac{\Delta T(t)l_1}{l_1 - B_3 b} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_n(a_n r) . \quad (2.52)$$

Тому

$$A_n = \frac{2\Delta T(t)l_1}{l_1 - B_n b} \frac{J_1(a_n r)}{a_n r (J_0^2(a_n r) + J_1^2(a_n r))} , \quad (2.53)$$

а функція (2.50) запишеться

$$\tilde{\theta}(r, z, p) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_0(a_n r) (ch b_n z + B_n sh b_n z) , \quad (2.54)$$

$$\text{де } b_n = \sqrt{\frac{p}{\chi} + a_n^2} .$$

Для визначення коефіцієнтів a_n використовуємо першу з граничних умов (2.47). Підставляючи туди (2.54), отримуємо рівняння

$$a_n J_1(a_n r) - l_3 J_0(a_n r) = 0 . \quad (2.55)$$

Розв'язок цього рівняння дає значення a_n .

Стала B_n визначається з третього рівняння граничних умов (2.47). Підставивши туди (2.54), отримаємо

$$B_n = \frac{b_n sh(b_n h) - h ch(b_n h)}{b_n sh(b_n h) + h ch(b_n h)} . \quad (2.56)$$

Підставивши формули (2.53) (2.56) у (2.54) одержуємо зображення температурного поля мембрани. Виконавши зворотне перетворення Лапласа отримуємо оригінал, а саме

$$T(r, z, t) = T_0 + T_{\partial}(r, z, t) + T_y(r, z) , \quad (2.57)$$

де $T_{\partial}(r, z, t)$ -динамічна, перехідна складова, що становить:

$$T_{\partial}(r, z, t) = -\frac{4\Delta T \cdot l_1 \cdot l_3}{R} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_2(z, \beta_m) \cdot e^{-\chi(a_n^2 + \beta_m^2)t} \cdot \beta_m}{(a_n^2 + \beta_m^2) \cdot \Phi_3(\beta_m)} \cdot \Phi_1(r, a_n) \quad (2.58)$$

де $T_y(r, z)$ -усталена складова, яка дорівнює

$$T_y(r, z) = -\frac{2\Delta T \cdot l_1 \cdot l_3}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n ch(a_n(h-z)) + l_2 sh(a_n(h-z))}{(l_1 + l_2) a_n ch(a_n h) + (l_1 l_2 + a_n^2) sh(a_n h)} \Phi_1(r, a_n) \quad (2.59)$$

$$\text{де} \quad \Phi_1(a_n, r) = \frac{J_0(a_n r)}{(l_3^2 + a_n^2) J_0(a_n R)}, \quad (2.60)$$

$$\Phi_2(\beta_m, z) = \beta_m \cos \beta_m (h - z) + l_2 \sin \beta_m (h - z), \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \Phi_3(a_n, r) = & \beta_m [2 + h(l_1 + l_2)] \sin \beta_m h - \\ & - [h(l_1 \cdot l_2 - \beta_m^2) + l_1 + l_2] \cos \beta_m h, \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\beta_m - \text{корені рівняння } ctg \beta_m h = \frac{1}{l_1 + l_2} \left(\beta_m - \frac{l_1 \cdot l_2}{\beta_m} \right).$$

Отримане рівняння (2.57) дозволяє здійснити дослідження температурного поля у круглій мембрані при дії граничних умов, температури середовища. У середовищах із змінною нестационарністю пропонується проводити аналіз термопружних процесів, виходячи з найбільш інтенсивного термовпливу — термоудару [78]. В результаті такого підходу оцінка впливу температури на сенсор є максимальною, тому при менших термовпливах вона виявляється завищеною. Проте, з огляду на складність виготовлення експериментального обладнання для відтворення термовпливів зі змінною часовою характеристикою, запропонований підхід є універсальним, оскільки дозволяє здійснювати оцінку термопружних процесів у елементах сенсора за умов максимально жорсткого термовпливу. Окрім того, для генерації термоударів застосовується спеціальне експериментальне обладнання [80,...,82].

Щоб підкреслити вплив термоудару, приймемо, що внутрішня поверхня мембрани та її периметр контактують із середовищами з фіксованою температурою. Для моделювання термопружних процесів буде використаний

термоудар максимальної амплітуди $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. У цьому температурному діапазоні фізико-механічні властивості матеріалів сенсора (мембрани, корпусу та вторинних пружних елементів) можна вважати сталими.

В реальних умовах температура середовищ змінюється в процесі поступового нагрівання всього сенсора. Через це температурне поле в мембрані стає більш однорідним, а рівень термонапружень зменшується.

Використовуючи вираз (3.18) моделюємо температурне поле у мембрані при дії термоудару амплітудою $\Delta T = 400\text{C}^0$, з різними геометричними параметрами мембрани і різних значень коефіцієнтах теплообміну (рис. 2.11,...,рис.2.17).

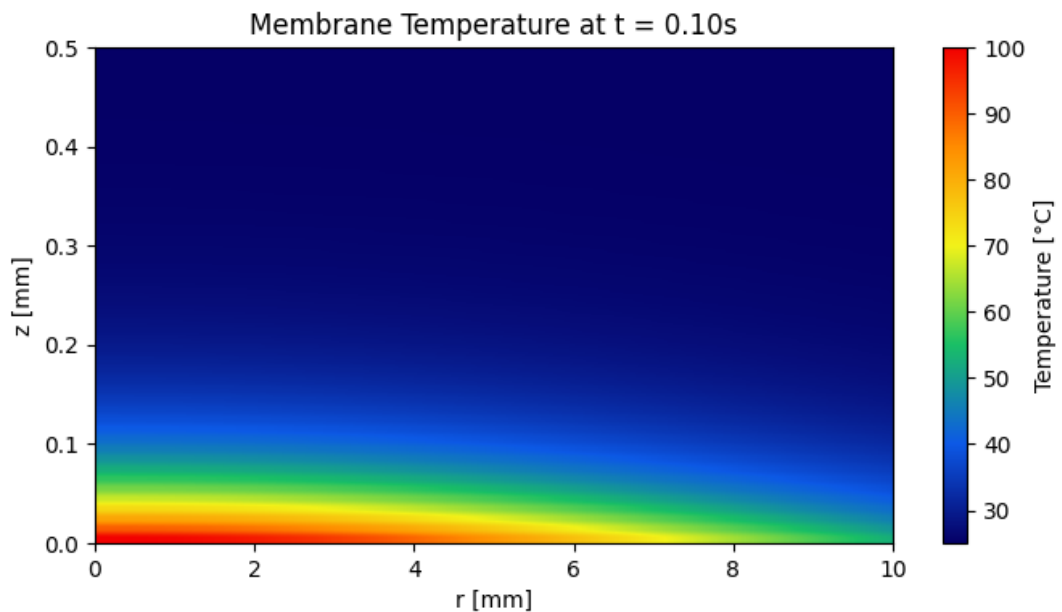


Рис.2.11. Стан температурного поля у мембрані при дії термоудару у момент часу $t=0,1\text{c}$. (товщина і радіус мембрани $-h = 0,25\text{мм}, R = 5\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну на периметрі $l_3 = 200\text{ m}^{-1}$)

Оскільки задача теплопровідності є осесиметричною, то на цих рисунках показано половину мембрани. На рисунках по осях абсцис і ординат подано геометричні розміри елементів, а з правої сторони рисунка подана температурна шкала, де значення температури відображено відповідним кольором.

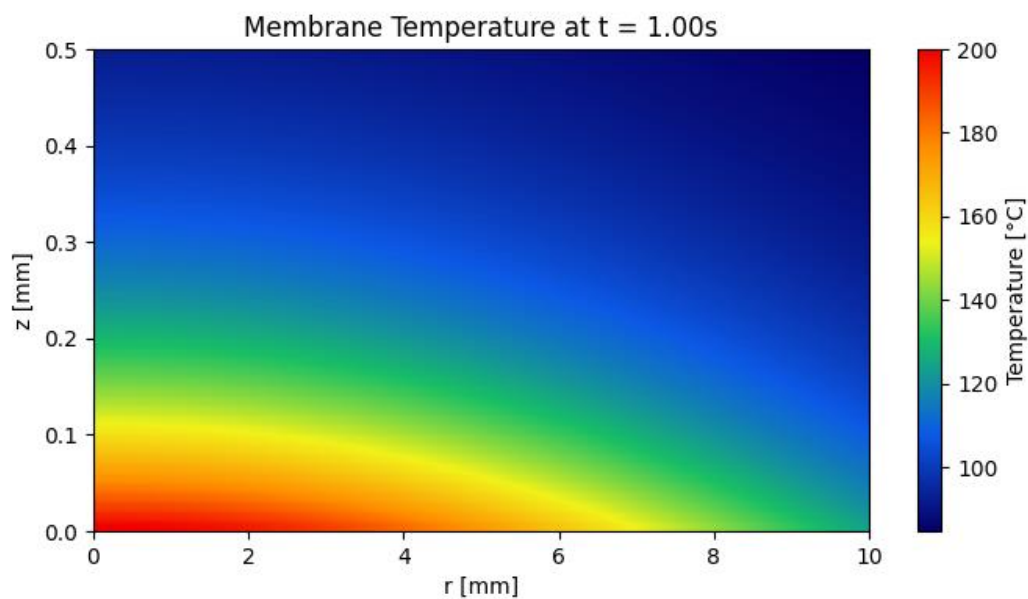


Рис.2.12. Стан температурного поля у мембрані при термоударі у момент часу $t=1c$. ($h = 0,25\text{мм}$, $R = 5\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну $l_3 = 200\text{ м}^{-1}$)

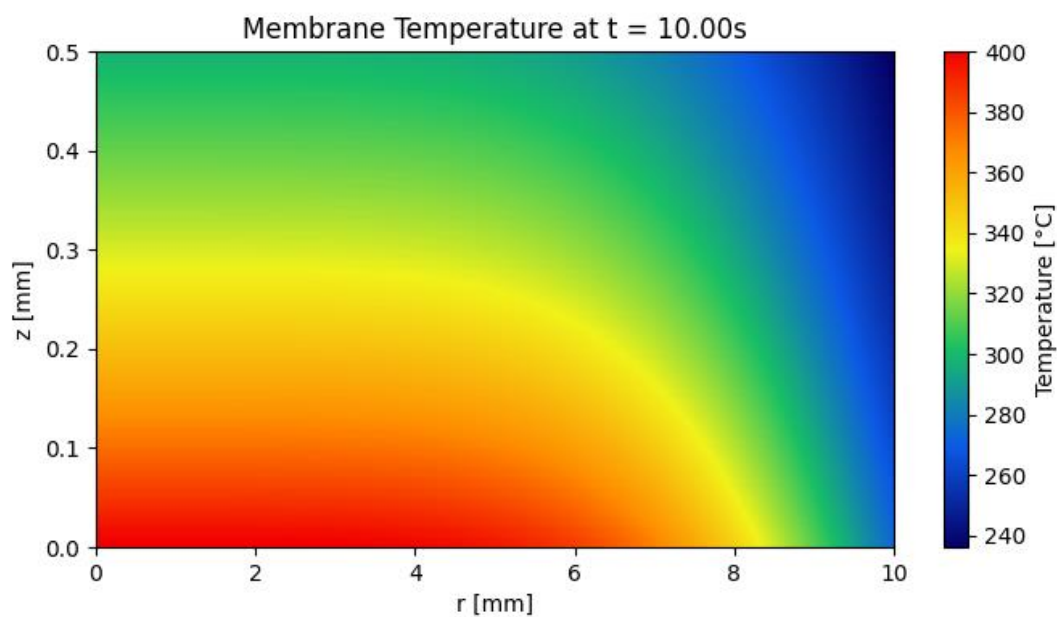


Рис.2.13. Стан температурного поля у мембрані при термоударі у момент часу $t=10c$. ($h = 0,25\text{мм}$, $R = 5\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну $l_3 = 200\text{ м}^{-1}$)

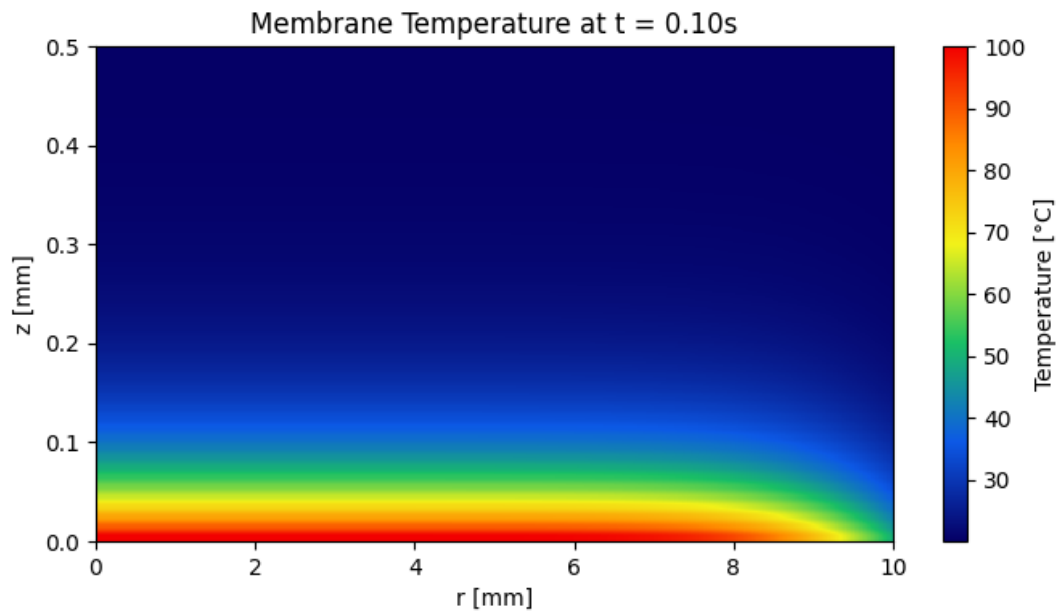


Рис.2.14. Стан температурного поля у мембрані при термоударі у момент часу $t=0,1$. ($h = 0,5\text{мм}$, $R = 10\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну $l_3 = 100\text{ м}^{-1}$)

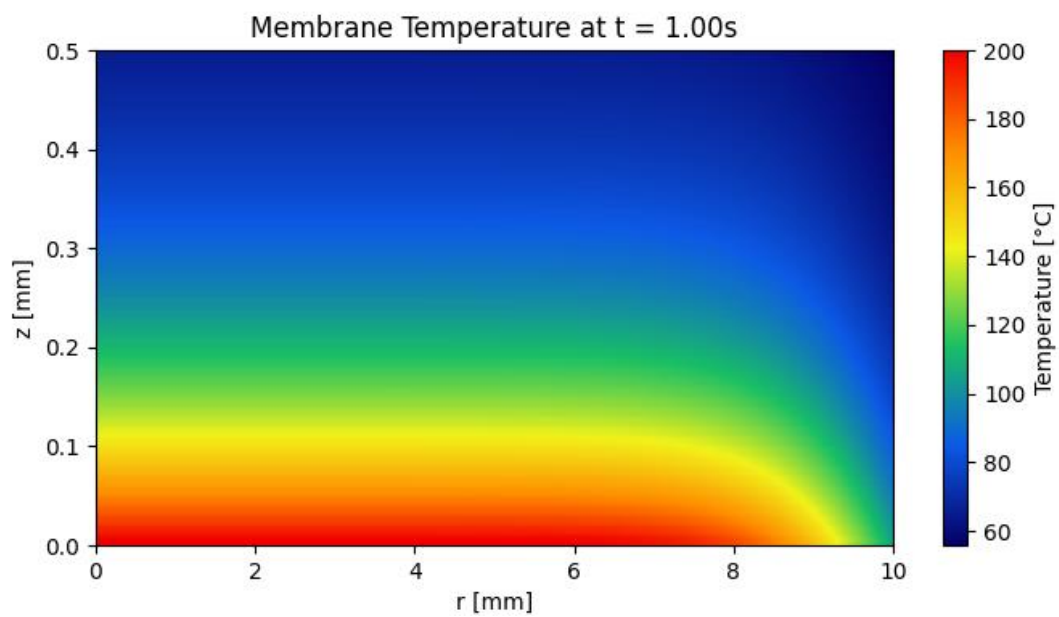


Рис.2.15. Стан температурного поля у мембрані при термоударі у момент часу $t=1с$. ($h = 0,5\text{мм}$, $R = 10\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну $l_3 = 100\text{ м}^{-1}$)

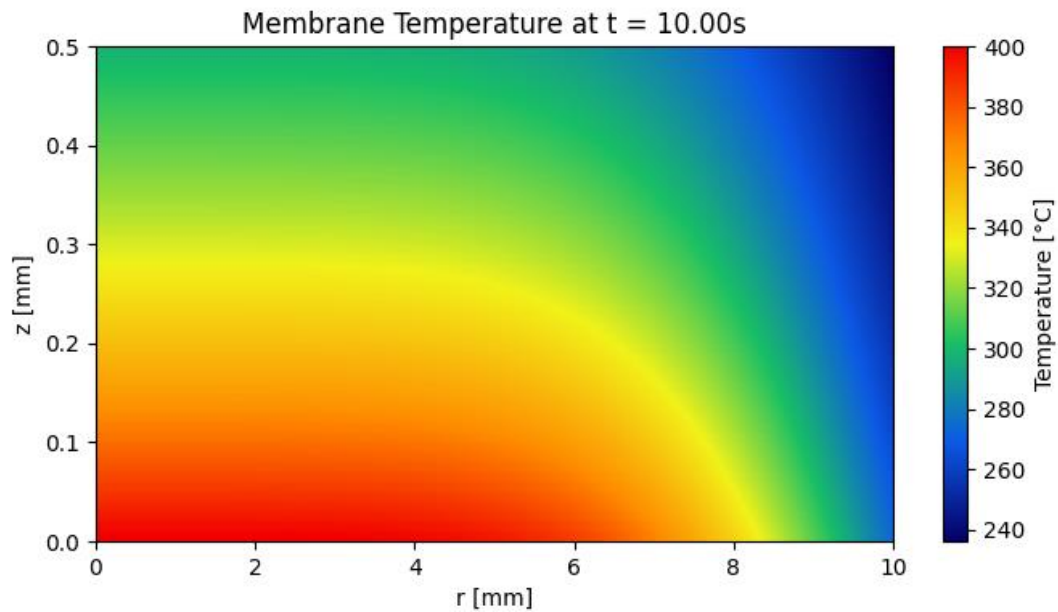


Рис.2.16. Стан температурного поля у мембрані при термоударі у момент часу $t=10c$. ($h = 0,5\text{мм}$, $R = 10\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну $l_3 = 100 \text{ м}^{-1}$)

На основі отриманих результатів визначаємо характер температурного поля мембрани вздовж радіуса внутрішньої сторони (рис.2.15, рис.2.16).

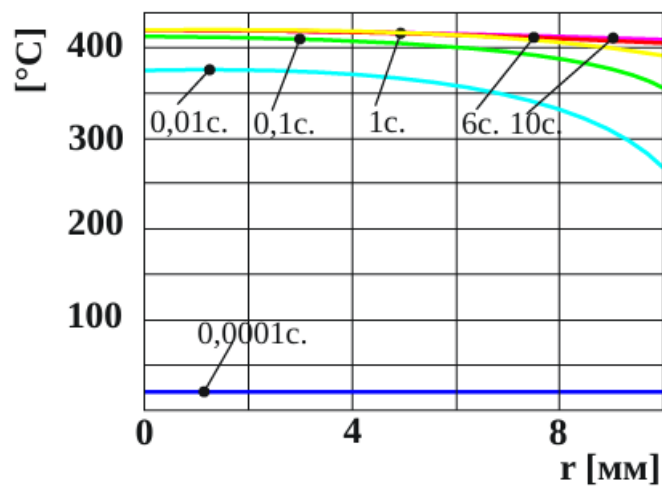


Рис.2.17. Температурне поле на внутрішній стороні мембрани ($h = 0,25\text{мм}$, $R = 5\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну $l_3 = 200 \text{ м}^{-1}$)

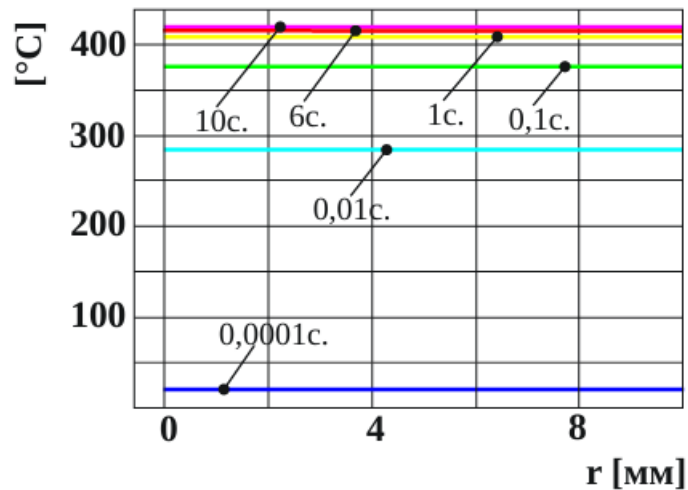


Рис.2.18 Температурне поле на внутрішній стороні мембрани ($h = 0,5\text{мм}$, $R = 10\text{мм}$; нормований коефіцієнт теплообміну $l_3 = 100\text{ м}^{-1}$)

Виходячи з отриманих даних, також встановлюємо динаміку проникнення температури по її товщині (рис.2.19).

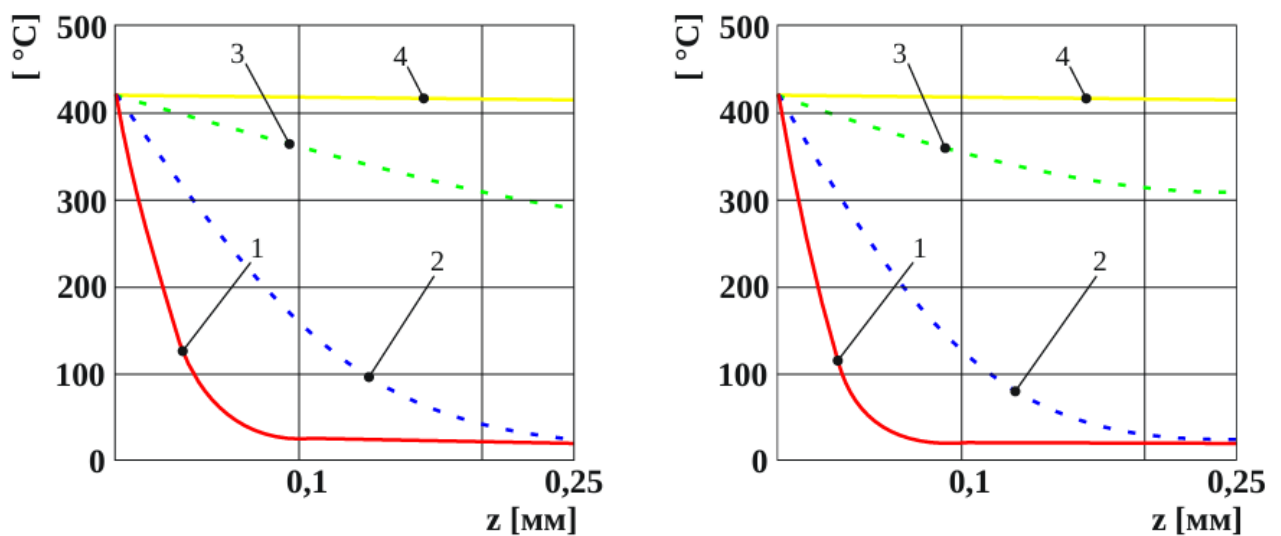


Рис.2.19. Характер температурного поля по товщині мембрани а)- в центрі, б)- на периметрі. (1 – 0.01, 2 – 0.1, 3 – 1, 4 – 6)

Дослідження температурного поля мембранни виявило фундаментальне явище: в залежності від коефіцієнті теплообміну на периметрі а також геометричних розмірів мембрани сенсора тиску спостерігатися градієнт температури вздовж радіуса мембрани (рис.2.17), він практично відсутній (рис.2.18). Мембрана (не)знаватиме термопрогину при перепаді температури

по товщині мембрани сенсора (рис.2.19), при відсутності або наявності градієнта вздовж радіуса мембрани сенсора. А враховуючи те, що температурне поле є нестационарне, термопрогин мембрани перетвориться у її коливання [83]. Такий термопрогин становитиме дестабілізуючий вплив вимірювання.

Усунути градієнт температури вздовж радіуса мембрани можливо мінімізацією теплового потоку в точці закріплення в корпусі сенсора тиску. Відсутність теплообміну між корпусом і мембраною при термоізоляції мембрани по периметру (рис.2.20.а), або коли матеріал корпусу буде мати аналогічну теплопровідність, як у точці закріплення мембрани що забезпечить нульовий тепловий потік ($Q_1 = Q_2$) (рис.2.20.б).

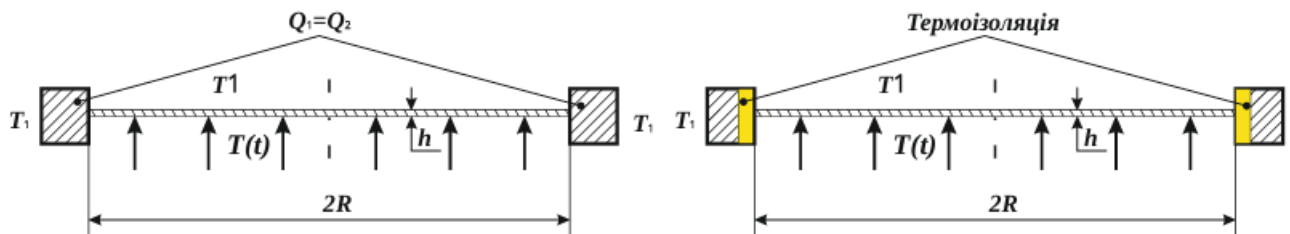


Рис.2.20. Схема теплообміну по периметрі мембрани сенсора тиску

Лінеаризація температурного поля мембрани відіграватиме ключову роль у зменшенні температурного впливу на вимірювальне перетворення в умовах нестационарних термовпливів. Саме забезпечення лінійності температурного поля у мембрані конструкційно-технологічними заходами з метою підвищення точності вимірювання є одним з шляхів інтелектуалізації сенсорів на апаратному рівні.

2.3.2. Спосіб вимірювання тиску в умовах нестационарного термовпливу.

Теоретичне підґрунтя для розроблення способу вимірювання базується на таких аспектах.

У мембрані виникатимуть термонапруження під дією нестационарної температури середовища, які можна описати [84]:

$$\sigma_r(r, z, t) = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\phi - (1 + \nu) \lambda_l T(r, z, t)] , \quad (2.63)$$

$$\sigma_\phi(r, z, t) = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_\phi + \nu \varepsilon_r - (1 + \nu) \lambda_l T(r, z, t)] , \quad (2.64)$$

де $T(r, z, t)$ -значення температури в певній точці мембрани (2.45).

При жорсткому зацемленні мембрани $\varepsilon_r, \varepsilon_\phi$ будуть нульові, термонапруження становитимуть (рис. 2.21):

$$\sigma_r(r, z, t) = \sigma_\phi(r, z, t) = \frac{E}{1-\nu} [-\lambda_l T(r, z, t)] \quad (2.65)$$

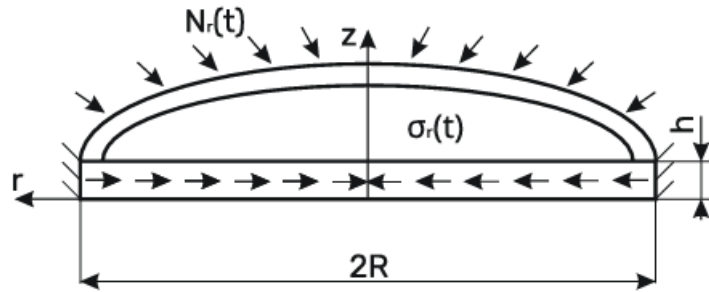


Рис.2.21. Термонапруження і термозусилля у площині мембрани

Термонапруження змінюють її перетворюючи функцію, що і є однією з нескількох причин температурної похибки сенсора тиску [65]. Ступінь впливу термонапружень на динамічні характеристики сенсора оцінимо через визначення зміни його перехідної функції при термонапруженнях у мембрані.

Еквівалентні термонапруженням (3.65) радіальні зусилля в площині мембрани будуть (рис.3.15)

$$N_r(t) = \frac{-E\lambda_l}{(1-\nu)} \frac{1}{R} \int_0^R \int_0^h T(r, z, t) dz dr \quad (2.66)$$

Статичний прогин мембрани в її центрі при дії тиску і стискуючих, чи розтягуючих зусиль $\pm N$ в її площині становить

$$w_{cm}^0 = p_0 \cdot \frac{(J_1(\mu_0) \cdot I_0(\mu_0) - J_0(\mu_0) \cdot I_1(\mu_0))(I_0(\mu_0) - J_0(\mu_0))R^4}{J_0^2(\mu_0) \cdot I_0^2(\mu_0)(c^4 \mu_0^5 \gamma \pm N \mu_0^3 R^2)} \quad (2.67)$$

Тобто, при зростанні стискаючих зусиль N цей прогин може невпинно зростати, а при зростанні розтягуючих зусиль прогин може набути практично нульового значення. Це означає, що статична характеристика мембрани буде невизначена.

Якщо у площині жорстко защемленої мембрани діють стискуючі (розтягуючі) зусилля $N(t)$, то її коливання при вимірюванні тиску $p(t)$ описуються рівнянням [217]

$$c^4 \Delta^2 w(r, t) \pm \frac{N(t)}{\gamma} \Delta w(r, t) + \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = \frac{p(t)}{\gamma} \quad (2.68)$$

За аналогією до методики розв'язку (2.3), опускаючи проміжні викладки, розв'язок рівняння (3.41) запишеться

$$w(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\eta_n(t-\tau)) d\tau, \quad (2.69)$$

де ζ_n визначається з (2.42), η_n - з виразу (2.49), але в ньому

$$\xi_n^2 = c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^4} \pm \frac{N(t)}{\gamma} \frac{\mu_n^2}{R^2}. \quad (2.70)$$

Покладаючи, що у (2.64) $p(\tau) = 1$, отримуємо перехідну функцію при дії термонапружень в площині мембрани

$$h_{\sigma}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \cdot \left[\frac{\eta_n - e^{-\beta \cdot t} (\eta_n \cdot \cos \eta_n t + \beta \sin \eta_n t)}{\eta_n^2 + \beta^2} \right] \quad (2.71)$$

На рис.2.22 показані: $h(t)$ -перехідна характеристика мембрани при нормальних умовах ($\Delta T = 0, N(t) = 0$), і $h_{\sigma}(t)$ - при дії термонапружень, що виникли в результаті термоудару з амплітудою $\Delta T = 400^\circ\text{C}$ по мембрані з $R = 0.005\text{м}$ і $h = 0.00025\text{м}$.

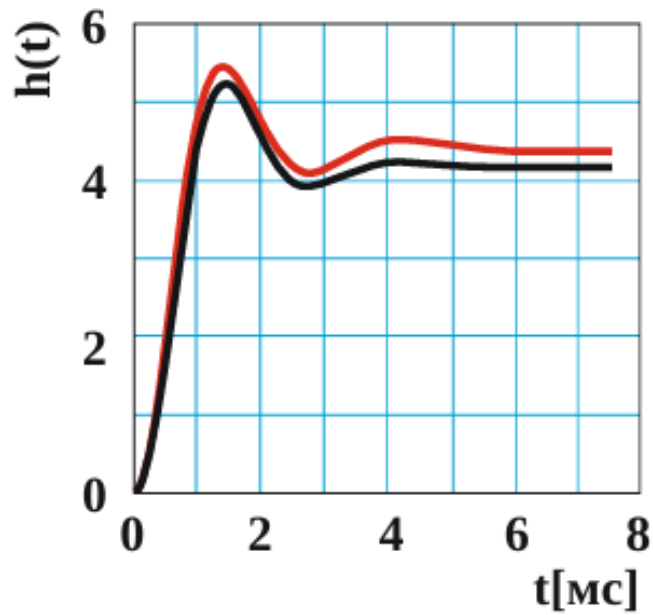


Рис.2.22. Перехідні характеристики мембрани

● - за нормальних умов;●-при дії термонапружень

Різниця перехідної характеристики при дії термонапружень і при нормальних умовах оцінена відносною похибкою $\delta_{\sigma}(t) = \left(\frac{h(t) - h_{\sigma}(t)}{h(t)} \right) 100\%$ показана на (рис.2.23).

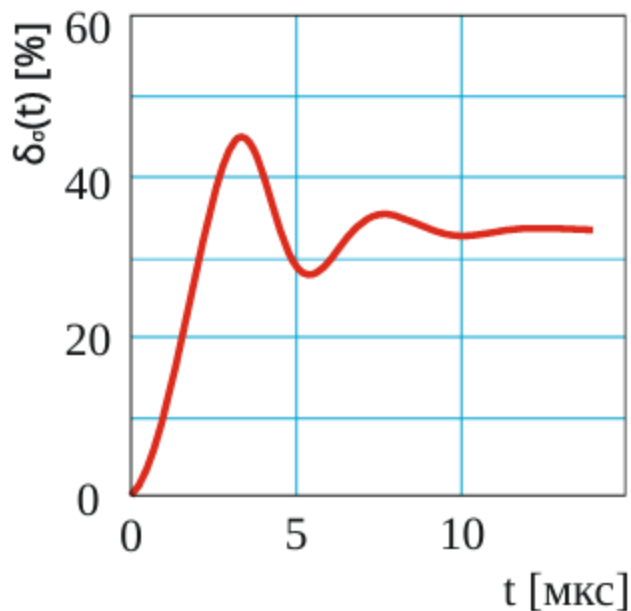


Рис.2.23. Відносна похибка перехідної характеристики при дії термонапружень

З поданого числового моделювання видно, що термонапруження спотворюють перехідну характеристику мембрани при неможливості деформації мембрани у своїй площині. Спотворення сягає 50%. Через це похибки вимірювань при дії нестационарних температур і змінного тиску є достатньо значними [85].

За можливості вільної теплової деформації мембрани у своїй площині відносне значення деформації склало б:

$$\varepsilon_r(r, t) = (1 + \nu)\lambda_n \left[T\left(r, \frac{h}{2}, t\right) - \frac{1}{r^2} \int_0^r T\left(r, \frac{h}{2}, t\right) dr - \frac{1}{R^2} \int_0^R r T(r, h/2, t) dr \right] \quad (2.72)$$

Динаміка термодеоформації на периметрі мембрани ($r = R$) з $R = 0,005\text{м}$ і $h = 0,00025\text{м}$, термоудар $\Delta T = 400\text{C}^0$. представлено на рис.2.25.

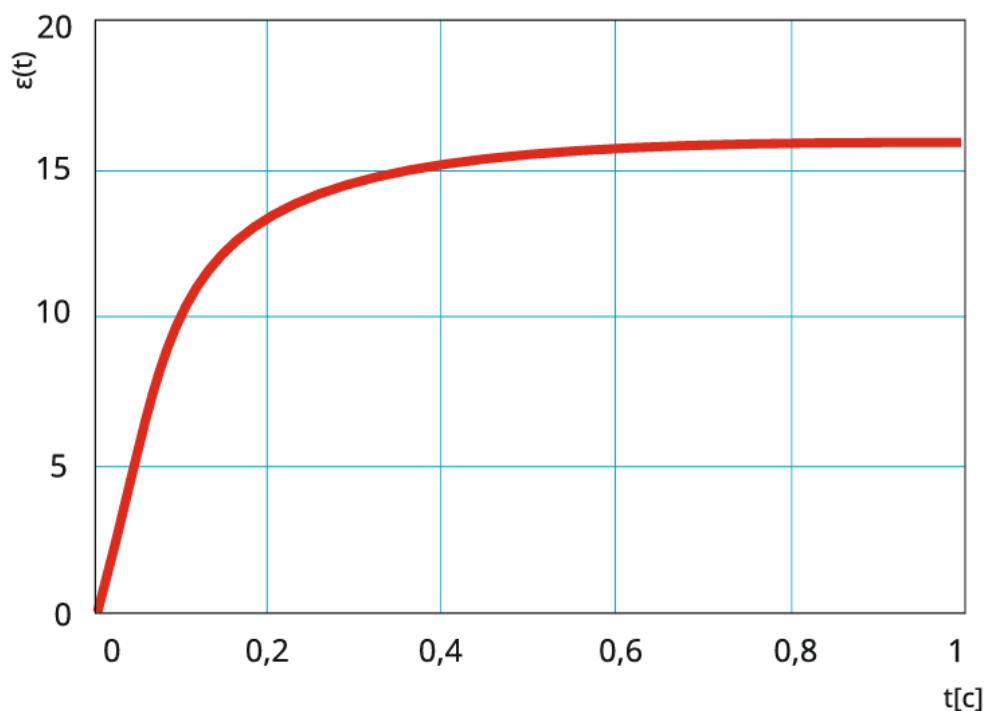


Рис.2.24. Відносна радіальна термодеоформація по периметру вільно заземленої мембрани при дії термоудару

Максимальне значення відносної радіальної термодеоформації мембрани ε_{rmax} сягає $1,7 \times 10^{-4}$. Тоді прийнявши в (2.44) $R = R_0(1 + \varepsilon_{rmax})$, а в (3.42) $N(t) = 0$ отримуємо перехідну характеристику $\dot{h}_\varepsilon(t)$ сенсора при

термодеформованій мембрані (рис.2.25 а). Розбіжність такої характеристики і нормальної також оцінімо відносною похибкою $\delta_\varepsilon(t) = \left(\frac{h(t) - h_\varepsilon(t)}{h(t)} \right) 100\%$ (рис.2.25 б).

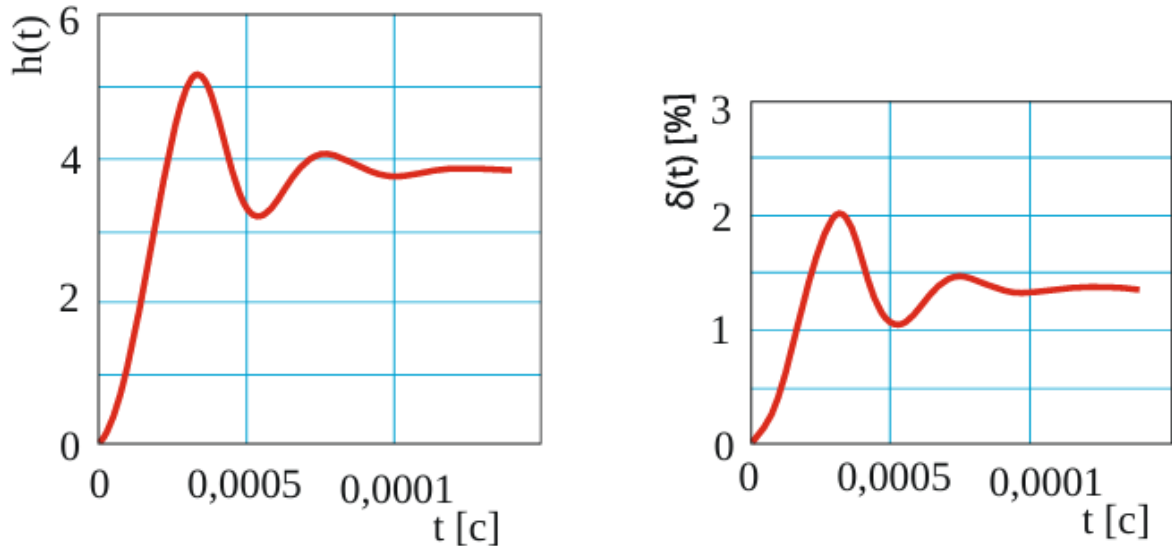


Рис.2.25. Перехідна характеристики мембрани, радіус якої зазнав теплового розширення- а); б)-відносна похибка цієї характеристики ε

З числового моделювання можна побачити що при термоударі високої амплітуди ($\Delta T = 400^\circ\text{C}$), відносна термодеформація мембрани сенсора тиску становить порядку 10^{-4} , спотворення динамічної характеристики становить тільки 2%, що становить дуже незначну зміною в порівнянні зі пятидесяти відсотковою зміною перехідної характеристики мембрани що зазнала термонапруження. Температурне стиснення/розширення порядку 10^{-4} є значним для тензорезисторів, за умови їхнього розташування безпосередньо на мембрані, що породить істотну температурну похибку.

Ці факти мають принципове значення оскільки виявили шляхи для інтелектуалізації сенсорів, а саме розроблення ефективних способів вимірювання тиску за умов нестаціонарних термовпливів, причому таких, які б передбачали швидкодіюче коригування результату вимірювання в залежності від впливу температури. Одним з таких шляхів є шлях конструкційного

забезпечення максимально можливого вільного защемлення мембрани і коригування вихідного сигналу з урахуванням значення термодформацій.

Конструкція сенсора який реалізує такий спосіб подана на Рис.2.26

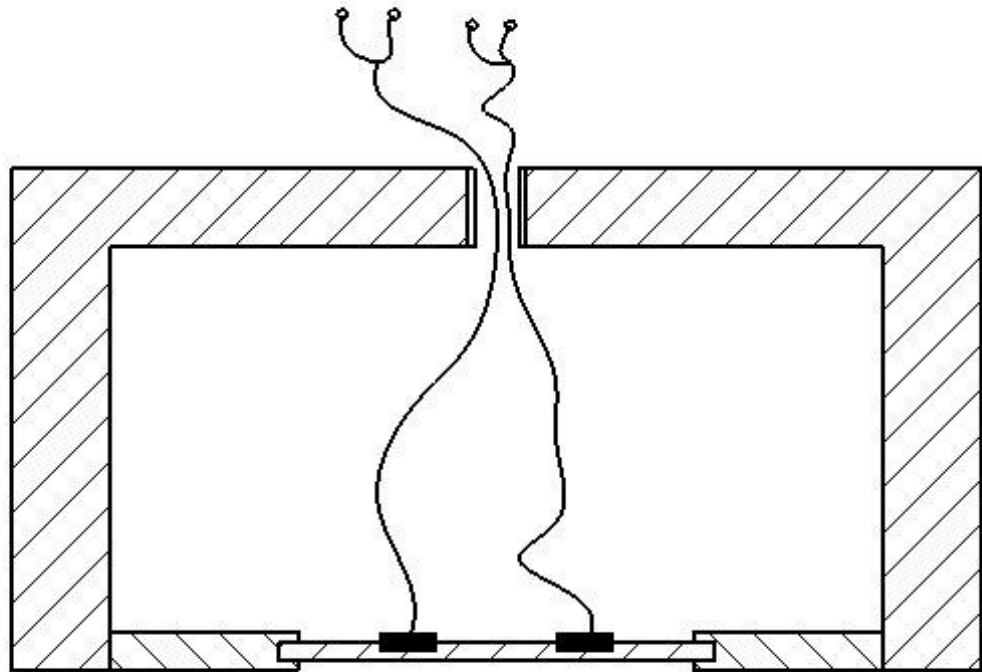


Рис.2.26 Конструкція сенсора

Мембрана сенсора через компенсуюче кільце з матеріалу, що має більший коефіцієнт температурного розширення замонтована в корпусі сенсора. Основне призначення кільця— виконувати функцію буфера між мембраною та корпусом, компенсуючи різницю в коефіцієнтах теплового розширення матеріалів. Важливо, щоб механічні характеристики матеріалу залишалися стабільними протягом тривалого часу експлуатації, навіть за умови інтенсивних температурних впливів та динамічних навантажень.

Виходячи з описаних вимог, найбільш оптимальним матеріалом для компенсуючого кільця є нітинол. Нітинол - це так званий інтелектуальний сплав із пам'яттю форми, який може автоматично відновлювати свою пластичну деформацію до початкової форми за певної температури. Крім цього в нього при

певному виді обробки спостерігається відємний коефіцієнт теплового розширення [86, 87]. Його швидкість розширення більше ніж на 20%, довговічність у 10^7 разів, характеристики демпфування у 10 разів вищі ніж звичайної сталі, його корозійна стійкість краща ніж у нержавіючої сталі, тому цей сплав може задовольнити потреби у різних інженерних застосуваннях. Крім того, високі механічні характеристики, такі як гіперпластичність дозволяють нітинолу ефективно компенсувати теплові розширення.

2.3.3. Розрахунок співвідношення параметрів компенсуючого кільця і мембрани і методу їх з'єднання.

Розрахунок температурної компенсації для сенсора тиску з мембраною та компенсуючим кільцем передбачає аналіз розширення чи звуження мембрани і сил які виникають при цьому.

Мембрану що буде розширюватися або стискатися під дією температури, можна описати лінійною залежністю:

$$\Delta R_{\text{мем.}} = \alpha_{\text{мат.мем.}} \cdot R_0 \cdot \Delta T$$

де $\Delta R_{\text{мем.}}$ — зміна радіусу мембрани,

$\alpha_{\text{мат.}}$ — температурний коефіцієнт лінійного розширення мембрани,

R_0 — початковий радіус мембрани,

ΔT — зміна температури.

Компенсуюче кільце, при зміні температури також буде зазнавати лінійного розширення, залежно від його температурного коефіцієнта лінійного розширення. Тому зміна радіусу кільця за температури визначається за аналогічною формулою:

$$\Delta R_{\text{кіл.}} = \alpha_{\text{мат.кіл.}} \cdot R_0 \cdot \Delta T$$

Компенсуюче кільце повинно компенсувати деформацію мембрани за рахунок зміни власних розмірів. Для цього необхідно щоб виконувалась наступна умова:

$$\Delta R_{\text{кїл.}} = \Delta R_{\text{мем.}}$$

Тепер розглянемо сили, що виникають на мембрану та кільце при зміні температури.

Еквівалентна сила мембрани що виникає при термонапруженнях:

$$F_{\text{мем.}} = E_{\text{мем.}} \cdot S_{\text{мем.}} \cdot \frac{\Delta R_{\text{мем.}}}{R_0}$$

де $E_{\text{мат.}}$ — модуль пружності матеріалу мембрани, $S_{\text{мем.}}$ — площа поверхні мембрани.

Площа поверхні мембрани круглої форми:

$$S_{\text{мем.}} = 2\pi R_0^2$$

Тепер вираз для сили буде виглядати так:

$$F_{\text{мем.}} = E_{\text{мем.}} \cdot 2\pi R_0^2 \cdot \frac{\Delta R_{\text{мем.}}}{R_0}$$

Підставимо вираз для $\Delta R_{\text{мем.}}$:

$$F_{\text{мем.}} = E_{\text{мем.}} \cdot 2\pi R_0^2 \cdot \frac{\alpha_{\text{мем.}} \cdot R_0 \cdot \Delta T}{R_0}$$

$$F_{\text{мем.}} = E_{\text{мем.}} \cdot 2\pi R_0^2 \cdot \alpha_{\text{мем.}} \cdot \Delta T$$

У випадку компенсуючого кільця, сила, яка виникає через зміну його розміру при температурному впливі, також залежить від модуля пружності матеріалу, площі поперечного перерізу і зміни радіусу:

$$F_{\text{кїл.}} = E_{\text{кїл.}} \cdot S_{\text{кїл.}} \cdot \frac{\Delta R_{\text{кїл.}}}{R_0}$$

де $E_{\text{кїл.}}$ — модуль пружності матеріалу компенсуючого кільця,

$S_{\text{кіл}}$ — площа компенсуючого кільця.

$$S_{\text{кіл}} = \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)$$

де R_1 і R_2 – зовнішній, внутрішній радіус кільця.

Тепер вираз для сили буде виглядати так:

$$F_{\text{кіл.}} = E_{\text{кіл.}} \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot \frac{\alpha_{\text{кіл.}} \cdot R_0 \cdot \Delta T}{R_0}$$

$$F_{\text{кіл.}} = E_{\text{кіл.}} \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot \alpha_{\text{кіл.}} \cdot \Delta T$$

Щоб компенсуюче кільце компенсувало вплив змінної температури, необхідно, щоб виконувалась умова:

$$F_{\text{кіл.}} = F_{\text{мем.}}$$

Тобто:

$$E_{\text{кіл.}} \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot \alpha_{\text{кіл.}} \cdot \Delta T = E_{\text{мем.}} \cdot 2\pi R_0^2 \cdot \alpha_{\text{мем.}} \cdot \Delta T$$

Спростимо рівняння

$$E_{\text{кіл.}} \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot \alpha_{\text{кіл.}} = E_{\text{мем.}} \cdot 2R_0^2 \cdot \alpha_{\text{мем.}}$$

Дане рівняння показує, що для ефективної компенсації температурних деформацій, площа компенсуючого кільця та мембрани повинна бути пропорційна іншим параметрам, таким як температурний коефіцієнт розширення та модулі пружності відповідних матеріалів.

Для досягнення компенсації температурних деформацій на основі температурних коефіцієнтів розширення і модулів пружності, отримаємо співвідношення між площами компенсуючого кільця і мембрани:

$$\frac{S_{\text{кіл}}}{S_{\text{мем.}}} = \frac{E_{\text{кіл.}} \cdot \alpha_{\text{кіл.}}}{E_{\text{мем.}} \cdot \alpha_{\text{мем.}}} \cdot \frac{2R_0^2}{(R_1^2 - R_2^2)}$$

Це співвідношення визначає необхідне співвідношення площ компенсуючого кільця і мембрани сенсора тиску для досягнення ефективної компенсації температурних деформацій.

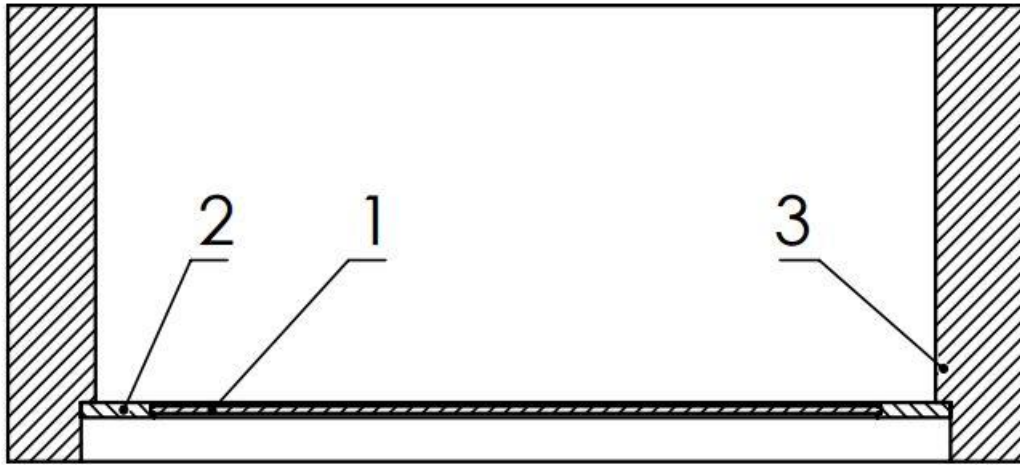


Рис. 2.27. Зображення сенсора

1 – мембрана, 2 – компенсуюче кільце, 3 – корпус.

З'єднання компенсуючого кільця і мембрани є одним з важливих етапів у розробці сенсора тиску, оскільки правильно з'єднані компоненти забезпечують точність вимірювання та довговічність сенсора.

Одним із варіантів з'єднання, що відповідає вимогам сенсорів, є термічне з'єднання, або зварювання. Зварювання дозволяє створити міцне і надійне з'єднання між компонентами сенсора, використовуючи високу температуру для розплавлення та з'єднання матеріалів. Термічне зварювання є ефективним при з'єднанні різних матеріалів, оскільки завдяки зварювальним технологіям можна досягти стабільного з'єднання навіть при різних фізико-механічних властивостях матеріалів.

Однак, окрім вибору методу з'єднання, важливо передбачити також конструкційні з'єднання мембрани та компенсуючого кільця. Використаємо ефект термічного розширення і усадки матеріалів для створення надійного фіксованого з'єднання.

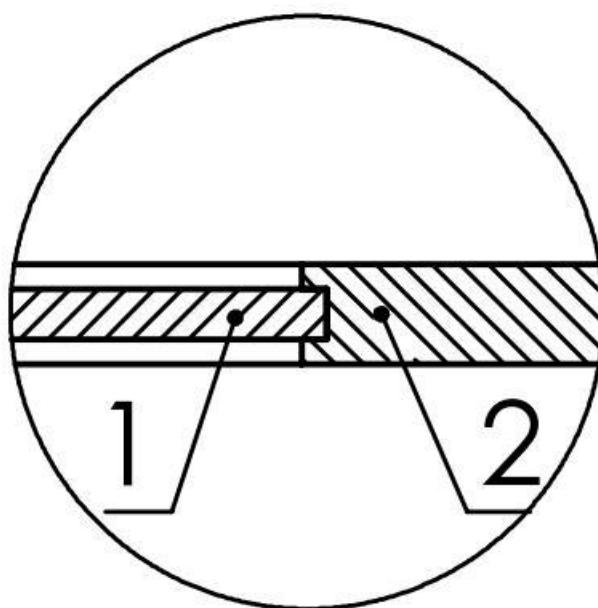


Рис.2.28. конструкційне з'єднання мембрани і компенсуючого кільця

1 – мембрана, 2 – компенсуюче кільце

Принцип роботи цього з'єднання базується на використанні різниці температур під час монтажу. Компенсуюче кільце перед установкою піддається нагріванню, що спричиняє його розширення, тоді як мембрана охолоджується, що призводить до її незначного звуження. Після встановлення кільця на місце температура обох елементів повертається до рівноважного стану, внаслідок чого компенсуюче кільце розширюється і міцно затискає мембрану. Завдяки цьому створюється надійне та довговічне з'єднання.

Розглянута конструкція забезпечує стабільність роботи сенсора тиску, зменшуючи ризик втрати герметичності. Дане з'єднання мембрани та компенсуючого кільця дає змогу досягти високої точності вимірювання завдяки забезпеченню постійного контакту між елементами.

Таким чином, шляхом використання інтелектуального матеріалу для компенсуючого кільця забезпечене ковзне защемлення мембрани і, тим самим, мінімізуються термонапруження у мембрані. Далі, для компенсації

температурної похибки, яке виникне внаслідок теплового розширення мембрани на її внутрішній стороні в точках з координатами $r = R/\sqrt{3}$ встановлюють два тензорезистора з різними типами провідностей. Оскільки в точках мембрани з координатами $r = R/\sqrt{3}$ відбувається перегин мембрани при її прогині, то тензорезистори в цих точках не відчуватимуть деформації при прогині мембрани, а лиш відчуватимуть її лінійне розширення.

Компенсація термофізичних процесів у тензорезисторах досягається підбором резисторів із різнознаковою провідністю та їх розміщенням на мембрані в областях з нульовими [88], або рівними за величиною, але протилежними за знаком деформаціями (рис.2.29).

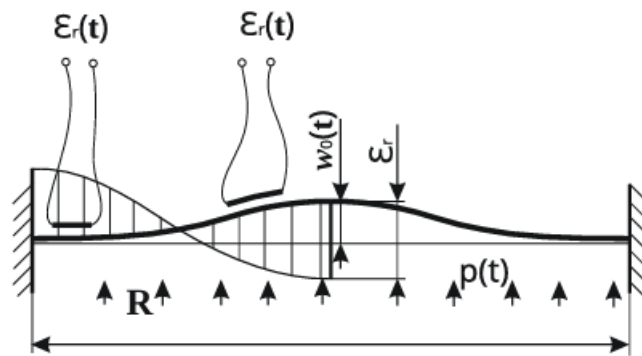


Рис.2.29. Розташування тензорезисторів з термокомпенсацією на мембрані

Відповідно, спосіб вимірювання тиску при нестационарному термовпливі передбачає виконання наступних процедур:

- вимірюванні термодеоформації мембрани $\varepsilon_{\Delta R}$ опрацюванням сигналів з тензорезисторів, які розташовані в точках з координатами $r = R/\sqrt{3}$
- коригування значення основних тензорезисторів

$$\varepsilon_K^+ = \varepsilon_r^+ + \varepsilon_{\Delta R} \quad \text{і} \quad \varepsilon_K^- = \varepsilon_r^- - \varepsilon_{\Delta R}$$

- розрахунку скоригованого на температурну похибку значення вимірюваного тиску, з використанням розробленого у п.2.2 способу вимірювання.

Таким чином, спосіб контролю термодеоформацій ґрунтується на вимірюванні тиску, математичному опрацюванні вимірювального сигналу (рис.2.30).

Сенсор, який реалізує запропонований метод, містить корпус 1, мембрану 2, жорстко зацмлену, через нітинове кільце 3, тензорезистори 4 і 5, які розташовуються на мембрані (рис.2.26).

При вимірюванні тиску під дією нестационарної температури тензорезистори 4 вимірюють її деформацію згину (сигнали $\varepsilon_r^+(t)$ і $\varepsilon_r^-(t)$), а тензорезистори 5 вимірюють термодеоформацію $\varepsilon_{\Delta R}$.

$$1- \beta, R, h, \lambda, E, b$$

$$2- \varepsilon(t) = \frac{\varepsilon^-(t) + \varepsilon^+(t)}{2}, \Delta R(t) = \pm \frac{\varepsilon(t)R}{2}, U(t) = U_0 \cdot b \cdot \varepsilon(t)$$

$$3- T^0(z, t) = \int_0^t f(T_1^0(t), T_2^0(t)) dt$$

$$4- U'(t) = \int_0^t U''(t) dt$$

$$5- N(t) = f(T^0(z, t), \Delta R(t)), k = f(N(t)), \eta = f(N(t))$$

$$6- p(t) = \frac{U''(t) + 2\beta U'(t) + (\eta^2 + \beta^2)U(t)}{k\eta}$$

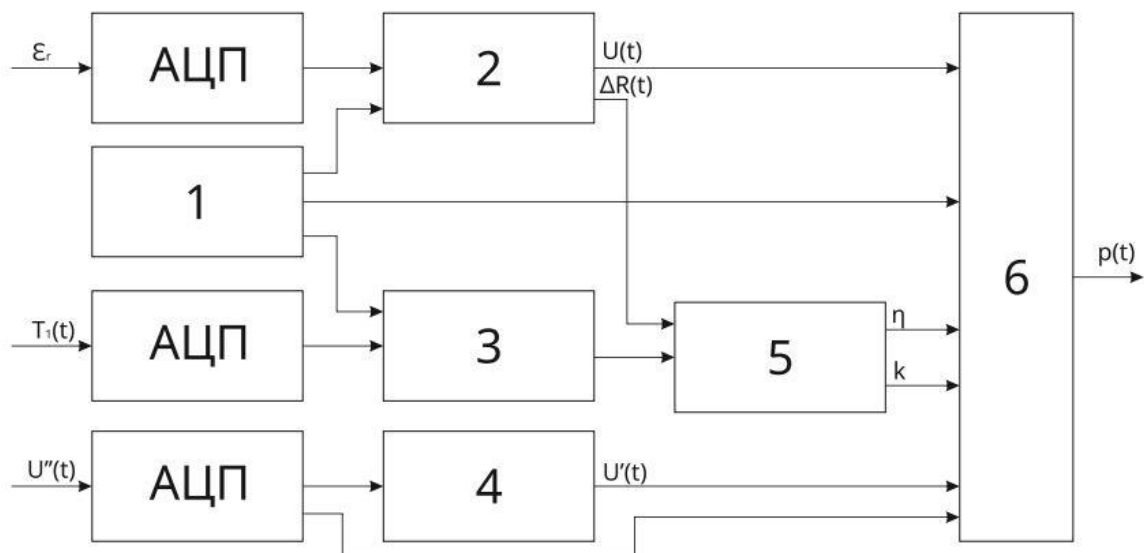


Рис.2.30. Структурно-функціональна схема вимірювання тиску за умов нестационарного температурного впливу

2.4. Самодіагностика сенсора тиску

У системах вимірювання тиску з використанням тензорезистивних сенсорів важливо не лише забезпечити високу точність вимірювань, але й гарантувати довготривалу стабільну роботу сенсора. Одним із сучасних і ефективних підходів до підвищення функціональної безпеки таких систем є самодіагностика — здатність пристрою виявляти відхилення у власній роботі без зупинки технологічного процесу чи необхідності зовнішнього втручання. Це дозволяє виявляти пошкодження або деградацію сенсора ще до того, як вони призведуть до критичних помилок у вимірюваннях.

У тензорезистивному сенсорі тиску одним з ключових елементів виступають тензорезистори, які змінюють свій електричний опір під впливом деформації пружного елемента — мембрани. Коли до поверхні мембрани прикладається зовнішній тиск, виникає деформація, що передається тензорезисторам.

Типовою конфігурацією підключення тензорезисторів у сенсорі є мостова схема, у яку включені чотири, або два тензорезистори. При цьому тензорезистори, які сприймають різнознакову деформацію включаються в протилежні плечі моста Уїтстона. Ці тензорезистори підбирають так, щоб вони мали максимально ідентичні електрофізичні характеристики, але мають різні типи провідностей, а тому при різних знаках деформацій, які вони сприймають мають однакову зміну опору. У нормальних умовах, за відсутності аномалій або деградації, ця схема зберігає певну симетрію у зміні опорів. Таким чином, сталість характеристик тензорезисторів є наріжною умовою правильної роботи сенсора.

Саме тому перевірка характеристик тензорезисторів є одним з бажаних заходів при повірці сенсорів. Проте у багатьох технічних системах вилучення сенсора на повірку є трудомісткою, а інколи і неможливою процедурою. Для

періодичного моніторингу характеристик тензорезисторів розроблений спосіб їхньої самодіагностики, як елемент інтелектуалізації сенсорів.

Вихідна напруга мосту Уінстона визначається як:

$$V_a = V_{cc} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

де R_1, R_2, R_3, R_4 , — опори чотирьох тензорезисторів

V_{cc} — напруга живлення.

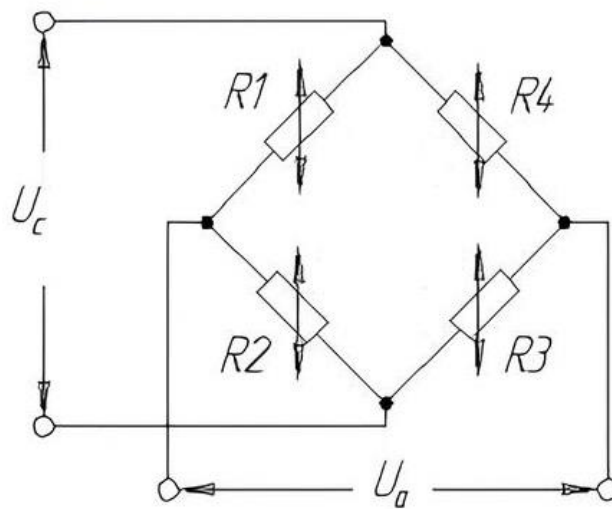


Рис. 2.31 Мостова схема підключення тензорезисторів

У випадку симетричних змін опору сигнал буде лінійним, а у випадку деградації одного з елементів порушується баланс плечей, і в результаті з'являється нелінійна компонента [96].

Самодіагностика тензорезисторів сенсора полягає у перевірці можливої зміни опору кожного окремого тензорезистора у часі та побудова індикаторної функції, яка дозволяє виявити порушення симетрії. Для цього вводиться відносне відхилення опору кожного тензорезистора у вигляді

$$\varepsilon_i(t) = \frac{R_i(t)}{R_i(0)} - 1$$

де $R_i(t)$ — поточний опір i -го тензорезистора, а $R_i(0)$ — його номінальне значення.

За ідеальних умов всі $\varepsilon_i(t)$ змінюються синхронно й зберігають певну симетрію.

$$\varepsilon_1 \approx \varepsilon_3 \quad \varepsilon_2 \approx \varepsilon_4$$

У разі ж появи відхилень одна з величин $\varepsilon_i(t)$ змінюється незалежно.

Щоб кількісно охарактеризувати асиметрію, вводяться дві сумарні функції:

перша — симетричне відхилення пари плечей.

$$S_1(t) = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 - (\varepsilon_2 + \varepsilon_4)$$

друга — диференціальне відхилення в межах пар

$$S_2(t) = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)$$

На їхній основі будується інтегральна діагностична функція що є узагальненим скалярним критерієм для вимірювання відхилень рівня сигналів тензорезисторів.

$$D(t) = \sqrt{S_1^2(t) + S_2^2(t)}$$

Для визначення допустимого рівня відхилення використовується порогове значення діагностичної функції:

$$D_{\text{поріг}} = D(0) + k \cdot \sigma_D$$

де σ_D — середньоквадратичне відхилення,

$D(t)$, k — коефіцієнт надійності

Процес самодіагностики будується за таким алгоритмом: на етапі ініціалізації зчитуються та зберігаються початкові номінальні значення всіх тензорезисторів $R_i(0)$, після чого обчислюється початкове значення інтегральної

діагностичної функції $D(0)$, а також визначається порогове значення цієї функції $D_{\text{поріг}}$. Зчитуються поточні значення опорів $R_i(t)$, обчислюються їхні відносні відхилення, а далі — обчислюються $D(t)$. Якщо $D(t) > D_{\text{поріг}}$, фіксується порушення симетрії мостової схеми, що свідчить про потенційну деградацію одного або кількох тензорезисторів. Чим більше значення $D(t)$, тим суттєвіше порушення, і тим вища ймовірність несправності.

На наступному етапі виконується аналіз відносних відхилень $\varepsilon_i(t)$ з метою виявлення конкретного несправного тензорезистора. У випадку, якщо одне зі значень $\varepsilon_i(t)$ суттєво відрізняється від свого симетричного партнера, це дозволяє ідентифікувати несправний елемент.

Таким чином, самодіагностика сенсора не лише дозволяє виявити факт порушення симетрії, але й локалізувати причину — конкретний тензорезистор, що вийшов з ладу або зазнав деградації.

Реалізуємо у вигляді простого алгоритму на мікроконтролері STM32.

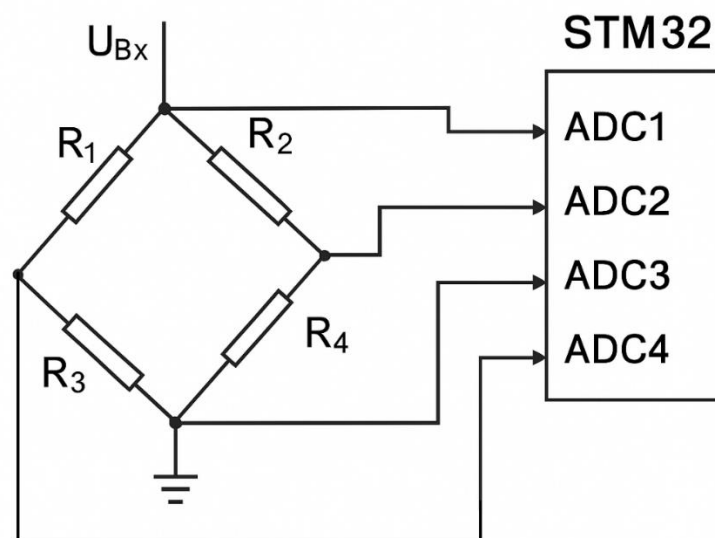


Рис. 2.32 Схема підключення тензорезисторів до контролера

Для вимірювання зміни опору, що виникає в мостовій схемі, використовуватимемо аналогові входи мікроконтролера STM32. Це забезпечить

можливість зчитування змін напруги, що виникають у результаті зміни опору тензорезисторів, аналоговими входами контролера.

Всі тензорезистори в мостовій схемі підключені до чотирьох різних каналів аналогових входів ADC на STM32. Це дозволяє забезпечити точне зчитування сигналу з кожного тензорезистора окремо і враховувати їх зміни в процесі обробки сигналу.

Розподіл сигналів буде таким: тензорезистор R_1 підключається до каналу ADC_1 , R_2 підключається до каналу ADC_2 , R_3 підключається до каналу ADC_3 , R_4 підключається до каналу ADC_4 .

Це дозволяє окремо вимірювати напруги, що змінюються на кожному плечі мостової схеми, і використовувати ці дані для подальших обчислень та діагностики.

Запропонований метод має низку переваг:

1. Не потребує окремих еталонних сенсорів або зовнішніх еталонів тиску — вся оцінка проводиться за допомогою опрацювання внутрішніх змін тензоелементів.
2. Дозволяє виявляти як повільну деградацію, так і раптові відмови, а також є потенційно стійким до температурних зсувів, якщо температурний вплив симетричний для всіх тензоелементів.

2.5. Висновок до розділу 2.

1. Введено класифікацію інтелектуальних сенсорів тиску, яка охоплює основні напрями: апаратну та програмну інтелектуалізацію, а також їх поєднання.
2. Проведено дослідження динамічних характеристик первинного вимірювального перетворювача сенсорів-мембрани, на підставі цього розроблено динамічну модель у вигляді інтегрального рівняння, виходячи з

якого Отримано розв'язок оберненої задачі вимірювання, що дозволяє запропонувати новий спосіб фільтрації і диференціювання вихідного сигналу. Запропонований спосіб диференціювання вихідного сигналу базується на теорії числової фільтрації вимірювальних сигналів. Розроблений спосіб реалізує програмну інтелектуалізацію сенсорів тиску і забезпечує можливість вимірювання нестационарного тиску в реальному часі і в межах статичної похибки.

3. Досліджено роботу розробленого методу на моделях тестових сигналів з урахуванням специфіки та особливостей умов експлуатації. Для цього було проведено моделювання на наборах тестових сигналів, які відтворювали реальні робочі умови сенсорів тиску. Результати досліджень показали, що розроблений метод має високу ефективність

4. Проведено аналіз термомеханічних процесів у мембрані сенсора тиску під впливом нестационарного термовпливу, зокрема термоудару максимальної амплітуди. На основі розв'язку осесиметричного рівняння теплопровідності з урахуванням теплообміну на контактній і внутрішній поверхнях мембрани та її периметрі, встановлено просторово-часову еволюцію температурного поля з врахуванням параметрів мембрани і нормованих коефіцієнтів теплообміну. Виявлено, що наявність температурного градієнта вздовж радіуса і по товщині мембрани призводить до її термопрогину, який у динамічних умовах перетворюється в механічні коливання, що дестабілізують вимірювальне перетворення. Показано, що усунення температурного градієнта по радіусу можливе шляхом конструкційної термоізоляції периметра або оптимального підбору теплопровідності матеріалу корпусу, що є важливим кроком до інтелектуалізації сенсора на апаратному рівні.

5. Розроблено спосіб вимірювання тиску в умовах нестационарного термовпливу, що ґрунтується на комплексному аналізі термонапружень і термодеоформацій у мембрані сенсора. Встановлено, що в умовах термоудару виникають істотні термонапруження, які можуть спотворювати перехідну характеристику сенсора до 60%, тоді як за умов ковзного защемлення мембрани

із можливістю вільної термодетформації це спотворення знижується до 2%. Запропоновано конструкцію сенсора з компенсаційним кільцем з нітинолу, що забезпечує термокомпенсоване заземлення мембрани та мінімізує вплив температурних напружень. Розроблено розрахункові залежності між параметрами кільця і мембрани для ефективної термокомпенсації. Встановлено раціональну схему розташування тензорезисторів для роздільного вимірювання згинальних і температурних деформацій, що дозволяє коригувати результат вимірювання тиску в режимі реального часу. Такий підхід створює підґрунтя для побудови інтелектуальних сенсорів тиску нового покоління з підвищеною точністю в умовах змінної температури.

6. Запропоновано метод самодіагностики сенсорів тиску, що базується на аналізі симетрії мостової схеми за допомогою інтегральної діагностичної функції. Метод дозволяє в режимі реального часу фіксувати порушення в роботі тензорезисторів без зупинки процесу вимірювання та дозволяє ідентифікувати конкретний несправний елемент.

РОЗДІЛ 3. ПРИСВОЄННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИМ СЕНСОРАМ ТИСКУ ПІД ЧАС МАСОВОГО ВИРОБНИЦТВА.

Масове виробництво тензорезистивних сенсорів тиску ставить до процедури метрологічної атестації специфічні задачі. Процес присвоєння метрологічних характеристик тензорезистивним сенсорам тиску під час масового виробництва складається з кількох ключових етапів: градуювання сенсорів – процес встановлення градуювальної характеристики (шкали) сенсора на основі стандартних вимірювальних процедур; присвоєння класу точності – класифікація сенсорів за їхньою основною похибкою; маркування і сертифікація – оформлення документації, яка підтверджує відповідність сенсорів встановленим вимогам.

При метрологічній атестації одного екземпляра чи кількох градуювання немає якихось особливостей і добре розроблене. Однак при масовому, або великосерійному виробництві появляються особливості. Зазначимо, що саме новітні технології прецизійної механіки та мікроелектроніки зробили можливим великосерійне виробництво сенсорів тиску.

При масовому виробництві вкрай бажаним, щоб сенсори одного типоміналу мали єдину градуювальну характеристику. Загалом таку одностайність забезпечують калібруванням сенсорів чи додатковим налаштуванням. Але при масовому виробництві така процедура стає обтяжлива, затратна в часі і дорога. Саме тому пропонується новий підхід в процедурі градуювання. Цей підхід полягає на використанні інтелектуальних способів, а саме використання штучних нейронних мереж. Таким чином цей підхід реалізує програмний принцип інтелектуалізації сенсорів, причому у новому аспекті-процедурі метрологічної атестації.

3.1. Загальні поняття при метрологічній атестації сенсорів.

Завдання метрологічної атестації полягає у визначенні метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, підтвердженні їх придатності до використання.

В Україні ці вимоги адаптовано до національного законодавства та нормативної бази. Зокрема, застосовуються такі стандарти:

- ДСТУ 7223:2011 — «Датчики тензорезисторні. Загальні технічні умови». Регламентує технічні вимоги до тензорезистивних датчиків, включаючи методики проведення випробувань та контролю параметрів точності [97].
- ДСТУ 3989:2000 — «Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення». Визначає порядок проведення калібрування, критерії оцінки та оформлення результатів для забезпечення метрологічної простежуваності [98].
- ДСТУ 3921.2:2000 — «Контроль процесів вимірювань засобами вимірювальної техніки. Частина 2. Настанови щодо використання вимірювального обладнання». Забезпечує основу для впровадження системи якості у вимірювальних лабораторіях а також під час масового виробництва сенсорів [99].

Градуювальні установки, що використовуються зазвичай складаються з кількох основних елементів, які взаємодіють між собою для забезпечення мети процедури. Зазначена установка містить:

1. *Задавач тиску* (автоматичний чи ручний), який генерує калібровані значення тиску в контрольованому діапазоні.
2. *Взірцевий (еталонний) сенсор тиску*, що використовується для градуювання забезпечує взірцеві значення тиску.
3. *Дослідний сенсор тиску*, який піддається градуюванню.

4. Блок передачі та обробки сигналів, який зчитує вихідний сигнал від дослідного сенсора та передає його для подальшої обробки й аналізу за допомогою спеціального програмного забезпечення

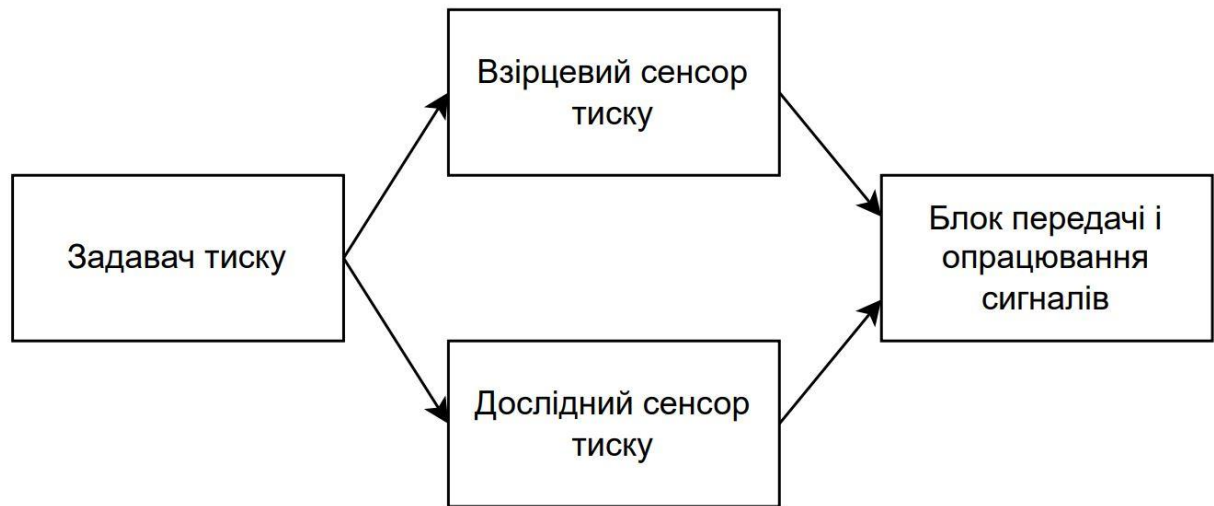


Рис. 3.1. Блок схема установки для градуювання сенсора тиску

В процесі градуювання, задавач тиску піддає дослідний сенсор тиску послідовним значенням тиску, які контролюються через взірцевий (еталонний) сенсор або інші калібровані сенсори. Для кожного значення тиску отримується сигнал від дослідного сенсора, який надходить до блоку обробки, де порівнюється з взірцевим значеннями. Програмне забезпечення здійснює аналіз отриманих результатів, що дозволяє визначити точність роботи сенсора.

3.2. Визначення параметрів статичних характеристик сенсорів тиску

З метою забезпечення роботи сенсорів необхідно провести дослідження їхніх основних метрологічних характеристик, зокрема — статичної характеристики та класу точності.

У процесі дослідження вихідний сигнал сенсора подається на блок передачі та обробки сигналів, де він перетворюється та обробляється, після чого результати виводяться на монітор. Дослідження проводяться в зростаючому

(“↑”) та спадаючому (“↓”) напрямках. Сукупність зростаючого і спадаючого напрямків представляє собою один цикл контролю. Зростаючий, чи спадаючий напрямок задавання вхідного сигналу є підциклом градуювання.

Необхідно провести r циклів і відповідно було $2r$ підциклів . Значення вихідних сигналів сенсорів U_{ji} ($i = 1 \dots 2r$) при кожному з m каліброваних значень вхідного сигналу p_j ($j = 1 \dots m$) у i -тому підциклі градуювання [82].

В результаті процедури градуювання отримується множина значень вихідного сигналу.

Для кожного зі значень вхідного сигналу p_j знаходимо:

- математичне сподівання

$$\bar{U}_j = \frac{1}{2r} \sum_{i=1}^{2r} U_{ji} \quad (3.1)$$

- центр згинів при припущенні одномодальності та нормальності закону розподілу.

$$U_j = \frac{\bar{U}_j + U_{cj}}{2}, \quad (3.2)$$

$$U_{cj} = \frac{U_{(t+1)} + U_{(2r-t)}}{2}, \quad (3.3)$$

t – ціла частина числа $\frac{2r}{4}$;

В результаті отримуємо множину значень вихідного сигналу сенсора при наростанні вірцевих значень тиску і при їхньому спаданні (Рис. 3.2).

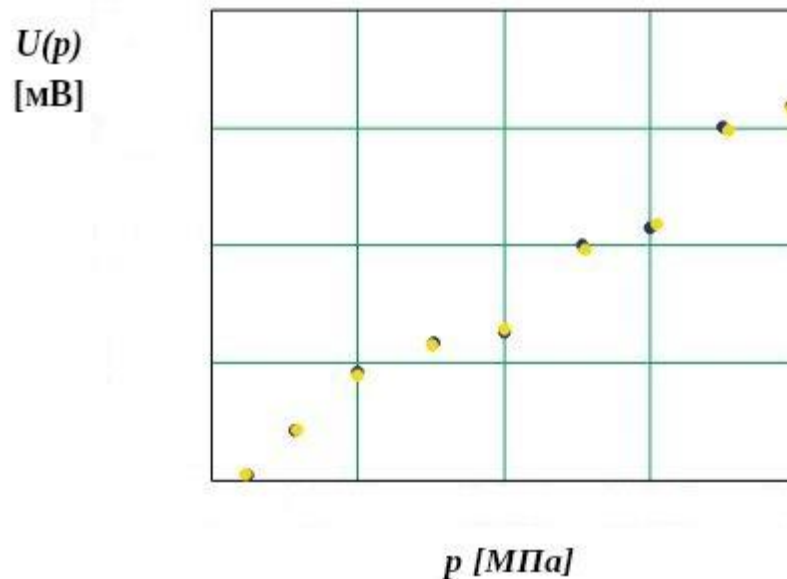


Рис. 3.2. Результати градуювання сенсора: залежність вихідного сигналу від тиску при його наростанні (●) та спаданні (●).

Представивши статичну характеристику лінійною функцією виду $U(p) = b + a \cdot p$, обчислюємо значення коефіцієнтів цієї характеристики, методом найменших квадратів:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^m U_j \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - \sum_{j=1}^m (U_j \cdot p_j) \cdot \sum_{j=1}^m p_j}{m \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - (\sum_{j=1}^m p_j)^2} \quad (3.4)$$

$$b = \frac{m \cdot \sum_{j=1}^m (U_j \cdot p_j) - \sum_{j=1}^m U_j \cdot \sum_{j=1}^m p_j}{m \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - (\sum_{j=1}^m p_j)^2} \quad (3.5)$$

За отриманими даними статична характеристика сенсора тиску буде представлені в такому вигляді (рис. 3.2):

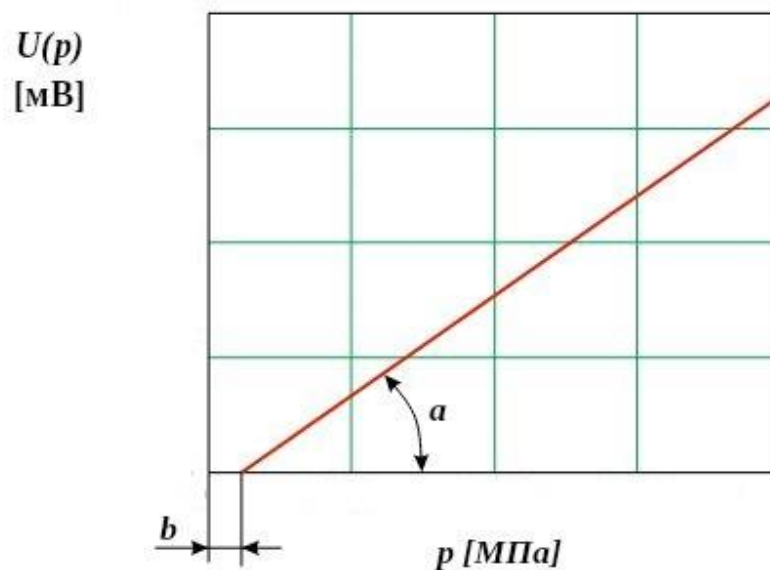


Рис. 3.3. Статична характеристика сенсора з лінійною залежністю

Тобто, для сенсора статична характеристика буде виражатися апроксимованим лінійним рівнянням:

$$U(p) = b + a \cdot p, \quad (3.6)$$

де b – так зване відхилення нуля (зауважимо, що можлива ситуація коли $b = 0$), тоді статична характеристика набуде вигляду:

$$U(p) = a \cdot p$$

що означає, що вихідна напруга лінійно пропорційна прикладеному тиску без зміщення по осі U .

3.3. Групування сенсорів тиску

Отримавши метрологічні дані про сенсори тиску, постає важливе завдання їхнього групування в межах типономіналу. Це дозволяє класифікувати сенсори за подібністю їх метрологічних характеристик та забезпечити однорідність партій продукції.

Для математичного представлення статичної характеристики кожного сенсора доцільно використовувати векторний опис.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} a \\ \frac{1}{b} \end{bmatrix}$$

Для кількісної оцінки ступеня подібності між сенсорами застосовується евклідова відстань між відповідними векторами:

$$d(\vec{v}_i, \vec{v}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (v_{i,k} - v_{j,k})^2}$$

де $\vec{v}_i, \vec{v}_j$ — вектори статичних характеристик двох сенсорів,

n — кількість дискретних точок градуювання.

Сенсори об'єднуються в одну підгрупу якщо їх параметри відрізняються не більше ніж на допустимі значення ε_a та ε_b , які визначаються як частка від середнього значення параметра в групі:

$$\varepsilon_a = \gamma \cdot a$$

$$\varepsilon_b = \gamma \cdot b$$

де γ — клас точності,

a, b — середні значення відповідних параметрів у групі.

Якщо сенсор не входить в жодну з груп він відбраковується або відправляється на підлаштування параметрів.

Для кожної сформованої групи сенсорів обчислюється узагальнена статична характеристика, яка визначається як вектор середніх значень параметрів усіх сенсорів, що входять до цієї групи.

$$\bar{a} = \frac{1}{|G|} \sum_G a_i$$

$$\bar{b} = \frac{1}{|G|} \sum_G b_i$$

де G — кількість сенсорів у одній групі,

a_i, b_i — значення параметрів a та b відповідно для i -го сенсора в групі.

На основі цих середніх значень отримуємо статична характеристику групи сенсорів:

$$\bar{U}(p) = \bar{a} \cdot p + \bar{b}$$

Для оцінки однорідності групи обчислюється внутрішньогрупова дисперсія, яка визначається як середнє значення відстаней між векторами характеристик сенсорів і середнім вектором групи:

$$D = \frac{1}{|G|} \sum_{i=1}^{|G|} \|\vec{v}^{(i)} - \vec{v}_{\text{сер.}}\|^2$$

де $\vec{v}^{(i)}$ — вектор характеристик i -го сенсора,

$\vec{v}_{\text{сер.}}$ — середній вектор групи.

$$\vec{v}_{\text{сер.}} = \frac{1}{|G|} \sum_{i=1}^G \vec{v}^{(i)}$$

де $\|\cdot\|$ — евклідова норма.

Чим менше значення D , тим більш однорідною вважається група, що підвищує точність узагальненої характеристики.

Після отримання узагальнених статичних характеристик груп сенсорів, сенсори повторно сприймали калібровані значення тиску. Отримали вихідні сигнали U_{ji} ($i = 1 \dots 2r$) для кожного з m каліброваних значень p_j ($j = 1 \dots m$) у i -тому підциклі експерименту.

Для кожного вхідного сигналу $p_j \uparrow$ і $p_j \downarrow$ знаходимо значення абсолютних і відносних похибок:

$$\Delta_{ji} \uparrow = \frac{U_{ji}}{b} \uparrow - p_j \uparrow, \Delta_{ji} \downarrow = \frac{U_{ji}}{b} \downarrow - p_j \downarrow$$

$$\delta_{ji} \uparrow = \frac{\Delta_{ji} \uparrow}{p_j \uparrow} \times 100\%, \delta_{ji} \downarrow = \frac{\Delta_{ji} \downarrow}{p_j \downarrow} \times 100\%$$

-середні за цикл значення відносних похибок

$$\delta_i = \frac{\sum_{j=1}^m \delta_{ji} \uparrow \downarrow}{2m}$$

-математичне сподівання похибки

$$M(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^{2r} \delta_i}{2r}$$

- середньоквадратичне відхилення похибки

$$\sigma(\delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2r} \delta_i^2}{2r} - (M(\delta))^2}$$

-значення основної похибки

$$[\delta] = M(\delta) \pm 3\sigma(\delta)$$

Таким чином, на основі обчислених значень похибок та їх статистичних характеристик визначається клас точності сенсора для відповідної групи, що дозволяє оцінити відповідність сенсорів встановленим метрологічним вимогам.

Групування тензорезистивних сенсорів здійснюється у два етапи: спершу — за класом точності, а після цього — за параметрами статичної характеристики. Після групування проводиться повторне тестування сенсора для визначення його класу точності та перевірки відповідності встановленим параметрам обраної групи. Це забезпечує структуровану класифікацію сенсорів і дозволяє уникнути помилкового включення елементів до невідповідних груп.

3.4. Автоматизація процесу групування сенсорів тиску

Автоматизація процесу групування сенсорів тиску є важливим кроком для підвищення ефективності метрологічного контролю та забезпечення однорідності партій продукції. Враховуючи двоетапний характер групування — спершу за класом точності, а потім за параметрами статичних характеристик — пропонується методика, що поєднує класифікаційні нейронні мережі та алгоритми кластеризації.

Для автоматичного групування сенсорів за їхніми статичними характеристиками використовується багатошарова нейронна штучна мережа, яка реалізує функцію відображення:

$$f_{\theta}: R^d \rightarrow R^N$$

де d — розмірність вхідного вектора,

N — кількість груп, сформованих на етапі аналізу класу точності сенсорів, або заданих.

НШМ має типову архітектуру багатошарового персептрона, яка складається з таких основних компонентів:

Вхідний шар:

$$x = (a, b) \in R^d$$

який представляє статичну характеристику конкретного сенсора.

Приховані шари:

Мережа складається з L прихованих шарів, які здійснюють афінне перетворення і нелінійну активацію. Для шару $l = 1, \dots, L_1$:

$$h^{(l)} = \sigma^{(l)}(W^{(l)}h^{(l-1)} + b^{(l)}),$$

де $h^{(0)} = x$ — вхідний вектор,

$W^{(l)} \in R^{n_l \times n_{l-1}}$ — матриця ваг,

$b^{(l)} \in R^{n_l}$ — вектор зсувів,

n_l — кількість нейронів у шарі l ,

$\sigma^{(l)}(\cdot)$ — нелінійна функція активації.

Для забезпечення стабільного і ефективного навчання нейронної мережі використовується функція активації ReLU (Rectified Linear Unit) — випрямлений лінійний елемент, в прихованих шарах, що визначається за формулою:

$$\sigma_{ReLU}(x) = \max(0, x)$$

Ця функція пропускає позитивні значення без змін, а всі від'ємні значення перетворює на нуль. Така властивість забезпечує простоту обчислень, ефективну передачу градієнта та зменшує ймовірність виникнення проблеми затухаючого градієнта, що робить ReLU однією з найчастіше використовуваних активаційних функцій у сучасних глибоких нейронних мережах[100].

Вибір ReLU дозволяє уникнути проблеми згасаючих градієнтів та прискорює збіжність під час навчання.

Для балансу між складністю моделі і її здатністю до узагальнення рекомендується застосовувати два прихованих шари з кількістю нейронів у кожному від 32.

Вихідний шар:

Вихідний шар має N нейронів — по одному на кожну групу:

$$z = W^{(L+1)}h^{(L)} + b^{(L+1)} \quad z \in R^N$$

Для отримання ймовірностей належності сенсора до кожної з груп використовується функція Softmax:

$$p_k = \frac{\exp(z_k)}{\sum_{m=1}^N \exp(z_m)}, \quad k = 1, \dots, N$$

$$p = \begin{cases} p_1 \\ p_2 \\ p_N \end{cases}, \quad \sum_{k=1}^N p_k = 1,$$

p_k інтерпретується як ймовірність того, що сенсор належить до групи k .

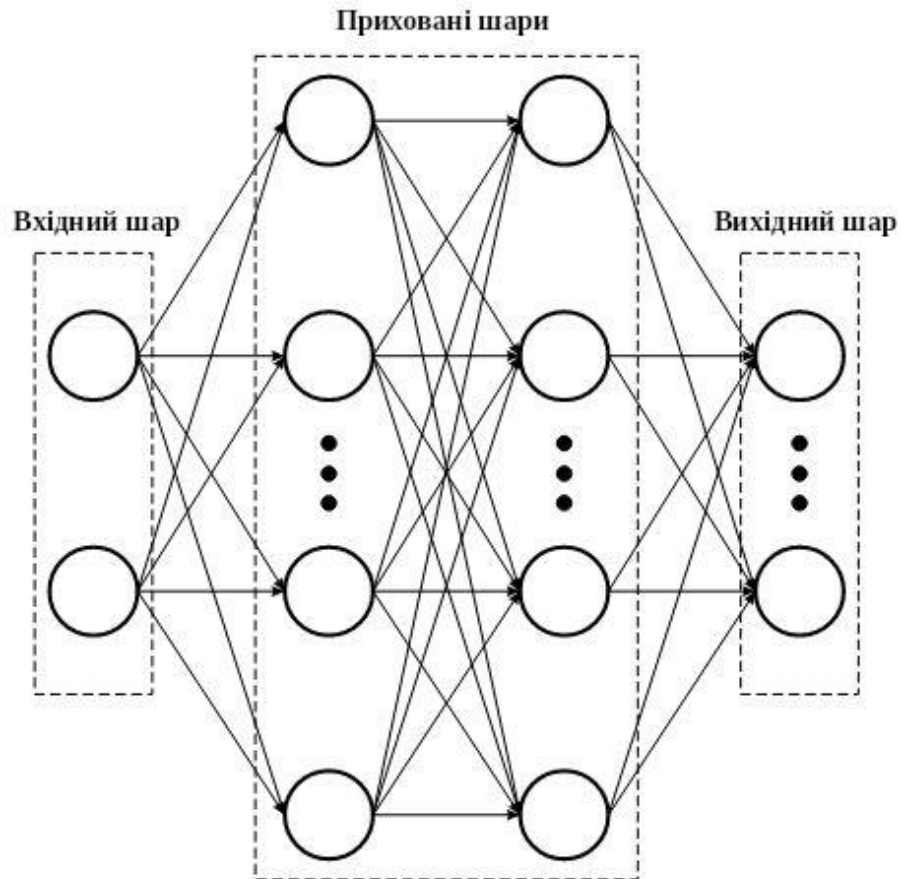


Рис. 3.4. Багатошаровий персептрон

Після визначення архітектури багатошарової штучної нейронної мережі (ШНМ) важливим етапом є процес навчання, тобто оптимізація її параметрів таким чином, щоб мережа змогла точно класифікувати сенсори тиску за групами. Також, в умовах змін виробничих умов і метрологічних характеристик, нейронна мережа повинна бути здатною адаптуватися до нових даних.

Параметри ШНМ, які підлягають навчанню, — це ваги та зсуви на кожному з шарів:

$$\theta = \{W^{(l)}, b^{(l)}\}_{l=1}^{L+1}$$

де L — кількість прихованих шарів,

$L + 1$ — індекс вихідного шару.

Для навчання класифікаційної нейронної мережі використовується функція втрат крос-ентропії. Вона оцінює розбіжність між фактичними мітками класів та ймовірнісним розподілом, який мережа генерує на вихідному шарі :

$$L(\theta) = -\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N y_k^{(j)} \log p_k^{(j)}$$

де M — кількість сенсорів у навчальній вибірці,

N — кількість груп,

$y_k^{(j)}$ — бінарні мітки належності (1 для групи k , до якої відноситься сенсор j , і = 0 для інших),

$p_k^{(j)}$ — вихід мережі.

Щоб уникнути перенавчання, коли модель починає не узагальнювати закономірності, а запам'ятовувати окремі навчальні приклади, у процесі навчання застосовується $L2$ -регуляризація ваг. Цей метод полягає в додаванні до функції втрат додаткового штрафу за надто великі значення вагових коефіцієнтів, що сприяє зменшенню складності моделі та покращенню її здатності до узагальнення.

Регуляризація ваг ($L2$ -регуляризація):

$$L_{\text{рег}} = \lambda \sum_{l=1}^{L+1} \|W^{(l)}\|_F^2$$

де $\lambda > 0$ — коефіцієнт регуляризації.

Однією з ключових переваг штучної нейронної мережі (ШНМ) є її здатність до адаптації — тобто повторного навчання або донавчання на нових даних. Це особливо важливо в умовах виробництва, де з часом можуть змінюватися характеристики сенсорів (наприклад, через технологічні зміни або зношення матеріалів).

Щоб забезпечити актуальність і точність класифікації, мережу періодично перенавчають на нових зразках сенсорів, оновлюючи її вагові параметри. Процес оновлення ваг відбувається за стандартним правилом градієнтного спуску:

$$\theta^{(t+1)} = \theta^{(t)} - \eta \nabla_{\theta} L(\theta^{(t)})$$

де $\theta^{(t)}$ — вектор усіх параметрів мережі (ваг і зсувів) на ітерації t ,

η — швидкість навчання,

$\nabla_{\theta} L$ — градієнт функції втрат за параметрами мережі.

Таким чином, реалізована методика автоматизованого групування тензорезистивних сенсорів тиску на основі багат шарової штучної нейронної мережі забезпечує високу точність класифікації та гнучкість адаптації до нових умов. Застосування нейронної моделі дозволяє враховувати як метрологічні характеристики сенсорів, так і відмінності їхніх статичних параметрів, що критично важливо для підтримання однорідності продукції у промислових партіях.

Вбудована можливість повторного навчання моделі на нових зразках гарантує її актуальність у динамічному середовищі виробництва, де параметри сенсорів можуть змінюватися з часом.

3.5. Висновки до розділу 3

1. Проведено аналіз стандартів України у сфері метрологічного забезпечення калібрування сенсорів тиску. На основі цього аналізу визначено

перелік обов'язкових елементів калібрувальної установки, необхідних для забезпечення відтворюваності результатів калібрування.

2. Запропоновано методику групування сенсорів тиску за класами точності та статичними характеристиками. Цей підхід передбачає поділ усієї партії сенсорів на декілька груп відповідно до класу точності, що встановлюється згідно з метрологічними вимогами. Усередині кожної групи сенсори додатково класифікуються за близькістю векторів їхніх статичних характеристик, що відображають основні параметри їх роботи.

3. Розроблено метод автоматизованого групування тензорезистивних сенсорів тиску на основі багатопарової нейронної мережі, що забезпечує точну класифікацію за класами точності та статичними характеристиками, з можливістю адаптації моделі до змін виробничих умов через повторне навчання.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Встановлення класу точності сенсора тиску

Досліджуваний сенсор (рис. 4.1.) є однопружним. Конструкційно сенсор складається з мембрани на якій розташовуються тензорезистори, мембрана кріпиться до корпусу через компенсаційне кільце

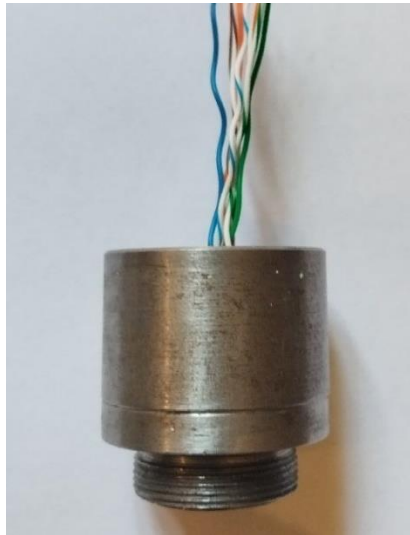


Рис. 4.1. Сенсор вимірювання тиску в нестационарних середовищах

Загальна структура системи, призначеної для проведення встановлення статичної характеристики, представлена на рис. 4.2.

Система складається з таких основних компонентів:

1. Ручного задавача тиску — призначеного для створення контрольованих значень тиску в діапазоні вимірювання;
2. Дослідного сенсора тиску, встановленого в робочий канал для сприймання створеного тиску;
3. Взірцевого манометра — використовується як еталон для контролю створених значень тиску;
4. Інтерфейсного зовнішнього модуля типу E14-140, що виконує функції обробки та аналого-цифрового перетворення вихідного сигналу сенсора;

5. Персонального комп'ютера, на якому здійснюється візуалізація, реєстрація та подальший аналіз отриманих даних у реальному часі.

У робочому каналі ручного задавача тиску встановлюється дослідний сенсор, який підлягає випробуванню. Задавач дозволяє вручну створювати дискретний набір каліброваних значень тиску в діапазоні $0 \dots 0,25$ МПа.

Сигнал із сенсора тиску передається на інтерфейсний модуль Е14-140, який здійснює попередню обробку, аналого-цифрове перетворення та передачу цифрових даних у комп'ютер для подальшої візуалізації та аналізу.

Процедура випробувань здійснюється у двох напрямках зміни вхідного тиску: зростаючому ($\uparrow$) та спадаючому ($\downarrow$). Повна послідовність цих двох напрямків утворює один цикл калібрування, а кожен з напрямків окремо розглядається як підцикл. Таке подання дозволяє точно аналізувати явища гістерезису, лінійності та інші характеристики сенсора.

У процесі експериментальних досліджень було проведено вісім повних циклів калібрування, що включають 16 підциклів ($2r$). Фіксовані рівні електричного вихідного сигналу сенсора U_{ji} ($i = 1 \dots 2r$) кожного з m еталонних значень вхідного впливу, заданих у процесі градуювання p_j ($j = 1 \dots m$) у i -тому підциклі процедури градуювання

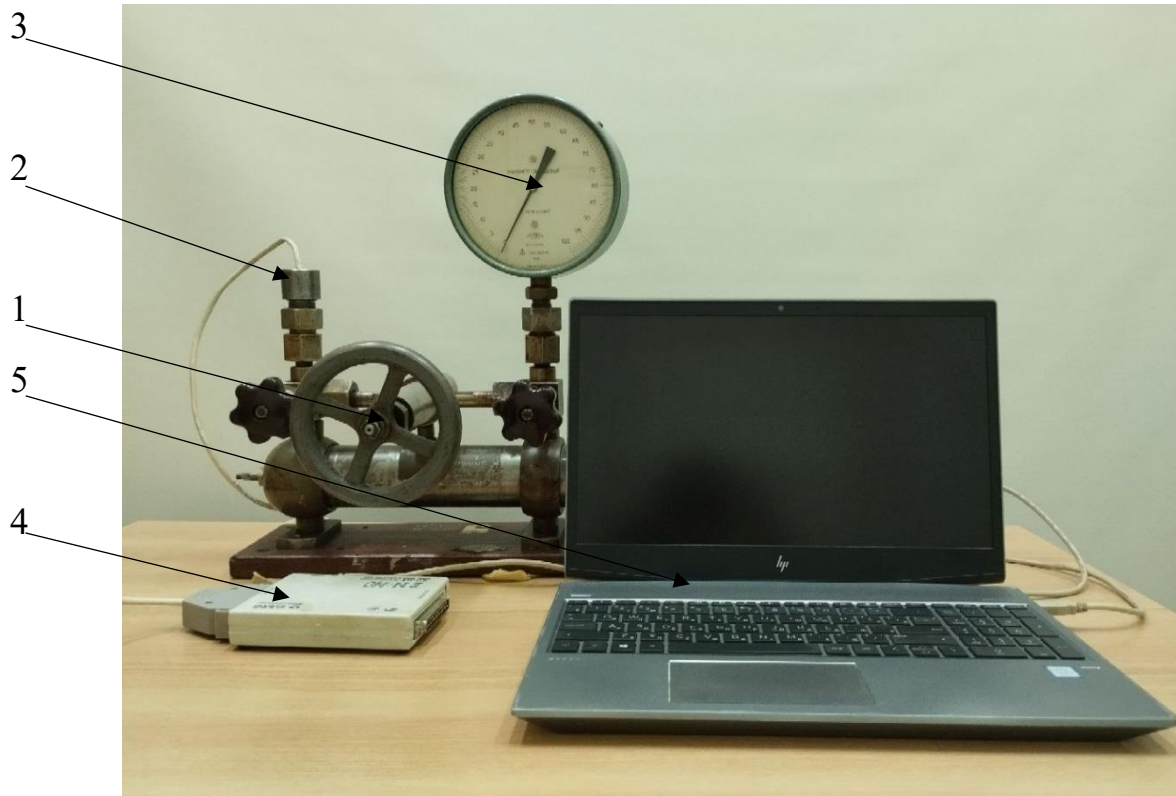


Рис.4.2. Система для проведення експериментів з визначення статичних характеристик і точності сенсорів

Для кожного зі значень вхідного сигналу p_j знаходимо:

- математичне сподівання вихідного сигналу:

$$\bar{U}_j = \frac{1}{2r} \sum_{i=1}^{2r} U_{ji}$$

- центр згинів при припущенні одномодальності і нормальності закону розподілу даних:

$$U_j = \frac{\bar{U}_j + U_{cj}}{2},$$

$$U_{cj} = \frac{U_{(t+1)} + U_{(2r-t)}}{2}$$

Представляючи статичні характеристики сенсорів лінійними функціями виду $U(p) = a + b \cdot p$, за методом найменших квадратів обчислюємо значення коефіцієнтів цих характеристик:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^m U_j \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - \sum_{j=1}^m (U_j \cdot p_j) \cdot \sum_{j=1}^m p_j}{m \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - (\sum_{j=1}^m p_j)^2}$$

$$b = \frac{m \cdot \sum_{j=1}^m (U_j \cdot p_j) - \sum_{j=1}^m U_j \cdot \sum_{j=1}^m p_j}{m \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - (\sum_{j=1}^m p_j)^2}$$

За отриманими даними Додаток А статична характеристика дослідного сенсора тиску представлена (рис. 4.3):

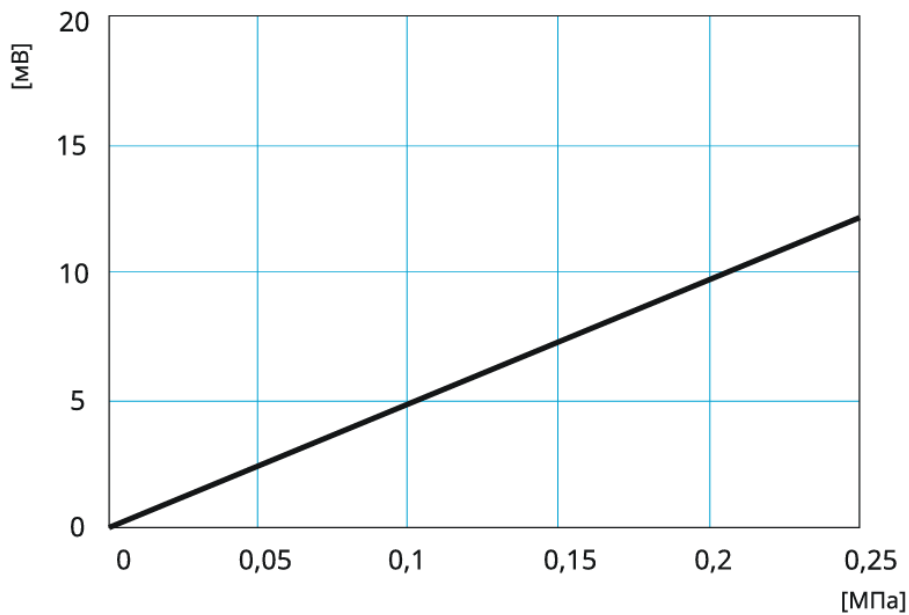


Рис. 4.3. Статична характеристика сенсора тиску

Статична характеристика сенсора виражається рівнянням:

$$U(p) = b \cdot p = 4,98 \cdot p \text{ [mV]},$$

Визначивши статичну характеристику сенсор, знову сприймає калібровані значення тиску у вигляді сигнали U_{ji} ($i = 1 \dots 2r$) для кожного з m каліброваних значень вхідного сигналу p_j ($j = 1 \dots m$) у i -тому підциклі.

Для кожного значення вхідного сигналу $p_j \uparrow$ і $p_j \downarrow$ знаходимо відповідні значення (Додаток Б):

- абсолютних і відносних похибок:

$$\Delta_{ji} \uparrow = \frac{U_{ji}}{b} \uparrow - p_j \uparrow, \Delta_{ji} \downarrow = \frac{U_{ji}}{b} \downarrow - p_j \downarrow$$

$$\delta_{ji} \uparrow = \frac{\Delta_{ji} \uparrow}{p_j \uparrow} \times 100\%, \delta_{ji} \downarrow = \frac{\Delta_{ji} \downarrow}{p_j \downarrow} \times 100\%$$

- усереднені по циклу відносні похибки:

$$\delta_i = \frac{\sum_{j=1}^m \delta_{ji} \uparrow \downarrow}{2m}$$

- математичне сподівання похибки:

$$M(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^{2r} \delta_i}{2r}$$

- стандартне (середньоквадратичне) відхилення похибки:

$$\sigma(\delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2r} \delta_i^2}{2r} - (M(\delta))^2}$$

-значення основної похибки:

$$[\delta] = M(\delta) \pm 3\sigma(\delta)$$

За отриманими даними отримуємо:

$$M(\delta) = 0.0886; \sigma(\delta) = 0.0516;$$

$$\text{Звідки } [\delta] = 0.1548$$

За отриманими результатами встановлено, що розроблений сенсор відповідає класу точності 0,2.

4.2 Розроблення методу тестування сенсорів тиску

Для комплексної оцінки метрологічних характеристик сенсора необхідно мати динамічні характеристики сенсора.

На даний час розроблено низку методів і пристроїв, які призначені для

експериментальної оцінки динамічних характеристик сенсорів нестационарного тиску. Зазначені методи і технічні засоби відрізняються між собою за типом визначуваних динамічних характеристик, так і за необхідною точністю їх оцінювання і вартістю експерименту. При розробці нових сенсорів тиску виникає задача вибору або розробки оптимального методу для дослідження динамічних характеристик сенсорів [102,...,106].

Сучасні методи динамічного тестування сенсорів тиску передбачають використання різних типів тестових імпульсів, які характеризуються відмінностями у формі сигналу та тривалістю його фронту. Відомо, що чим менша тривалість фронту тестового імпульсу, тобто чим стрімкіше зростає тиск, тим ближче такий сигнал до “ідеального” імпульсу, що забезпечує кращу адекватність динамічних характеристик сенсора. Водночас генерація коротких імпульсів із високою швидкістю наростання супроводжується значними технічними труднощами та зростанням вартості випробувального обладнання.

Для аналізу динамічної реакції сенсора доцільно використовувати ідеалізовану модель імпульсу тиску, яка передбачає миттєве зростання тиску до сталої величини. “Ідеальний” імпульс тиску (рис. 4.4) описується ступінчастою функцією:

$$p(t) = p_0 = \text{const} \quad (4.1)$$

При $t \geq 0$

Разом з тим, при реальному стрибку тиску (рис. 4.5) передній фронт імпульсу співпадає з півперіоду косинусоїди [107,...,113], що задається функцією:

для $0 \leq t \leq t_1$

$$p(t) = \frac{p_0}{2} (1 - \cos \eta t), \quad (4.2)$$

для $t_1 \leq t \leq t_2$

$$p(t) = p_0 = \text{const} \quad (4.3)$$

де $p(t)$ — вимірюваний тиск у момент часу t ;

$\eta = \frac{\pi}{t_1}$ - частота коливань

t_1 - період фронту стрибка тиску.

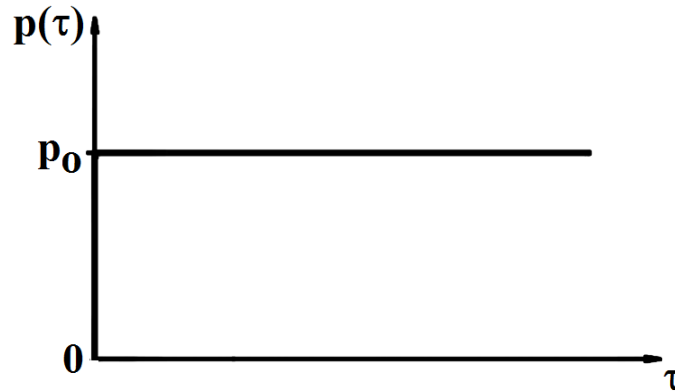


Рис.4.4. Форма “ідеального” тестового впливу

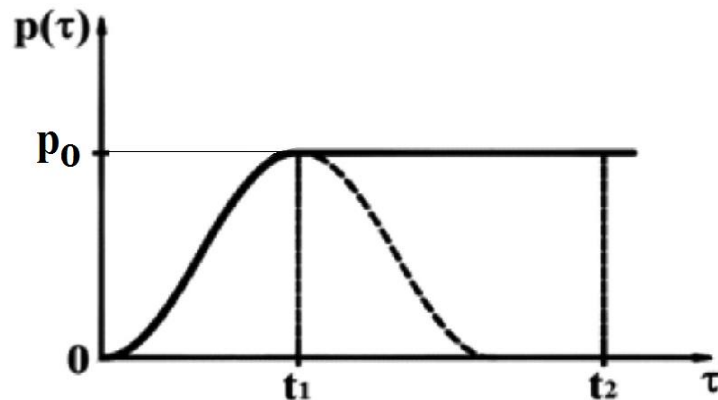


Рис.4.5. Форма реального тестового впливу

Відомо що при дії “ідеального” стрибка тиску (рис. 4.4) прогин центра мембрани давача (рис. 4.6.) описується виразом [101]:

$$w_0(t) = k \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p_0 \sin(\omega(t-\tau)) d\tau \quad (4.4)$$

де k — статичний коефіцієнт перетворення сенсора;

β — коефіцієнт демпфування коливань мембрани сенсора;

ω — частота власних коливань мембрани з урахуванням демпфування;

$$\omega = \sqrt{\nu^2 - \beta^2}$$

ν — частота власних коливань мембрани без врахування демпфування.

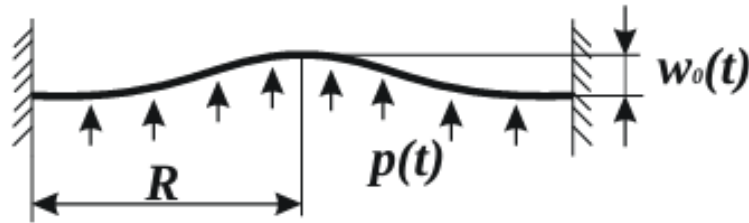


Рис. 4.6. Прогин мембрани давача

Підставляючи вираз (4.2) у рівняння (4.4), отримаємо вираз для прогину центра мембрани у діапазоні $0 \leq \tau \leq t_1$:

$$\begin{aligned} w(t) &= k \cdot \int_0^{t_1} e^{-\beta(t_1-\tau)} \frac{p_0}{2} (1 - \cos \eta \tau) \sin(\omega \cdot (t_1 - \tau)) d\tau = \\ &= k \cdot \frac{p_0}{2} [F_1 - F_2 - F_3], \end{aligned} \quad (4.5)$$

де

$$F_1 = \frac{\omega - e^{\beta t} (\omega \cdot \cos \omega t + \beta \cdot \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2},$$

$$F_2 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega - \eta)^2} (\sin \omega t + \frac{\omega - \eta}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (\sin \omega t + \frac{\omega - \eta}{\beta} \cos \omega t)) \right],$$

$$F_3 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega + \eta)^2} (-\sin \omega t + \frac{\omega + \eta}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (-\sin \omega t + \frac{\omega + \eta}{\beta} \cos \omega t)) \right].$$

Для визначення вихідного сигналу в інтервалі часу $t \geq t_1$, ідставимо вираз (3) у рівняння (4):

$$\tilde{w}_0(t) = e^{-\beta t} \left[\frac{(\tilde{w}_0)'(t_1) + \beta \tilde{w}_0(t_1)}{\omega} \sin \omega t + \tilde{w}_0(t_1) \cos \omega t \right] +$$

$$+k \left[p_0 \frac{\omega - e^{-\beta t}(\omega \cdot \cos \omega t + \beta \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2} \right], \quad (4.6)$$

де $w(t)$ - значення вихідного сигналу,

$\tilde{w}_0(t)$ - його перша похідна (швидкість зміни сигналу) в момент часу t

Шляхом підстановки виразу (4.1) у рівняння (4.4) обчислюється вихідний сигнал, що відповідає ідеальному тестовому впливу.

$$w_i(t) = kp_0 \left[\frac{\omega - e^{-\beta t}(\omega \cdot \cos \omega t + \beta \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2} \right] \quad (4.7)$$

Різниця “ідеального” і реального прогину центра мембрани на проміжку часу $0 \leq t \leq t_1$, становитиме

$$\begin{aligned} \Delta_1(t) &= \tilde{w}_0(t) - w_0(t) = \\ &= \frac{\beta}{2} \left\{ \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega - \eta)^2} (\sin \omega t + \frac{\omega - \eta}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (\sin \omega t + \frac{\omega - \eta}{\beta} \cos \omega t)) \right] \right. \\ &\quad + \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega + \eta)^2} (-\sin \omega t + \frac{\omega + \eta}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (\sin \omega t + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\omega + \eta}{\beta} \cos \omega t)) \right] \left. \right\}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

для $t > t_1$, отримаємо:

$$\Delta_2(t) = \tilde{w}_0(t) - w_0(t) = -e^{-\beta t} \left[\frac{(\tilde{w}_0(t_1))' + \beta \tilde{w}_0(t_1)}{\omega} \sin \omega t + \tilde{w}_0(t_1) \cos \omega t \right] \quad (4.9)$$

Значення параметрів β , ω та ν знаходяться в діапазоні від кГц до МГц для реальних датчиків тиску, тому значення $\Delta_2 \gg \Delta_1$. Тому доцільно оцінити відповідність реального вихідного сигналу за отриманим виразом (4.9)

Момент часу, коли різниця реального та “ідеального” вихідного сигналу буде максимальною визначиться наступним чином:

Диференціюємо (8) по t і прирівнюємо до нуля

$$\frac{\partial \Delta_2(t)}{\partial t} = e^{-\beta t} \left[\frac{\beta(\tilde{w}_0(t_1))' + \beta^2 \tilde{w}_0(t_1) + \omega^2 \tilde{w}_0(t_1)}{\omega} \sin \omega t - (\tilde{w}_0(t_1))' \cos \omega t \right] \\ = 0$$

Отримуємо:

$$t^* = \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{\omega(\tilde{w}_0(t_1))'}{\beta(\tilde{w}_0(t_1))' + \beta^2 \tilde{w}_0(t_1) + \omega^2 \tilde{w}_0(t_1)}, \quad (4.10)$$

Через неможливість фізичного створення ідеального тестового впливу, на практиці завжди будемо працювати з реальними впливами. Що, в свою чергу, призведе до відхилень реального вихідного сигналу в порівнянні до ідеального вихідного сигналу, що можна розглядати як певну похибку випробування.

Максимальне відхилення вихідного сигналу від реального тестового впливу з тривалістю t_1 переднього фронту і отриманим сигналом “ідеального” тестового впливу, вважатимемо методичною похибкою.

Відхилення реального і “ідеального” вихідних сигналів максимальної відносної величини визначається формулою:

$$\delta_{max} = \frac{\Delta_2(t^*)}{\tilde{w}_i(t^*)} 100 \% , \quad (4.11)$$

де значення величин визначаються у момент часу t^* .

Для аналізу буде використовуватись формула максимальної відносної похибки (4.11) при різних значеннях величин t_1 і ω . Чисельний аналіз демонструє залежність методичної похибки випробування від динамічних параметрів датчика та параметрів тестового впливу. Результат представлено у вигляді графіку який показаний на Рис. 4.7.

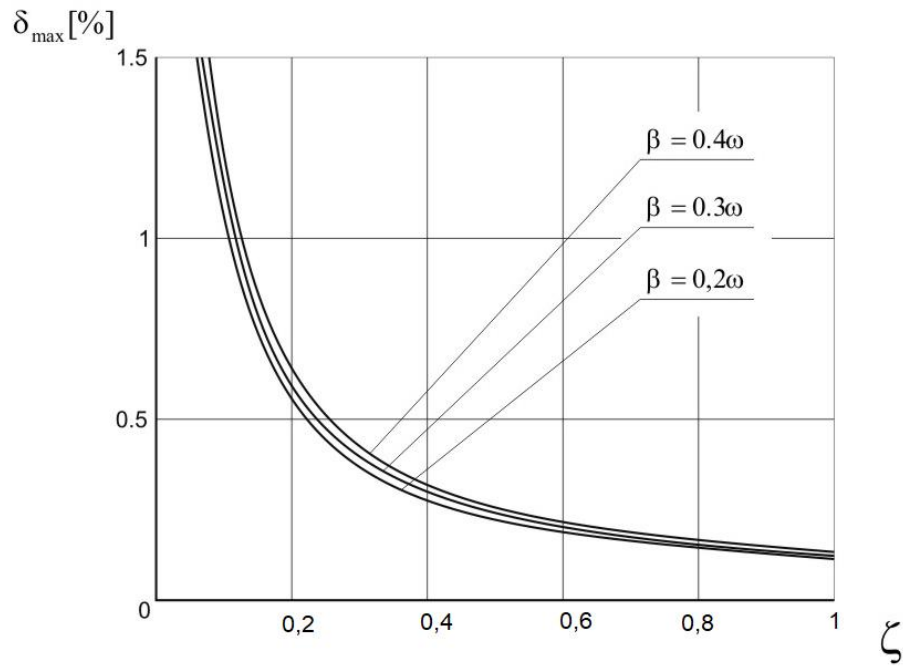


Рис. 4.7. Залежність δ_{max} від співвідношення $\zeta = \frac{1}{t_1 \cdot \omega}$

За допомогою наступної формули можемо інтерполювати отримані залежності :

$$\delta \approx \frac{0,125}{\zeta_{max}}, \quad (4.12)$$

Звідси отримуємо вираз для визначення тривалість фронту стрибка тиску:

$$t_1 \approx \frac{8 \cdot \delta_{max}}{\omega} \quad (4.13)$$

Виходячи з формули (4.13) можемо розрахувати тривалості фронту стрибка тиску. Для практичного використання доцільно користуватись нерівністю:

$$t_1 < \frac{8 \cdot \delta_{max}}{\omega} \quad (4.14)$$

де: ω - частота власних коливань мембрани,

δ_{max} - задана максимальна методична похибка способу.

При наявності значень власної частоти коливань мембрани ω , яке може бути отримане як з теоретичних розрахунків, так і з технічних характеристик

датчика, і заданням максимально допустимої методичної похибки способу $\delta_{\max}$, застосовуючи вираз (4.14), можна визначити прийнятну тривалість часу наростання фронту тестового впливу. Це забезпечує обґрунтований вибір установки для проведення тестування датчика з можливістю достовірної інтерпретації отриманих результатів.

Може існувати фізичний процес, у якому наростання переднього фронту імпульсу тиску відбувається за законом, відмінним від косинусного. Проте це не змінює вимог до тривалості наростання переднього фронту: вона повинна залишатися меншою за значення, визначене за формулою (14). Під дією такого імпульсу тиску буде отримано перехідну характеристику датчика, яка відрізнятиметься від характеристики, визначеної для прямокутного імпульсу, не більше ніж на $\delta_{\max}$, що розглядається як методична похибка.

4.3. Розробка установки для створення тестового впливу для динамічного тестування сенсорів тиску

Як зазначалося при описі методу, важко досягти стабільності тиску ($p(\tau) = p_0 = \text{const}$) під час створення стрибка тиску на його сталій частині ($t_1 \leq \tau \leq t_2$). Зазвичай це призводить до виникнення відбитих хвиль і прояву коливань корпусу ударної труби та інших наслідків, тобто $p(t) \approx \text{const}$, що значно ускладнює проведення випробування, оскільки знижує надійність отриманих результатів.

Натомість, якщо тестовий вплив буде представлений спадаючим фронтом, «стрибком», що діє на мембрану, яка вже була попередньо деформована, то характер отриманих результатів буде аналогічний до описаного вище. Відхилення реального вихідного сигналу від ідеального не перевищує $\delta_{\max}$ відсотків якщо час спадання впливу становитиме (4.14)

Тому пропонується виконувати динамічне тестування сенсорів тиску шляхом застосування швидкоплинного спадного фронту тестового впливу на мембрану, яка вже була попередньо деформована.

Для проведення динамічного тестування сенсорів шляхом дії спадаючого фронту була розроблена спеціальна установка. Загальний вигляд цієї установки наведено на рис. 4.6.

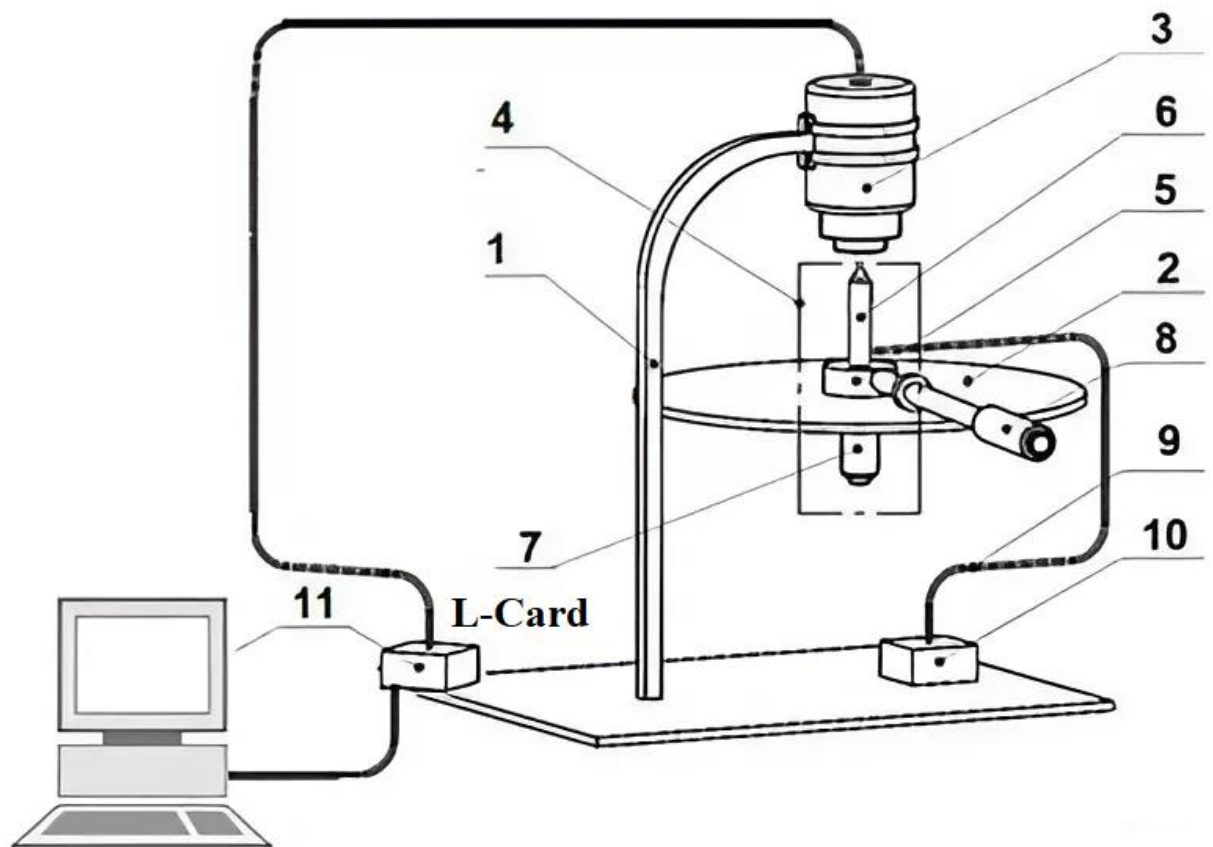


Рис. 4.8. Схема конструкції установки для динамічного калібрування сенсорів тиску

Установка складається з наступних елементів:

- 1 – кронштейн;
- 2 – базова платформа;
- 3 – тримач сенсора;
- 4 – блок створення пробного удару;

- 5 – пристрій для попередньої кінематичної деформації мембрани сенсора;
- 6 – п'єзострижень;
- 7 – мікрометрична вертикальна подача;
- 8 – пристрій центрування штока;
- 9 – кабель живлення і керування;
- 10 – блок керування;
- 11- система обробки та візуалізації сигналів.

Випробуваний датчик закріплюється в тримачі над блоком для створення тестового імпульсу, а п'єзоелектричний стрижень вертикально спрямований до центру мембрани.

У верхній частині стрижня знаходиться металева куля, діаметр якої менший за діаметр мембрани. Кабель живлення і управління, блоку управління, з'єднується із стрижнем. Частота поздовжнього п'єзореzonансного коливання п'єзокерамічного стрижня відповідатиме наступній умові:

$$\zeta > \frac{v}{16 \cdot \delta_{max}}$$

де ζ — частота поздовжніх п'єзореzonансних коливань п'єзоелектричного керамічного стрижня,

v — частота власних коливань мембрани датчика.

4.4. Встановлення динамічних характеристик тензорезистивного сенсора тиску

Установка динамічного тестування сенсорів тиску (рис. 4.9.) складається з масивний кронштейна на якому знаходиться утримува сенсора. На платформі базування знаходиться вузол що відповідає за створення тестового впливу, що складається з пристрою що містить мікрометричну подачу та п'єзокерамічний

шток, що відповідає за попереднє кінематичне деформування мембрани сенсора тиску. Досліджуваний сенсор закріплюється в утримувачі що знаходиться над вузлом створення тестового впливу, на центр мембрани вертикально спрямований п'єзокерамічний шток. Кулька діаметр якої значно менший в порівнянні з діаметром мембрани знаходиться на вершині штока. Шток під'єднано кабель живлення, управління, блоку управління. Частота поздовжніх п'єзорезонансних коливань п'єзокерамічного штока відповідає умові (4.13)

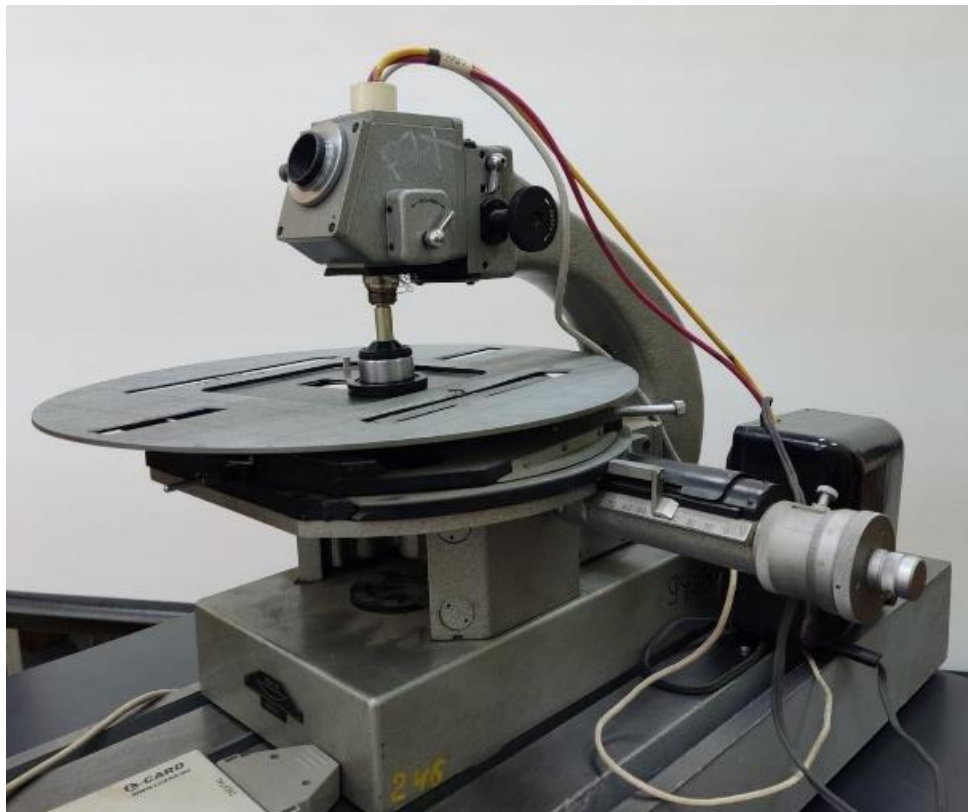


Рис.4.9. Установка динамічного тестування сенсорів тиску

Теоретична частота власних коливань досліджуваного сенсора дорівнює $\nu = 40,0$ кГц.

За таких визначених динамічних параметрів сенсора, визначеному класу точності, його методична похибка випробувань $\delta_{max}=0,2\%$, максимальна тривалість фронту тестового імпульсу відповідатиме умові:

$$t_1 < \frac{8 \cdot \delta_{max}}{\nu} = \frac{8 \times 0,2}{40 \times 10^3} = 40 \text{ с.}$$

Резонансна частота поздовжніх коливань штока становить 250 кГц, тривалість фронту тестового імпульсу становитиме 2 мкс., що виконує умову

(14). Результатом тестового впливу під час калібрування є відповідний вихідний сигнал сенсора, який піддається чисельній обробці та візуалізації сигналів системою розробленої установки.

Результат випробування показаний на Рис.4.10.

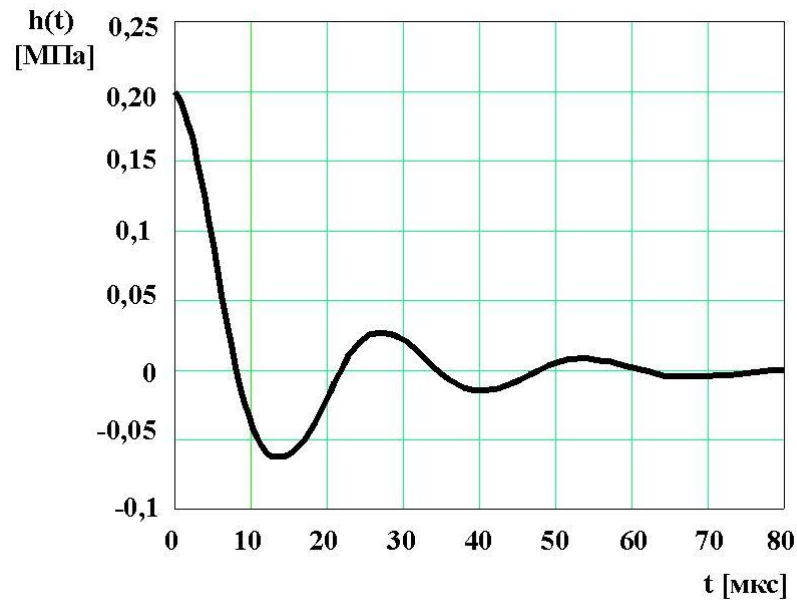


Рис. 4.10. Результат динамічного тестування сенсора тиску.

Вихідний сигнал сенсора тиску представляє собою «обернену» перехідну характеристику. При перетворенні «оберненої» перехідної характеристики відносно горизонтальної осі отримуємо звичайну перехідну характеристику (рис. 4.11).

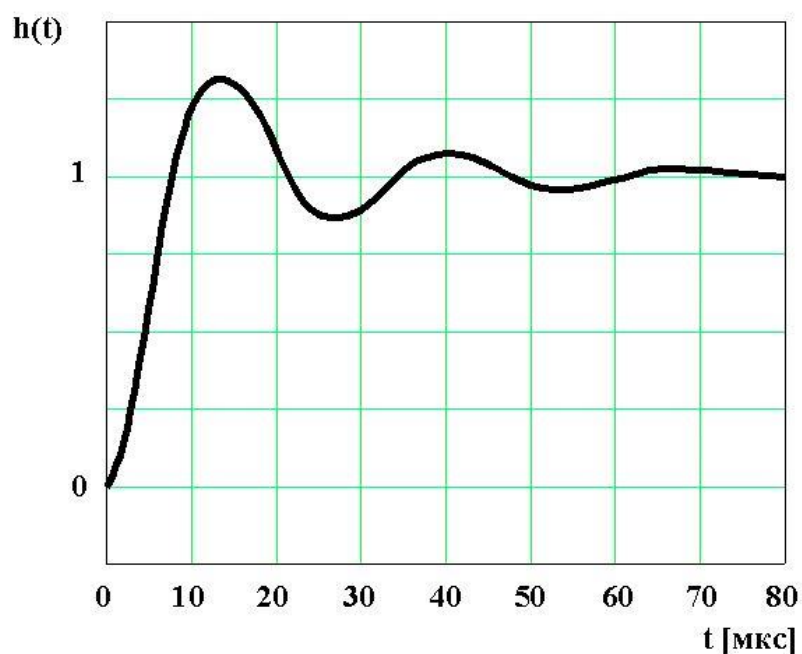


Рис. 4.11. Перехідна характеристика датчика тиску

Чисельною обробкою вихідного сигналу сенсора можна встановити, що частота власних коливань сенсора становить 39,57 кГц, що узгоджується зі значенням власної частоти. З перехідної характеристики можна встановити, що час загасання власної вібрації для досліджуваного датчика становить 80 с на повітрі за нормальних умов.

Після встановлення статичної і динамічної характеристики можемо перейти до перевірки апаратної інтелектуалізації термовпливу

4.5. Експериментальна перевірка ефективності апаратної інтелектуалізації

Для дослідження працездатності апаратної інтелектуалізації сенсора тиску необхідно створити одночасну дію стрибка тиску і температури.

Для проведення експерименту сенсор тиску попередньо встановлюється у спеціальний тримач 2 що кріпиться всередині скляної колби 1 (рис. 4.12). Сенсор через кабель 4 під'єднують до система обробки та візуалізації сигналів 5. Після

встановлення сенсора в колбу з якої відкачують повітря через ніпель 3 до рівня, за якого стінки колби перебувають у стані близькому до межі міцності. Паралельно з внутрішньої порожнини сенсора відкачуємо повітря, зрівноважуючи тиск всередині колби, що запобігти деформації мембрани сенсора. Таким чином усувається внутрішнє газове середовище, що дозволяє сформувати максимально різкий фронт впливу при її руйнуванні.

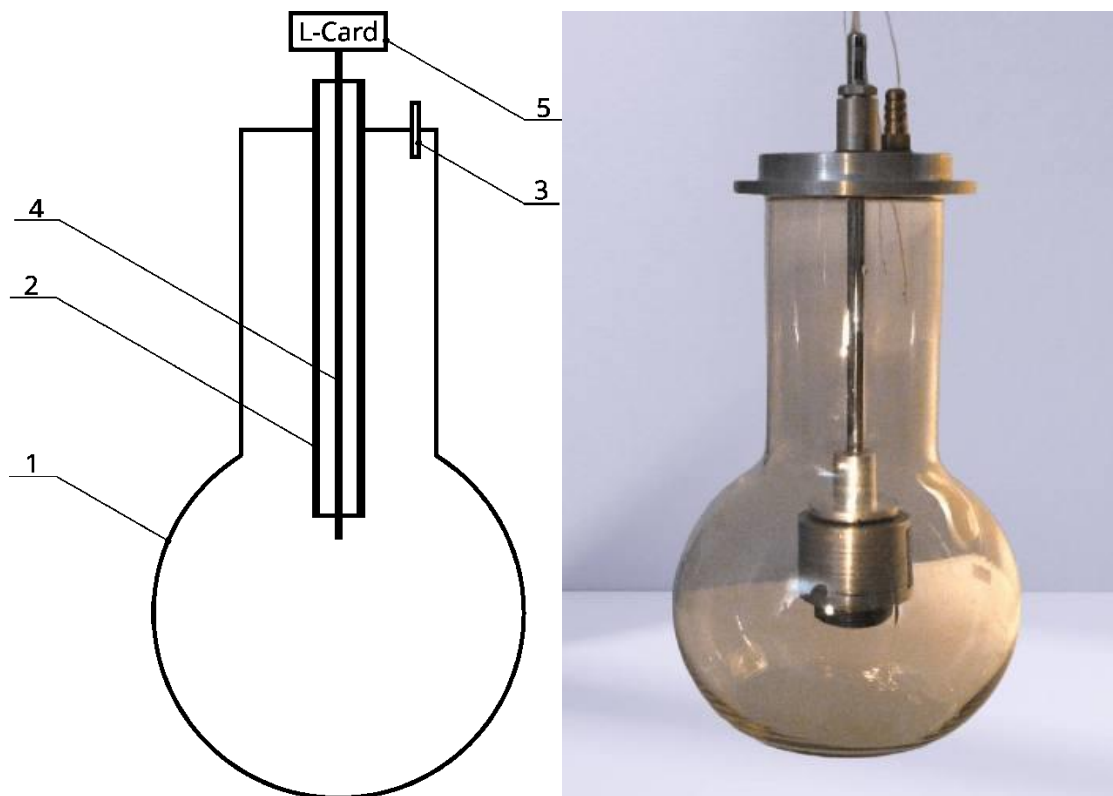


Рис. 4.12. Вакуумована колба з сенсором тиску

Одночасно з цим готують термогазовий резервуар, який заповнюють робочим газом і нагрівають до температури близько $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після стабілізації температури в усьому об'ємі резервуара, вакуумовану колбу з сенсором різким рухом занурюють у резервуар. Через значний перепад зовнішнього та внутрішнього тиску й високий температурний удар колба миттєво руйнується, оскільки її стінки попередньо перебували у напруженому стані. Внаслідок цього гарячий газ з великою швидкістю проникає до сенсора, формуючи крутий фронт газової хвилі, що забезпечує одночасний стрибок тиску та температури.

На рис. 4.13 представлений результат вимірювання стрибка тиску при дії термоудару що виник при руйнуванні колби

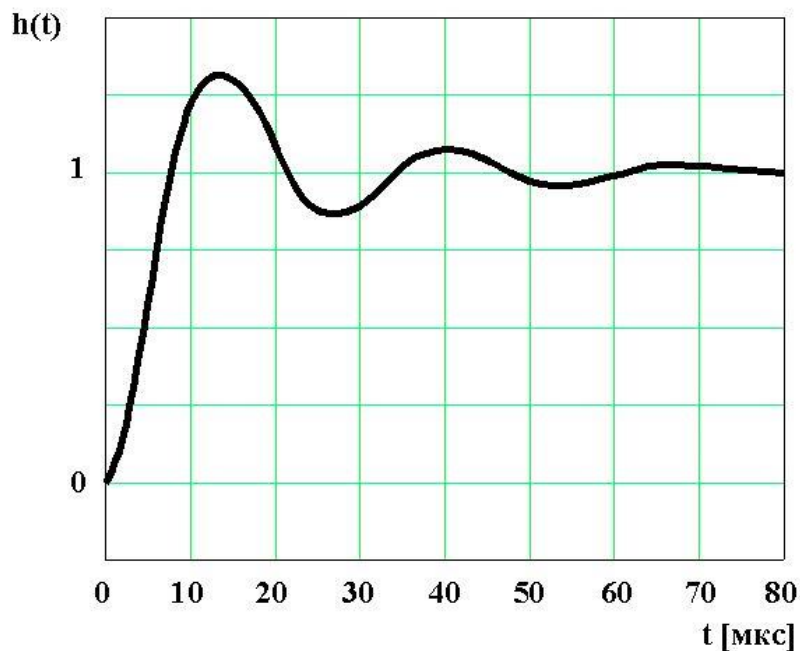


Рис. 4.13. Результат вимірювання стрибка тиску при дії термоудару.

В результаті термоудару при сприйманні скачка тиску сенсор скоригував сигнал і показав похибку 3 % що підтверджує апаратну інтелектуалізацію.

4.6. Експериментальна перевірка ефективності програмної інтелектуалізації

Реальний сигнал для зашумлення використовувався знятий при тестуванні сенсора тиску, який має власну частоту коливань $\eta_0 = 39,57$ кГц та максимальну амплітуду вихідного сигналу U_0 . Для моделювання реальних умов зашумлення вимірювання до сигналу у Simulink додавалися спеціально сформовані шумові компоненти. Гармонічний шум генерувався із регульованою частотою f та амплітудою Y_0 , причому частота шуму варіювалася у діапазоні від $0,5 \eta_0$ до $5 \eta_0$, що дозволяло імітувати як низькочастотні коливання, так і високочастотні дестабілізуючі фактори. Додатково застосовувався широкий спектр білого шуму, який у Simulink реалізовувався блоком Band-Limited White Noise із заданим діапазоном частот та середньоквадратичним рівнем. Обидва

типи шумів сумувалися з основним сигналом, формуючи зашумлений вимірювальний сигнал, характерний для реальної роботи сенсора в умовах нестационарного навантаження. На рис. 4.13 наведено приклад зашумленого сигналу при амплітуді гармонічного шуму 10% від амплітуди корисного сигналу та частоті шуму 79,14 кГц.

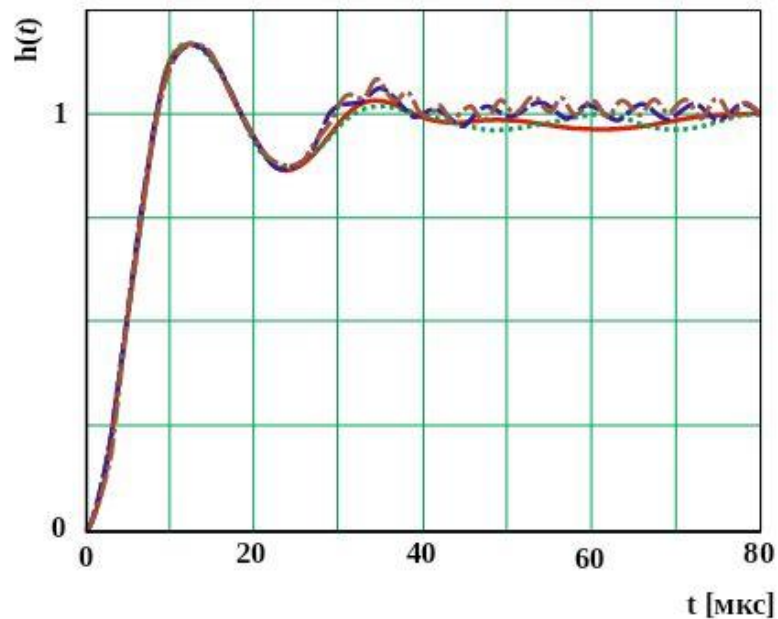


Рис. 4.14. Зашумлений сигнал сенсора тиску

Фільтрація зашумленого сигналу здійснювалась із застосуванням розробленого методу програмної інтелектуалізації, описаного в розділі 2.2. Для цього сигнал пропускався через модель цифрового фільтра в Simulink, побудовану на основі комбінованого підходу: низькочастотне фільтрування видаляє високочастотні компоненти шуму, а адаптивне віконне усереднення забезпечує згладжування залишкових флуктуацій. Кожне вікно оброблялося з урахуванням локальної дисперсії сигналу, що дозволяло зменшити вплив різкої зміни амплітуди сигналу та локальних перехідних процесів.

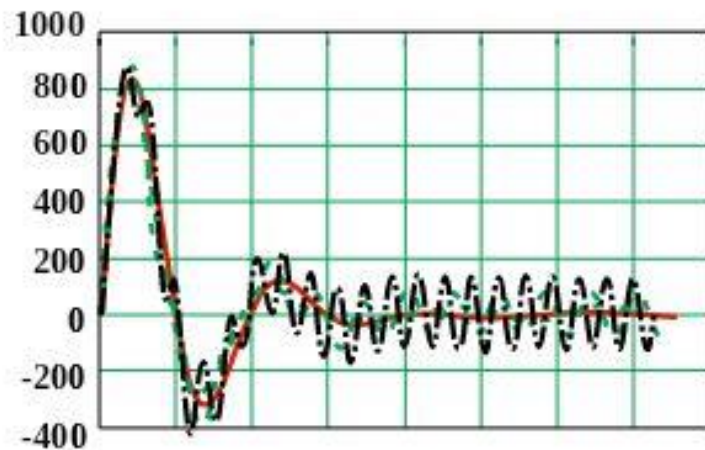


Рис. 4.15. Відповідні похідні реальних вихідних сигналів сенсора тиску

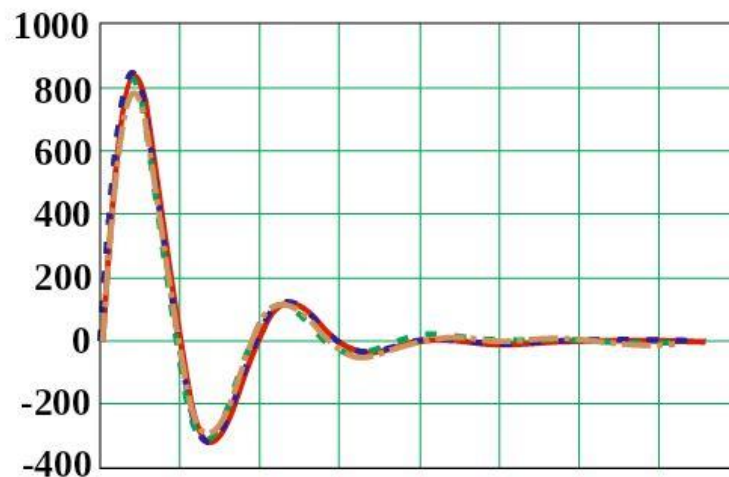


Рис. 4.16. Похідні відфільтрованого вихідного сигналу сенсора

Для оцінки ефективності методу виконувалося чисельне диференціювання фільтрованого сигналу та порівняння отриманої похідної $U'_1(t)$ з похідною еталонного сигналу $U'(t)$, отриманого при відсутності шуму. Відносна похибка визначалась за формулою:

$$\delta_1(t) = \frac{U'(t) - U'_1(t)}{U'(t)} \cdot 100\%,$$

де $U'(t)$ — похідна реального сигналу без шуму,

$U'_1(t)$ — похідна відфільтрованого сигналу.

Встановлено, що запропонована програмна інтелектуалізація забезпечує стійке відновлення сигналу навіть при високочастотних шумових завадах. Максимальні відносні похибки відновленого сигналу не перевищують 0,2%, що відповідає класу точності цифрового сенсора тиску. Середня похибка по всьому сигналу становить близько 0,05–0,1%, що підтверджує практичну ефективність методики програмної інтелектуалізації.

Аналіз характеристик похибок показав, що більші відхилення спостерігаються у точках швидкої зміни сигналу, тоді як у стаціонарних ділянках похибка практично зникає. Це свідчить про високу стабільність методу та його придатність для сенсорів тиску в умовах реальної експлуатації.

4.7. Висновки до розділу 4

У даному розділі проведено комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на визначення статичних і динамічних характеристик тензорезистивного сенсора тиску, а також на розроблення методики та технічних засобів для його динамічного тестування.

1. У результаті проведених статичних випробувань встановлено, що характеристика перетворення сенсора описується рівнянням $U(p) = 4,98 p \text{ [мВ]}$. За результатами статистичної обробки отримано середнє відхилення $M(\delta) = 0,0886$ та стандартне відхилення $\sigma(\delta) = 0,0516$, що відповідає основній похибці $[\delta] = 0,1548$. Визначено, що сенсор відповідає класу точності 0,2, що свідчить про його високу метрологічну надійність і стабільність у діапазоні вимірювань 0...0,25 МПа.

2. На основі теоретичного аналізу та моделювання процесів деформації мембрани сенсора при дії імпульсів тиску розроблено методику динамічного тестування. Встановлено аналітичну залежність максимальної відносної похибки від параметрів тестового імпульсу, що дозволило отримати критерій

достовірності динамічного калібрування у вигляді нерівності $t_1 < \frac{8 \cdot \delta_{max}}{\omega}$. Це співвідношення забезпечує можливість визначення допустимої тривалості фронту тестового імпульсу при заданій точності випробування та дає змогу оптимізувати параметри випробувального обладнання.

3. Розроблено експериментальну установку для динамічного калібрування сенсорів тиску, що забезпечує формування короткочасних імпульсів з тривалістю фронту $t_f = 2$ мкс, що задовольняє умову $t_1 < \frac{8 \cdot \delta_{max}}{\omega}$. Експериментальні дослідження показали, що власна частота коливань сенсора становить 39,57 кГц, що узгоджується з теоретичним значенням 40,0 кГц, а час загасання власних коливань дорівнює 80 с. Це підтверджує правильність теоретичних розрахунків, розробленої методики для достовірного визначення динамічних характеристик сенсорів нестационарного тиску.

4. Експериментальна перевірка показала, що апаратна інтелектуалізація сенсора тиску забезпечує реагування на одночасні стрибки тиску та температури, а відносна похибка вимірювань не перевищує 3 %. Результати свідчать про ефективність апаратної інтелектуалізації

5. Програмна інтелектуалізація стабільно відновлює сигнал навіть при високочастотних шумових завадах, забезпечуючи максимальну похибку 0,2% і середню 0,05–0,1%, що відповідає класу точності сенсора.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі обґрунтовано та запропоновано нові науково-технічні підходи до підвищення точності та стабільності вимірювання тиску, що реалізовані через розвиток теоретичних засад, нових методів і способів вимірювання, а також створення сенсорів для їх здійснення:

1. Вперше сформульовано принципи інтелектуалізації сенсорів тиску, які поділяються на: апаратну (конструкційну) та програмну інтелектуалізацію, а також їх інтеграцію в апаратно-програмну інтелектуалізацію.

2. Проведено дослідження динамічних характеристик первинного вимірювального перетворювача сенсорів-мембрани та розроблено динамічну модель у вигляді інтегрального рівняння. На її основі отримано розв'язок оберненої задачі вимірювання, що дозволяє запропонувати новий спосіб фільтрації та диференціювання вихідного сигналу. Запропонований метод, заснований на теорії числової фільтрації вимірювальних сигналів, реалізує програмну інтелектуалізацію сенсорів тиску та забезпечує можливість точного вимірювання нестационарного тиску в реальному часі в межах статичної похибки.

3. Проведено аналіз термомеханічних процесів у мембрані сенсора тиску під дією нестационарного термовпливу, зокрема термоудару максимальної амплітуди, та встановлено просторово-часову еволюцію температурного поля з урахуванням теплообміну і параметрів мембрани. Виявлено, що температурні градієнти вздовж радіуса і по товщині мембрани призводять до термопрогину та механічних коливань, які дестабілізують вимірювання. Показано, що усунення температурного градієнта по радіусу можливе за допомогою конструкційної термоізоляції або оптимального підбору теплопровідності матеріалу корпусу. На основі цього розроблено спосіб вимірювання тиску при нестационарному термовпливі з компенсацією термонапружень, що дозволяє знизити спотворення перехідної характеристики сенсора з 60% до 2%. Запропоновано конструкцію сенсора з компенсаційним кільцем з нітинолу та раціональну схему

розташування тензорезисторів для роздільного вимірювання згинальних і температурних деформацій, що забезпечує корекцію результатів у режимі реального часу. Запропонований підхід створює основу для побудови інтелектуальних сенсорів тиску нового покоління з підвищеною точністю у динамічних температурних умовах.

4. Запропоновано метод самодіагностики тензорезистивних сенсорів тиску, що базується на оцінці симетрії мостової схеми через інтегральну діагностичну функцію, який дозволяє в режимі реального часу виявляти та локалізувати деградацію або відмову окремих тензорезисторів, підвищуючи функціональну надійність та інтелектуалізацію сенсорних систем.

5. Запропоновано методику групування сенсорів тиску за класами точності та статичними характеристиками, яка передбачає поділ партії сенсорів на групи відповідно до метрологічно визначеного класу точності та додаткову класифікацію всередині кожної групи за близькістю векторів статичних характеристик. На її основі розроблено метод автоматизованого групування тензорезистивних сенсорів з використанням багатошарової нейронної мережі, що забезпечує точну класифікацію та адаптацію моделі до змін виробничих умов через повторне навчання. Запропонований підхід дозволяє підвищити однорідність характеристик у групах і покращує ефективність контролю та використання сенсорів у виробничих і вимірювальних системах.

6. Розроблено методику динамічного тестування сенсорів тиску на основі аналізу деформацій мембрани під дією імпульсів тиску. Встановлено критерій достовірності динамічного калібрування у вигляді нерівності $t_1 < \frac{8 \cdot \delta_{max}}{v}$, що дозволяє оптимізувати параметри тестових імпульсів. Експериментальна установка з тривалістю фронту $t_1 = 2$ мкс підтвердила правильність теоретичних розрахунків та забезпечила точне визначення динамічних характеристик сенсорів. Результати демонструють ефективність методики для достовірного калібрування сенсорів нестационарного тиску.

7. Результати дисертаційного дослідження впроваджені та використовуються в ТзОВ “Елпор Інжиніринг Юкреін”, м. Львів, Акт про впровадження від 14.04.2025р.; ТзОВ “Спектографіка”, м. Львів, Акт про впровадження від 29.04.2025р.; ПП “Захід-Львів” м. Львів, Акт про впровадження від 06.05.2025р. у навчальному процесі та при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі «Інтелектуальної мехатроніки та роботи», Національного університету «Львівська політехніка», Акт про впровадження від 19.06.2025р.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Fraden, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* (5th ed.). Springer, 2016. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-19303-8>
2. Smith, S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, 1997. <https://www.dspguide.com/>
3. Li, D., Chen, X. "Capacitive Pressure Sensors for Harsh Environment Applications: A Review." *Micromachines*, 12(8), 855, 2021. <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/8/855>
4. I.Maryamova. Semiconductor Mechanical Sensors for Adverse and dynamic conditions/ I.Maryamova, M. Tykhan, E.Lavitska, A.Kutrakov // XIV IMEKO World Congress.-Tampere.-1997. -Vol. IX A. -P. 99-103.
5. Тихан М.О. Проблеми розрахунку та проектування тензометричних давачів тиску / М.О. Тихан // 3-й міжнародний симпозіум інженерів-механіків у Львові. Тез. доп. – Львів. -1997. -С.94.
6. Тихан М.О. Аналіз впливу термомеханічних процесів у мембрані тензометричного перетворювача динамічного тиску при термоударі на його додаткову похибку. / М.О. Тихан // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування -Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка".–2007. -№ 574. -С.69-75.
7. Тихан М. О. Моделювання термомеханічних процесів в конструктивних елементах вимірювачів тиску /М.О. Тихан, Р.Б. Малець, Г.А. Шинкаренко // -Машинознавство. -2008. -№6(132). -С. 26-31.
8. Тимошенко С. П. Теория упругости / С.П. Тимошенко [и др.] // -М.: Наука., 1975. -576 с
9. I.Maryamova. Semiconductor Mechanical Sensors for Adverse and dynamic conditions/ I.Maryamova, M. Tykhan, E.Lavitska, A.Kutrakov // XIV IMEKO World Congress.-Tampere.-1997. -Vol. IX A. -P. 99-103.
10. Гавриш В. І., Федасюк Д. В. Моделювання теплових режимів у термочутливому шарі з тепловиділяючим чужорідним включенням

Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. — 2009. — № 650. — С. 94–99..

11. Гавриш В. І., Федасюк Д. В. Моделювання теплових режимів в термочутливій кусково-однорідній смузі з внутрішніми джерелами тепла Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. — 2009. — № 651. — С. 50–54.

12. Sensors Web Portal: <http://www.sensorsportal.com/html/sensors/Pressure.htm>

13. Jackson, R. G. Novel Sensors and Sensing. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 310 p. – ISBN 978-0750309899.

14. Однодворець Л. В., Проценко С. І., Чорноус А. М. Чутливий елемент тензодатчика : пат. №98073761 Україна. МПК G01B7/16. Заявл. 14.07.1998; опубл. 15.12.2000, Бюл. №7–11.

15. PEWATRON AG. PSD18-410 Silicon Piezoresistive Pressure Sensor for Water or Aggressive Media [Електронний ресурс]. – Electronicspecifier.com, 2021. – Режим доступу: <https://www.electronicspecifier.com/products/sensors/psd18-410-pewatron-silicon-piezoresistive-pressure-sensor-for-water-or-aggressive-media>

16. Aggressive-media-exposed differential pressure sensor with deposited membrane [Електронний ресурс] // MyScienceWork.com. – Режим доступу: <https://www.mysciencework.com/publication/show/aggressive-media-exposed-differential-pressure-sensor-deposited-membrane-a3fc3982>

17. US Patent US20240044727A1. Pressure Sensor With Dynamic Response. – 2024. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US20240044727A1/en>

18. Вуйцінік В., Готра З. Ю., Готра О. З., Григор'єв В. В., Каліта В., Мельник О. М., Потенцкі Є. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: науково-навчальне видання. Львів: Ліга-Прес, Том 1, 2002 (Том 2, 2003)

19. Кисельов Є., Крицька Т., Строїтелева Н., Туришев К. Конструкція теплового мікроелектромеханічного сенсора. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, 6(9), 46–52.

20. Ліневич Я.О., Коваль В.М. Сенсори на основі нанорозмірних кремнієвих 1D структур для промислового, екологічного та медичного моніторингу. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, 2022, 27(2).
21. Павлов С., Войчик В., Голяка Р., Азаров О., Никифорова Л., Лунінь Я. Розробка математичної моделі теплового поля інтегральної структури при реалізації сенсорів для біомедичних досліджень. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2023
22. Powner, E. T., & Yalcinkaya, F. (1995). Intelligent sensors: Structure and system. *Sensor Review*, 15(3), 31–35. <https://doi.org/10.1108/02602289510795978>
23. Svenja Reitenbach, Maximilian Behrens, Tobias von Unwerth, Christian Richter. Additive Manufacturing for Sensors: Piezoresistive Strain Gauge with Temperature Compensation // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 17. – Article 8607. DOI: 10.3390/app12178607
24. Zhongyu Wang, Yaxin Li, Zhongyu Ma et al. A Resonant Pressure Microsensor with Temperature Compensation Method Based on Differential Outputs and a Temperature Sensor // *Micromachines*. – 2020. – Vol. 11, No. 11. – Article 1022. DOI: 10.3390/mi11111022
25. Xiaoyu Li, Ying Zhang, Zongqi Liu, Yufei Ren. Temperature Compensation Method for Piezoresistive Pressure Sensors Based on Gated Recurrent Unit // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, No. 16. – Article 5394. DOI: 10.3390/s24165394
26. Huijie Shao, Xiaotian Zhang, Jianwen Zhao et al. A Resonant Pressure Microsensor Capable of Self-Temperature Compensation // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15, No. 5. – P. 10048–10058. DOI: 10.3390/s150510048
27. Omega Group Company // Omega engineering, 2006.
28. Zhou, G., Zhao, Y., Guo, F., & Xu, W. (2014). A smart high accuracy silicon piezoresistive pressure sensor temperature compensation system. *Sensors*, 14(7), 12174–12190. <https://doi.org/10.3390/s140712174>
29. Nie, M., & Gao, Y. (2017). The analytical calibration model of temperature effects on a silicon piezoresistive pressure sensor. *AIP Advances*, 7(3), 035120. <https://doi.org/10.1063/1.4973333>

30. Li, X., Zhang, Y., Liu, Z., & Ren, Y. (2024). Temperature compensation method for piezoresistive pressure sensors based on gated recurrent unit. *Sensors*, 24(16), 5394. <https://doi.org/10.3390/s24165394>
31. Тихан М. О. Оцінка похибки тензOMETричного датчика динамічного тиску /М.О. Тихан // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні. -Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка".—1995. -№ 290. -С.91-96.
32. Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. *Discrete-Time Signal Processing*. – Pearson, 2010.
33. Simon Haykin. *Adaptive Filter Theory*. – Pearson, 5th ed., 2013.
34. Bernd Hofmann, Peter Mathé, Barbara Kaltenbacher. *Regularization Methods in Banach Spaces*. – Walter de Gruyter, 2023.
35. Andreas Kirsch. *An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems*. – Springer, 2011.
36. Martin Hanke. *Conjugate Gradient Type Methods for Ill-Posed Problems*. – CRC Press, 1995.
37. P. C. Hansen. *Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems: Numerical Aspects of Linear Inversion*. – SIAM, 1998.
38. R. Pallás-Areny, J. G. Webster. *Sensors and Signal Conditioning*. – Wiley, 3rd ed., 2012.
39. K. Ogata. *Discrete-Time Control Systems*. – Prentice Hall, 2nd ed., 1995.
40. Simon Haykin. *Kalman Filtering and Neural Networks*. – Wiley, 2001.
41. M. J. S. Lowe, D. S. Ball. *Thermal Protection Systems for Aerospace Applications*. – Wiley, 2015.
42. S. S. P. Park, H. J. Kim. *Thermal Management in Electronics: Principles and Practices*. – Wiley, 2018.
43. Keith A. P. Croce, Louis L. B. *Systems Engineering Principles and Practice*. – Wiley, 2014.

44. Robert K. Yin. *Case Study Research: Design and Methods*. – Sage Publications, 6th ed., 2017.
45. T. G. Leighton. *Fundamentals of Acoustics and Sensing Structures*. – Wiley, 2012.
46. J. Fraden. *Handbook of Modern Sensors*, 5th ed. – Springer, 2016.
47. Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th ed. – McGraw-Hill, 2014.
48. J. A. Pelesko. *Self-Assembly: The Science of Things That Put Themselves Together*. – CRC Press, 2007.
49. D. M. Pozar. *Microwave Engineering*, 4th ed. – Wiley, 2011.
50. Simon Haykin. *Neural Networks and Learning Machines*, 3rd ed. – Pearson, 2009.
51. Dan Simon. *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*. – Wiley, 2006.
52. N. D. Theodore. *MEMS Materials and Processes Handbook*. – Springer, 2010.
53. B. Bhushan. *Springer Handbook of Nanotechnology*. – Springer, 2017.
54. M. A. Frerking. *Crystal Oscillator Design and Temperature Compensation*. – Wiley, 2002.
55. J. L. Huber. *Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation*. – CRC Press, 2020.
56. Stephen Senturia. *Microsystem Design*. – Springer, 2001.
57. R. Pallás-Areny, J. G. Webster. *Sensors and Signal Conditioning*. – Wiley, 2012.
58. Franco Maloberti. *Data Converters*. – Springer, 2007.
59. Walt Kester (ed.). *The Data Conversion Handbook*. – Newnes, 2005.
60. Clarence W. de Silva. *Sensors and Actuators: Control System Instrumentation*. – CRC Press, 2007.
61. G.K. Ananthasuresh, K.J. Vinoy, S. Gopalakrishnan et al. *Micro and Smart Systems*. – Wiley India, 2010..

62. N. D. Theodore. *MEMS Materials and Processes Handbook*. – Springer, 2010.
63. J. W. Gardner, V. K. Varadan, O. O. Awadelkarim. *Microsensors, MEMS and Smart Devices*. – Wiley, 2001.
64. Тихан М.О. Проблеми розрахунку та проектування тензометричних давачів тиску / М.О. Тихан // 3-й міжнародний симпозіум інженерів-механіків у Львові. Тез. доп. – Львів. -1997. -С.94.
65. Тихан М.О. Аналіз впливу термомеханічних процесів у мембрані тензометричного перетворювача динамічного тиску при термоударі на його додаткову похибку. / М.О. Тихан // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування -Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка".–2007. -№ 574. -С.69-75.
66. Karakaya K. Smart Sensors: Trends, Opportunities and Challenges for the Future // *Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. – January 2012. – DOI: 10.1364/ACP.2012.ATh2H.1
67. Beeby, S. P., & White, N. M. (2013). *Energy Harvesting for Autonomous Systems*. Artech House.
68. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation / Series Editor: Subhas Chandra Mukhopadhyay. – Cham: Springer. – ISSN (Print): 2194-8402, ISSN (Online): 2194-8410. – [Book series]. – Доступно: <https://link.springer.com/series/10680>
69. Guesalaga, A., & Azocar, C. (2017). Smart sensors: Requirements, challenges, and trends. *IEEE Latin America Transactions*, 15(3), 575–583. [DOI: 10.1109/TLA.2017.7910216]
70. Kundu, S., & Mahapatra, R. N. (2022). Smart Sensor Systems: Emerging Challenges and Design Perspectives. *IEEE Sensors Journal*, 22(1), 20–31. [DOI: 10.1109/JSEN.2021.3119880]
71. IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators — IEEE 1451.0-2007. [<https://ieeexplore.ieee.org/document/4292806>]

72. Pérez-Padilla, J., García Morillo, J., Ramírez-Faz, J., Montesinos, P. Design and Implementation of a Pressure Monitoring System Based on IoT for Water Supply Networks // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 15. – P. 4247. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s20154247>.
73. Fang, B., Sun, F., Liu, H., & Liu, C. (2023). Smart calibration and monitoring: Leveraging artificial intelligence to improve MEMS-based inertial sensor calibration. *Complex & Intelligent Systems*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40747-024-01531-y>
74. Reddy, C. S., & Anand, K. (2023). Sensor signal processing using high-level synthesis and Internet of Things with a layered architecture. *arXiv preprint arXiv:2301.03356*.
75. Андреева А. Е. *Упругие элементы приборов* / А. Е. Андреева. — М.: Машиностроение, 1981. — 392 с.
76. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: О редукции к идеальному прибору в физике и технике / Г.И. Василенко// - М.: Сов. радио, 1979. -272 с.
77. Тихан М.О. Спосіб вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу /М.О. Тихан // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Вимірювальна техніка та метрологія. -Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка".-2008.-Вип.69. -С.72-78.
78. Тихан М., Мокрицький В., Теслюк В. Ефект термодеоформації мембрани на точність тензорезистивного датчика тиску / М. Тихань, В. Мокрицький, В. Теслюк // Вісник Національного технічного університету «Львівська політехніка». — 2017. — № 942. — С. [32-37]. — Режим доступу: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107239>
79. Выгода Ю.А. Специальные режимы датчиковой аппаратуры /Ю.А. Выгода Ю.А.//- Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1989. - 72 с.
80. Федяков Е. М. Измерение переменных давлений /Е.М. Федяков [и др.] //-М.: Изд-во стандартов, 1982. - 216 с.

81. Спосіб динамічного випробування давачів тиску при термодинамічному впливі та пристрій для його здійснення: деклараційний патент України на винахід №30887А, G01L27/00 / М.О. Тихан, опубл. 15.12.2000, бюл. №7-П.
82. Тихан М.О. Дослідження динамічної характеристики тензорезистивного давача тиску при нестационарному термовпливі /М.О. Тихан // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: укр. міжвід. наук.-техн. зб.— Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2011. — Вип. 45. — С. 439-445.
83. Даниловская В.И. Динамические температурные напряжения в бесконечной плите / В.И. Даниловская // Динамические температурные напряжения в бесконечной плите.-М. -Инженерный журнал. -1961. Том1. Вып.4. —С.86-94.
84. Боли Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер// — М.: Мир, 1964. -512 с.
85. Педоренко Н.П. К вопросу о точности измерения давления при воздействии термоудара /Н.П. Педоренко [и др.] // Датчики систем измерения, контроля и управления: межвуз. сб. науч. тр. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1994. — Вып. 13. -С. 92 – 94.
86. Otsuka K., Wayman C. M. (ред.). Shape memory materials / K. Otsuka, C. M. Wayman. — Cambridge: Cambridge University Press, 1998. — 308 с.
87. Duerig T., Pelton A., Stöckel D. An overview of nitinol medical applications / T. Duerig, A. Pelton, D. Stöckel // Materials Science and Engineering: A. — 1999. — Vol. 273–275. — P. 149–160. — DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00996-2.
88. Вимірювач тиску для середовищ з нестационарними температурами: пат. 93157 Україна: МПК(2011.01) G01L 7/02, G01L 9/04 / М.О. Тихан. — № а200912935; заявл. 14.12.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. — 3 с.
89. Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2006). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications* (4th ed.).

90. Mallat, S. (1999). *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press.
91. Haykin, S. (2002). *Adaptive Filter Theory* (4th ed.). Prentice Hall.
92. Markina, O., Tykhan, M., Repetylo, T., & Kliuchkovskyi, S. (2019). *Construction and investigation of a method for measuring the non-stationary pressure using a wavelet transform. Східноєвропейський журнал передових технологій*, 1(5-97), 28–33.
93. Tykhan, M., Repetylo, T., Kliuchkovskyi, S., & Markina, O. (2019). *Construction and investigation of a method for measuring the non-stationary pressure using a wavelet transform. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5), 28–34.
94. Kalman, R. E. (1960). *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering, 82(Series D), 35–45.
95. Андреев А. Г. Тензометрія: підручник / А. Г. Андреев, Г. І. Львов, О. В. Щепкін. — Х.: НТУ «ХПІ», 2017. — 232 с. — ISBN 978-617-05-0223-0.
96. Співак В. М., Гуржий А. М., Нельга А. Т., Ітякін О. С. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник / Співак В. М., Гуржий А. М., Нельга А. Т., Ітякін О. С. — Київ: КПІ, 2020. — 266 с.
97. ДСТУ 7223:2011 — Датчики тензорезисторні. Загальні технічні умови. — К.: Держспоживстандарт України, 2011. — 20 с.
98. ДСТУ 3989:2000 — Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення. — К.: Держспоживстандарт України, 2000. — 25 с.
99. ДСТУ 3921.2:2000 — Контроль процесів вимірювань засобами вимірювальної техніки. Частина 2. Настанови щодо використання вимірювального обладнання. — К.: Держспоживстандарт України, 2000. — 20 с.
100. Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.
101. Тихан М.О. Побудова динамічних моделей пружних елементів тензорезистивних вимірювачів тиску. Ч.1. Приладобудування.- Вісник

Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут", №36, 2009. С.73-88

102. Javed, Y., Mansoor, M., & Shah, I. A. (2019). A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications. *Sensor Review*, 39(4), 652–664. <https://doi.org/10.1108/sr-06-2018-0135>

103. Custom Pressure Sensors for the Aerospace Industry. Merit Sensor. <https://meritsensor.com>

104. Sensors for Aerospace & Defense. PCB Piezotronics. <https://www.pcb.com/aerospace>.

105. Tykhan, M., Repetylo, T., Kliuchkovskyi, S., & Markina, O. (2019). Construction and investigation of a method for measuring the non-stationary pressure using a wavelet transform. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4), 97, 28–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156959>

106. Tykhan, M., Ivakhiv, O., & Teslyuk, V. (2017). New type of Piezoresistive Pressure Sensors for Environments with Rapidly Changing Temperature. *Metrology and Measurement Systems*, 24(1), 185–192. <https://doi.org/10.1515/mms-2017-0010>

107. Wang, J., Yu, Y., Zhou, L., & Ye, R. (2018). Numerical simulation and optimized design of cased telescoped ammunition interior ballistic. *Defence Technology*, 14(1), 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.11.006>

108. Lu, X., Zhou, Y., & Yu, Y. (2010). Experimental Study and Numerical Simulation of Propellant Ignition and Combustion for Cased Telescoped Ammunition in Chamber. *Journal of Applied Mechanics*, 77(4). <https://doi.org/10.1115/1.4001560>

109. Li, X., Liang, L., & Mei, S. (2023). Numerical simulation of the extruded process of Cased Telescoped Ammunition. *Journal of Physics: Conference Series*, 2528(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2528/1/012041>

110. Kagankiewicz, F., & Magier, M. (2023). Experimental verification of the internal ballistics numerical simulations of classical weapons in Lagrangian coordinates. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00161-023-01263-3>

111. Otón-Martínez, R. A., Velasco, F. J. S., Nicolás-Pérez, F., García-Cascales, J. R., & Mur-Sanz de Galdeano, R. (2021). Three-Dimensional Numerical Modeling of Internal Ballistics for Solid Propellant Combinations. *Mathematics*, 9(21), 2714. <https://doi.org/10.3390/math9212714>
112. Bakalov, V., Kuzmenko, V., Yarish, I., Zroichykov., D. (2023). Computer study of the mathematical model of the artillery shot process. *Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*. 15(1). <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.15.2023.02>
113. Zeldovich, Y. B., Barenblatt, G. I., Librovich, V. B., Makhviladze, H. M. (1980). *Mathematical theory of combustion and explosion*. Nauka.
114. Anomaly detection using unsupervised machine learning algorithms: A simulation study. (2024). *Scientific African*, 26, e02386. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02386>
115. Using autoencoders for anomaly detection and transfer learning in IoT. (2020). *Sensors*, 20(7), 88. <https://doi.org/10.3390/s20072088>
116. Mastering time series forecasting: From ARIMA to LSTM. (n.d.). *Machine Learning Mastery*. <https://machinelearningmastery.com/mastering-time-series-forecasting-from-arima-to-lstm>
117. Филиппов А. П. Колебания механических систем /А.П. Филиппов //- Киев: Наукова думка , 1965. – 716 с.
118. Тимошенко С. П., Войновський-Крігер С. Теорія пластинок і оболонок. — Київ: Наукова думка, 1975. — 472 с.

Додаток А

p (МПа)	U↑ (мВ)	U↓ (мВ)	Усереднє (мВ)
0.0	0.00	0.00	0.00
0.1	0.50	0.50	0.50
0.2	1.00	1.00	1.00
0.3	1.50	1.50	1.50
0.4	2.00	1.99	2.00
0.5	2.50	2.49	2.50
0.6	3.01	2.99	3.00
0.7	3.50	3.50	3.50
0.8	4.00	4.00	4.00
0.9	4.50	4.49	4.50
1.0	5.00	4.98	4.99
1.1	5.49	5.48	5.49
1.2	6.00	5.99	6.00
1.3	6.49	6.48	6.49
1.4	7.00	6.99	7.00
1.5	7.49	7.48	7.49
1.6	8.00	7.96	7.98
1.7	8.48	8.46	8.47
1.8	8.99	8.97	8.98
1.9	9.48	9.46	9.47
2.0	9.99	9.98	9.99
2.1	10.48	10.47	10.48
2.2	10.98	10.97	10.98
2.3	11.47	11.46	11.47
2.4	11.98	11.98	11.98
2.5	12.42	12.42	12.42

Додаток Б

p (МПа)	U_j↑ (мВ)	Δj↑ (мВ)	δj↑ (%)	U_j↓ (мВ)	Δj↓ (мВ)	δj↓ (%)
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.50	−0.00	0.26	0.50	−0.00	0.53
0.2	1.00	+0.00	0.35	1.00	+0.00	0.18
0.3	1.50	+0.00	0.12	1.50	−0.00	0.06
0.4	2.00	−0.00	0.07	1.99	−0.00	0.18
0.5	2.50	+0.01	0.20	2.49	+0.00	0.04
0.6	3.01	+0.01	0.26	2.99	+0.00	0.05
0.7	3.50	+0.01	0.25	3.50	+0.00	0.06
0.8	4.00	+0.01	0.17	4.00	−0.00	0.01
0.9	4.50	+0.01	0.09	4.49	−0.00	0.06
1.0	5.00	+0.00	0.07	4.98	−0.01	0.08
1.1	5.49	+0.00	0.02	5.48	−0.01	0.10
1.2	6.00	+0.01	0.17	5.99	+0.00	0.02
1.3	6.49	+0.01	0.08	6.48	−0.01	0.06
1.4	7.00	+0.01	0.17	6.99	0.00	0.00
1.5	7.49	+0.00	0.02	7.48	−0.01	0.13
1.6	8.00	−0.01	0.06	7.96	−0.02	0.24
1.7	8.48	−0.01	0.08	8.46	−0.02	0.20
1.8	8.99	+0.01	0.06	8.97	−0.01	0.07
1.9	9.48	+0.01	0.07	9.46	−0.01	0.05
2.0	9.99	+0.02	0.17	9.98	+0.01	0.07
2.1	10.48	+0.01	0.06	10.47	−0.01	0.06
2.2	10.98	+0.01	0.06	10.97	−0.01	0.04
2.3	11.47	+0.01	0.05	11.46	−0.00	0.03
2.4	11.98	+0.01	0.04	11.98	−0.00	0.03
2.5	12.42	+0.01	0,03	12.43	−0,01	0.04

Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТзОВ «ЕЛПОР ІНЖИНІРИНГ
ЮКРЕІН»



Міхаель МЮЛЛЕР

2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

«Інтелектуальні сенсори тиску»

Маркович Віктора Йосифовича

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 175 Інформаційно-вимірювальні технології

Результати наукових досліджень, отриманих у межах дисертаційної роботи Марковича В.Й., були використані під час розробки сучасного автоматизованого обладнання для формування та обробки керамічних заготовок.

У рамках впровадження особливу увагу було зосереджено на реалізації функції самодіагностики сенсора тиску, що базується на аналізі змін параметрів тензорезисторів у структурі вимірювального моста. Запропонований у дослідженні діагностичний підхід до самодіагностики сенсорів тиску забезпечив підвищення експлуатаційної надійності систем вимірювання та дозволив своєчасно виявляти ознаки деградації чутливих елементів.

Директор

ТзОВ «ЕЛПОР ІНЖИНІРИНГ
ЮКРЕІН»



Міхаель МЮЛЛЕР

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор фінансовий ТзОВ
«СПЕКТРОГРАФІКА»


Світлана БЛОНСЬКА
«29» 04 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

«Інтелектуальні сенсори тиску»

Маркович Віктора Йосифовича

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 175 Інформаційно-вимірювальні технології

Результати наукових досліджень, отриманих при виконанні дисертаційної роботи Марковича В.Й., були впроваджені у технологічні процеси виготовлення кераміки для контролю тиску в пневматичних системах приводів, що забезпечують точне позиціонування елементів обладнання під час формування керамічних виробів.

Використання запропонованих дисертантом наукових і технічних рішень дало змогу підвищити точність і надійність вимірювання тиску в пневматичних системах технологічного обладнання.

Директор фінансовий
ТзОВ «СПЕКТРОГРАФІКА»



Світлана БЛОНСЬКА

Додаток Д

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ПП «ЗАХІД-ЛЬВІВ»



Віталій ГЕНЕРАЛОВ

2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

«Інтелектуальні сенсори тиску»

Маркович Віктора Йосифовича

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 175 Інформаційно-вимірювальні технології

Цим актом підтверджується, що основні результати наукових досліджень, отриманих у межах виконання дисертаційної роботи Марковича В.Й., впроваджено у виробничу діяльність ПП «ЗАХІД-ЛЬВІВ».

У межах модернізації виробничого обладнання для нанесення покриттів на метали впроваджено програмний рівень інтелектуалізації сенсорів тиску, а саме диференціювання вихідного сигналу, інтегрованих у пневматичні системи транспортування порошкових сумішей до зони напилення. Інтелектуалізація забезпечила безперервний контроль та адаптивне регулювання робочого тиску в режимі реального часу. Це дозволило стабілізувати динаміку подачі порошку, забезпечити однорідність товщини покриття та зменшити витрати матеріалу.

Директор

ПП "ЗАХІД-ЛЬВІВ"



Генералов В.Ю.

Додаток Е



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

Олег ДАВИДЧАК

« 19 » 06. 2025 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Марковича Віктора Йосифовича
«Інтелектуальні сенсори тиску»
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
175 Інформаційно-вимірювальні технології
(галузь знань *17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*)

Комісія в складі: голови директора Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доц. Костіва Ю.М. та членів завідувача кафедри "Інтелектуальної мехатроніки та робототики", д.т.н., проф. Тихана М.О., професора кафедри "Інтелектуальної мехатроніки та робототики", д.т.н., проф. Івахіва О.В. і професора кафедри "Інтелектуальної мехатроніки та робототики", д.т.н., проф. Бойка Т.Г. даним актом підтверджує, що проведені дисертантом наукові дослідження виконувалися ним на кафедрі «Інтелектуальної мехатроніки та робототики» Національного університету «Львівська політехніка». Основні положення та результати дисертаційної роботи «Інтелектуальні сенсори тиску» впроваджені у навчальний процес кафедри «Інтелектуальної мехатроніки та робототики» Національного університету «Львівська політехніка» під час викладання дисциплін: «Віброметрія» та «Прецизійна мехатроніка та адитивні технології».

Голова комісії:

Директор ІКТА, к.т.н., доц.

Юрій КОСТИВ

Члени комісії:

Зав. каф ІМР, д.т.н., проф.

Мирослав ТИХАН

проф. каф ІМР, д.т.н., проф.

Орест ІВАХІВ

проф. каф ІМР, д.т.н., проф.

Тарас БОЙКО

Додаток Є

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Tykhan M., Dilay I., Markina O., Markovych V. Investigation of thermomechanical processes in miniature membrane elastic elements / Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering - 2020 - Volume 98 - Issue 1 - Pages 24-31. DOI: [10.5604/01.3001.0014.0814](https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0814). *Особистий внесок здобувача:*
2. Tykhan M., Repetylo T., Dilay I., Markovych V. Study of the influence of a fast-changing temperature on metrological characteristics of the tensorresistive pressure sensor / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2018 - Volume 1 - Issue 7-91 - Pages 30-37. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.123391](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123391). *Особистий внесок здобувача:*
3. Маркович В., Тихан М. Використання штучних нейронних мереж для опрацювання даних вимірювання тиску / Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 2024 - №1, Сторінка 160-165, DOI: [10.31891/2219-9365-2024-77-20](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-20). *Особистий внесок здобувача:*
4. Tykhan M., Markovych V., Heneralov V., Milian M., Device for dynamic calibration of pressure sensors / Metrology and measurement systems, Vol. 31 (2024), No. 4, DOI: [10.24425/mms.2024.150293](https://doi.org/10.24425/mms.2024.150293). *Особистий внесок здобувача:*

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Маркович В., Тихан М. Застосування ншм для коригування температурної похибки сенсора тиску за умов нестационарного термовпливу. VI міжнародної науково-практичної конференції “Управління якістю в освіті та промисловості:

досвід, проблеми та перспективи” – Україна, Львів, 16–17 листопада 2023 року – Сторінка 245. *Особистий внесок здобувача:*

2. Markovych V., Tykhan M., Milian M. The change in the dynamics of the membrane of a piezoresistive pressure sensor during stationary processes of temperature change. XX International Scientific and Practical Conference “Problems of solving global problems of humanity” – Greece, Athens, May 20-22, 2024 – Pages 353-356. *Особистий внесок здобувача:*

3. Markovych V., Tykhan M., Markovych R. Analysis of hardware architecture of intelligent pressure sensors. XX International Scientific and Practical Conference “Trends in the development of quality training of future specialists” - Oslo, Norvegia, May 21-24, 2024 – Pages 308-310. DOI: 10.46299/ISG.2024.1.20. *Особистий внесок здобувача:*