

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Меренько Богдан Іванович**

УДК 004.94:681.2:665.7

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НАФТОВОЇ  
ЕМУЛЬСІЇ ЗА СПЕКТРОМ КОМПЛЕКСНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕДАЧІ**

123 Комп'ютерна інженерія

12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 Б. І. Меренько

Науковий керівник **Кропивницька Віталія Богданівна**, кандидат технічних  
наук, доцент

Івано-Франківськ – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Меренько Б. І.* Комп'ютерна система контролю параметрів нафтової емульсії за спектром комплексних коефіцієнтів передачі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія в галузі знань 12 Інформаційні технології. – Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано–Франківськ, 2026. Захист відбудеться у разовій спеціалізованій вченій раді Івано–Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-прикладної задачі створення комп'ютерної системи контролю параметрів нафтової емульсії за спектром комплексних коефіцієнтів передачі для безперервної ідентифікації стану багат шарового середовища типу «нафта–емульсія–вода» в промислових умовах. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення точності та оперативності контролю параметрів багатокомпонентних рідин у технологічних апаратах нафтогазової галузі, де пряме вимірювання часто є ускладненим або неможливим через агресивність середовища, паразитні параметри вимірювального тракту, апаратні обмеження дискретизації та високу неінформативну волатильність сигналів. У роботі запропоновано підхід, за якого ідентифікація стану середовища здійснюється не через пряме досягнення точки апаратного балансу, а на основі багаточастотного аналізу електрофізичних відгуків, цифрового моделювання та нейромережевого перетворення вимірювальної інформації. Об'єктом дослідження є інформаційні процеси формування, перетворення та опрацювання спектру електрофізичних відгуків в інформаційно-вимірювальній системі оцінки параметрів розшарування багатофазного середовища типу «нафта–емульсія–вода». Предметом дослідження є моделі, методи й алгоритми визначення параметрів

багатошарового середовища за спектральними електрофізичними відгуками копланарного ємнісного перетворювача, методи оцінювання ідентифікованості, генерації синтетичних даних, двокаскадного нейромережевого перетворення та програмно-апаратної реалізації вимірювального тракту. Метою дисертації є розроблення та вдосконалення комп'ютерної системи оцінки параметрів гравітаційного розшарування багатошарового середовища на основі спектру комплексних коефіцієнтів передачі копланарного ємнісного перетворювача з ізолюваними електродами.

У дисертації виконано аналіз фізико-хімічних основ гравітаційного розділення системи «нафта–пластова вода», сучасних методів вимірювання товщини нафтової плівки, підходів до прискорення розділення та оцінки їх ефективності, ємнісних методів у нафтогазовій галузі, а також існуючих приладів і систем моніторингу. На цій основі обґрунтовано доцільність використання багаточастотного імпедансного зондування з копланарним ємнісним перетворювачем з ізолюваними електродами як найбільш перспективного підходу для безперервного вбудованого контролю тонких шарів нафти в умовах промислових сепараторів. Розроблено інформаційну модель апаратної підсистеми первинного перетворення сигналів у багатокомпонентних середовищах, яка формалізує взаємозв'язок між фізичними станами об'єкта контролю та багатовимірним простором частотних відгуків з урахуванням специфіки ізолюваних електродних інтерфейсів. Побудовано цифровий двійник системи збору даних і розроблено математичні та комп'ютерні моделі багатошарового середовища, що дало змогу виконати статистичне дослідження простору станів методом Монте-Карло, визначити межі апаратної інформативності вхідних потоків, проаналізувати матрицю Якобі, матрицю інформації Фішера, обумовленість задачі та сформулювати ознаки для розв'язання оберненої задачі ідентифікації. Окрему увагу приділено багаточастотному аналізу комплексних коефіцієнтів передачі, числовій оцінці глибини зондування, усуненню РС-неоднозначності, аналізу спектрів і діаграм

Найквіста, а також обґрунтуванню нейромережевого підходу до переходу від електрофізичних вимірювань до фізичних параметрів шару.

Основними науковими результатами дисертації є такі: вперше запропоновано безрозмірний комплексний коефіцієнт передачі як інформаційно-вимірювальний параметр, який визначається компенсаційним методом із використанням копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами та забезпечує можливість безперервного зчитування сигналів без прямого контакту сенсора з агресивним середовищем; удосконалено метод ідентифікації параметрів багатофазного середовища на основі матричної моделі електричних вузлових потенціалів копланарного перетворювача, що дало змогу сформувати синтетичний набір даних без проведення фізичного експерименту та використати його для попереднього навчання первинної нейромережі; набув подальшого розвитку двокаскадний нейромережевий компонент комп'ютерної системи, у якому перший каскад, навчений на синтетичних даних, виконує відображення спектрального електрофізичного відгуку у простір оцінок стану середовища, а другий каскад, дотренований на обмеженому наборі натурних даних, забезпечує перехід до абсолютних фізичних параметрів стану, що дало змогу скоротити етап адаптації алгоритму до конкретного фізичного об'єкта; набув подальшого розвитку метод кількісної оцінки інформативності вимірювального параметра в багатопараметричній системі на основі приросту ентропії Шеннона, що дало змогу визначати власний вплив кожного параметра на вихідний сигнал незалежно від виду функціонального зв'язку та міжпараметричних взаємодій.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні комплексного апаратно-програмного рішення для автоматизованого моніторингу просторового розподілу багатофазних рідин, доведеного до стадії інженерної реалізації та алгоритмічного забезпечення мікроконтролерних систем. У роботі розроблено апаратну структуру та топологію вимірювального зонда; запропоновано і обґрунтовано гібридну копланарно-стрижневу конструкцію первинного перетворювача, яка дозволяє масштабувати

динамічний діапазон приладу відповідно до габаритів досліджуваного резервуара та усунути проблему «сліпих зон», властиву традиційним поверхневим датчикам. Створено алгоритмічне забезпечення вимірювального тракту для мікроконтролерів на базі ARM Cortex-M, зокрема STM32, включно з алгоритмами автоматичного апаратного балансування, адаптивного пошуку нульового струму, синхронного детектування, компенсації фазових зсувів і цифрового накопичення сигналу. Показано, що застосування автоматичного масштабування напруги збудження, лінійної інтерполяції диференціальних струмів та оверсемплінгу забезпечує високу роздільну здатність вимірювального каналу в умовах жорстких апаратних обмежень стандартних 12-бітних цифро-аналогових перетворювачів. Синтезовано нейромережеву модель для розв'язання оберненої задачі спектроскопії, адаптовану до виконання у вбудованих системах з обмеженими обчислювальними ресурсами. На основі масивів комплексних коефіцієнтів передачі на різних частотах зондування, температури середовища та загальної гідростатичної висоти стовпа рідини система в режимі реального часу визначає геометричні товщини шарів нафти та емульсії і обчислює похідний технологічний параметр — кінетичну швидкість розшарування емульсії. Практична цінність результатів полягає в можливості застосування розробленої системи для автоматизованого контролю процесів гравітаційного розділення, оцінювання ефективності реагентів, підвищення інформативності вимірювань і зменшення впливу паразитних параметрів та завад у промислових умовах.

**Ключові слова.** Комп'ютерна система, інформаційно-вимірювальна система, контроль, нафтова емульсія, комплексні коефіцієнти передачі, багаточастотне імпедансне зондування, копланарний ємнісний перетворювач, первинний перетворювач, вимірювальні сигнали, математична модель, комп'ютерний експеримент, опрацювання сигналів, цифровий двійник, нейронна мережа, цифрові компоненти.

## ABSTRACT

*Merenko B. I.* Computer System for Monitoring Oil Emulsion Parameters Based on the Spectrum of Complex Transfer Coefficients. – Qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 123 Computer Engineering in the field of knowledge 12 Information Technologies. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2026. The dissertation will be defended before the one-time Specialized Academic Council of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied problem of developing a computer system for monitoring oil emulsion parameters by the spectrum of complex transfer coefficients for continuous identification of the state of a multilayer medium of the “oil–emulsion–water” type under industrial conditions. The relevance of the study is determined by the need to improve the accuracy and efficiency of monitoring multicomponent liquids in technological equipment of the oil and gas industry, where direct measurement is often difficult or impossible because of the aggressive nature of the medium, parasitic parameters of the measurement path, hardware limitations of discretization, and high non-informative signal volatility. The proposed approach identifies the state of the medium not by directly reaching the hardware balance point, but through multifrequency analysis of electrophysical responses, digital modelling, and neural-network transformation of measurement information. The object of the study is the information processes of formation, conversion, and processing of the spectrum of electrophysical responses in the information-measuring system for assessing the stratification parameters of a multiphase medium of the “oil–emulsion–water” type. The subject of the study is the models, methods, and algorithms for determining the parameters of a multilayer medium from the spectral electrophysical responses of a coplanar capacitive

transducer, as well as methods for assessing identifiability, generating synthetic data, two-stage neural-network transformation, and software-hardware implementation of the measurement path. The aim of the dissertation is to develop and improve a computer system for assessing the parameters of gravitational stratification of a multilayer medium based on the spectrum of complex transfer coefficients of a coplanar capacitive transducer with insulated electrodes.

The dissertation analyses the physicochemical foundations of gravitational separation in the “oil–produced water” system, modern methods for measuring oil film thickness, approaches to intensifying separation and evaluating their efficiency, capacitance-based methods in the oil and gas industry, and existing instruments and monitoring systems. On this basis, the expediency of using multifrequency impedance probing with a coplanar capacitive transducer with insulated electrodes is substantiated as the most promising approach for continuous built-in monitoring of thin oil layers under industrial separator conditions. An information model of the hardware subsystem for primary signal conversion in multicomponent media has been developed; it formalizes the relationship between the physical states of the monitored object and the multidimensional space of frequency responses, taking into account the specific features of insulated electrode interfaces. A digital twin of the data acquisition system has been built, and mathematical and computer models of the multilayer medium have been developed, which made it possible to carry out a statistical study of the state space using the Monte Carlo method, determine the limits of the hardware informativeness of the input flows, analyse the Jacobian matrix, the Fisher information matrix, and the conditioning of the problem, and generate features for solving the inverse identification problem. Particular attention is paid to the multifrequency analysis of complex transfer coefficients, numerical estimation of probing depth, elimination of RC ambiguity, analysis of spectra and Nyquist plots, and substantiation of a neural-network approach for transitioning from electrophysical measurements to the physical parameters of the layer.

The main scientific results of the dissertation are as follows: for the first time, a dimensionless complex transfer coefficient has been proposed as an information-

measuring parameter, which is determined by a compensation method using a coplanar capacitive transducer with insulated electrodes and enables continuous signal acquisition without direct contact between the sensor and the aggressive medium; the method for identifying the parameters of a multiphase medium based on a matrix model of electrical nodal potentials of a coplanar transducer has been improved, which made it possible to generate a synthetic dataset without conducting a physical experiment and to use it for pre-training the primary neural network; the two-stage neural-network component of the computer system has been further developed, in which the first stage, trained on synthetic data, maps the spectral electrophysical response into the space of medium state estimates, while the second stage, fine-tuned on a limited set of full-scale experimental data, ensures the transition to absolute physical state parameters, thereby reducing the stage of adapting the algorithm to a specific physical object; the method for quantitative evaluation of the informativeness of a measurement parameter in a multiparameter system based on the increment of Shannon entropy has been further developed, which makes it possible to determine the individual influence of each parameter on the output signal regardless of the type of functional relationship and interparameter interactions.

The practical significance of the obtained results lies in the development of a comprehensive hardware-software solution for automated monitoring of the spatial distribution of multiphase liquids, brought to the stage of engineering implementation and algorithmic support for microcontroller-based systems. The dissertation presents the hardware architecture and the topology of the measuring probe; in particular, a hybrid coplanar-rod design of the primary transducer is proposed and substantiated, which makes it possible to scale the dynamic range of the instrument according to the dimensions of the monitored tank and eliminate the “blind-zone” problem inherent in conventional surface sensors. Algorithmic support for the measurement path has been developed for ARM Cortex-M microcontrollers, including STM32 platforms, covering automatic hardware balancing, adaptive zero-current search, synchronous detection, phase-shift compensation, and digital signal accumulation. It is shown that

the use of automatic scaling of the excitation voltage, linear interpolation of differential currents, and oversampling ensures high resolution of the measurement channel under the strict hardware limitations of standard 12-bit digital-to-analog converters. A neural-network model has been synthesized for solving the inverse spectroscopy problem and adapted for execution in embedded systems with limited computational resources. Based on arrays of complex transfer coefficients measured at different probing frequencies, together with the medium temperature and the total hydrostatic height of the liquid column, the system determines in real time the geometric thicknesses of the oil and emulsion layers and computes a derived technological parameter, namely the kinetic rate of emulsion stratification. The practical value of the results lies in the possibility of applying the developed system to automated control of gravitational separation processes, evaluation of reagent efficiency, enhancement of measurement informativeness, and reduction of the influence of parasitic parameters and interference under industrial conditions.

**Keywords:** Computer system, information-measuring system, monitoring, oil emulsion, complex transfer coefficients, multifrequency impedance probing, coplanar capacitive transducer, primary transducer, measurement signals, mathematical model, computer experiment, signal processing, digital twin, neural network, digital components.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

1. Merenko V. Modeling and algorithmic support of a computer system for estimating the thickness of oil films. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2026. Volume 87, no.1. P.86-94. doi: [10.23939/istcmtm2026.01.086](https://doi.org/10.23939/istcmtm2026.01.086) (Фахове наукове видання України категорії Б). *Здобувач розробив спосіб оцінювання стану дисперсного середовища на основі спектрального аналізу комплексного імпедансу. Здобувач формалізував вимірювальне перетворення як задачу отримання та інтерпретації даних, запропонував використання компенсаційного принципу нульового балансу для формування інформативних ознак і зменшення впливу паразитних параметрів, а також створив комп'ютерну двовимірну матричну модель взаємодії копланарних ємнісних ізолюваних електродів із системою «діелектрик–провідник».*

2. Кропивницька В.Б., Меренько Б.І. Модель кіберфізичної системи моніторингу та керування рівнем рідин у високих резервуарах. *Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія»*. 2025. 4(192), с. 22–28. doi: [10.33042/3083-6727-2025-4-192-22-28](https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-22-28). (Фахове наукове видання України категорії Б). *Здобувач розробив модель кіберфізичної системи моніторингу рівня рідини у резервуарах, формалізував архітектуру багатосенсорного збору даних та розробив алгоритми їх опрацювання, зокрема фільтрації, нормалізації, злиття вимірювальної інформації та адаптивного самоналаштування. Здобувач обґрунтував структуру системи та оцінив результати моделювання з позицій побудови кіберфізичної інфраструктури. Кропивницька В.Б. формувала методологію дослідження, інтерпретувала результати та науково редагувала статтю.*

3. Корнута В.А., Меренько Б.І. Комплексний підхід до моделювання та планування інтелектуальних автоматизованих систем на основі SAT-планування. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75) № 5. Частина 2. с.133-

141. doi: [10.32782/2663-5941/2025.5.2/19](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/19) (Фахове наукове видання України категорії Б). *Здобувач розробив формалізований підхід до моделювання та планування інтелектуальних автоматизованих систем, що базується на автоматному представленні поведінки, алгоритмізації процедур SAT-планування та застосуванні засобів модельної перевірки для забезпечення коректності функціонування системи. Здобувач здійснив основне опрацювання наукової проблеми, сформував концепцію дослідження, виконав формалізацію інтелектуальної автоматизованої системи, обґрунтував структуру планування і перепланування в динамічному середовищі та здійснив тлумачення одержаних результатів. Корнута В.А. методологічно узгодив підходи до моделювання та планування, інтерпретації результатів і науково редагував статтю.*

4. Корнута В.А., Меренко Б.І., Катамай Ю.В., Дмитрів І.Я., Іванців Н.Т., Дячук А.В. *Методи убезпечення від помилок інтелектуальних автоматизованих систем нафтогазової галузі. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 36 (75). № 1. 2025. Частина 2. С.117-123. doi: [10.32782/2663-5941/2025.1.2/18](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/18) (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач обґрунтував застосування формальних методів перевірки, тестування та аналізу покриття коду для підвищення надійності інтелектуальних автоматизованих систем, узагальненні їх значення для забезпечення коректності програмно-алгоритмічного забезпечення та підготовці прикладів практичного використання в задачах нафтогазової галузі. Такий внесок тематично узгоджується з дисертаційним дослідженням, пов'язаним із розробленням автоматизованих і кіберфізичних систем моніторингу та керування. Корнута В.А. опрацював матеріал щодо верифікації, тестування та перевірки покриття коду. Катамай Ю.В. підготувала матеріал щодо формальних методів перевірки; Дмитрів І.Я. підготував матеріал щодо модульного та інтеграційного тестування; Іванців Н.Т. обґрунтував підходи до тестування на основі властивостей і аналізу нефункціональних вимог; Дячук А.В. здійснив*

наукове редагування, узгодження висновків та фінальне доопрацювання статті.

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

5. Меренько Б.І. Інтелектуальний предиктивний аналіз процесу розшарування водонафтових емульсій. Global Trends in Science, Technology and Economy: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. Graz, Austria. March 25-27, 2026. P.67-70. doi: [10.70286/isu-25.03.2026.006](https://doi.org/10.70286/isu-25.03.2026.006). *Здобувач розробив підходи до побудови інтелектуальної автоматизованої системи предиктивного аналізу процесу розшарування водонафтових емульсій, що поєднує математичне моделювання, опрацювання вимірювальних даних і процедури підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності. Здобувач сформував концептуальні засади побудови такої системи та її обґрунтованого використання як програмно-алгоритмічного засобу моніторингу технологічного процесу.*

6. Меренько Б.І. Аналіз можливостей вивчення багатошарового середовища методами багаточастотного імпедансного зондування. XXVI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій» Одеса, 16-17 квітня 2026 р. - Одеса, Видавництво ОНТУ, 2026 р. С. 52-53. URL: [https://ontu.edu.ua/download/konfi/2026/Conference\\_abstract-IT-2026.pdf](https://ontu.edu.ua/download/konfi/2026/Conference_abstract-IT-2026.pdf). *Здобувач розробив спосіб ідентифікації параметрів багатошарового середовища на основі багаточастотного аналізу його електрофізичних характеристик, оцінив існуючі підходи до параметричної ідентифікації, встановив обмеження одночастотних методів, обґрунтував доцільність багаточастотного зондування.*

7. Merenko B. Hardware-software implementation of a computerized system for predictive identification of multilayer medium parameters. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference «Global Directions in Scientific Research and Technological Development» April 6-8, 2026, Valencia,

Spain 2026. 74-77 p. URL: [https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2026/04/Valencia\\_Spain\\_06.04.26.pdf](https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2026/04/Valencia_Spain_06.04.26.pdf) DOI: 10.70286/EOSS-06.04.2026.006.74-77. *Здобувач розробив комп'ютерну систему для прогнозної ідентифікації параметрів багатoshарового середовища типу «нафта–емульсія–вода».*

8. Меренко Б. І., Кропивницька В. Б. Архітектура та функціональні можливості кіберфізичної системи для моніторингу та керування рівнем рідин. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «*Scientific Research: Emerging Theories and Practical Breakthroughs*», November 17-19, 2025. Edinburgh, Scotland. С. 122-123. URL: [https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2025/11/Edinburgh\\_Scotland\\_17.11.25.pdf](https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2025/11/Edinburgh_Scotland_17.11.25.pdf). *Здобувач розробив архітектуру кіберфізичної системи моніторингу та керування рівнем рідин, визначив її функціональні компоненти і принципи взаємодії між ними, а також обґрунтував застосування інтелектуальних методів опрацювання даних у складі системи. Кропивницька В.Б. сформувала методологію дослідження та науково редагувала тези.*

9. Меренко Б. І., Кропивницька В. Б. Аналіз сучасних підходів до моніторингу рідин та обґрунтування необхідності кіберфізичних систем. Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 9 жовтня, 2025 р. Івано-Франківськ, 2025. С. 197-198. URL: <https://drive.google.com/file/d/1sim7SKa62RzaS5XZrTGt248h5VAfflWQ/view>. *Здобувач проаналізував сучасні підходи до моніторингу рідин, систематизував їхні переваги і обмеження, а також обґрунтував доцільність застосування кіберфізичних систем для підвищення ефективності контролю та керування технологічними процесами. Кропивницька В.Б. сформувала методологію дослідження та науково редагувала тези.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НАФТОВОЇ ЕМУЛЬСІЇ.....	24
1.1. Інформативні характеристики вимірюваного середовища .....	24
1.2. Методи вимірювання рівня розділу фаз нафта-вода.....	28
1.3. Огляд комп'ютерних систем контролю параметрів нафтових емульсій ..	38
1.4. Ємнісні методи вимірювання в нафтогазовій галузі.....	43
1.5. Перспективи вдосконалення інформаційно-вимірювальних каналів контролю параметрів нафтовмісних рідин, постановка задачі досліджень ....	51
Висновки до розділу 1 .....	62
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПАРАМЕТРУ ДЛЯ ОЦІНКИ ПІДСИСТЕМИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ПРОФІЛЮВАННЯ .....	66
2.1. Структура та функціонал комп'ютерної системи контролю параметрів нафтової емульсії за спектром комплексних коефіцієнтів передачі .....	66
2.2. Математична модель поверхневого зондування багат шарового середовища методом імпедансного аналізу.....	69
2.3. Аналіз впливу цільових параметрів моделі на імпеданс .....	73
2.4. Вдосконалення моделі для поверхневого зондування багат шарового середовища із використанням комплексного коефіцієнта передачі.....	88
2.5. Аналітичне обґрунтування робочого діапазону комп'ютерної вимірювальної системи на основі апаратних обмежень.....	95
Висновки до розділу 2 .....	99
РОЗДІЛ 3 ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БАГАТОШАРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	101
3.1. Дискретна сіткова модель багат шарового середовища та електродної системи.....	101

3.2. Формування матриці адмітансів.....	106
3.3. Структура часового вхідного тензора нейромережі .....	110
3.4. Верифікація та оцінка якості нейромережевого обчислювача синтетичного рівня .....	118
3.5. Генерація синтетичного набору даних параметричного простору методом Монте-Карло.....	126
3.6. Структурне рішення двокаскадного нейромережевого компоненту комп'ютерної системи.....	131
Висновки до розділу 3 .....	138
РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РОЗДІЛУ ФАЗ НАФТОВОЇ ЕМУЛЬСІЇ.....	140
4.1. Апаратно-програмна структура підсистеми первинного збору даних ...	140
4.2. Алгоритми опрацювання сигналів первинного перетворювача комп'ютерною системою .....	148
4.3. Апробація комп'ютерної системи та адаптація нейромережевої моделі	166
Висновки до розділу 4 .....	177
ВИСНОВКИ.....	179
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	181
ДОДАТКИ.....	199

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач

АЧХ — амплітудно-частотна характеристика

ПТФЕ — фторопласт

ФЧХ — фазо-частотна характеристика

ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач

ЯМР — ядерно-магнітний резонанс

ARM Cortex-M — мікроконтролерна архітектура ARM для вбудованих систем

CG — метод спряжених градієнтів

CSR — формат зберігання розріджених матриць Compressed Sparse Row

DDS — прямий цифровий синтез

ECT — електрична ємнісна томографія

Err — інтегральний критерій достовірності результату ідентифікації

FIM — матриця інформації Фішера

FPU — блок обчислень з плаваючою комою

JFET — польовий транзистор з керувальним р-n переходом

MAE — середня абсолютна похибка

MSE — середньоквадратична похибка

OSM — аналізатор типу Oil-in-Water Monitor

RC — резистивно-ємнісна ланка

STM32 — сімейство мікроконтролерів STM32

STM32G474 — мікроконтролер сімейства STM32G474

TIA — трансімпедансний підсилювач; трансімпедансний тракт

TL082 — операційний підсилювач з JFET-входами

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Сучасний етап розвитку комп'ютерних систем моніторингу нафтогазового комплексу характеризується потребою у достовірній ідентифікації параметрів нафтових емульсій. Проте наявні апаратно-програмні рішення часто є недостатньо оптимізованими для інтеграції складних обчислювальних структур безпосередньо у вбудовані системи на технологічних об'єктах. Це створює масив задач для комп'ютерних систем непрямих обчислень, де пряме вимірювання складу емульсії є технічно складним або енергетично деструктивним для об'єкта.

Проблеми організації таких систем зумовлені обмеженнями апаратних схем дискретизації (зокрема, розрядністю ЦАП та АЦП мікроконтролерів). Дискретні сигнали, що відображають спектр комплексних коефіцієнтів передачі, часто мають малу кількість станів, що відповідають реальним фізичним змінам продукту. Натомість ці дані мають високу волатильність, спричинену інструментальними шумами, паразитними ємностями вимірювальних ліній та процесами поляризації.

У таких умовах класичний архітектурний підхід, орієнтований на пряме фізичне сканування унікальних станів, вичерпав себе. Він генерує масиви даних з низьким рівнем інформативності та створює небажане збурення середовища. Виникає необхідність переходу до створення інтелектуальних методів первинного перетворення, здатних алгоритмічно відсікати неінформативну варіативність.

З огляду на це, розробка принципів побудови комп'ютерних систем, що базуються на алгоритмічній імітації (віртуалізації) шуканих станів спектра замість їх фізичного досягнення, має вагоме значення. Використання критеріїв інформаційної значущості для фільтрації даних та застосування спеціалізованих нейромережових структур дозволяє подолати апаратні обмеження дискретизуючих систем.

Таким чином, науково-прикладна задача розробки комп'ютерних систем контролю параметрів нафтової емульсії, здатної виявляти інформативну складову в спектрі комплексних коефіцієнтів передачі шляхом зменшення неінформативної волатильності, є своєчасною та актуальною.

**Об'єкт дослідження** — інформаційні процеси формування, перетворення та опрацювання спектру електрофізичних відгуків в інформаційно-вимірювальній системі оцінки параметрів розшарування багатофазного середовища типу «нафта–емульсія–вода».

**Предмет дослідження** — моделі, методи, алгоритми та апаратно-програмні засоби ідентифікації параметрів за спектром комплексних коефіцієнтів передачі.

**Мета дослідження** — розроблення та вдосконалення комп'ютерної системи оцінки параметрів гравітаційного розшарування багатошарового середовища на основі спектру комплексних коефіцієнтів передачі копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. На основі огляду та аналізу існуючих методів, підходів та рішень виокремити інформативні параметри та характеристики контрольованого середовища та методи їх опрацювання.

2. Розробити інформаційну модель апаратної підсистеми первинного перетворення сигналів, що формалізує взаємозв'язок між фізичними параметрами розшарування нафтової емульсії та спектром відгуків копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами, а також обґрунтувати інформативність безрозмірного комплексного коефіцієнта передачі як інформаційно-вимірювального параметра для оцінки товщини нафтової плівки та часового коефіцієнта гравітаційного розшарування.

3. Розробити математичну модель електричних властивостей багатошарового середовища на основі матричного методу вузлових потенціалів копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами для формування синтетичного набору даних, що забезпечує попереднє навчання

нейромережевого компонента комп'ютерної системи без проведення повномасштабного фізичного експерименту.

4. Розробити алгоритмічне рішення визначення комплексного коефіцієнта передачі копланарного ємнісного перетворювача на основі принципу віртуального пошуку точки нульового струму, де визначення точки балансу в умовах адитивних завад здійснюється лінійною апроксимацією за двома вимірами в її околі.

5. Розробити алгоритм двокаскадного трансферного навчання нейромережевого компонента комп'ютерної системи, в якій перший каскад, адаптований до ресурсних обмежень вбудованих систем шляхом децимації часового набору вхідних даних із доповненням вектора ознак статистиками ковзного вікна, навчається на синтетичному наборі даних та формує узагальнений спектральний відгук середовища, а другий каскад фізичного узгодження дотреновується на обмеженому наборі натурних вимірювань, розмічених еталонними методами в процесі адаптації алгоритму до конкретного фізичного об'єкта.

**Методи дослідження:** методи теорії електричних кіл, імпедансної спектроскопії та електрофізичного моделювання багат шарових середовищ; методи математичного та комп'ютерного моделювання; методи цифрового опрацювання сигналів, статистичного та спектрального аналізу, децимації та згладжування часових рядів; методи машинного і трансферного навчання; методи експериментальних досліджень.

#### **Наукова новизна роботи:**

1. Вперше запропоновано безрозмірний комплексний коефіцієнт передачі як інформаційно-вимірювальний параметр копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами, який визначається на основі принципу віртуального пошуку точки нульового струму, не потребує прямого контакту сенсора з агресивним середовищем та дозволяє перейти від вимірювання напруги на електродах до вимірювання струму в їх колі, що спростило схемотехніку вимірювального тракту комп'ютерної системи.

2. Удосконалено метод ідентифікації параметрів багатофазного середовища на основі матричної моделі електричних вузлових потенціалів копланарного перетворювача, що дало змогу сформувати синтетичний набір даних без проведення повномасштабного фізичного експерименту та використати його для попереднього навчання первинної нейромережі.

3. Набув подальшого розвитку двокаскадний нейромережевий компонент комп'ютерної системи, у якому перший каскад, навчений на синтетичних даних, виконує відображення спектрального електрофізичного відгуку у простір оцінок стану середовища, а другий каскад, дотренований на обмеженому наборі натурних даних, забезпечує перехід до абсолютних фізичних параметрів стану, що дало змогу скоротити етап адаптації алгоритму до конкретного фізичного об'єкта.

4. Набув подальшого розвитку метод кількісної оцінки інформативності вимірювального параметра в багатопараметричній системі шляхом використання приросту ентропії Шеннона як міри зменшення невизначеності вихідної величини при фіксації окремого параметра за вільної зміни решти в межах їх природної варіації, що дало змогу визначати власний вплив кожного параметра на вихідний сигнал незалежно від виду функціонального зв'язку та міжпараметричних взаємодій.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати теоретичних і практичних досліджень, які є змістом дисертаційної роботи, одержані автором особисто. У наукових працях, виконаних у співавторстві автору належить: [150] – розроблення моделі кіберфізичної системи моніторингу рівня рідини у резервуарах, формалізація структури багатосенсорного збору даних і створення алгоритмів їх обробки, зокрема фільтрації, нормалізації, злиття вимірювальної інформації та адаптивного самоналаштування, обґрунтування структури системи та оцінка результату моделювання з позицій побудови комп'ютерної кіберфізичної інфраструктури; [151] – розроблення формалізованого підходу до моделювання та планування інтелектуальних автоматизованих систем, що базується на автоматному представленні

поведінки, алгоритмізації процедур SAT-планування та застосуванні засобів модельної перевірки для забезпечення коректності функціонування системи, основне опрацювання наукової проблеми, формалізація інтелектуальної автоматизованої системи, обґрунтування структури планування і перепланування в динамічному середовищі та тлумачення одержаних результатів; [152] – обґрунтування застосування формальних методів перевірки, тестування та аналізу покриття коду для підвищення надійності інтелектуальних автоматизованих систем, узагальнення їх значення для забезпечення коректності програмно-алгоритмічного забезпечення та підготовка прикладів практичного використання в задачах нафтогазової галузі.

**Апробація матеріалів дисертації.** Наукові результати дисертації висвітлені у 9 наукових публікаціях здобувача, серед яких 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України. Матеріали дисертації доповідалися на 5 наукових конференціях і опубліковані у вигляді тез доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг друкованого тексту становить 244 сторінки, з них: 163 сторінки основного тексту, 32 рисунки, 12 таблиць, список використаних джерел, що містить 153 найменування на 17 сторінках.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження відповідає державним пріоритетам у сфері науки, технологій та інновацій і тематично узгоджується з Переліком пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 30.04.2024 № 476, зокрема за напрямками «Інформаційні та комунікаційні технології», «Системи штучного інтелекту», «Кіберфізичні системи. Інтернет речей. Робототехніка. Комп'ютерне опрацювання сигналів різних видів та походження», «Глибоке навчання, великі дані, нейроподібні мережі», а також «Енергетика та енергоефективність» і «Енергоменеджмент, інформаційно-аналітичне та

нормативно-методичне забезпечення енергетичної галузі». Прикладна спрямованість роботи також відповідає положенням Енергетичної стратегії України на період до 2050 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р, у частині цифровізації, моніторингу та підвищення ефективності функціонування енергетичних і паливних систем.

Аспірант Меренько Б.І. був співвиконавцем науково-дослідної роботи кафедри комп'ютерні системи і мережі (Тема: «Наукові засади створення цифрових компонентів спеціалізованих мереж та інформаційно-вимірювальних систем промислових об'єктів», №0124U004100) та його власне дослідження стало фрагментом даної науково-дослідної роботи.

### **Практична цінність роботи:**

Практична цінність дисертаційної роботи (дослідження) полягає у створенні комп'ютерної системи для оцінки просторового гравітаційного розшарування багатофазних рідин, яке доведено до стадії інженерної реалізації з апаратним рішенням та алгоритмічним забезпеченням мікроконтролерної системи, а основні практичні результати:

1. Розроблено топологію вимірювального сенсора на основі копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами, що усунуло потребу в прямому контакті з агресивним середовищем та забезпечило можливість безперервного моніторингу в промислових умовах.

2. Розроблено апаратно-програмну структуру первинного перетворювача для визначення комплексного коефіцієнта передачі на основі принципу віртуального пошуку точки нульового струму, реалізовану для мікроконтролерів на базі ядра ARM Cortex-M, де визначення точки балансу в умовах адитивних завад здійснюється лінійною апроксимацією за двома вимірами в її околі із застосуванням автоматичного масштабування напруги збудження та оверсемплінгу, що дозволяє досягти роздільної здатності вимірювального каналу на рівні 1% в умовах апаратних обмежень стандартних АЦП і ЦАП.

3. Синтезовано двокаскадний нейромережевий компонент комп'ютерної системи, адаптований до ресурсних обмежень вбудованих систем, вхідний вектор ознак якого містить спектр комплексних коефіцієнтів передачі на різних частотах зондування, поточну температуру середовища та коефіцієнти нахилу лінійної апроксимації, що забезпечує визначення у режимі реального часу геометричної товщини шару нафти та кінетичного коефіцієнта розшарування емульсії.

# РОЗДІЛ 1

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НАФТОВОЇ ЕМУЛЬСІЇ

### 1.1. Інформативні характеристики вимірюваного середовища

Функціонування комп'ютерних систем контролю у нафтовидобутку базується на опрацюванні даних про складні дисперсні системи, що утворюються при підйомі на поверхню нафти та значних об'ємів пластової води. Оскільки на різних стадіях розробки родовища обводненість продукції може сягати 80–98%, першочерговим завданням для інформаційно-вимірювальних систем є забезпечення точності ідентифікації параметрів розділення такої двофазної суміші [1]. Процес гравітаційного розшарування компонентів є складним об'єктом моделювання, де реальна динаміка системи виходить за межі моделі Стокса. Взаємозв'язок фізико-хімічних факторів середовища визначає специфіку алгоритмів опрацювання сигналів та вимоги до обчислювальної потужності апаратних засобів перетворювача.

Рушійною силою гравітаційного розділення є різниця густин нафти і пластової води. Для більшості нафт із родовищ України ця різниця становить 100–250 кг/м<sup>3</sup>: густина нафти знаходиться в діапазоні 820–900 кг/м<sup>3</sup>, тоді як пластова вода, збагачена розчиненими солями, має густину від 1010 до 1200 кг/м<sup>3</sup> і більше [1]. Відповідно до закону Стокса, швидкість підйому краплини нафти в нерухомій водяній фазі пропорційна квадрату її радіуса і різниці густин та обернено пропорційна динамічній в'язкості дисперсійного середовища:

$$v = \frac{2r^2\Delta\rho g}{9\eta}, \quad (1.1)$$

де  $r$  — радіус краплини,  $\Delta\rho$  — різниця густин фаз,  $g$  — прискорення вільного падіння,  $\eta$  — динамічна в'язкість водяної фази [2]. З виразу (1.1) випливає, що дисперсні системи з дрібними краплинами нафти (радіус менше 10–30 мкм)

фактично не розширюються за прийнятний технологічний час навіть за сприятливих теплових умов. Саме тому подрібнена нафтова дисперсія, що утворюється в результаті роботи насосів, штуцерів і регулювальних клапанів, потребує додаткового укрупнення крапель перед подачею до відстійника.

Формування стійкої емульсії нафта–вода обумовлене наявністю на поверхні крапель природних емульгаторів — асфальтенів, смол, нафтових кислот, а також частинок глини та вапняку, що виносяться з пласта. Ці речовини адсорбуються на міжфазній поверхні та утворюють структурований захисний шар, який перешкоджає злиттю крапель при їхньому зближенні [3]. Асфальтени, зокрема, здатні утворювати жорсткі тривимірні структури на границі розділу фаз, які надають краплям значної механічної стійкості. Як показано у роботах Sjöblom et al. [4], механічна міцність такого шару прямо корелює з концентрацією асфальтенів і часом їхньої адсорбції: при витримуванні емульсії впродовж кількох годин стійкість крапель до коалесценції зростає у рази. Паралельно нафтові кислоти та смолянисті компоненти знижують міжфазний натяг на границі нафта–вода, що само по собі стабілізує дисперсну систему, оскільки зменшує рушійну силу злиття крапель [5].

Міжфазний натяг на границі нафта–вода є одним із центральних параметрів, що визначають швидкість коалесценції та кінцеву ефективність розділення. Для систем чиста нафта–чиста вода цей показник становить зазвичай 20–35 мН/м, але у реальних пластових умовах присутність поверхнево-активних компонентів знижує його до 1–5 мН/м і навіть нижче [6]. Зниження міжфазного натягу уповільнює злиття крапель і разом з тим підвищує ймовірність утворення стабільних тонких плівок між ними — так званих дренажних плівок, розрив яких є необхідною умовою коалесценції. Кінетика стоншення та розриву таких плівок описується теорією DLVO (Дерягіна–Ландау–Фервея–Овербека), яка враховує взаємодію електростатичних подвійних шарів і дисперсійних сил Ван-дер-Ваальса [7]. У пластових водах із високою мінералізацією товщина дифузного подвійного шару суттєво

зменшується внаслідок екранування зарядів іонами солей, що теоретично має полегшувати коалесценцію. Проте на практиці ця перевага нерідко нівелюється більш щільним пакуванням адсорбованих шарів поверхнево-активних речовин при зростанні іонної сили розчину [8].

В'язкість нафтової фази відіграє подвійну роль у процесі розділення. По-перше, висока в'язкість власне нафти уповільнює внутрішню циркуляцію в краплях і тим самим гальмує їхню деформацію та злиття при зіткненні. По-друге, і це важливіше з точки зору інженерних розрахунків, в'язкість суміші на стадії формування перехідного шару безпосередньо впливає на ефективну швидкість підйому нафтових краплин, оскільки вираз Стокса застосовується саме до в'язкості безперервної фази [9]. Для важких нафт кінематична в'язкість може перевищувати 100–500 мм<sup>2</sup>/с при 20 °С, що робить гравітаційне розділення практично неможливим без попереднього підігріву. Залежність в'язкості нафти від температури описується рівнянням Арреніуса або більш точними емпіричними кореляціями Walther і ASTM, і для ряду родовищ підвищення температури з 20 до 60 °С знижує в'язкість у 5–15 разів [10]. Саме тому в технологічних регламентах підготовки нафти температура відстоювання є одним із головних контрольованих параметрів.

Пластова вода за своїм складом суттєво відрізняється від прісної технологічної. Загальна мінералізація у різних родовищах може варіюватися від кількох грамів на літр до 300–350 г/л і більше, причому переважаючими іонами, як правило, є  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$  і  $HCO_3^-$  [1]. Висока іонна сила пластової води позначається на стані міжфазного шару та, як зазначено вище, впливає на електрокінетичні властивості краплин нафти. Крім того, двовалентні катіони кальцію та магнію здатні утворювати нерозчинні мила з нафтовими кислотами безпосередньо на межі фаз, що додатково зміцнює захисний адсорбційний шар і підвищує стійкість емульсії [11]. Вплив мінералізації на стійкість емульсії нелінійний: при помірних концентраціях солей стійкість може зростати, тоді як при дуже високій мінералізації відбувається

«висолювання» деяких поверхнево-активних речовин, що, навпаки, може послаблювати захисний шар [12].

Розчинений газ, що міститься у пластовому флюїді, при зниженні тиску вивільняється у вигляді бульбашок і суттєво ускладнює картину розділення. Бульбашки газу з'єднуються з краплями нафти та утворюють флотаційні агрегати, які спливають значно швидше, ніж чисті краплини нафти тієї ж розмірності [13]. З одного боку, це сприяє видаленню нафти з водної фази, що саме по собі корисне. З іншого — інтенсивне газовиділення у сепараторі спричиняє турбулентність і механічне диспергування вже укрупнених крапель, що погіршує кінцевий результат відстоювання. У горизонтальних нафтогазоводяних сепараторах для врахування цього ефекту вводять поняття ефективного числа Рейнольдса потоку, і проектування внутрішніх розподільних пристроїв спрямоване саме на мінімізацію турбулентного диспергування [14].

Процес розшарування у відстійнику не є рівноважним і не завершується утворенням двох абсолютно чистих фаз. На практиці між основними шарами нафти і води формується перехідний шар — так звана «rag layer» або промжар, — який являє собою концентровану емульсію з розміром крапель переважно від 1 до 50 мкм і може містити також тверді частинки, бактерії та продукти корозії [15]. Товщина цього шару залежить від властивостей нафти, якості підготовки флюїду і часу відстоювання, і у несприятливих випадках може сягати десятків сантиметрів. Контроль положення та товщини перехідного шару є самостійним технологічним завданням і безпосередньо пов'язаний із загальною проблемою вимірювання товщини нафтової плівки на поверхні водного шару нижче нього.

Розподіл краплин за розмірами (дисперсний склад) є, мабуть, найбільш інформативним параметром, що характеризує стан нафтоводяної системи перед розділенням. Дослідженнями методами лазерної дифракції та мікроскопії показано, що після типових для нафтопромислового обладнання гідравлічних перепадів тиску розподіл крапель описується логарифмально-нормальним або функцією Розіна–Раммлера з медіанним розміром від 5 до 150 мкм залежно від

інтенсивності диспергування [16]. Частка краплин розміром менше 10 мкм, для яких застосування класичного закону Стокса дає час спливання в стандартному відстійнику понад 24 год, може становити від 10 до 40 % від загального об'єму нафти у водяній фазі [17]. Саме ця частина дисперсії визначає залишкову концентрацію нафти у відпрацьованій воді після відстійника і є мішенню для всіх методів прискорення коалесценції.

Загальна концепція гравітаційного розділення нафтоводяних систем є добре вивченою, проте зв'язок між миттєвим станом границі розділу фаз і кінетикою процесу в реальному відстійнику досі залишається предметом досліджень. Стан цієї границі — тобто товщина нафтового шару безпосередньо над водяною фазою, швидкість його зростання та рівномірність — інтегрально відображає баланс між надходженням нафтових крапель із нижніх шарів і відведенням укрупненої нафти у верхній колектор. Вимірювання цього параметра в режимі реального часу дозволяє не лише оцінювати поточну ефективність сепараційного обладнання, а й отримувати кількісний показник для оцінки ефективності різних хімічних реагентів, що прискорюють розділення.

## **1.2. Методи вимірювання рівня розділу фаз нафта-вода**

Проблема кількісного визначення товщини нафтового шару на водній поверхні виникла значно раніше, ніж сформувалася сучасна нафтова промисловість. Перші спроби оцінити товщину олійних плівок на воді описав ще Бенджамін Франклін у 1774 році, коли спостерігав поширення краплі олії по поверхні ставка і оцінив мінімальну товщину шару, нижче якої поширення зупинялося [18]. Ця оцінка, як виявилось значно пізніше, була близькою до розміру одного молекулярного моношару. Від якісних спостережень до кількісних вимірювань, придатних для промислового контролю, пройшло понад двісті років, і сьогодні існує кілька принципово різних фізичних підходів до вирішення цього завдання.

Складність вимірювання товщини нафтової плівки визначається насамперед широким діапазоном значень, які цей параметр може приймати: від субмікронних мономолекулярних плівок на поверхні природних водойм до шарів товщиною в кілька сантиметрів у промислових відстійниках. Жоден єдиний метод не покриває весь цей діапазон з однаковою точністю, і вибір вимірювального підходу завжди є компромісом між метрологічними характеристиками, вартістю реалізації та придатністю до конкретних умов експлуатації.

### 1.2.1. Оптичні методи

Найбільш розробленою і широко застосовуваною групою є оптичні методи, які використовують взаємодію електромагнітного випромінювання з нафтовою плівкою. Серед них особливе місце посідає ультрафіолетова флуориметрія, заснована на здатності поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що є невід'ємними складовими будь-якої нафти, поглинати ультрафіолетове випромінювання і перевипромінювати його у видимому діапазоні. Цей метод є одним із найбільш чутливих: порогова концентрація нафтопродуктів, що реєструється флуориметричним датчиком, може становити кілька мікрограмів на літр у водній фазі [19]. Для вимірювання товщини плівки безпосередньо на поверхні води флуориметрія застосовується у конфігурації відбивної флуоресцентної спектроскопії: лазерний або світлодіодний збуджуючий промінь спрямовується на поверхню під кутом, а детектор реєструє інтенсивність флуоресценції, яка при певних умовах пропорційна товщині плюміруючого шару. Проте ця пропорційність виконується лише в обмеженому діапазоні товщин — зазвичай від десятків до кількох сотень мікрометрів — і порушується при насиченні флуоресцентного сигналу у товстих шарах і при гасінні флуоресценції у дуже тонких [20]. Особливою проблемою є залежність інтенсивності флуоресценції від хімічного складу нафти: легкі конденсати, бідні ароматикою, дають значно слабший сигнал, ніж важкі нафти з високим вмістом поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що унеможливорює застосування єдиної калібрувальної залежності для різних нафт без

попереднього визначення флуоресцентних характеристик конкретного продукту [21].

Інфрачервона спектроскопія в різних модифікаціях застосовується для вимірювання товщини нафтових плівок завдяки наявності характеристичних смуг поглинання вуглеводнів у середній ІЧ-ділянці спектра — передусім С–Н валентних коливань у діапазоні 2850–3000  $\text{см}^{-1}$ . Метод нарізно відбивної ІЧ-спектроскопії (IRRAS — Infrared Reflection-Absorption Spectroscopy) дозволяє реєструвати плівки субмікронної товщини на рідкій підкладці та з достатньою точністю кількісно визначати їх масову поверхневу густину [22]. Лабораторна чутливість методу при переносі в промислові умови суттєво знижується через поглинання ІЧ-випромінювання парами води, що особливо помітно у закритих сепараторах з насиченою водяною парою атмосферою. Крім того, серійне ІЧ-спектрометричне обладнання є дорогим та вимогливим до обслуговування, що обмежує його застосування постійними стаціонарними системами моніторингу на великих установках.

Лазерна інтерферометрія ґрунтується на явищі оптичної інтерференції між променями, відбитими від верхньої і нижньої поверхні плівки. За умови, що плівка є оптично однорідною, товщина  $d$  пов'язана з порядком інтерференції  $m$ , довжиною хвилі  $\lambda$  і показником заломлення плівки  $n$  виразом (1.2):

$$d = \frac{m\lambda}{2n \cos \theta}, \quad (1.2)$$

де  $\theta$  — кут падіння [23]. Метод забезпечує надзвичайно високу роздільну здатність — аж до одиниць нанометрів — і добре зарекомендував себе у лабораторних дослідженнях тонких олійних плівок. Практичне застосування в умовах промислових відстійників стикається з принциповими труднощами: хвилювання поверхні, наявність завислих частинок і бульбашок газу розкидають інтерференційну картину, і отримання стійкого вимірювального сигналу вимагає або оптичного зондування локальної мікроділянки поверхні, або складного опрацювання спектр-зображень [24]. Метод коректно працює

лише для плівок, товщина яких не перевищує довжину когерентності лазерного випромінювання, що для типових лазерних джерел обмежує діапазон вимірювання кількома мікрометрами.

Метод еліпсометрії є різновидом поляризаційної оптичної спектроскопії і заснований на вимірюванні зміни стану поляризації світла при відбитті від поверхні плівки. На відміну від інтенсиметричних методів, еліпсометрія вимірює відношення амплітуд і різницю фаз двох поляризаційних компонент відбитого пучка, що робить її значно стійкішою до флуктуацій інтенсивності джерела [25]. Субнанометрова роздільна здатність еліпсометрії зробила її стандартним інструментом дослідження нанорозмірних плівок у мікроелектроніці і колоїдній хімії. При товщинах понад кілька мікрометрів модель однорідної плівки перестає адекватно описувати систему і починаються проблеми з неоднозначністю рішення зворотної задачі. Для товщин нафтових шарів у промислових відстійниках, що відраховуються міліметрами і сантиметрами, еліпсометрія не є практичним інструментом.

Серед оптичних методів слід також згадати технологію флуоресцентного лідари, яка застосовується переважно для дистанційного виявлення нафтових розливів на відкритих водоймах. Ці методи розроблені для виявлення та картографування плівок товщиною від часток мікрометра до кількох міліметрів на значній площі при аерофотозйомці [26]. Їхня специфіка — великі відстані вимірювання і широке охоплення площі — робить їх непридатними для вбудованого контролю у сепараторах.

Загальним недоліком оптичних методів стосовно умов нафтопромислового контролю є висока чутливість до забруднення оптичних вікон і зондів відкладеннями асфальтенів, парафінів і мулу, а також складність забезпечення оптичного доступу до поверхні розділу фаз у закритих апаратах під тиском.

### **1.2.2 Акустичні методи**

Ультразвукові методи вимірювання товщини рідких шарів засновані на реєстрації часу пробігу акустичного імпульсу між границями шару або на

аналізі частотних характеристик ультразвукового резонатора, зануреного у рідину. Принципова перевага акустики перед оптикою полягає в тому, що ультразвукові хвилі поширюються в непрозорих рідинах, нечутливі до кольору середовища і можуть вимірювати товщини в діапазоні від часток міліметра до кількох метрів залежно від конструкції датчика і частоти випромінювання.

Імпульсний луна-метод є найпростішою реалізацією: ультразвуковий перетворювач випромінює короткий імпульс у вертикальному напрямку, а прилад вимірює час між відбиттям від поверхні вода–нафта і від поверхні нафта–газ. Знаючи швидкість звуку в нафті, з різниці часів пробігу обчислюють товщину шару [27]. Метод добре відпрацьований для вимірювання рівня рідини в резервуарах, однак для тонких шарів — менше 5–10 мм — точність різко знижується через нерозрізнення прямого і відбитого імпульсів при їхньому перекритті в часі [28]. На точність також суттєво впливає варіація швидкості звуку в нафті залежно від температури і газовмісту: для типових нафт при зміні температури від 20 до 60 °С швидкість звуку змінюється на 4–6 %, що при некорегованих вимірюваннях дає пропорційну похибку у визначенні товщини.

Резонансний ультразвуковий метод використовує явище акустичного резонансу в тонкому рідкому шарі. При певних частотах збуджуючого сигналу в шарі встановлюється стояча хвиля, і умовою резонансу є кратність товщини шару до напівдовжини хвилі. Сканування частоти дозволяє побудувати резонансний спектр і визначити товщину з більш високою роздільною здатністю, ніж у імпульсному методі [29]. Метод потребує точного знання акустичних властивостей нафти і складного частотного аналізу в реальному часі, що ускладнює його реалізацію у вбудованих промислових приладах.

Мікрохвильові рівнеміри (FMCW — frequency modulated continuous wave) добре відбивають сигнал від границі нафта–вода завдяки різкому перепаду діелектричної проникності між фазами (для нафти  $\epsilon \approx 2$ , для пластової води  $\epsilon \approx 50 - 80$ ), і час пробігу відбитого імпульсу дозволяє визначити відстань до цієї границі. Комерційні прилади цього класу широко застосовуються для

вимірювання рівня нафтопродуктів у резервуарах [30]. Проте їхня роздільна здатність по товщині шару — порядку 5–20 мм — недостатня для точного контролю тонких плівок в умовах безпосередньо після сепаратора, де товщина нафтового шару може становити одиниці міліметрів, а її динаміка є основним вимірюваним параметром.

### **1.2.3 Ядерно-фізичні та радіаційні методи**

Гамма-абсорбційний метод ґрунтується на ослабленні потоку гамма-випромінювання при проходженні через шар речовини. Оскільки коефіцієнти ослаблення нафти і води суттєво різняться, профіль ослаблення по висоті апарата дозволяє відновити розподіл фаз і визначити положення і товщину перехідних шарів. Метод застосовується для сепараторів нафта–вода як стаціонарна сканувальна система або як набір фіксованих точкових детекторів на різних висотах [31]. Перевагами є незалежність від хімічного складу нафти і пластової води та можливість вимірювань крізь стінку апарата без будь-якого контакту з продуктом. Суттєвими обмеженнями є необхідність радіаційного захисту, відповідна дозвільна документація, висока вартість і відносно низька просторова роздільна здатність по вертикалі — зазвичай не краща за 10–20 мм для поодинокого каналу джерело–детектор.

Нейтронна радіографія і нейтронне розсіювання також застосовуються в дослідженнях нафтоводяних систем, але виключно в лабораторних умовах при наявності реакторного або прискорюваного нейтронного джерела і практично не мають промислового застосування для контролю в реальному часі.

### **1.2.4 Електричні та електромагнітні методи**

Група методів, заснованих на вимірюванні електричних властивостей середовища, є найбільш природним вибором для промислового вбудованого контролю нафтоводяних систем. Це обумовлено принциповою відмінністю електрофізичних характеристик нафти і води: питомий електричний опір нафти знаходиться в діапазоні  $10^9 - 10^{15}$  Ом · м, тоді як питомий опір пластової води з мінералізацією 10–100 г/л становить 0,01 – 0,1 Ом · м — різниця на 10–13 порядків величини. Аналогічна різниця існує для відносної діелектричної

проникності: нафта характеризується значеннями  $\varepsilon = 1,8 - 2,5$ , вода —  $\varepsilon = 50 - 80$  залежно від температури і мінералізації [32].

Резистивні (кондуктометричні) методи використовують вимірювання електричного опору між зануреними у рідину електродами. Найпростіший варіант — пара електродів на фіксованих висотах: поки обидва занурені у воду, провідність між ними висока; при підйомі рівня нафти вище нижнього електрода опір стрибкоподібно зростає. Ця схема є фактично дискретним перемикачем, а не аналоговим датчиком товщини. Більш інформативні багатоелектродні системи — решітки точкових електродів, рознесених по висоті з кроком кілька міліметрів — дозволяють відновити профіль провідності і локалізувати границю розділу фаз [33]. Поляризація електродів при проходженні постійного або низькочастотного змінного струму через провідну рідину є принциповою метрологічною проблемою: на поверхні електродів утворюються оксидні шари і відбувається адсорбція іонів, що змінює контактний опір і призводить до дрейфу показань. Для мінімізації цього ефекту застосовують вимірювання на частотах вище кількох кілогерц, де ємнісний опір подвійного шару стає малим порівняно з опором розчину [34].

Ємнісний метод вимірювання заснований на вимірюванні електричної ємності між двома електродами, зануреними у досліджуване середовище або розміщеними по обидва боки від нього. Фізична суть явища полягає в тому, що ємність плоскопаралельного конденсатора (1.3) прямо пропорційна відносній діелектричній проникності  $\varepsilon$  заповнюючого його середовища.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}. \quad (1.3)$$

Оскільки нафта і вода мають різну діелектричну проникність, зміна товщини нафтового шару між електродами призводить до вимірюваної зміни ємності [35].

Якщо розглядати систему «два плоских електроди, між якими знаходиться шар нафти товщиною  $h$  над шаром води», то загальна ємність між електродами є ємністю послідовно з'єднаних шарів нафти, нафтоводяного

перехідного шару і води. При фіксованій відстані між електродами і відомих діелектричних властивостях обох фаз зміна  $h$  призводить до монотонної зміни загальної ємності, причому при малих товщинах нафтового шару відносна чутливість ємнісного датчика є найвищою саме у зоні тонких шарів — там, де точність вимірювання є найбільш критичною для оцінки ефективності розділення [36].

Практична реалізація ємнісних датчиків для вимірювання товщини нафтових шарів розглядається у ряді робіт. Yang et al. [37] описують циліндричну ємнісну комірку для вимірювання водовмісту і товщини шарів у двофазних нафтоводяних потоках, де реалізована мультиелектродна конфігурація із 8 і 16 електродами, розміщеними по колу поперечного перерізу труби. Метод електричної ємнісної томографії (ЕСТ — Electrical Capacitance Tomography), розвинутий на основі таких комірок, дозволяє реконструювати двовимірний розподіл фаз у поперечному перерізі потоку [38]. Для вертикального відстійника аналогічна ідея реалізується у вигляді вертикального масиву електродних пар, де кожна пара зондує тонкий горизонтальний шар: за набором ємностей по висоті відновлюється вертикальний профіль розподілу нафти і води.

Особливо значущим для задачі, що розглядається у цій роботі, є ємнісний метод у конфігурації зонда, зануреного у поверхню розділу фаз. На відміну від томографічних схем, де електроди охоплюють весь поперечний переріз апарата, точковий зонд реагує саме на локальну товщину нафтового шару в місці занурення і може бути виготовлений компактним і технологічним. Ren et al. [39] описують ємнісний датчик рівня рідини з високою роздільною здатністю у лабораторних умовах. Для промислових умов підвищена температура, тиск і мінералізація пластової води вносять додаткові систематичні похибки, які можуть бути скомпенсовані схемотехнічними засобами або алгоритмічно, якщо ці параметри вимірюються паралельно.

Вибір робочої частоти вимірювального сигналу є ключовим параметром при розробці ємнісного датчика для нафтоводяних систем. При низьких

частотах (менше 1 кГц) провідність пластової води вносить значний активний складник у повний імпеданс, і вимірюваний сигнал відображає суміш ємнісних і резистивних ефектів [40]. З підвищенням частоти до діапазону 100 кГц – 10 МГц ємнісна компонента починає домінувати, і вимірюваний імпеданс стає переважно реактивним. У роботі Jaworek et al. [41] показано, що в цьому частотному діапазоні залежність вимірюваної ємності від об'ємної частки нафти у двофазній суміші є близькою до лінійної для широкого класу нафт, що суттєво спрощує калібрування датчика.

### 1.2.5 Методи на основі диференційного тиску і гідростатики

Принципово простим підходом є вимірювання гідростатичного тиску у двох точках апарата на різних висотах. Якщо відстань між точками вимірювання  $\Delta z$  відома, а нафтовий шар займає частину цього простору, то ефективна (середньозважена) густина рідини між точками вимірювання дорівнює (1.4):

$$\rho_{eff} = \frac{\Delta P}{g \cdot \Delta z} \quad (1.4)$$

і відрізняється від густини чистої нафти і чистої води. При відомих густинах фаз і відомому загальному об'ємі апарата між датчиками тиску можна обчислити частку і товщину нафтового шару [42]. Метод є надійним, відносно недорогим і не вимагає контакту датчика з агресивним середовищем. Проте його точність суттєво залежить від точності знання густин фаз, які варіюються з температурою і газовмістом, а просторова роздільна здатність обмежена відстанню між точками вимірювання — зазвичай 100–500 мм, що є занадто грубим для вимірювання тонких плівок товщиною менше 20–30 мм.

Порівнюючи описані методи з позиції їх застосовності для завдання безперервного контролю товщини нафтової плівки безпосередньо після гравітаційного сепаратора, можна виділити кілька ключових критеріїв: діапазон вимірювань, роздільна здатність, чутливість до зміни складу фаз, стійкість до забруднення, вартість реалізації та придатність до вбудованого застосування у закритому апараті під тиском.

Оптичні методи — флуориметрія, ІЧ-спектроскопія, еліпсометрія — забезпечують найвищу роздільну здатність для тонких плівок (нанометри і мікрометри), але вкрай чутливі до забруднення оптичних поверхонь і практично не реалізовані у вигляді надійних вбудованих промислових датчиків для закритих нафтопромислових апаратів. Їх основна область застосування — лабораторні дослідження і моніторинг розливів на відкритих водних поверхнях.

Акустичні методи є стійкішими до оптично непрозорих середовищ і більш придатними для промислового застосування, однак їхня роздільна здатність для шарів тонших за 5 мм є обмеженою, а залежність швидкості звуку від температури і газовмісту вимагає додаткової компенсації.

Ємнісний метод займає особливе місце в цьому порівнянні. Відсутність рухомих частин, мала вартість вимірювальної комірки, принципова простота первинного перетворювача, широкий доступний діапазон вимірювань (від часток міліметра до кількох сантиметрів залежно від геометрії) і можливість реалізації у вигляді герметичного зонда, що витримує тиск до кількох МПа, роблять ємнісний підхід найбільш перспективним для задачі вбудованого контролю у промисловому сепараторі. Як зазначається в [43], ємнісні датчики у двофазних потоках нафта–вода демонструють стабільну роботу протягом тисяч годин без деградації характеристик при умові правильного вибору матеріалу електродів і захисних покриттів.

Разом з тим ємнісний метод має власні обмеження: залежність сигналу від мінералізації пластової води і температури, можливість адсорбційного забруднення поверхні електродів асфальтенами і парафінами при тривалій роботі, а також необхідність ретельного метрологічного обґрунтування зв'язку між вимірюваною ємністю і товщиною нафтового шару для конкретної геометрії електродної системи. Ці обмеження є інженерно переборними і розглядаються у наступних розділах роботи.

Мікрохвильові методи є привабливими з точки зору безконтактного вимірювання, але їхня роздільна здатність у кілька міліметрів і висока вартість апаратури є суттєвими обмеженнями для задачі контролю тонких шарів у

компактних сепараторах. Методи на основі гідростатичного тиску виконують допоміжну роль: вони забезпечують надійну, хоча і грубу оцінку положення границі фаз у великих апаратах, але не придатні для оперативного вимірювання тонкого шару з роздільною здатністю менше 10 мм. Ядерно-фізичні методи є практично незамінними при верифікаційних вимірюваннях і калібруванні інших датчиків, але не придатні для оперативного промислового контролю з економічних та регуляторних причин.

Таким чином, для задачі вбудованого безперервного вимірювання товщини нафтового шару на поверхні пластової води у сепараторі з одночасною оцінкою ефективності реагентів ємнісний метод є найбільш обґрунтованим вибором, і його детальне метрологічне дослідження є предметом подальшого розгляду.

### **1.3. Огляд комп'ютерних систем контролю параметрів нафтових емульсій**

Гравітаційне розділення нафтоводяних емульсій у відстійниках є відносно повільним процесом, швидкість якого визначається розміром нафтових крапель, різницею густин фаз та в'язкістю середовища. Для більшості промислових систем природне розшарування без будь-якого втручання може тривати від кількох годин до кількох діб, тоді як технологічні регламенти зазвичай відводять на цей процес 20–60 хвилин у горизонтальних сепараторах [14]. Це протиріччя між бажаною продуктивністю і фізичними можливостями природної коалесценції і стало рушійною силою розвитку цілого арсеналу методів інтенсифікації розділення.

Серед хімічних методів прискорення розділення провідне місце займає застосування деемульгаторів — поверхнево-активних речовин, що діють на захисний адсорбційний шар, який стабілізує краплі нафти у водному середовищі. Механізм дії деемульгаторів докладно розглянутий у монографії Schramm [44] і полягає в конкурентному витісненні природних емульгаторів

(асфальтенів, смол, нафтових мил) з поверхні крапель. Молекули деемульгатора адсорбуються на межі фаз нафта–вода значно швидше, ніж природні стабілізатори, і утворюють менш жорсткий поверхневий шар з нижчою механічною міцністю. Це полегшує злиття крапель при їхньому зближенні і в кінцевому рахунку прискорює укрупнення нафтової фракції. Сучасні промислові деемульгатори є, як правило, сумішами неіоногенних поверхнево-активних речовин на основі блоксополімерів етиленоксиду і пропіленоксиду, причому оптимальна молекулярна маса і баланс гідрофільних та гідрофобних груп підбираються індивідуально для кожного родовища [45]. Дозування деемульгаторів зазвичай становить від 10 до 100 г на тонну нафти, хоча в окремих випадках — при дуже стійких емульсіях або при низьких температурах — може досягати 200–300 г/т.

Поряд із деемульгаторами для інтенсифікації розділення застосовуються коагулянти і флокулянти, дія яких спрямована переважно на очищення водної фази від залишкових крапель нафти після основного розшарування. Коагулянти — найчастіше неорганічні солі алюмінію або заліза (сульфат алюмінію  $Al^2(SO^4)^3$ , хлорид заліза  $FeCl^3$ , оксихлорид алюмінію) — при введенні у воду гідролізують з утворенням позитивно заряджених гідроксиполімерних комплексів, які нейтралізують від'ємний поверхневий заряд на краплях нафти та частинках механічних домішок [46]. Нейтралізація заряду усуває електростатичний бар'єр між частинками і дозволяє їм зближуватися до відстаней, на яких починають діяти сили Ван-дер-Ваальса. Флокулянти — зазвичай органічні полімери з великою молекулярною масою (поліакриламід та його похідні) — діють за іншим механізмом: довгі полімерні ланцюги адсорбуються одночасно на кількох частинках і зшивають їх у великі агрегати-флокули, які осідають або спливають значно швидше, ніж вихідні дрібні краплі [47].

Термічна обробка є одним із найстаріших і найбільш широко застосовуваних методів прискорення розділення нафтоводяних систем. Підвищення температури одночасно діє через кілька механізмів: знижує

в'язкість нафтової фази (а отже, прискорює рух крапель згідно із законом Стокса), зменшує міцність адсорбційного шару на поверхні крапель, знижує міжфазний натяг і пришвидшує дифузію молекул деемульгатора до поверхні крапель [1]. У промислових установках підготовки нафти підігрів продукції зазвичай здійснюється у теплообмінниках або трубних печах до температури 40–80 °С. Верхня межа температури визначається не стільки технологічними міркуваннями, скільки економікою: витрати на підігрів зростають пропорційно різниці температур, і при певному значенні додаткові витрати на нагрів вже не окупаються приростом ефективності розділення. Для ряду важких нафт, що видобуваються в Україні та за кордоном, оптимальна температура розділення за результатами лабораторних і промислових досліджень знаходиться в діапазоні 55–70 °С [48].

Електрокоалесценція є методом, у якому прискорення злиття крапель досягається прикладанням до емульсії зовнішнього електричного поля. Краплі води в нафті (або краплі нафти у воді) в електричному полі набувають дипольного моменту і притягуються одна до одної, що багаторазово збільшує частоту зіткнень і, відповідно, швидкість коалесценції [17]. Для водонафтових систем з провідною водяною фазою застосовуються змінні або імпульсні електричні поля, оскільки постійне поле призводить до пробоя і електролізу. Промислові електростатичні дегідратори з напруженістю поля 0,3–2 кВ/см широко застосовуються на нафтопромислах і нафтопереробних заводах для глибокого зневоднення нафти — до залишкового водовмісту менше 0,1 % [49]. Разом з тим ефективність електрокоалесценції суттєво залежить від мінералізації водяної фази і зменшується при дуже високій провідності пластової води, що обмежує застосування методу для первинного розділення на промислах з високомінералізованими водами.

Флотація — метод, у якому дрібні краплі нафти прикріплюються до бульбашок газу і виносяться ними на поверхню — широко застосовується для очищення пластових вод після основного гравітаційного розділення. У промислових установках напірної флотації (DAF — Dissolved Air Flotation)

вода насичується повітрям або газом під тиском, після чого при зниженні тиску виділяються мікробульбашки розміром 10–100 мкм, що ефективно флотують краплі нафти розміром від 1 до 50 мкм [13]. Для нафтопромислових застосувань частіше використовується флотація з природним газом (IGF — Induced Gas Flotation), де газ вводиться безпосередньо у флотаційну камеру через диспергатор. Залишкова концентрація нафти у воді після флотації може становити 10–30 мг/л, тоді як після простого гравітаційного відстоювання — 100–500 мг/л і вище.

Методи механічного прискорення коалесценції включають коалесцентні фільтри (пакети поліпропіленових або скловолоконних насадок, на поверхні яких краплі нафти затримуються і злипаються в більші краплі) і гідроциклони, де центробіжна сила замінює гравітацію і дозволяє збільшити ефективне прискорення розділення у сотні разів [50]. Коалесцентні насадки особливо ефективні для тонкодисперсних емульсій з краплями менше 10 мкм і широко застосовуються як другий ступінь очищення після гравітаційних відстійників.

Оцінка ефективності перелічених методів є самостійним науково-технічним завданням, яке в промисловій практиці вирішується переважно дискретними лабораторними методами. Найбільш поширеним є так званий «пляшковий тест» (bottle test), запропонований ще в 1950-х роках і дотепер залишається галузевим стандартом для підбору деемульгаторів [51]. Суть методу полягає у введенні різних концентрацій досліджуваного реагенту у градуйовані скляні циліндри з пробою емульсії, перемішуванні стандартним чином і вимірюванні об'єму виділеної водної фази через фіксовані проміжки часу (15, 30, 60, 120 хвилин). За отриманими кривими кінетики розділення розраховують показники ефективності: ступінь зневоднення за заданий час, залишковий вміст води в нафті і залишковий вміст нафти у воді. Незважаючи на простоту і відтворюваність, bottle test має суттєве обмеження: результати, отримані в статичних умовах і при кімнатній температурі, часто погано корелюють з промисловими показниками, де умови перемішування, температура і час перебування суттєво відрізняються від лабораторних [52].

Турбідиметричний метод оцінки ефективності коагулянтів і флокулянтів заснований на вимірюванні каламутності водяної фази після введення реагенту і розділення. Каламутність, що вимірюється нефелометром у одиницях NTU (Nephelometric Turbidity Units), прямо пов'язана з концентрацією залишкових дрібних крапель нафти і частинок завислих речовин. Цей метод є відносно швидким (вимірювання займають лічені хвилини) і може бути реалізований у режимі потокового аналізу, однак дає інтегральну оцінку якості водяної фази і не дозволяє розрізнити внесок нафтових крапель і механічних частинок у загальну каламутність [53].

Визначення залишкового вмісту нафти у воді (Oil-in-Water, OiW) є стандартним показником ефективності розділення і регламентується рядом міжнародних і національних стандартів. Серед аналітичних методів основними є: інфрачервона спектрофотометрія після екстракції нафти розчинником (метод EPA 1664), ультрафіолетова флуориметрія (для нафт з достатнім вмістом ароматики) і газова хроматографія для детального фракційного аналізу [1]. Всі ці методи є лабораторними, вимагають відбору і підготовки проб, і час від відбору проби до отримання результату становить від 30 хвилин до кількох годин. Для цілей оперативного управління технологічним процесом і, тим більше, для оцінки ефективності реагентів у реальному часі такі методи непридатні.

Онлайн-аналізатори нафти у воді, що ґрунтуються переважно на ультрафіолетовій флуоресценції або лазерному розсіюванні, забезпечують безперервне вимірювання вмісту нафтопродуктів у водяній фазі з часом відгуку від секунд до хвилин. Такі прилади широко застосовуються на морських платформах і берегових установках підготовки нафти як засіб екологічного моніторингу скидних вод [54]. Проте вони вимірюють концентрацію нафти у водяній фазі після сепаратора, тобто дають інтегральну оцінку результату процесу, але не його кінетики. Для оцінки ефективності реагентів — деемульгаторів, коагулянтів, флокулянтів — принципово важливою є саме кінетика розділення: наскільки швидко і рівномірно формується нафтовий шар,

яка динаміка його зростання після введення реагенту. Ця інформація в існуючих системах моніторингу недоступна.

Таким чином, існуючі методи оцінки ефективності реагентів-прискорювачів гравітаційного розділення мають спільний принциповий недолік: вони або є дискретними лабораторними методами, непридатними для онлайн-застосування, або вимірюють лише фінальний результат процесу (концентрацію нафти у відведеній воді), але не його перебіг. Вимірювання динаміки зростання нафтового шару на поверхні водної фази безпосередньо у відстійнику в режимі реального часу дозволило б отримати кінетичний показник ефективності, що реагує на введення реагенту значно раніше, ніж зміна концентрації нафти у вихідній воді. Саме цей підхід і реалізується у розроблюваному ємнісному пристрої, опис якого є предметом наступних розділів.

#### 1.4. Ємнісні методи вимірювання в нафтогазовій галузі

Принцип ємнісного вимірювання ґрунтується на залежності електричної ємності конденсатора від діелектричної проникності середовища між електродами. Для плоского конденсатора ємність описується класичним виразом (1.5):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}, \quad (1.5)$$

де  $\varepsilon_0$  — електрична стала,  $\varepsilon_r$  — відносна діелектрична проникність діелектрика між обкладками,  $A$  — ефективна площа електродів,  $d$  — відстань між ними. Якщо між електродами знаходиться шаруватий діелектрик, еквівалентна схема перетворюється на послідовне або паралельне з'єднання часткових ємностей залежно від орієнтації шарів відносно силових ліній поля [55]. Ця обставина є фізичною основою для реєстрації товщини нафтової плівки на поверхні пластової води: оскільки діелектрична проникність нафти ( $\varepsilon \approx 2,0 - 2,5$ ) і мінералізованої пластової води ( $\varepsilon \approx 60 - 80$  при типовій мінералізації 50–

150 г/л) суттєво відрізняються, навіть тонкий нафтовий шар помітно змінює загальну ємність вимірювального перетворювача.

Ємнісні первинні перетворювачі в нафтогазовій промисловості використовуються для вирішення кількох класів вимірювальних задач. Перший — визначення рівня рідини або межі розділу фаз у резервуарах і технологічних апаратах. Другий — вимірювання вологовмісту нафти, тобто об'ємної частки дисперсної водяної фази в нафтовій матриці. Третій — контроль складу двофазних і трифазних потоків у трубопроводах. Для кожного з цих застосувань розроблені конструктивні різновиди електродних систем і методи первинного опрацювання сигналу, які суттєво відрізняються між собою [56].

Визначення вологовмісту нафти є, мабуть, найбільш дослідженим напрямком застосування ємнісних методів у галузі. Емульсії вода-в-нафті мають ефективну діелектричну проникність, що зростає зі збільшенням об'ємної частки води. Для розрахунку ефективної проникності суміші запропоновано низку моделей: формула Максвелла–Гарнетта, рівняння Бруггемана, модель Лоренца–Лоренца та інші [57]. Встановлено, що формула Максвелла–Гарнетта задовільно апроксимує експериментальні дані при вмісті дисперсної фази до 30%, тоді як за більшого вологовмісту доцільніше застосовувати рівняння ефективного середовища Бруггемана, яке краще враховує взаємодію між краплями дисперсної фази [58]. Промислові вологоміри нафти на основі ємнісних перетворювачів мають діапазон вимірювань від 0 до 60–70% води і забезпечують абсолютну похибку порядку  $\pm 0,5$ –2% при стабільному складі рідини. Їх суттєвим обмеженням є чутливість до зміни мінералізації пластової води та до температурних варіацій, що потребує або систематичного калібрування, або використання компенсаційних каналів [59].

Для вимірювання рівня рідини в резервуарах ємнісний метод конкурує з ультразвуковим, радарним і гідростатичним. Стрижневі та тросові ємнісні датчики рівня добре зарекомендували себе в умовах, де оптичний або

ультразвуковий доступ ускладнений: у герметично закритих ємностях під тиском, при наявності пари та аерозолів, у в'язких і абразивних середовищах. Суттєвою перевагою є відсутність рухомих частин і можливість виготовлення первинних перетворювачів із матеріалів, стійких до агресивного хімічного середовища [60]. Разом з тим стрижневі датчики рівня не призначені для вимірювання тонкої нафтової плівки на межі розділу фаз: їх конструкція оптимізована для вимірювання вертикального положення межі одна–одна фаза, а не для кількісної оцінки товщини шару між фазами.

Розвиток ємнісних методів для вимірювання складу потоку в трубопроводах пов'язаний із задачами промислової витратометрії багатофазних сумішей. Кільцеві ємнісні перетворювачі, що охоплюють трубу ззовні або вбудовані в стінку труби, дозволяють без контакту з середовищем отримувати інформацію про перерозподіл фаз у поперечному перерізі. На основі ємнісних систем із великою кількістю електродів (16 і більше) розвинулась окрема технологія — електрична ємнісна томографія (Electrical Capacitance Tomography, ECT), що дозволяє реконструювати двовимірний розподіл діелектричної проникності в перерізі труби з частотою оновлення кадрів до сотень герц [61]. Метод ECT застосовується для дослідження режимів двофазного течії (кільцевого, пробкового, снарядного), для моніторингу псевдозрідженого шару в реакторах і для контролю транспортування порошкоподібних матеріалів пневмотранспортом. Чутливість ECT до локального розподілу фаз відкриває потенціал для дослідження динаміки між-фазних границь, однак висока вартість і складність систем з великою кількістю каналів обмежують їх застосування переважно лабораторним і дослідним рівнями [62].

Математична модель ємності двоелектродного перетворювача з шаруватим діелектриком є основою для розроблення методики вимірювання товщини нафтової плівки. Розглянемо типову геометрію: два плоских паралельних електроди площею  $A$ , розташовані на відстані  $d$  один від одного. Між електродами розташовані два шари — нафтова плівка товщиною  $h$  і шар

пластової води товщиною  $(d - h)$ . При орієнтації шарів паралельно обкладкам конденсатора (шари перпендикулярні вектору поля) еквівалентна схема є послідовним з'єднанням двох ємностей (1.6) та (1.7):

$$C_{oil} = \varepsilon_0 \varepsilon_{oil} \frac{A}{h}, \quad (1.6)$$

$$C_{water} = \varepsilon_0 \varepsilon_{water} \frac{A}{d-h}. \quad (1.7)$$

Загальна ємність такої системи (1.8) [63]:

$$\frac{1}{C} = \frac{h}{\varepsilon_0 \varepsilon_{oil} A} + \frac{d-h}{\varepsilon_0 \varepsilon_{water} A}. \quad (1.8)$$

Оскільки  $\varepsilon_{water} \gg \varepsilon_{oil}$ , ємність визначається переважно шаром нафти, і навіть незначні зміни товщини  $h$  суттєво впливають на  $C$ . Саме ця обставина пояснює підвищену чутливість ємнісного методу до тонких нафтових плівок порівняно з вимірюванням рівня методами, що не використовують контрастність діелектричних проникностей двох фаз.

На практиці геометрія поля між електродами ніколи не є суто однорідною. Крайові ефекти, обумовлені скінченністю розмірів електродів, спричиняють розсіювання поля поза основним зазором і змінюють ефективну площу перетворювача. Для мінімізації крайових ефектів використовують огорожувальні (guard) електроди, що перебувають під тим самим потенціалом, що й вимірювальний електрод, але виведені з вимірювального кола [64]. Такий підхід дозволяє зробити поле в активній зоні датчика однорідним і тим самим наблизити реальну чутливість до розрахункової. Альтернативним рішенням є застосування циліндричної або коаксіальної геометрії електродів, для якої аналітичні вирази для ємності добре відомі і враховують реальний розподіл поля.

Частота вимірювального сигналу є одним із ключових параметрів ємнісного перетворювача при роботі з електролітичними середовищами, якими є пластова вода. На низьких частотах поляризація подвійного електричного шару на межі метал–електроліт створює паразитну ємність, що може бути порівнянною з корисним сигналом або навіть перевищувати його. Крім того, при прямому контакті металевого електрода з мінералізованою водою на

низьких частотах суттєвий внесок вносять омичні струми провідності [65]. Підвищення частоти до діапазону 10 кГц – 10 МГц дозволяє зменшити ємнісний опір вимірювального елемента і вийти за межу, де провідність середовища домінує над ємнісною компонентою. Оптимальний частотний діапазон для конкретної конструкції датчика визначається частотними спектрами імпедансу всіх складових еквівалентної схеми і знаходиться з умови максимального відношення корисного сигналу від нафтової плівки до шумових та паразитних складових [66].

Вплив мінералізації пластової води на результати ємнісного вимірювання є однією з найбільш досліджених проблем у цій галузі. Діелектрична проникність водних розчинів електролітів залежить від концентрації солей: для розчину  $NaCl$  підвищення концентрації від 0 до 200 г/л зменшує  $\epsilon_{water}$  приблизно з 80 до 50–55 при кімнатній температурі [67]. Ця залежність не є лінійною і змінюється з температурою. У реальних умовах нафтовидобутку мінералізація пластової води може варіюватися від одиниць до кількох сотень грамів на літр і може змінюватися з часом у межах одного родовища. Оскільки метод базується на контрасті між  $\epsilon_{oil}$  і  $\epsilon_{water}$ , зміна  $\epsilon_{water}$  через варіацію мінералізації безпосередньо впливає на чутливість перетворювача і може стати джерелом систематичної похибки. Для компенсації цього ефекту розроблено декілька підходів: використання опорного каналу, заповненого пластовою водою без нафти [68]; паралельне вимірювання провідності води для оцінки мінералізації [69]; калібрування за допомогою відомих стандартних зразків при монтажі та в процесі експлуатації.

Температура суттєво впливає на діелектричну проникність обох фаз, хоча ефекти різноспрямовані. Для більшості вуглеводнів  $\epsilon_{oil}$  слабо залежить від температури і змінюється в межах  $\pm 0,1$ – $0,2$  в діапазоні 20–80°C. Навпаки,  $\epsilon_{water}$  для мінералізованих розчинів знижується зі зростанням температури приблизно на 0,3–0,5 одиниць на кожний градус Цельсія. Крім того, при підвищеній температурі зменшується в'язкість нафти і змінюється структура нафтоводяної границі розділу, що може впливати на просторовий розподіл фаз

у зазорі між електродами [70]. Для застосувань, де температура суттєво коливається, необхідна або програмна температурна корекція вимірювань (на підставі відомих термічних коефіцієнтів), або апаратна термокомпенсація з використанням датчика температури безпосередньо в зоні вимірювання.

Газові включення є ще одним чинником, що ускладнює ємнісне вимірювання в реальних умовах після сепаратора. Навіть якщо основна маса газу відділяється в самому сепараторі, в рідинній фазі можуть залишатися мікробульбашки газу, що знаходяться в розчиненому або дрібнодисперсному стані. Діелектрична проникність газу близька до одиниці, тому наявність газових включень у нафтовій плівці або в підстилаючому водяному шарі зменшує вимірювану ємність і може бути інтерпретована як збільшення товщини нафтового шару [71]. Критичним є контроль за наявністю стабільних газових бульбашок, що прилипають до електродів — такий ефект може повністю блокувати ємнісний контакт між електродом і рідиною і призводить до значних похибок. Вибір матеріалу електродів і їх покриттів з метою мінімізації адгезії бульбашок є важливим конструктивним аспектом при розробці датчика.

У нафтогазовій галузі реалізовано і практично використовується ряд ємнісних вимірювальних систем, що вирішують задачі, близькі до розглянутої. Проточні ємнісні перетворювачі для вологомірів нафти серійно виготовляються провідними метрологічними компаніями. Описано конструкцію коаксіальних ємнісних датчиків для вимірювання товщини плівок рідини на стінках труб у двофазних режимах течії, де вимірюється ємність між електродом, вбудованим у стінку, і зовнішньою обкладкою — самою трубою [72]. У лабораторних дослідженнях гравітаційної сепарації ємнісні датчики використовуються для відстеження динаміки руху межі розділу фаз у відстійниках і для оцінки швидкості коалесценції крапель [73]. Спільним для переважної більшості описаних у літературі конструкцій є орієнтація на вимірювання або рівня, або об'ємної частки однієї з фаз у суміші, але не товщини чітко вираженого шару

однієї рідини на поверхні іншої в умовах сталого гравітаційного розшарування після сепаратора.

Окремого розгляду заслуговує питання геометрії електродів для вимірювання саме товщини шару в умовах горизонтальної межі розділу. При горизонтальній конфігурації, коли нафта плаває на воді, а датчик розташовується збоку від зони межі розділу, поле орієнтоване горизонтально і шари розташовані перпендикулярно вектору поля, що відповідає описаній вище моделі послідовного з'єднання. При вертикальній орієнтації електродів (поле спрямоване вертикально, вниз або вгору) шари знаходяться паралельно вектору поля, і еквівалентна схема стає паралельним з'єднанням — чутливість до тонкого нафтового шару в такому випадку суттєво нижча [74]. Тому для вимірювання товщини нафтової плівки на поверхні пластової води функціонально необхідна горизонтальна (бічна) орієнтація електродів із встановленням датчика таким чином, щоб зона між електродами охоплювала область очікуваного положення міжфазної границі.

Аналіз чутливості ємнісного перетворювача до зміни товщини нафтового шару показує, що вона є найвищою при малих значеннях  $h$  і знижується при збільшенні товщини плівки. Це обумовлено нелінійним характером залежності  $C(h)$  відповідно до формули послідовного з'єднання. Диференціювання виразу для  $C$  за  $h$  дає (1.9):

$$\frac{dC}{dh} = \frac{\varepsilon_0 A (\varepsilon_{water} - \varepsilon_{oil})}{\varepsilon_{oil} \varepsilon_{water} \left( \frac{d-h}{\varepsilon_{water}} + \frac{h}{\varepsilon_{oil}} \right)^2}. \quad (1.9)$$

Оскільки в знаменнику квадрат суми, а не різниці, похідна є завжди позитивною і монотонно спадною функцією  $h$  при  $\varepsilon_{water} > \varepsilon_{oil}$ . Це означає, що у верхній частині діапазону вимірювань роздільна здатність за товщиною знижується, і для забезпечення прийнятної точності в широкому діапазоні  $h$  може знадобитися застосування нелінійного перетворення або кускової калібрувальної кривої [75].

Електрична схема вимірювання також суттєво впливає на точність. Найпоширенішими підходами є: вимірювання імпедансу на фіксованій частоті

за допомогою мостових схем або синхронного детектора; перетворення ємності в частоту за допомогою RC-генератора; вимірювання фазового зсуву між напругою і струмом у RC-ланцюзі; використання спеціалізованих мікросхем перетворення ємності у вихідний сигнал типу AD7746 або аналогічних [76]. Для застосувань у середовищах з підвищеною провідністю, якими є мінералізовані пластові води, необхідно враховувати, що паразитна провідність між електродами знижує добротність вимірювального елемента і погіршує роздільну здатність. Використання диференціальних вимірювальних схем, де сигнал вимірювального перетворювача порівнюється з сигналом опорного елемента з відомими характеристиками, дозволяє значно зменшити вплив зовнішніх завад і дрейфу нульової лінії [77].

У контексті завдання кількісної оцінки ефективності реагентів для прискорення гравітаційного розділення ємнісний метод вимірювання товщини плівки надає принципово нову можливість. При введенні ефективного деемульгатора або коагулянту відбувається укрупнення крапель нафти з наступним їх злиттям і накопиченням у вигляді суцільного шару на поверхні водної фази. Ємнісний перетворювач, розташований у відповідній зоні сепаратора або відстійника, фіксує зміну товщини нафтового шару в часі. Швидкість наростання товщини плівки є об'єктивним кількісним показником ефективності реагенту при конкретних умовах: температурі, мінералізації, витраті, дозі реагенту. Такий підхід принципово відрізняється від традиційного пляшкового тесту тим, що дозволяє отримувати дані безпосередньо в потоці, без відбору проб і без часового лагу [78].

Огляд публікацій у реферованих журналах показує, що вимірювання товщини нафтових плівок безпосередньо на поверхні пластової води ємнісним методом залишається слабо розробленою темою. Більшість робіт присвячена або витонченій теорії двофазних ємнісних сенсорів для потоків [79], або розробці вологомірів нафти, де вода є дисперсною фазою всередині нафтової матриці, а не навпаки. Задача вимірювання товщини суцільного нафтового шару, що сформувався внаслідок гравітаційного розшарування, з точністю,

достатньою для оцінки кінетики сепарації, є значно менш дослідженою, що підтверджує доцільність її постановки як самостійної наукової задачі.

### **1.5. Перспективи вдосконалення інформаційно-вимірювальних каналів контролю параметрів нафтовмісних рідин, постановка задачі досліджень**

Промисловий контроль нафтовмісних стічних вод і технологічних рідин після сепараційного обладнання виконується за допомогою різних класів аналітичних і вимірювальних приладів. З функціональної точки зору всі вони можуть бути розділені на три групи: стаціонарні онлайн-аналізатори для безперервного контролю вмісту нафти у воді, портативні або лабораторні прилади для дискретного аналізу проб і спеціалізовані засоби контролю ефективності сепараційного обладнання. Кожна з цих груп вирішує своє коло задач, і жодна з них у своєму нинішньому вигляді не призначена безпосередньо для вимірювання товщини нафтового шару на межі розділу фаз після сепаратора з метою кількісної оцінки кінетики гравітаційного розшарування [80]. Розуміння цього обмеження вимагає детального розбору принципів роботи, конструктивних особливостей і метрологічних характеристик найбільш поширених промислових рішень.

Серед сучасних засобів онлайн-контролю вмісту нафти у воді важливе місце посідають прилади, що працюють на основі оптичних методів, зокрема ультрафіолетової флуориметрії. Принцип методу ґрунтується на здатності ароматичних компонентів нафти поглинати ультрафіолетове випромінювання та формувати флуоресцентний сигнал на довших хвилях, інтенсивність якого використовується як аналітичний показник наявності й вмісту нафтових домішок у водній фазі. Такі сенсорні підходи розглядаються як перспективні для оперативного та безперервного моніторингу пластової води і технологічних водних потоків у нафтогазовій галузі [81].

Однак УФ-флуориметрія має принципові обмеження, пов'язані з самою природою вимірюваної величини. По-перше, метод вимірює концентрацію нафти в рідкій пробі, що відбирається з потоку, а не геометричну характеристику розподілу фаз. Між концентрацією нафти у водній фазі і товщиною нафтового шару на поверхні немає однозначного зв'язку: при однаковій концентрації нафти у воді шар може бути тонким і суцільним або взагалі відсутнім — якщо нафта знаходиться у вигляді емульсії. По-друге, чутливість методу суттєво залежить від хімічного складу нафти, зокрема від вмісту ароматичних вуглеводнів. Нафти з низьким вмістом ароматики (парафінові нафти) дають слабкий флуоресцентний сигнал при тій самій масовій концентрації, що призводить до систематичного заниження результату. Калібрування приладу виконується за стандартним нафтопродуктом, і будь-яке відхилення складу реальної нафти від калібрувального стандарту вносить мультиплікативну похибку, яку неможливо усунути без повторного калібрування на місці [82]. По-третє, природна флуоресценція органічних речовин у воді (гумінові кислоти, фульвокислоти, деякі поверхнево-активні речовини) може накладатися на сигнал від нафти і завищувати результат вимірювання.

Окремо слід зазначити, що деякі деемульгатори та коагулянти, що використовуються для прискорення гравітаційного розділення, самі є флуоресцентними сполуками або впливають на флуоресцентні властивості водного середовища. У цьому разі введення реагенту безпосередньо змінює показання УФ-флуориметра незалежно від реального вмісту нафти, що унеможлиблює використання такого аналізатора для оцінки ефективності реагенту — саме того завдання, яке розглядається в даній роботі [83].

Аналізатори серії OSM (Oil-in-Water Monitor), що виготовляються компаніями Jorin та Process Instruments, також засновані на оптичному принципі, але використовують розсіювання лазерного випромінювання (метод лазерної нефелометрії або розсіювання  $M_i$ ) для визначення концентрації та дисперсного складу крапель нафти у водній фазі [84]. На відміну від

флуориметрії, нефелометричний сигнал менш залежить від хімічного складу нафти і реагує на присутність будь-яких частинок з відмінним від води показником заломлення. Прилади типу OSM дозволяють отримувати не лише загальну концентрацію нафти, але й розподіл крапель за розмірами, що є цінною інформацією для оцінки ефективності коалесценції. Проте і цей метод вимірює характеристики дисперсної нафти у водній фазі і не надає жодної інформації про суцільний нафтовий шар. Більш того, при переході від дисперсного стану нафти до суцільного шару (тобто при ефективній коалесценції) оптичний сигнал від водної фази зменшується — прилад показує поліпшення якості розділення — але динаміка формування суцільного шару залишається поза зоною спостереження.

Окремий клас онлайн-аналізаторів нафти у воді базується на оптичному принципі, за якого концентрацію нафтових домішок оцінюють за комбінацією світла, розсіяного та поглинутого краплями нафти у потоці проби. Такий підхід дає змогу здійснювати безперервний контроль вмісту вуглеводнів у водних потоках у режимі реального часу [85]. Конструктивно прилади цього типу зазвичай виконуються як проточні системи з вимірювальною коміркою та окремим електронним блоком, через які безперервно пропускається проба середовища [85]. Застосування в умовах нафтопромислу ускладнюється потребою у регулярному очищенні оптичних вікон, що забруднюються нафтою, механічними частинками і відкладеннями солей. Виробники пропонують системи автоматичного очищення зворотним промиванням або ультразвуковою очисткою, однак це суттєво ускладнює і здорожує конструкцію. В умовах важкої нафти або нафти з підвищеним вмістом смол і асфальтенів проблема забруднення оптики стає критичною і значно скорочує міжобслуговувальний інтервал [86].

Широко використовуються у промисловості ємнісні та мікрохвильові аналізатори вологовмісту нафти — прилади, що вимірюють об'ємну частку води в нафтовому потоці. Типові представники цього класу — аналізатори Phase Dynamics (США) серії Standard Cut Monitor та Compact Flow Analyzer, а

також прилади Roxar WaterCut (тепер Emerson) і аналогічні системи Vega, що використовують мікрохвильові резонансні методи [87]. Ці прилади встановлюються на трубопроводах після сепаратора і вимірюють вологовміст нафтового потоку, тобто частку дисперсної водяної фази в нафтовій матриці. Їх метрологічне завдання — протилежне до того, що розглядається в даній роботі: вони контролюють якість зневодненої нафти на виході, а не якість очищеної від нафти води. Проте принциповим є те, що навіть ці прилади не вимірюють геометрію межі розділу фаз і не здатні надати інформацію про товщину нафтового шару безпосередньо на межі розділу нафта–вода.

Радарні і ультразвукові рівнеміри знаходять обмежене застосування для вимірювання положення межі розділу нафта–вода у відстійниках і сепараторах. Радарні прилади серії Rosemount (Emerson) типу 5402 і 5900 можуть працювати в режимі вимірювання рівня межі розділу двох рідин при достатньому контрасті діелектричних проникностей [88]. Ультразвукові рівнеміри використовують відмінність акустичного імпедансу нафти і води для реєстрації положення межі розділу. Обидва методи визначають вертикальне положення межі і в принципі здатні зафіксувати факт наростання нафтового шару при достатній його товщині — зазвичай від 20–50 мм і більше. Для вимірювання тонких рідинних плівок завтовшки від одного до кількох міліметрів ультразвукові методи в реальних умовах потребують дуже обережного застосування, оскільки на точність істотно впливають складність інтерфейсу, хвильові збурення та нестабільність відбивного сигналу [89].

Ядерно-магнітно-резонансні (ЯМР) аналізатори, що використовуються в нафтогазовій галузі, наприклад прилади Oxford Instruments MQC+ або Halliburton MRIL, дозволяють з високою точністю визначати вологовміст нафти, пористість і проникність керну, склад газоконденсатних систем [90]. ЯМР-метод є неінвазивним і не чутливим до кольору та прозорості рідини. Однак промислові ЯМР-аналізатори є складними, дорогими (сотні тисяч доларів), вимагають криогенного або постійного магніту з ретельним захистом від зовнішніх магнітних полів і не призначені для безперервного оперативного

моніторингу в польових умовах. Їх роль у нафтогазовій промисловості — лабораторний або напівпромисловий аналіз, а не онлайн-контроль у потоці.

Кондуктометричні аналізатори і багатоелектродні матриці провідності використовуються в дослідницьких установках для вивчення двофазних течій і процесів сепарації. Метод вимірює локальну електричну провідність середовища, яка суттєво відрізняється для нафти (практично непровідна) і мінералізованої пластової води (висока провідність). Багатоелектродні матриці дозволяють реконструювати розподіл фаз у поперечному перерізі трубопроводу або у вертикальному профілі відстійника [91]. Проте електричний контакт між металевими електродами і мінералізованою пластовою водою породжує цілий ряд проблем. Насамперед це електролітична корозія та анодне розчинення матеріалу електродів при прикладанні напруги постійного струму або низькочастотного змінного струму. При використанні змінного струму вищих частот корозія зменшується, але виникають паразитні ємнісні ефекти, пов'язані з поляризацією подвійного шару на межі метал–електроліт, що описані ще в роботах Гельмгольца та деталізовані в сучасних моделях Гуї–Чепмена–Штерна [92]. Крім того, при тривалій роботі в мінералізованих середовищах на поверхні відкритих металевих електродів утворюються відкладення солей і оксидів, що змінюють перехідний опір і роблять метрологічні характеристики датчика нестабільними в часі. Ці ефекти є системною проблемою кондуктометричних і незахищених ємнісних датчиків, яка потребує вирішення на рівні конструкції, а не лише алгоритмічної компенсації.

Важливо розглянути питання схемотехнічного збудження ємнісних перетворювачів, оскільки воно суттєво визначає практичні характеристики вимірювальної системи. Традиційні ємнісні вимірювачі для промислового застосування використовують схеми потенціометричного збудження: між електродами прикладається синусоїдальна напруга відомої амплітуди і частоти, а вимірюваним сигналом є струм через перетворювач. Ємність визначається за співвідношенням (1.10):

$$C = \frac{I}{\omega U}. \quad (1.10)$$

Цей підхід добре відпрацьований для лабораторних умов, але в промисловому середовищі, де датчик з'єднаний із вимірювальним приладом кабелем значної довжини, виникають суттєві проблеми. По-перше, паразитна ємність кабелю (зазвичай 100–300 пФ/м) порівнянна з або перевищує ємність самого датчика, що знаходиться в діапазоні одиниць–десятьків пікофарад [76]. Компенсація кабельної ємності потребує або застосування схем активного екранування (техніка *driven shield*, або *triax*-кабелю з активно керованим екраном), або розташування вимірювальної електроніки безпосередньо на датчику, що суперечить вимогам промислової безпеки в вибухонебезпечних зонах. По-друге, в умовах промислового підприємства рівень електромагнітних завад суттєво вищий, ніж у лабораторії: частотні перетворювачі приводів, зварювальне обладнання, радіопередавачі — все це є джерелами наведень на незахищені ланцюги з високим імпедансом. Потенціометрична схема збудження, у якій вхідний ланцюг є вузловою точкою з потенціалом, що визначається малим сигнальним струмом через ємність датчика, є принципово чутливою до таких наведень [93].

Альтернативний підхід, що полягає у вимірюванні напруги при збудженні датчика струмом заданої амплітуди, має власні обмеження при роботі на ізольованих (покритих діелектриком) електродах. При ємнісному зв'язку між електродом і рідиною точне задання струму через ємність вимагає або прецизійного джерела струму з широкою смугою пропускання, або безпосереднього вимірювання струму через малий шунт — операція, що є технічно складною при рівнях сигналу в наноамперному або субнаноамперному діапазоні, характерних для малих ємностей і розумних рівнів збудження в умовах вибухонебезпечного виробництва. Крім того, при невідомій або змінній в часі ємності самого датчика задати точно визначений струм без попереднього знання  $C$  неможливо, і задача набуває ітераційного характеру. Реальні промислові рішення, як правило, обходять це обмеження

шляхом застосування мостових схем або двотактного збудження, де вимірюється не абсолютне значення ємності, а різниця між двома перетворювачами — вимірювальним і опорним [77]. Однак і ці рішення мають свої обмеження, насамперед пов'язані з необхідністю забезпечити симетрію опорного каналу відносно вимірювального та стабільність цієї симетрії в умовах змінних температур і хімічних впливів.

Окремою проблемою є визначення нульового рівня сигналу в ємнісних перетворювачах із захисним діелектричним покриттям. При нанесенні на електроди шару фторопласту або іншого діелектрика ємність перетворювача в відсутність нафтової плівки визначається геометрією та діелектричними властивостями покриття, конфігурацією електродів і діелектричними властивостями рідини, що контактує з покриттям. Ця «нульова» ємність є значно більшою за очікувану зміну ємності від нафтового шару, оскільки ємність діелектричного шару покриття виявляється в послідовному з'єднанні і суттєво впливає на результуюче значення. Підстава для тривоги — те, що виміряна різниця між ємністю «з нафтою» і «без нафти» становить відносно малу частку від загального значення виміряного сигналу. Традиційні схеми вимірювання абсолютної ємності при цьому вимагають або дуже низького рівня шуму і нестабільності нуля, або застосування ефективної схеми компенсації нульового зміщення [64]. Цей аспект рідко розглядається в публікаціях, присвячених лабораторним ємнісним датчикам, але є критичним для розроблення промислового приладу.

Слід окремо зупинитися на приладах, що спеціально позиціонуються виробниками як засоби контролю ефективності сепараційного обладнання. Системи моніторингу сепараторів типу Roxar Separator Monitor або VEGA VEGAPULS для нафтогазових установок вимірюють сукупність параметрів: рівень нафтового і водяного шарів, температуру, тиск — і на підставі цих даних надають оператору інформацію про стан сепараційного процесу [94]. Проте «рівень нафтового шару» в цьому контексті означає вертикальне положення межі газ–нафта і межі нафта–вода, виміряне з роздільною здатністю в

сантиметрах або десятках міліметрів. Для оцінки ефективності реагентів, що впливають на кінетику коалесценції і швидкість наростання нафтового шару в перші хвилини після введення реагенту, така роздільна здатність є недостатньою. Зміна товщини нафтового шару на кілька міліметрів за хвилину — цілком типова швидкість при дослідженні ефективності деемульгаторів — є поза межами реєстрації серійних рівнемірів.

Методи безпосереднього тестування ефективності реагентів у промислових умовах зводяться до відбору проб з подальшим лабораторним аналізом або до застосування пляшкового тесту в польових умовах. Пляшковий тест (Bottle Test) є стандартизованою процедурою, описаною в нормативних документах галузі, зокрема в настановах API і NACE [95]. Процедура передбачає відбір проби нафтоводяної емульсії в градуйовані циліндри або пляшки, введення різних доз реагенту, перемішування і спостереження за швидкістю розшарування. Результати оцінюються візуально або за допомогою рефрактометра: фіксується об'єм виділеної водяної фази через певні проміжки часу. Метод є дешевим, не вимагає складного обладнання і дозволяє порівнювати кілька реагентів між собою в однакових умовах. Принциповим обмеженням пляшкового тесту є його дискретний і лабораторний характер: умови тесту (температура, перемішування, граничний шар у скляному циліндрі) відрізняються від реальних умов у промисловому апараті, що не дозволяє безпосередньо переносити результати на виробничий процес [78].

Спроби технічної реалізації пляшкового тесту відомі з літератури. Запропоновані системи автоматичного фотометричного спостереження за границею розділу фаз у кюветі, системи ультразвукової реєстрації положення межі розділу в модельній ємності [96]. Ці підходи підвищують відтворюваність і зменшують суб'єктивність оцінки, але не усувають базової проблеми: вимірювання відбувається поза технологічним потоком і не відображає реальної картини в апараті. Крім того, жоден із відомих автоматизованих варіантів пляшкового тесту не вимірює безпосередньо товщину нафтової плівки

на поверхні водяного шару — параметр, який є найбільш прямим свідченням ефективності коалесценції і накопичення нафтової фази.

Узагальнення огляду приладів показує, що в існуючих промислових системах і дослідницьких установках є дві суттєві прогалини. Перша — відсутність засобів неперервного безконтактного (у сенсі відсутності електричного контакту з рідиною) вимірювання товщини нафтової плівки на поверхні пластової води з роздільною здатністю порядку одного міліметра і менше безпосередньо в умовах технологічного процесу. Друга — відсутність інструменту, що дозволяє в режимі реального часу оцінювати кінетику гравітаційного розшарування і, відповідно, ефективність реагентів без відбору проб і лабораторного аналізу. Ці прогалини обумовлені не стільки браком наукових ідей, скільки сукупністю технічних труднощів, що виникають при реалізації чутливого вимірювання малої ємності в агресивному середовищі з подовженими з'єднувальними лініями і в умовах електромагнітних завад [97].

Конструктивний підхід із копланарними електродами, покритими шаром фторопласту, дозволяє одночасно вирішити кілька із зазначених проблем. Копланарна (планарна зустрічно-гребінчаста) конфігурація передбачає розташування обох електродів в одній площині, що суттєво спрощує конструкцію датчика і дозволяє реалізувати його у вигляді плоского зонда, що встановлюється на стінці або дні апарата без введення виступних частин у робочий простір [98]. Поле планарного датчика проникає в рідину на глибину, порівнянну з відстанню між електродами, і реагує на розподіл діелектричної проникності в цій зоні, включаючи нафтовий шар, що знаходиться безпосередньо на поверхні рідини над датчиком. Чутливість планарного датчика до тонкого нафтового шару визначається глибиною проникнення поля і геометрією електродного малюнка, і може бути оптимізована вибором ширини і кроку електродів [99].

Покриття електродів фторопластом (ПТФЕ або ФЕП) усуває безпосередній електричний контакт між металом і рідиною. Фторопласт є одним із найбільш хімічно стійких матеріалів, практично інертних до пластових

вод будь-якого складу, кислот, лугів, вуглеводнів і нафтових реагентів [100]. Його діелектрична проникність ( $\epsilon \approx 2,0 - 2,1$ ) близька до проникності нафти, що є важливою обставиною з точки зору розподілу поля в структурі датчика. Рівна гідрофобна поверхня фторопласту не утримує краплі мінералізованої води і нафтових відкладень, що значно знижує проблему забруднення, яка є критичною для відкритих металевих і оптичних поверхонь. Відсутність електролітичного контакту виключає поляризацію подвійного електричного шару і анодне розчинення електродів, що усуває два важливих механізми дестабілізації нульового сигналу, характерних для відкритих провідникових датчиків [101].

Підхід до вимірювання на основі лінійної параметричної моделі, в якій на вхід подається відомий сигнал (напруга) і вимірюється реакція (струм або заряд), є концептуально відмінним від вимірювання абсолютної ємності. При відомій формі збудження задача зводиться до ідентифікації параметрів лінійної моделі (ємності, провідності та їх частотних залежностей) за спостережуваним відгуком. Оскільки форма збудження задана і стабільна, точність вимірювання визначається точністю реєстрації відгуку — вимірювання напруги або заряду. Вимірювання напруги є значно більш технологічно опрацьованою і метрологічно досконалою операцією порівняно з вимірюванням малого струму через ланцюг з ізольованими електродами: сучасні операційні підсилювачі з малим вхідним струмом дозволяють виміряти напругу на вході з вхідним опором порядку  $10^{12}$  Ом і шумом одиниць  $\text{nВ/Гц}^{0.5}$ , тоді як вимірювання наноамперних струмів вимагає використання трансїмпедансних підсилювачів з резисторами зворотного зв'язку на рівні гігаом, де є суттєві проблеми з шумом, смугою пропускання і паразитними ємностями [102]. Тому підхід, при якому модель ідентифікується за спостережуваною напругою без безпосереднього вимірювання струму в точці нуль, є не лише зручним, але і метрологічно обґрунтованим.

Застосування нейромережевих алгоритмів для визначення товщини нафтового шару і постійної часу процесу розшарування є логічним наслідком

нелінійного і складного характеру залежності вимірюваних електричних параметрів від шуканих геометричних і кінетичних характеристик системи. Аналітичні моделі ємності планарного датчика при наявності тонкого нафтового шару з урахуванням реальної геометрії електродів, кінцевої товщини фторопластового покриття і ефектів краю є достатньо складними і важко піддаються аналітичному інвертуванню [103]. Крім того, при роботі в реальних умовах форма нафтово-водяного шару не є ідеально горизонтальною плівкою рівномірної товщини — можуть бути хвилеутворення, неоднорідності, часткова емульгованість. Нейромережа, навчена на масиві синтетичних або лабораторних даних із відомими параметрами шару, здатна апроксимувати складну нелінійну залежність між спостережуваними електричними характеристиками і шуканими параметрами — і робити це з надлишковою параметризацією, що підвищує стійкість до шуму в порівнянні з аналітичними методами інверсії [104]. Додатково, нейромережа природно включає ідентифікацію постійної часу експоненціального процесу розшарування як ще одного вихідного параметра, що є нетривіальною задачею для аналітичних методів, орієнтованих на вимірювання миттєвих значень товщини.

Постійна часу експоненціального розшарування як параметр має самостійну цінність для оцінки ефективності реагентів, що є нетривіальним, але важливим аспектом. При аналізі динаміки наростання товщини нафтового шару  $h(t)$  після введення реагенту модель першого порядку (1.11) є фізично обґрунтованою для процесу коалесцентного розшарування в умовах, де швидкість коалесценції пропорційна концентрації дисперсних крапель.

$$h(t) = h_{\infty} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right). \quad (1.11)$$

Параметр  $\tau$  (постійна часу) несе інформацію про ефективність реагенту незалежно від початкової концентрації нафти у воді і є більш загальним показником ефективності, ніж проста концентрація нафти у воді після фіксованого часу відстоювання, що вимірюється традиційними методами [105]. Реалізація одночасної ідентифікації  $h_{\infty}$  і  $\tau$  за часовим рядом вимірювань

ємності є задачею нелінійної регресії, яка в принципі може бути вирішена аналітично (метод найменших квадратів для нелінійної моделі), але нейромережевий підхід дозволяє включити в ідентифікацію набагато більше параметрів спостережуваного сигналу і тим самим підвищити точність оцінки  $\tau$  в умовах шуму.

## Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз фізико-хімічних основ гравітаційного розділення нафтоводяних систем, методів вимірювання товщини нафтової плівки на поверхні пластової води, засобів прискорення розділення та їх оцінки, ємнісних методів вимірювання в нафтогазовій галузі, а також існуючих промислових систем моніторингу. На підставі виконаного аналізу сформульовано такі висновки.

1. Показано, що ефективність процесу розділення нафти і пластової води визначається комплексом фізико-хімічних факторів — дисперсним складом нафтоводяної системи, в'язкістю і густиною фаз, складом природних емульгаторів, мінералізацією пластової води та температурним режимом. Стан межі розділу нафта–вода — зокрема, товщина нафтового шару і швидкість його наростання — є інтегральним показником ефективності сепараційного процесу, який відображає баланс між надходженням нафти з водяної фази і накопиченням суцільного нафтового шару.

2. Аналіз методів вимірювання товщини нафтової плівки показав, що наявні підходи не задовольняють повною мірою вимогам безперервного промислового моніторингу на виході сепаратора. Оптичні методи — УФ-флуориметрія, ІЧ-спектроскопія, лазерна інтерферометрія — мають чутливість, достатню для лабораторних досліджень, але вимагають прозорості середовища, чистоти оптичних вікон і стабільності хімічного складу нафти, що в умовах реального нафтопромислу нереалістично. Критичним обмеженням відомих реалізацій ємнісного методу є безпосередній контакт металевих електродів з

агресивним мінералізованим середовищем, що призводить до нестабільності метрологічних характеристик через поляризацію подвійного електричного шару, електролітичну корозію та відкладення солей на поверхні електродів.

3. Встановлено, що усунення електричного контакту між електродами і рідиною шляхом нанесення захисного діелектричного покриття є обов'язковою умовою стабільної роботи ємнісного перетворювача в умовах пластової води. Фторопласт (ПТФЕ) є матеріалом, що поєднує хімічну інертність до вуглеводнів і мінералізованих розчинів будь-якої концентрації, стабільну діелектричну проникність ( $\epsilon \approx 2,0 - 2,1$ ), яка мало залежить від температури і не змінюється в часі, і гідрофобну поверхню, що запобігає адгезії крапель нафти і відкладень. Копланарна (планарна зустрічно-гребінчаста) геометрія електродів забезпечує компактну конструкцію датчика, придатну для встановлення на стінці або дні технологічного апарата, і достатню глибину проникнення поля в рідину для реєстрації нафтових шарів у діапазоні від одиниць міліметрів до кількох сантиметрів.

4. Виявлено, що практичне застосування ємнісних датчиків у промислових умовах ускладнюється через два незалежних чинники. По-перше, паразитна ємність підвідних кабелів значної довжини (100–300 пФ/м) може перевищувати корисний сигнал датчика і є джерелом нестабільності при використанні традиційних схем потенціометричного збудження з вимірюванням струму через перетворювач. По-друге, промислове електромагнітне середовище (частотні перетворювачі, зварювальне обладнання, силова комутація) є суттєвим джерелом завад для вимірювальних ланцюгів з малосигнальними струмами. Вирішення цієї проблеми потребує принципово іншого підходу до організації вимірювального каналу — зокрема, вимірювання напруги як відгуку на задану форму збудження замість безпосереднього вимірювання струму, що дозволяє використовувати низькоімпедансні вимірювальні ланцюги, природно стійкі до ємнісних наводок від кабелів і менш чутливі до електромагнітних завад у промисловому середовищі.

5. Аналіз задачі визначення нульового рівня сигналу при ізольованих електродах показав, що при наявності діелектричного покриття ємність у відсутність нафтового шару («нульова» ємність) визначається геометрією і властивостями покриття і є значно більшою, ніж очікувана зміна сигналу від нафтового шару. Це ставить задачу ідентифікації параметрів еквівалентної схеми перетворювача, а не вимірювання абсолютного значення ємності. Підхід, при якому шукані параметри визначаються шляхом підбору коефіцієнтів лінійної моделі за спостережуваним відгуком напруги на відоме збудження, є методологічно більш коректним, ніж визначення ємності через відношення струм/напруга, оскільки виключає невизначеність нульового рівня струму при ізольованих електродах.

6. Встановлено, що вимірювання товщини нафтового шару є самостійним інформативним параметром, що безпосередньо свідчить про ступінь завершеності процесу гравітаційного розділення. На відміну від концентрації нафти у водній фазі (яку вимірюють флуориметричні та нефелометричні аналізатори), товщина суцільного нафтового шару над водою є показником, що відображає стадію процесу, на якій краплі нафти вже пройшли коалесценцію і сформували суцільний шар — тобто кінцевий стан, до якого прагне технологічний процес. Динаміка зміни товщини плівки в часі після введення реагентів є кількісним показником ефективності коагулянтів і деемульгаторів, безпосередньо в потоці і без відбору проб.

7. Проведений аналіз методів опрацювання сигналів ємнісних перетворювачів показав, що реальна нафтоводяна система в умовах сепаратора є складним об'єктом, поведінка якого погано описується рекурентними (авторегресійними) моделями через нелінійний характер залежності ємності від товщини шару, нестационарність параметрів середовища (мінералізація, температура, наявність газових включень) і нерівномірність просторового розподілу нафтової фази над датчиком. Апроксимаційні можливості нейромережових алгоритмів, що витікають із теореми Кіберко про універсальну апроксимацію, роблять нейромережу придатним інструментом для

відображення складної нелінійної залежності між спостережуваними електричними характеристиками і шуканими параметрами — товщиною нафтового шару і постійною часу процесу розшарування.

## РОЗДІЛ 2

### ОБҐРУНТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПАРАМЕТРУ ДЛЯ ОЦІНКИ ПІДСИСТЕМИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ПРОФІЛЮВАННЯ

#### **2.1. Структура та функціонал комп'ютерної системи контролю параметрів нафтової емульсії за спектром комплексних коефіцієнтів передачі**

Для реалізації запропонованого методу контролю параметрів нафтової емульсії необхідне створення спеціалізованої комп'ютерної системи, яка поєднує засоби первинного електрофізичного перетворення, багаточастотного зондування, цифрового опрацювання сигналів та подальшої інтерпретації результатів. З функціональної точки зору така система має розглядатися як інформаційно-вимірювальна система, в якій цифрові компоненти реалізують формування зондуючих впливів, дискретизацію відгуків і алгоритмічну інтерпретацію спектральних даних. На відміну від традиційних підходів, у запропонованій системі стан багатошарового середовища типу «нафта–емульсія–вода» визначається на основі аналізу спектрального відгуку копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами. Такий підхід дає змогу перенести основну частину ідентифікаційних процедур із рівня аналогової схеми на рівень алгоритмічного опрацювання, зменшити вплив завад на вимірювальний тракт та забезпечити безперервний контроль в умовах промислової експлуатації.

Структура розроблюваної системи базується на модульному принципі та охоплює три взаємопов'язані функціональні вузли: вимірювально-перетворювальний, обчислювально-ідентифікаційний та комунікаційно-інтерфейсний. Узагальнена структурна схема такої системи відображає послідовний перехід від формування зондуючого впливу на об'єкт до отримання діагностичних і технологічних параметрів, придатних для

локального відображення, архівації та передавання до зовнішніх інформаційних систем (рис. 2.1).

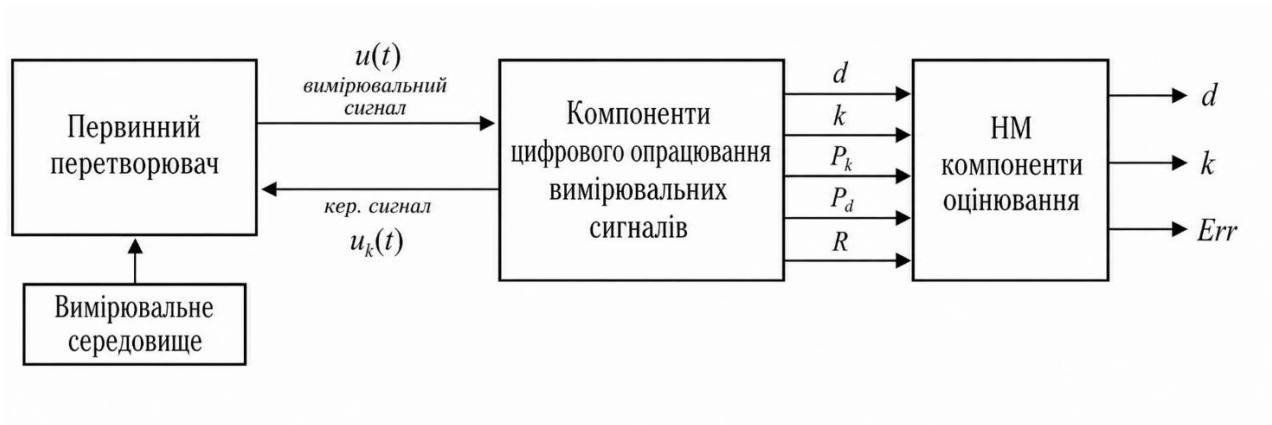


Рисунок 2.1 – Загальна структура комп’ютерної системи контролю параметрів нафтової емульсії

Вимірювально-перетворювальний контур включає первинний вимірювальний перетворювач, вузол формування зонduючого сигналу, аналогову схему попереднього опрацювання сигналу, засоби компенсації та блок реєстрації відгуку. Первинний перетворювач реалізовано у вигляді копланарної електродної системи з ємнісними діелектрично ізольованими електродами, розташованої на поверхні нафтової емульсії.

Зовнішні електроди формують електричне поле в досліджуваному середовищі, а внутрішні використовуються для компенсаційного впливу, що і є інформаційним відгуком. Ізоляція електродів усуває прямий електрохімічний контакт із нафтовою емульсією, що є необхідною умовою довготривалої стабільної роботи перетворювача.

Апаратну основу системи становить мікроконтролерний модуль класу ARM Cortex-M з інтегрованими засобами цифро-аналогового та аналого-цифрового перетворення, який забезпечує синтез зонduючих сигналів, керування режимами вимірювання, дискретизацію відгуку та цифрове опрацювання даних. Формування інформативного сигналу здійснюється в багаточастотному режимі, що дає змогу отримати спектральний опис електрофізичного відгуку об’єкта у вибраному частотному діапазоні.

Важливою складовою структури є компенсаційний канал, призначений для зменшення впливу паразитних ємностей, нестабільності кабельних з'єднань і обмеженої розрядності перетворювальних вузлів. Саме поєднання багаточастотного зондування, компенсації та синхронного цифрового детектування забезпечує можливість виділення слабких інформативних змін на тлі неінформативної волатильності сигналів.

Обчислювально-ідентифікаційний вузол призначений для перетворення первинних електричних відгуків у фізично змістовні параметри стану середовища. На першому етапі виконуються синхронне виділення амплітудної та фазової складових, цифрова фільтрація, усереднення, компенсація систематичних похибок і нормалізація даних. Результатом цього етапу є вектор спектральних ознак, сформований за відгуком системи в наборі частотних точок і придатний для подальшого розв'язання оберненої задачі ідентифікації.

Подальша інтерпретація отриманих даних здійснюється як розв'язання оберненої задачі ідентифікації параметрів багатошарового середовища. З цією метою в системі передбачено використання двокаскадного нейромережевого компонента комп'ютерної системи. Перший каскад, навчений на синтетичних даних цифрового двійника, здійснює відображення спектрального опису відгуку у компактний простір оцінок стану середовища. Другий каскад, адаптований до конкретного фізичного об'єкта за обмеженим набором натурних даних, перетворює цей опис у абсолютні фізичні параметри стану. Така побудова дозволяє поєднати переваги модельного підходу та даних реального експерименту скоротити етап адаптації алгоритму і підвищити стійкість системи до зміни умов експлуатації.

На відміну від систем, у яких вихідним результатом є лише електричний параметр або формальний індикатор стану, розроблювана комп'ютерна система орієнтована на одержання параметрів, безпосередньо пов'язаних із технологічним процесом. До них належать товщина нафтового шару, а також похідні характеристики, що відображають кінетику розшарування середовища. Завдяки цьому система може використовуватися не лише як вимірний

канал, а і як засіб оцінювання ефективності гравітаційного розділення та реагентного впливу.

Комунікаційно-інтерфейсний вузол забезпечує подання результатів вимірювання у формі, придатній для оперативного сприйняття та подальшого використання в автоматизованих системах вищого рівня. У найпростішому режимі система може функціонувати як автономний вимірювальний модуль із локальним відображенням поточних параметрів і службової інформації. У складі розподіленої інформаційно-вимірювальної або кіберфізичної системи передбачено передавання результатів через стандартні цифрові інтерфейси до засобів диспетчеризації, архівування та аналітичного опрацювання.

Запропонована структура є відкритою до масштабування та модифікації. Вона допускає зміну геометрії первинного перетворювача, розширення частотного діапазону, а також ускладнення алгоритмів ідентифікації без зміни загального принципу побудови. Саме така декомпозиція системи на вимірювальний, обчислювальний та інтерфейсний вузли створює методичну основу для подальшого розгляду в цьому розділі процесів формування вимірювальних сигналів, побудови електрофізичної макромоделі, аналізу інформативності запропонованого вимірювального параметра та обмежень компенсаційного методу контролю.

## **2.2. Математична модель поверхневого зондування багат шарового середовища методом імпедансного аналізу**

Задача просторової ідентифікації прихованих станів багат шарових дисперсних середовищ є фундаментальною проблемою при розробці сучасних комп'ютеризованих систем моніторингу технологічних процесів. В основі методу лежить принцип поверхневого електричного зондування: система електродів, розміщених на поверхні досліджуваного об'єкта, збуджує електричне поле, яке проникає у глибину середовища, і за характером відгуку на поверхні відновлюється вертикальний профіль електричних параметрів [99,

106]. Глибина проникнення поля визначається просторовим періодом розташування електродів  $L$ : поле загасає експоненційно з характерною глибиною  $z \sim \frac{L}{2\pi}$ , тому варіювання геометрії електродної системи дозволяє зондувати різні горизонти [106].

Адаптація цього методу до умов нафтопереробного відстійника вимагає вирішення специфічної проблеми: хімічної і електрохімічної взаємодії металевих електродів з досліджуваним середовищем. При безпосередньому контакті металевого електрода з нафтовмісною емульсією виникає ряд ефектів, що унеможливають коректне вимірювання: електрохімічні (фарадеївські) процеси на межі метал–електроліт, корозія і поляризація подвійного електричного шару на межі метал–електроліт вносять некеровану систематичну похибку [107, 108]. Додатково, асфальтено-смолисті компоненти нафти адсорбуються на металевій поверхні і утворюють адсорбований органічний шар (плівку), яка змінює контактний імпеданс непередбачуваним чином у процесі роботи приладу [109].

Принциповим рішенням є повна діелектрична ізоляція електродів від досліджуваного середовища шаром фторопласту (ПТФЕ) товщиною  $d_{iz}$ . Фторопласт характеризується питомим опором  $\rho > 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_r = 2.1$ , хімічною інертністю до вуглеводнів і мінералізованих вод, механічною стабільністю при температурах до  $260^\circ\text{C}$  і тисках до 10 МПа [110]. Ізоляція не лише усуває проблему електрохімічної взаємодії, але і є фізично виправданою: нафта є діелектриком з питомою провідністю  $\sigma_n \sim 10^{-12} - 10^{-10} \text{ См/м}$  — на 10–12 порядків нижче провідності пластової води. При таких значеннях голий металевий електрод у нафті функціонально нічим не відрізняється від ізольованого — зв'язок з провідним шаром рідини здійснюється виключно через ємнісне поле (рис. 2.2) [111, 112].

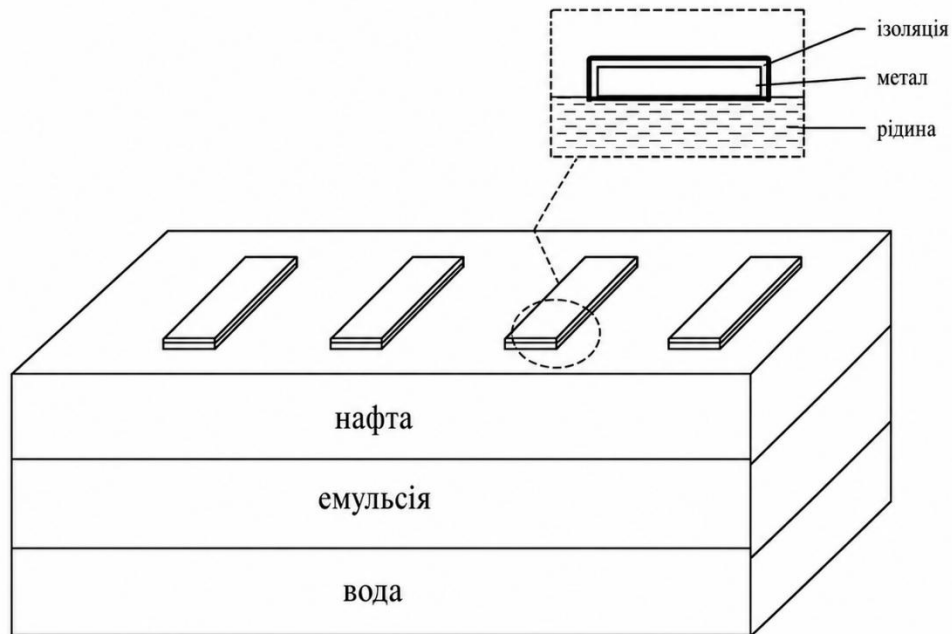


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема первинного перетворювача для поверхневого електричного зондування копланарними ємнісними ізольованими електродами

При постійному струмі або дуже низьких частотах ємнісний опір ізоляції (2.1) прямує до нескінченності, і зондуючий струм практично не проникає у глибину середовища.

$$X_{iz} = \frac{1}{\omega C_{iz}}. \quad (2.1)$$

Водночас постійний струм замикається по поверхні через провідні плівки і канали, не несучи жодної інформації про вертикальний розподіл властивостей. З цих двох причин постійний струм є непридатним для вертикального зондування з ізольованими електродами. Відмова від постійного струму є одночасно методично виправданим рішенням і автоматично усуває проблему електролізу і поляризаційного впливу на об'єкт дослідження [113, 114].

Для кількісного аналізу інформаційних можливостей системи і проектування алгоритму ідентифікації необхідна математична модель, що пов'язує вимірювані електричні величини на поверхні датчика з електрофізичними параметрами багат шарового середовища. Найбільш

природним підходом є побудова еквівалентної схеми заміщення — дискретної мережі з зосередженими параметрами, що відтворює електричну поведінку системи «ізолюваний електрод — шарувата рідина» в робочому частотному діапазоні [99, 114].

Досліджуване середовище є багат шаровою рідиною з вертикальним градієнтом складу: від шару нафти на поверхні через зону водонафтової емульсії до шару пластової води на дні. Кожен шар характеризується комплексною питомою провідністю (2.2):

$$\tilde{\sigma} = \sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r. \quad (2.2)$$

Дискретизація простору за методом скінченних різниць дає мережу з комірок двох типів: горизонтальні гілки описують зв'язок між вузлами вздовж поверхні датчика, вертикальні — зв'язок між шарами у напрямку зондування. Для шарів нафти комірка зводиться до чистого конденсатора ( $\sigma \ll \omega\varepsilon$ ); для шарів пластової води — до чистого резистора ( $\sigma \gg \omega\varepsilon$  у всьому діапазоні 10 Гц–100 кГц) [115, 116].

Ізоляція кожного електрода моделюється конденсатором  $C_{i3}$ , включеним послідовно між металевим провідником і першим вузлом рідини. Для електрода площею  $S_e = 900 \text{ см}^2$  і товщини шару фторопласту  $d_{i3} = 1 \text{ мм}$  ємність ізоляції (2.3):

$$C_{i3} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{ПТФЕ}} \cdot S_e}{d_{i3}} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.1 \cdot 0.09}{10^{-3}} \approx 1.67 \text{ нФ}. \quad (2.3)$$

Конфігурація з чотирма електродами включає чотири ємності ізоляції C1–C4, три горизонтальні гілки рідини R1–R3 і C5–C7, та чотири вертикальні стовпи рідини R4–R7 і C8–C11 (рис. 2.3) [99, 116].

Горизонтальні елементи R1–R3 і C5–C7 описують латеральну провідність рідини між позиціями електродів і вважаються конструктивно відомими. Вертикальні елементи R4–R7 і C8–C11 описують імпеданс стовпа рідини під кожним електродом і є цільовими невідомими вимірювання: вони інтегрально відображають вертикальний профіль  $\tilde{\sigma}(z)$  в зоні під відповідним електродом.

Зміна висоти шару нафти, концентрації емульсії або мінералізації води безпосередньо проявляється у зміні  $R_k$  і  $C'_k$  вертикальних елементів [115, 116].

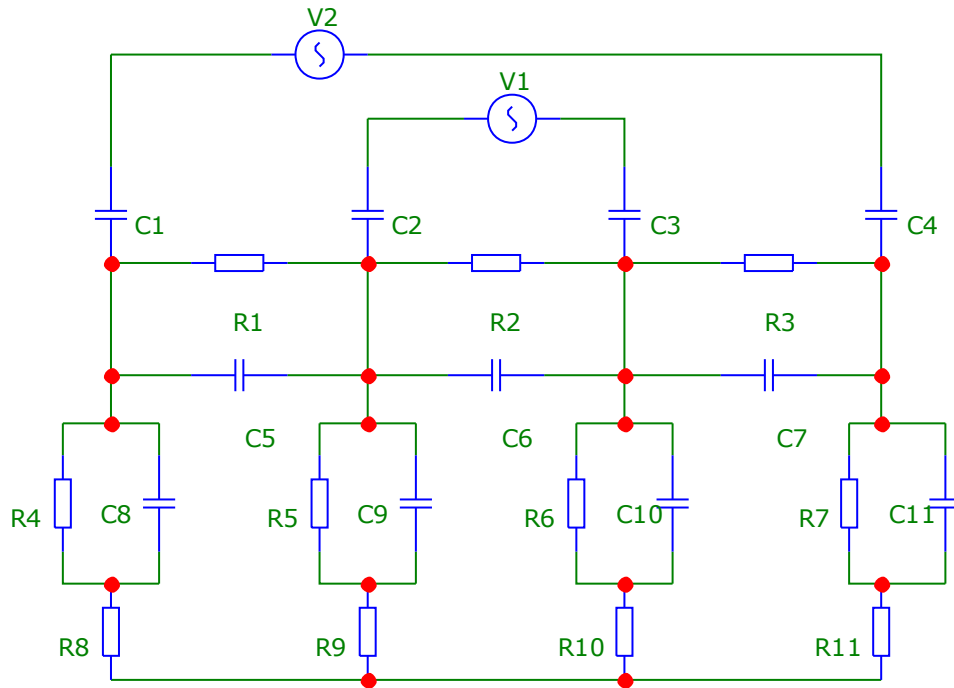


Рисунок 2.3 – Електрофізична модель чотириелектродної системи зондування багатофазного середовища

Металевий резервуар, опір якого порівняно з опорами рідинного середовища є малим, у моделі подається як спільний екіпотенціальний вузол, до якого під'єднані гілки R8-R11.

### 2.3. Аналіз впливу цільових параметрів моделі на імпеданс

Вимірюваний сигнал датчика — модуль повного імпедансу  $|Z|$  — є функцією п'яти незалежних параметрів еквівалентної схеми та кутової частоти збудження  $\omega$  (2.4):

$$|Z| = f(G_v, C_v, G_h, C_h, R_{gnd}, \omega), \quad (2.4)$$

де  $G_v, C_v$  — вертикальні провідність і ємність рідини;  $G_h, C_h$  — горизонтальні провідність і ємність;  $R_{gnd}$  — опір струмів витоку на землю. Завдання цього

розділу — кількісно встановити, наскільки сильно і в яких частотних діапазонах кожен параметр визначає вихідний сигнал.

Схему наведено на рис. 2.4. Вертикальна гілка представляє стовп рідини між сусідніми шарами: паралельний RC-контур ( $G_v, C_v$ ) з'єднаний послідовно з опором витоку  $R_{gnd}$ . Її адмітанс (2.5):

$$y_v = \frac{1}{\frac{1}{G_v + j\omega C_v} + R_{gnd}}. \quad (2.5)$$

Горизонтальна гілка описує бічний зв'язок між сусідніми вузлами (2.6):

$$y_h = G_h + j\omega C_h. \quad (2.6)$$

Для чотирьох вузлів схеми (1, 2, 3, 4) складається матриця вузлових провідностей розміром  $4 \times 4$  (2.7):

$$Y = \begin{bmatrix} y_v + y_h & -y_h & 0 & 0 \\ -y_h & y_v + 2y_h & -y_h & 0 \\ 0 & -y_h & y_v + 2y_h & -y_h \\ 0 & 0 & -y_h & y_v + y_h \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

$$I = \begin{bmatrix} J \\ 0 \\ 0 \\ -J \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

$$Y \cdot V = I, \quad (2.9)$$

де матриця вузлових провідностей  $Y$  має розмір  $4 \times 4$  (чотири вузли: 1, 2, 3, 4). Горизонтальні гілки  $y_h$  з'єднують сусідні вузли 1–2, 2–3, 3–4; вертикальні гілки  $y_v$  з'єднують кожен вузол із землею. Вектор  $I$  задає інжекцію одиничного струму між крайніми електродами (вузли 1 і 4). Задавши струм рівний по амплітуді 1A і з фазою 0 градусів (2.10):

$$I = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Модуль трансфер-імпедансу між внутрішніми потенційними електродами (вузли 2 і 3) визначається як модуль різниці вузлових напруг (2.11):

$$|Z| = |V_2 - V_3|. \quad (2.11)$$

Ємності ізоляційного шару, пов'язані з потенційними електродами, не впливають на значення  $|Z|$ , оскільки реєстрація в режимі холостого ходу означає нульовий струм у вимірювальному колі. За відсутності струму у вимірювальному колі спад напруги на цих ємностях дорівнює нулю. Аналогічно, ємності в колі зовнішніх електродів не змінюють заданого струму збудження, оскільки джерело працює в режимі ідеального струмового джерела. Отже, у межах прийнятої моделі стан електродних ізоляцій має другорядний вплив на розподіл струмів і напруг у досліджуваному середовищі, а основну роль у формуванні  $|Z|$  відіграють параметри горизонтальних і вертикальних гілок рідини.

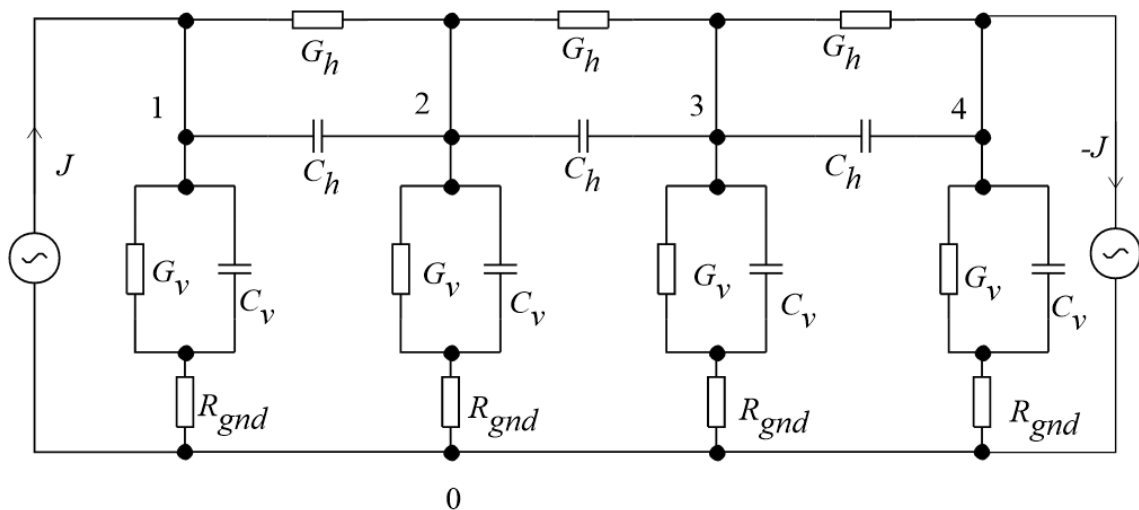


Рисунок 2.4 — Еквівалентна схема датчика для аналізу інформативності

Для оцінки впливу цих параметрів у всьому фізично допустимому діапазоні застосовується статистичне моделювання методом Монте-Карло.

### 2.3.1 Статистичне моделювання методом Монте-Карло

Для оцінки впливу параметрів у всьому фізично допустимому діапазоні застосовується метод статистичних випробувань. Генерується ансамбль із  $N_{MC} = 2000$  реалізацій вектора параметрів схеми за методом латинського гіперкубу [117, 118, 119] у логарифмічних межах:

$$G_v, G_h \in [10^{-5}, 10^{-1}] \text{См}, \quad (2.12)$$

$$C_v, C_h \in [10^{-11}, 10^{-7}] \text{Ф}, \quad (2.13)$$

$$R_{gnd} \in [500, 5000] \text{ Ом.} \quad (2.14)$$

Для кожного стану вектора параметрів система вузлових рівнянь розв'язується послідовно для 60 логарифмічно рівновіддалених точок частотної сітки від 10 Гц до 100 кГц. У результаті формується матриця  $|Z|(N_{MC} \times N_{freq})$ , де рядки відповідають реалізаціям параметрів, а стовпці — фіксованим частотам.

### 2.3.2 Кореляційний аналіз

Для кожного частотного зрізу  $\omega$  обчислюється коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона між логарифмом  $|Z|$  і логарифмом кожного параметра (2.15):

$$r(Z, x_i)(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^N (\log|Z|_k - \overline{\log|Z|})(\log x_{i,k} - \overline{\log x_i})}{N \cdot \sum_{k=1}^N (\log|Z|_k - \overline{\log|Z|})^2 \cdot \sum_{k=1}^N (\log x_{i,k} - \overline{\log x_i})^2} \quad (2.15)$$

де  $k$  — індекс реалізації, кутові дужки позначають вибіркове середнє. Послідовне обчислення цього коефіцієнта для кожного стовпця частотної матриці дає спектральний профіль кореляції  $r(Z, x_i)(\omega)$ .

Програма для побудови спектру кореляцій (додаток Ж) генерує ансамбль методом латинського гіперкубу [117], розв'язує систему вузлових рівнянь для кожної реалізації та частоти, а потім для кожного частотного зрізу обчислює коефіцієнти Пірсона між  $lg|Z|$  і  $lg$  кожного параметра.

Аналіз спектру кореляцій (рис. 2.5) виявляє три характерні частотні зони з різним складом домінуючих параметрів.

У низькочастотній зоні (10–100 Гц) горизонтальна провідність  $G_h$  має стійку від'ємну кореляцію з  $|Z|$  на рівні  $r \approx -0.65 \dots -0.70$ . Від'ємний знак є фізично обґрунтованим: зростання  $G_h$  збільшує горизонтальний струм між вузлами, що зменшує різницю потенціалів між внутрішніми електродами і знижує  $|Z|$ . Горизонтальна ємність  $C_h$  також дає від'ємну кореляцію ( $r \approx -0.35$ ), однак слабшу, оскільки на низьких частотах реактивний опір ємності великий і горизонтальний ємнісний струм незначний. Вертикальні параметри  $G_v$  і  $C_v$  та опір  $R_{gnd}$  мають кореляцію, близьку до нуля, що вказує на відсутність лінійного зв'язку з  $|Z|$  у цьому діапазоні.

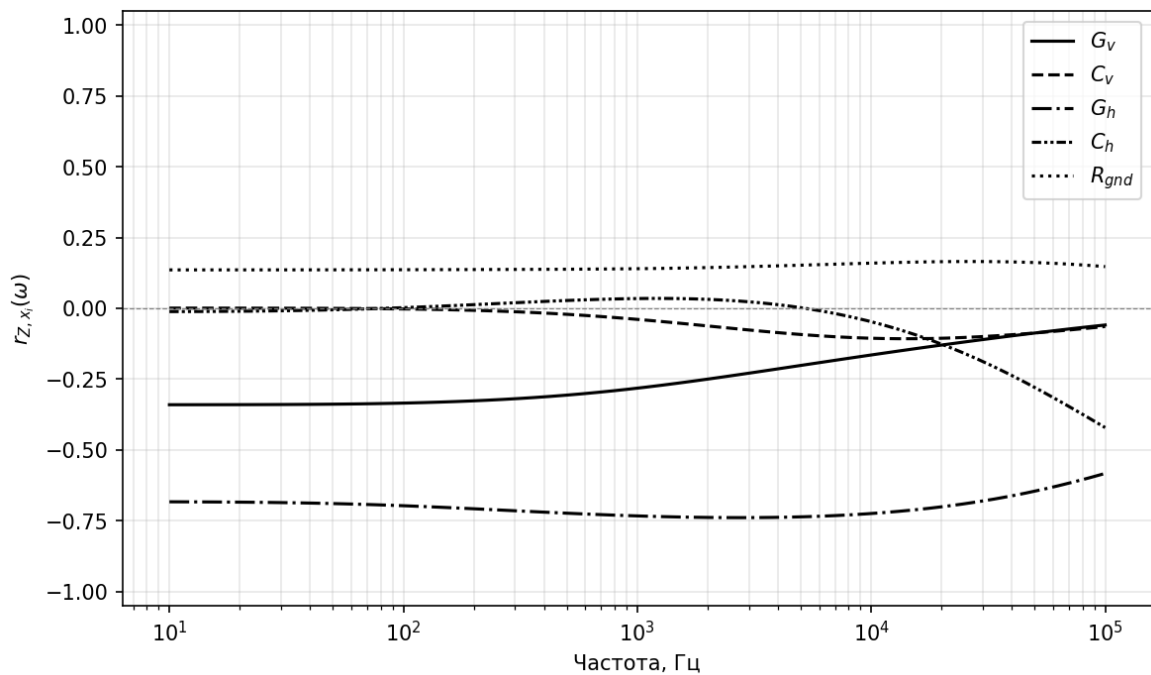


Рисунок 2.5 — Спектральні профілі коефіцієнтів кореляції Пірсона параметрів схеми з  $|Z|$

У перехідній зоні (100 Гц — 10 кГц) картина змінюється: кореляція  $G_h$  поступово зростає за абсолютним значенням до  $r \approx -0.75$  на частоті близько 5 кГц, після чого різко падає. Одночасно кореляція  $C_h$  зростає за абсолютним значенням, досягаючи  $r \approx -0.35$  на 10 кГц. Це відповідає зменшенню реактивного опору ємнісних елементів і перерозподілу струму в ємнісні канали. Вертикальна ємність  $C_v$  залишається малоінформативною за кореляційним критерієм у всій перехідній зоні.

У високочастотній зоні (10–100 кГц) всі чотири параметри  $G_v$ ,  $C_v$ ,  $G_h$ ,  $C_h$  демонструють різке зростання кореляції (за абсолютним значенням до  $r \approx -0.4 \dots -0.5$ ), причому їхні профілі зближуються між собою. Опір  $R_{gnd}$  зберігає невелику додатну кореляцію ( $r \approx +0.15$ ) упродовж усього діапазону, що відображає його роль послідовного елемента вертикальної гілки.

Кореляційний аналіз дозволяє встановити знак та відносну силу лінійного зв'язку між кожним параметром і  $|Z|$ , а також визначити частотні межі, де параметр є потенційно вимірюваним. Разом з тим коефіцієнт Пірсона має принципове обмеження: він реєструє лише лінійну складову залежності та

усереднює вплив по всьому простору параметрів [120]. Якщо чутливість  $|Z|$  до параметра  $x_i$  суттєво залежить від поточного значення іншого параметра  $x_j$  (мультиплікативна взаємодія), глобальна кореляція  $r(Z, x_i)$  може як занижувати, так і завищувати реальний вплив залежно від розподілу  $x_j$  у вибірці. Зокрема, адмітанс вертикальної гілки (2.5) при малих значеннях  $R_{gnd}$  визначається безпосередньо через  $(G_v + j\omega C_v)$ , тоді як при  $R_{gnd} \cdot |y_{rc}| \gg 1$  виходить  $y_v \approx \frac{1}{R_{gnd}}$  і вплив  $C_v$  на  $|Z|$  практично зникає. Кореляція  $r(Z, C_v)$ , усереднена по всьому діапазону  $R_{gnd}$ , не відображає жодного з цих режимів коректно. Для кількісного врахування взаємодій застосовується глобальний аналіз чутливості на основі декомпозиції дисперсії [121].

### 2.3.3 Індeksi глобальної чутливості на основі декомпозиції дисперсії

Метод базується на розкладі повної дисперсії вихідної змінної на внески окремих параметрів та їхніх взаємодій (2.16) [121, 122]:

$$\text{Var}(Z) = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{i,j} + \dots, \quad (2.16)$$

де  $V_i = \text{Var}_{x_i}(\overline{Z | x_i})$  — дисперсія умовного математичного сподівання.

Нормований індекс першого порядку (2.17):

$$S_i = \frac{V_i}{\text{Var}(Z)} \quad (2.17)$$

характеризує власний (не обумовлений взаємодіями) внесок параметра  $x_i$ .

Повний індекс (2.18):

$$S_{iT} = 1 - \frac{\text{var}_{x_i}(\overline{Z | x_i})}{\text{Var}(Z)} \quad (2.18)$$

враховує також усі вищі взаємодії за участю  $x_i$ . Різниця  $(S_{iT} - S_i)$  кількісно описує внесок взаємодій.

Обчислення виконано за схемою Сальтеллі [123] з використанням двох базових матриць вибірок  $A$  і  $B$  та змішаних матриць  $AB_i$ . Згенеровано дві незалежні матриці вибірок  $A$  і  $B$  розміром  $(N_S \times 5)$ , де  $N_S = 1000$ . Для кожного параметра  $i$  формується матриця  $AB_i$ : всі стовпці з  $A$ , але  $i$ -й стовпець замінений відповідним стовпцем з  $B$ . Оцінки дисперсій (2.19), (2.20):

$$V_i = \frac{1}{N_S} \sum_{k=1}^{N_S} f(B_k) \left( f(AB_{i,k}) - f(A_k) \right), \quad (2.19)$$

$$V_{iT} = \frac{1}{2N_S} \sum_{k=1}^{N_S} \left( f(A_k) - f(AB_{i,k}) \right)^2, \quad (2.20)$$

де  $f(A)$ ,  $f(B)$ ,  $f(AB_i)$  — значення  $|Z|$  на матрицях  $A$ ,  $B$ ,  $AB_i$  відповідно. Нормування на повну дисперсію  $Var(Z)$  дає безрозмірні індекси  $S_i$  і  $S_{iT}$ . Цикл повторюється для кожної точки частотної сітки, утворюючи спектри  $S_i(\omega)$  і  $S_{iT}(\omega)$ . Загальна кількість звернень до розв'язувача схеми становить  $N_S(k + 2)$  на одну частоту, де  $k = 5$  — кількість параметрів.

Спектр повних індексів чутливості (рис. 2.6) суттєво відрізняється від спектру кореляцій і розкриває іншу картину чутливості системи.

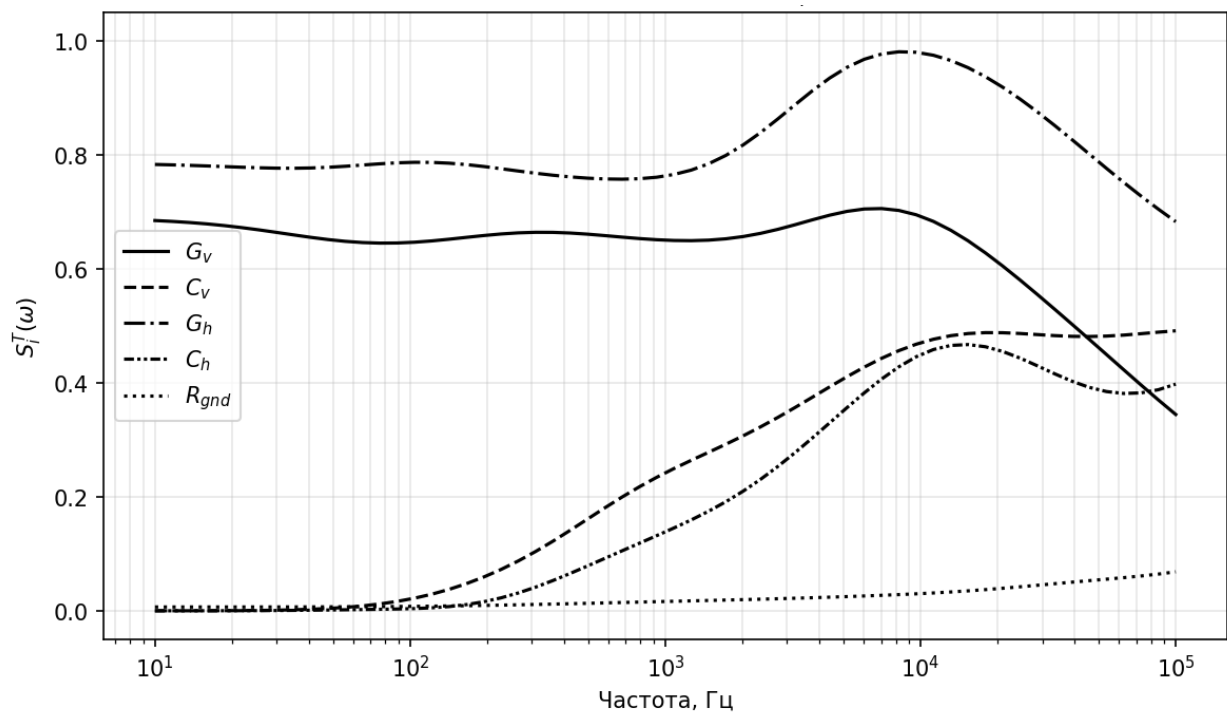


Рисунок 2.6 — Спектральні профілі повних індексів чутливості  $S_{iT}(\omega)$

Горизонтальна провідність  $G_h$  домінує упродовж усього частотного діапазону: її повний індекс  $S_{iT}(G_h) \approx 0.78 - 0.80$  на низьких частотах і зростає до  $0.95-1.0$  в зоні 3–10 кГц. Такий рівень індексу означає, що варіація  $G_h$  разом із її взаємодіями з іншими параметрами пояснює до 95–100 % повної дисперсії  $|Z|$  у цій зоні. Горизонтальна ємність  $C_h$  займає друге місце:  $S_{iT}(C_h) \approx 0.65$  на 10 Гц і зростає до  $0.70$  на 100 кГц з локальним максимумом близько  $0.70$  на 5–

10 кГц. Обидва горизонтальні параметри разом мають сумарний повний індекс, що перевищує 1.0 у середньочастотній зоні, — це є прямим свідченням сильної взаємодії між ними.

Вертикальна провідність  $G_v$  має  $S_{iT} \approx 0.65 - 0.70$  у низькочастотній зоні і поступово знижується до 0.40 на 100 кГц. Вертикальна ємність  $C_v$  залишається малоінформативною на низьких частотах ( $S_{iT} \approx 0.01$ ) і зростає до 0.45–0.50 у зоні 5–50 кГц, відображаючи зміну механізму провідності вертикальної гілки при наближенні до частоти релаксації RC-контурі. Опір  $R_{gnd}$  має  $S_{iT} < 0.10$  у всьому діапазоні, що підтверджує його підлеглу роль у формуванні  $|Z|$ .

Порівняння результатів кореляційного аналізу і індексів чутливості виявляє принципову розбіжність для вертикальних параметрів. Кореляція  $r(Z, G_v)$  та  $r(Z, C_v)$  близька до нуля в широкому діапазоні частот, тоді як  $S_{iT}(G_v)$  і  $S_{iT}(C_v)$  є значними. Це розходження пояснюється тим, що вплив вертикальних параметрів на  $|Z|$  є переважно нелінійним і реалізується через взаємодію з горизонтальними параметрами: кореляція, яка вимірює лише лінійну складову, його не виявляє, тоді як повний індекс чутливості враховує внесок через дисперсію умовного сподівання незалежно від форми залежності. Сума повних індексів по всіх параметрах перевищує одиницю (у середньочастотній зоні сягає 2.5–3.0), що кількісно підтверджує, що модель є суттєво нелінійною системою з сильними ефектами взаємодії.

Схема Сальтеллі вимагає незалежності вхідних параметрів і використовує дисперсію як єдину міру розсіювання. При розподілах із важкими хвостами або при сильній асиметрії розподілу  $|Z|$  дисперсія може бути нестабільною оцінкою, і індекси чутливості можуть давати завищені або нестійкі значення. Для подолання цього обмеження застосовується метод приросту ентропії.

### 2.3.4 Метод приросту ентропії Шеннона

Кореляційний аналіз виявляє лінійні зв'язки, індекси чутливості спираються на дисперсію. Для охоплення довільних (зокрема, нелінійних) залежностей між параметрами та  $|Z|$  застосовується метод, заснований на

ентропії Шеннона [124]. Інформаційна ентропія характеризує ступінь невизначеності (розкид) розподілу вихідної змінної: чим рівномірніше розподілені значення  $|Z|$  по динамічному діапазону, тим вища ентропія [125, 126].

**Алгоритм обчислення приросту ентропії, варіант 1 - Ізольована варіація параметра.**

Спочатку розглянемо допоміжну ізольовану постановку, у якій варіюється лише один параметр  $x_i$ , а всі інші параметри фіксуються на медіанних значеннях. Такий підхід дає змогу оцінити власну здатність параметра формувати розкид вихідної величини без впливу міжпараметричних взаємодій. Для кожної точки частотної сітки  $\omega$  виконується така послідовність дій.

Крок 1. Генерується ансамбль із  $N = 2000$  реалізацій усіх параметрів (латинський гіперкуб). Для кожної реалізації обчислюється  $|Z|$ , утворюючи масив  $Z_{all}$ . Глобальний діапазон  $[Z_{min}, Z_{max}]$  на цій частоті визначає єдину нормалізовану шкалу.

Крок 2. Масив  $Z_{all}$  дискретизується на  $M = 256$  інтервалів у логарифмічній шкалі. Кожне значення  $|Z|$  відображається в номер інтервалу (стан). Глобальна ентропія (2.21):

$$H_{all} = -\sum_i p_i \log_2(p_i), \quad (2.21)$$

де  $p_i$  — відносна частота потрапляння в  $i$ -й інтервал. При  $M = 256$  станах максимальне теоретичне значення  $H_{all} = -\log_2 256 = 8$  біт. Кількість станів  $M$  задається константою на початку програми і визначає роздільну здатність ентропійної шкали; збільшення  $M$  знижує похибку дискретизації, але потребує більшого  $N$ .

Крок 3. Для кожного параметра  $x_i$  будується ізольований масив: всі параметри, крім  $x_i$ , фіксуються на медіанних значеннях  $X_{med}$ ; параметр  $x_i$  пробігає всі  $N$  згенерованих значень. Для кожного стану вектора розв'язується система вузлових рівнянь, отримуючи масив  $Z_{fixed}$ . Ентропія цього масиву

$H_{\sim i}(\omega)$  обчислюється на тій самій фіксованій шкалі  $[Z_{min}, Z_{max}]$  і з тим самим числом  $M$  інтервалів.

Крок 4. Приріст інформативності параметра  $x_i$  (2.22):

$$\Delta H_i^{iso}(\omega) = H_{all}(\omega) - H_{\sim i}(\omega). \quad (2.22)$$

Фізичний зміст:  $H_{all}$  характеризує розкид  $|Z|$  при одночасній варіації всіх параметрів.  $H_{\sim i}(\omega)$  — розкид при варіації лише  $x_i$  (решта фіксовані). Якщо  $H_i^{iso}(\omega) \approx 0$ , ізольована варіація  $x_i$  породжує такий само розкид, що й увесь ансамбль, — параметр самостійно визначає вихідну невизначеність. Якщо  $H_i^{iso}(\omega) > 0$ , повний ансамбль є більш інформативним, ніж ізольований вплив  $x_i$ : фіксація решти параметрів на медіанних значеннях «звужує» розподіл  $|Z|$ , тобто взаємодія з іншими параметрами підсилює вплив  $x_i$ . Від'ємне  $H_i^{iso}(\omega)$  означало б, що при фіксованих параметрах  $x_i$  впливає сильніше, ніж у повному ансамблі, — це можливо, якщо взаємодія інших параметрів частково маскує вплив  $x_i$ . Параметр із найбільшим  $H_i^{iso}(\omega)$  у даній точці частотної сітки є тим, ізольована варіація якого найменше відтворює розкид повного ансамблю — тобто він найбільше залежить від взаємодії з іншими параметрами для реалізації свого впливу на  $|Z|$ .

На відміну від кореляції та індексів чутливості, метод приросту ентропії не припускає жодної форми залежності (лінійної, квадратичної тощо) і не вимагає дисперсії як міри розсіювання [125, 127]. Він є чутливим до будь-якого монотонного або немонотонного зв'язку між  $x_i$  і  $|Z|$ , оскільки оцінює розподіл вихідної змінної в цілому, а не лише його другий момент.

**Алгоритм обчислення приросту ентропії, варіант 2 - умовна фіксація параметра.**

На відміну від попередньої постановки, де оцінювався вплив ізольованої варіації параметра  $x_i$  при фіксованих інших параметрах, далі використовується вимірювально-орієнтована постановка. У ній параметр  $x_i$  фіксується на медіанному значенні, тоді як решта параметрів залишаються вільними. Такий підхід відповідає реальній задачі вимірювання, коли значення одного параметра

стало відомим, а інші параметри середовища залишаються невизначеними. Саме цей варіант використано надалі для побудови спектрів  $\Delta H_i(\omega)$  та їх фізичної інтерпретації. Для кожної точки частотної сітки  $\omega$  виконується така послідовність дій.

Крок 1. Генерується ансамбль із  $N = 2000$  реалізацій усіх параметрів (латинський гіперкуб). Для кожної реалізації розв'язується система вузлових рівнянь і обчислюється  $|Z|$ , утворюючи масив  $Z_{all}$  розміром  $N$ . Глобальний діапазон  $[Z_{min}, Z_{max}]$  на цій частоті визначає єдину нормалізовану шкалу для всіх подальших обчислень. Обчислюється глобальна ентропія (2.23):

$$H_{all} = -\sum_i p_i \log_2(p_i), \quad (2.23)$$

де масив  $Z_{all}$  розбивається на  $M = 256$  інтервалів у логарифмічній шкалі,  $p_i$  — відносна частота потрапляння в  $i$ -й інтервал.  $H_{all}$  характеризує невизначеність  $|Z|$  в умовах, коли параметр  $x_i$  є невідомим і варіює разом з усіма іншими.

Крок 2. Для кожного параметра  $x_i$  по черзі: параметр  $x_i$  фіксується на своєму медіанному значенні  $\tilde{x}_i$  для всіх  $N$  реалізацій; решта параметрів  $x_{\sim i}$  залишаються незмінними з повного ансамблю і вільно варіюються. Розв'язання системи вузлових рівнянь для кожної з  $N$  реалізацій дає масив  $Z_{fix}$ . Його ентропія  $H_{fix_i}(\omega)$  обчислюється на тій самій фіксованій шкалі  $[Z_{min}, Z_{max}]$  і з тим самим числом  $M$  інтервалів.  $H_{fix_i}(\omega)$  характеризує невизначеність  $|Z|$  в умовах, коли значення  $x_i$  стало відомим.

Крок 3. Приріст інформативності параметра  $x_i$  (2.24):

$$\Delta H_i(\omega) = H_{all}(\omega) - H_{fix_i}(\omega). \quad (2.24)$$

Якщо  $\Delta H_i > 0$  — знання  $x_i$  зменшило невизначеність  $|Z|$ : параметр є інформативним на даній частоті. Чим більше  $\Delta H_i$ , тим сильніший власний вплив параметра на вихід. Якщо  $\Delta H_i \approx 0$  — фіксація  $x_i$  практично не змінює розподіл  $|Z|$ : параметр неінформативний на даній частоті незалежно від характеру залежності.

Фіксація  $x_i$  при вільних інших показує реальне зменшення невизначеності при отриманні інформації про  $x_i$  в умовах, коли стан решти параметрів

залишається невідомим. Саме ця постановка відповідає реальній задачі вимірювання.

За своєю структурою  $\Delta H_i(\omega)$  є ентропійним аналогом індексу першого порядку  $S_i$ : обидві величини вимірюють власний вплив параметра на вихідну змінну без урахування взаємодій з іншими параметрами [126]. Індeksi глобальної чутливості на основі декомпозиції дисперсії усувають основне обмеження кореляційного аналізу, оскільки дають змогу оцінити внесок параметрів у варіацію вихідної змінної з урахуванням нелінійності та взаємодій.

Індекс першого порядку характеризує власний внесок параметра у дисперсію виходу, а повний індекс — його сумарний внесок разом з усіма взаємодіями. Разом з тим ці індекси описують лише структуру внеску в дисперсію і не дають інформації про знак залежності або напрям зміни  $|Z|$  при зміні параметра. Крім того, при сильній асиметрії розподілу або наявності важких хвостів дисперсія може бути не найстійкішою мірою розсіювання, що обґрунтовує доцільність додаткового ентропійного аналізу.

Програма для обчислення приростів ентропії (додаток А) реалізує описаний алгоритм. Константа  $N\_BINS$  задає кількість квантових станів (за замовчуванням 256); максимальна теоретична ентропія  $H_{max} = \log_2 256 = 8$  біт.

Спектр приростів ентропії (рис. 2.7) надає якісно іншу, більш деталізовану картину інформативності параметрів порівняно з двома попередніми методами [126].

Чим більше  $\Delta H_i(\omega)$  тим сильніше знання параметра  $x_i$  зменшує невизначеність виходу. Навпаки, параметр із  $\Delta H_i \approx 0$  самотійно, без участі інших, формує той самий розкид  $|Z|$ , що й повний ансамбль — його вплив не потребує взаємодії.

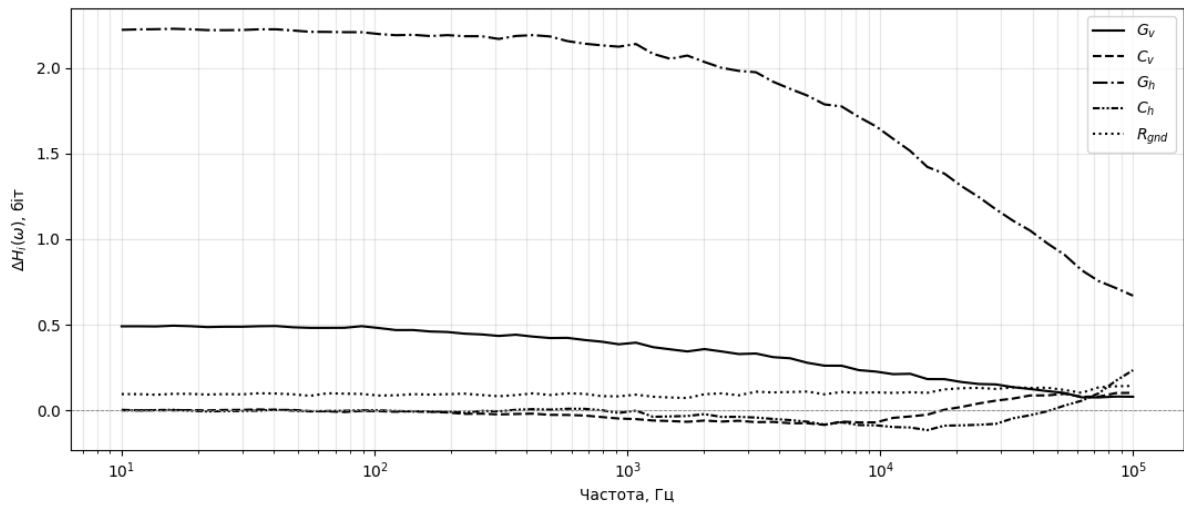


Рисунок 2.7 — Спектральні профілі приростів інформативності  $\Delta H_i(\omega)$  для параметрів схеми

Метод дозволяє також виявити частотні вікна з максимальною роздільністю між параметрами: якщо на певній частоті лише один параметр має ненульове  $\Delta H_i$ , а решта близькі до нуля, то вимірювання на цій частоті є селективним до даного параметра. Перетин або зближення кривих  $\Delta H_i(\omega)$  вказує на частотні зони, де параметри взаємно маскують один одного і де однозначна ідентифікація кожного з них є ускладненою.

### 2.3.5 Порівняльний аналіз трьох методів

Три застосовані методи дають взаємодоповнювальну, але не тотожну інформацію про структуру залежності  $|Z|$  від параметрів схеми.

Кореляційний аналіз виявляє знак і силу лінійного зв'язку. Його головна перевага — простота інтерпретації: від'ємна кореляція з  $G_h$  безпосередньо підтверджує, що зростання горизонтальної провідності знижує  $|Z|$ . Головне обмеження — нечутливість до нелінійних і взаємодійних ефектів: вертикальні параметри  $G_v$  і  $C_v$  дають  $r \approx 0$  у широкому діапазоні частот, хоча за індексами чутливості вони пояснюють 40–70 % дисперсії  $|Z|$ .

Індекси чутливості усувають це обмеження: вони враховують дисперсійний внесок параметра разом із усіма взаємодіями, тому  $S_{iT}(G_v)$  і  $S_{iT}(C_v)$  правильно відображають їхню роль у системі. Разом з тим схема

Сальтеллі дає лише безрозмірне відношення часток дисперсії без інформації про знак залежності або про те, в якому напрямку зміщується  $|Z|$  при зміні параметра. Сума  $S_{iT} > 1$  у середньочастотній зоні (до 2.5–3.0) кількісно характеризує силу взаємодій, але не вказує, які саме пари параметрів взаємодіють найсильніше.

Метод приросту ентропії доповнює обидва підходи тим, що оцінює інформативність через повний розподіл  $|Z|$ , а не через його другий момент. Операція фіксації  $x_i$  при вільних інших параметрах відповідає реальній ситуації вимірювання: система отримує інформацію про один параметр, тоді як решта залишаються невідомими.  $\Delta H_i(\omega)$  показує, наскільки саме це знання зменшує невизначеність вихідного сигналу. На відміну від  $S_i$  (індекс чутливості), який дає точну оцінку лише для монотонних залежностей,  $\Delta H_i$  однаково коректний при будь-якій формі залежності між  $x_i$  і  $|Z|$ .

Таким чином, сукупне застосування кореляційного аналізу, індексів чутливості та методу приросту ентропії забезпечує повну характеристику залежності  $|Z|$  від параметрів схеми: кореляція встановлює знак і лінійну силу зв'язку; індекси чутливості кількісно оцінюють глобальний вклад кожного параметра з урахуванням взаємодій; метод приросту ентропії вимірює зменшення невизначеності  $|Z|$  при отриманні інформації про кожен окремий параметр незалежно від форми залежності. Результати підтверджують, що імпеданс чотириелектродної схеми містить інформацію про всі п'ять параметрів, однак ця інформація розподілена частотно: різні параметри є визначальними в різних частотних зонах, що обґрунтовує необхідність багаточастотного вимірювання для повної ідентифікації стану середовища.

### **2.3.6 Межі застосовності методу імпедансу та проблема нафтового шару**

Наведений аналіз проводився для еквівалентної схеми, яка описує стовп рідини між електродами без урахування діелектричного шару нафти на поверхні датчика. У цих умовах метод вимірювання модуля імпедансу  $|Z|$  є працездатним: він дозволяє розрізнити провідність і діелектричну проникність

середовища в різних частотних зонах і теоретично придатний для ідентифікації електрофізичних параметрів рідини.

Однак у реальних умовах нафтового відстійника поверхня електродів контактує із шаром нафти, яка є практично ідеальним діелектриком ( $\sigma \sim 10^{-10}$  См/м) [115]. Ємність цього шару (2.25):

$$C_{oil} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{oil} \cdot \frac{S}{d_{oil}} \quad (2.25)$$

вмикається послідовно з ємністю фторопластової ізоляції електрода  $C_{iz}$  у вертикальній гілці схеми. Сумарна ємність послідовного з'єднання (2.26):

$$\frac{1}{C_{sum}} = \frac{1}{C_{iz}} + \frac{1}{C_{oil}} \quad (2.26)$$

є єдиним реактивним елементом, який спостерігає вимірювач у цій гілці. Оскільки обидві ємності входять у той самий вираз як нерозривна сума зворотних величин, вимірювання  $|Z|$  не дає змоги відрізнити зміну  $C_{oil}$  (тобто зміну товщини  $d_{oil}$ ) від зміни  $C_{iz}$  (наприклад, через налипання відкладень або старіння полімеру). З точки зору вимірювача обидві зміни дають тотожний результат — зменшення  $C_{sum}$ . Таким чином, пряме вимірювання  $|Z|$  є принципово нечутливим до товщини нафтового шару як самостійного параметра.

Ця математична недовизначеність є не технічним недоліком конкретної реалізації, а фундаментальним обмеженням вимірювальної топології. Вона не усувається збільшенням кількості частотних точок, підвищенням точності АЦП або вдосконаленням алгоритмів опрацювання: при будь-якій кількості вимірювань на різних частотах система рівнянь залишається нерозв'язаною відносно пари  $(C_{iz}, d_{oil})$  — є лише одна спостережувана величина  $C_{sum}$  і два невідомих.

Для подолання цього обмеження необхідна зміна самого принципу вимірювання. Замість абсолютного значення  $|Z|$  потрібна величина, яка залежить від відношення імпедансів двох різних ділянок середовища. Якщо ці ділянки відрізняються за товщиною нафтового шару або за складом рідини під ним, їхнє відношення несе пряму інформацію про різницю параметрів,

недоступну при одноточковому вимірюванні. Саме цей підхід реалізовано у вигляді комплексного коефіцієнта передачі, розглянутого у наступному розділі.

## 2.4. Вдосконалення моделі для поверхневого зондування багат шарового середовища із використанням комплексного коефіцієнта передачі

Аналіз розділу 2.3 підтвердив, що модуль імпедансу  $|Z|$  чотириелектродної схеми несе інформацію про провідність і діелектричну проникність рідкого середовища. Разом з тим там само встановлено фундаментальне обмеження: ємність нафтового шару  $C_{oil}$  і ємність фторопластової ізоляції  $C_{iz}$  входять у вимірюваний сигнал через нероздільну суму  $\frac{1}{C_{iz}} + \frac{1}{C_{oil}}$ , і тому товщина нафтового шару не може бути визначена як самостійний параметр.

Для подолання цього обмеження вводиться принцип активної компенсації, що дозволяє перейти до нового вимірювального параметра — комплексного коефіцієнта передачі  $K(j\omega)$ . Фізична ідея полягає в тому, що замість пасивного вимірювання відгуку на струмове збудження реалізується режим, у якому компенсуюча напруга підбирається так, щоб струм через ємність електрода збудження обнулювався. При цьому ємність електрода виключається з рівняння, і  $K$  стає функцією відношення адмітансів гілок середовища, в якому ємність нафтового шару входить відокремлено від ємності ізоляції.

### 2.4.1 Спрощення схеми та виведення $K(j\omega)$

Вихідна чотиривузлова схема (розділ 2.3) завдяки антисиметрії прикладених напруг зводиться до двовузлової (рис. 2.8). Джерело збудження  $V_{exc}$  прикладене між зовнішнім колом і вузлом 1 через ємність  $C1$ ; джерело компенсації  $V_{comp}$  — між зовнішнім колом і вузлом 2 через ємність  $C4$ . Ємності  $C1$  і  $C4$  є послідовним з'єднанням ємності фторопластової ізоляції  $C_{iz}$  і ємності

нафтового шару  $C_{oil}$ , що знаходиться безпосередньо на поверхні електрода (2.27):

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_{iz}} + \frac{1}{C_{oil}}. \quad (2.27)$$

Між вузлами 1 і 2 включена горизонтальна гілка з адмітансом  $y_h$ ; від кожного вузла до землі — вертикальна гілка з адмітансом  $y_v$ . Адмітанси  $y_v$  і  $y_h$  мають ту саму структуру, що і в розділі 2.3, оскільки вони описують властивості рідини між електродами і не включають ємності електродів. Внаслідок симетрії схеми можна обмежитися тільки однією половиною.

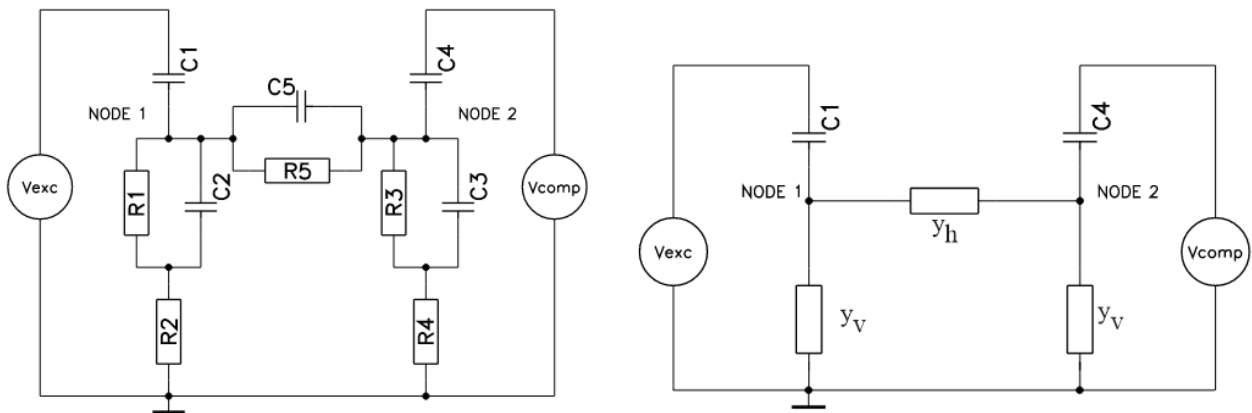


Рисунок 2.8 — Двовузлова еквівалентна схема вимірювального кола в режимі компенсації

Умова компенсації: струм через  $C_1$  у вузол 1 дорівнює нулю. Струм через  $C_1$  визначається різницею потенціалів між зовнішнім джерелом і вузлом 1 (2.28):

$$I_{C_1} = j\omega C_1 (V_{exc} - V_1) = 0 \Rightarrow V_1 = V_{exc}. \quad (2.28)$$

Умова  $I_{C_1} = 0$  означає, що потенціал вузла 1 точно дорівнює потенціалу джерела збудження: падіння напруги на  $C_1$  відсутнє. Це автоматично виключає  $C_1$  з усіх подальших рівнянь — ємність ізоляції і нафтовий шар на стороні збудження не впливають на результат вимірювання.

Рівняння Кірхгофа для вузла 1 при  $I_{C_1} = 0$  (сума адмітансних струмів) (2.29):

$$V_1 (y_v + y_h) - V_2 y_h = 0. \quad (2.29)$$

Звідси потенціал вузла 2 (2.30):

$$V_2 = V_1 \frac{y_v + y_h}{y_h}. \quad (2.30)$$

Комплексний коефіцієнт передачі (2.31):

$$K(j\omega) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{y_v + y_h}{y_h} = 1 + \frac{y_v}{y_h}. \quad (2.31)$$

Таким чином,  $K$  є відношенням повного адмітансу вузла 1 до адмітансу горизонтальної гілки. Ємність  $C_4$  на стороні компенсації залишається в колі, але в явному виразі для  $K$  не фігурує: вона входить у повний адмітанс вузла 2, однак при умові компенсації  $V_2$  визначається виключно через  $V_1$  і адмітанси середовища.

Зв'язок  $K$  із нафтовим шаром реалізується через адмітанс  $y_v$ . Вертикальна гілка містить паралельний RC-контур рідини ( $G_v$ ,  $C_v$ ) послідовно з  $R_{gnd}$ . При цьому  $C_v$  у реальній схемі є сумарною ємністю послідовного з'єднання власної ємності рідини і ємності нафтового шару  $C_{oil}$  (2.32):

$$\frac{1}{C_{v\,eff}} = \frac{1}{C_{v\,liq}} + \frac{1}{C_{oil}}. \quad (2.32)$$

Зміна товщини нафтового шару  $d$  змінює  $C_{oil} = \epsilon_0 \epsilon_{oil} \frac{S}{d}$ , що змінює  $C_{v\,eff}$ , що змінює  $y_v$  і, відповідно,  $K$ . На відміну від  $|Z|$ , де  $C_{oil}$  і  $C_{iz}$  входили разом у нерозрізную суму, у  $K$  ємність нафтового шару входить через  $y_v$ , а ємність ізоляції  $C_1$  повністю виключена умовою компенсації. Це і є механізм, що забезпечує чутливість  $K$  до товщини нафтового шару як самостійного параметра.

#### 2.4.2 Доведення відсутності виродження $K(j\omega)$

Виродженням називається ситуація, при якій  $K(j\omega) = const$  для всіх  $\omega$ , що означало б відсутність частотної інформації про параметри середовища.

Умова виродження — тотожне обнулення похідної  $\frac{dK}{d\omega} = 0$ .

Підставимо явні вирази для  $y_v$  і  $y_h$  (2.33):

$$K = 1 + \frac{G_v + j\omega C_v}{(1 + R_{gnd}(G_v + j\omega C_v))(G_h + j\omega C_h)}. \quad (2.33)$$

Диференціюючи по  $\omega$  і виділяючи уявну частину числівника похідної, отримуємо вираз, що є поліномом другого степеня по  $\omega$  (2.34):

$$\text{Im} \left\{ \frac{dK}{d\omega} \right\} \sim C_h C_v R_{gnd} \omega^2 + 2C_h C_v G_v R_{gnd} \omega + C_v G_h - C_h G_v (1 + R_{gnd} G_v). \quad (2.34)$$

Коефіцієнт при  $\omega^2$  дорівнює  $C_h C_v R_{gnd}$ . При будь-яких фізичних значеннях параметрів ( $C_h > 0$ ,  $C_v > 0$ ,  $R_{gnd} > 0$ ) цей коефіцієнт строго додатний, і поліном не може бути тотожно рівним нулю. Отже,  $\frac{dK}{d\omega} \neq 0$  і виродження  $K(j\omega)$  у константу є неможливим ні при яких фізичних параметрах середовища.

Граничні асимптоти  $K$  підтверджують частотну залежність (2.35), (2.36):

$$\omega \rightarrow 0: K \rightarrow 1 + \frac{G_v}{G_h(1+R_{gnd}G_v)}, \quad (2.35)$$

$$\omega \rightarrow \infty: K \rightarrow 1. \quad (2.36)$$

Різниця між асимптотами  $\Delta K = \frac{G_v}{G_h(1+R_{gnd}G_v)} \neq 0$  є ненульовою при будь-яких фізичних параметрах. Це означає, що між низькочастотною і високочастотною границями  $K$  завжди існує перехідна зона, у якій різні параметри середовища впливають на  $K$  з різними ваговими коефіцієнтами.

### 2.4.3 Ентропійний аналіз інформативності $K(j\omega)$

Для кількісної оцінки того, яку інформацію про кожен параметр середовища несе  $K(j\omega)$  і в яких частотних зонах, застосовується метод приросту ентропії, обґрунтований у розділі 2.3. Вихідною величиною є модуль  $|K(\omega)|$ . Алгоритм реалізовано у програмі, наведеній у додатку Б: для кожної точки частотної сітки генерується ансамбль  $N = 2000$  реалізацій параметрів  $\{G_v, C_v, G_h, C_h, R_{gnd}\}$  методом латинського гіперкубу, обчислюється  $|K|$  через умову компенсації з повної матриці  $4 \times 4$ , після чого визначається приріст ентропії для кожного параметра.

Глобальна ентропія  $H_{all}(\omega)$  (рис. 2.9) монотонно спадає від  $\sim 5.8$  біт на низьких частотах до  $\sim 4.7$  біт на 100 кГц. Це означає, що на низьких частотах розподіл  $|K|$  по ансамблю параметрів є рівномірнішим — значення  $|K|$  рівномірно заповнюють весь динамічний діапазон, і невизначеність максимальна. На високих частотах  $K \rightarrow 1$  для більшості реалізацій (асимптота

$\omega \rightarrow \infty$ ), тому розподіл звужується і ентропія спадає. Загалом  $H_{all}$  залишається в діапазоні 4.7–5.8 біт упродовж усього діапазону, що підтверджує:  $K$  несе суттєву інформацію про стан середовища на всіх частотах.

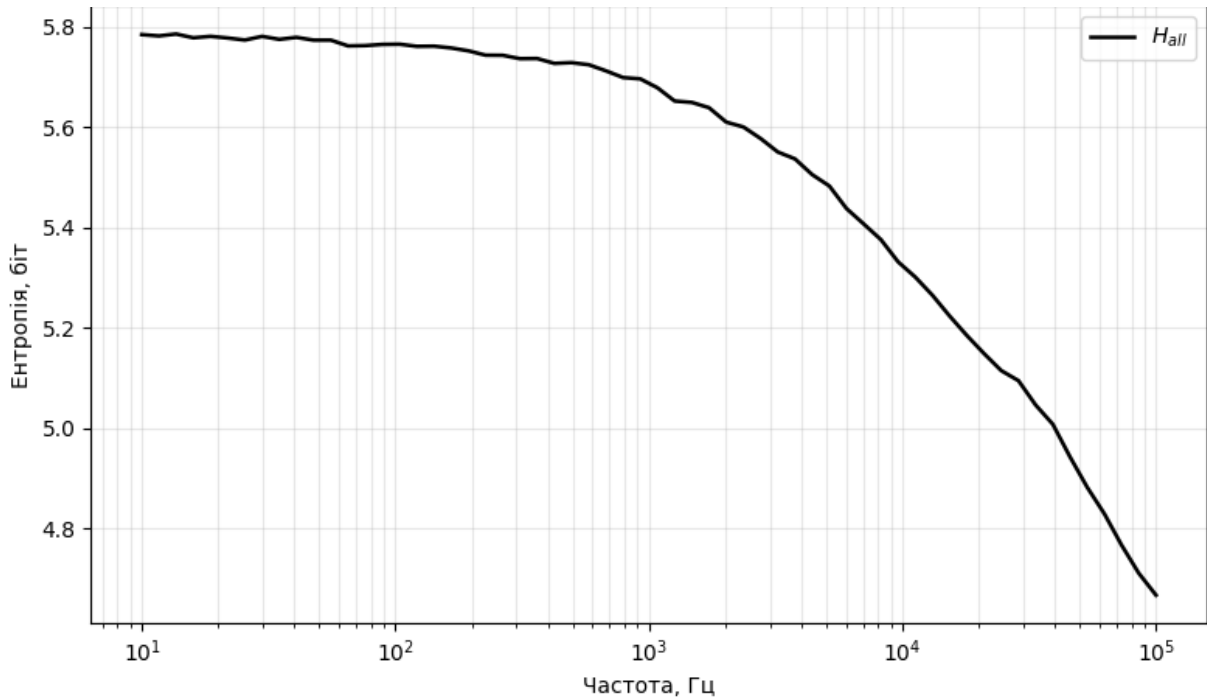


Рисунок 2.9 — Глобальна ентропія коефіцієнта передачі  $K(j\omega)$

Спектр приростів ентропії  $\Delta H_i(\omega)$  (рис. 2.10) виявляє якісно іншу картину порівняно з аналогічним спектром для  $|Z|$  з розділу 2.3.

Горизонтальна провідність  $G_h$  має від'ємний приріст  $\Delta H(G_h) \approx -0.55$  біт у низькочастотній зоні (10–1000 Гц), поступово зростаючи до нуля на 10–30 кГц. Від'ємне значення має конкретний фізичний зміст: фіксація  $G_h$  при вільних інших параметрах збільшує ентропію  $|K|$  порівняно з повним ансамблем. Це відбувається тому, що  $G_h$  входить у знаменник  $K$  через  $y_h = G_h + j\omega C_h$  — фіксація  $G_h$  знімає одну із зав'язок між параметрами, і розкид  $|K|$  від решти параметрів стає більшим. Фізично: горизонтальна провідність є «опорним» елементом (2.37):

$$K = 1 + \frac{y_v}{y_h}; \quad (2.37)$$

її фіксація усуває нормування і підсилює відносний вплив  $y_v$ .

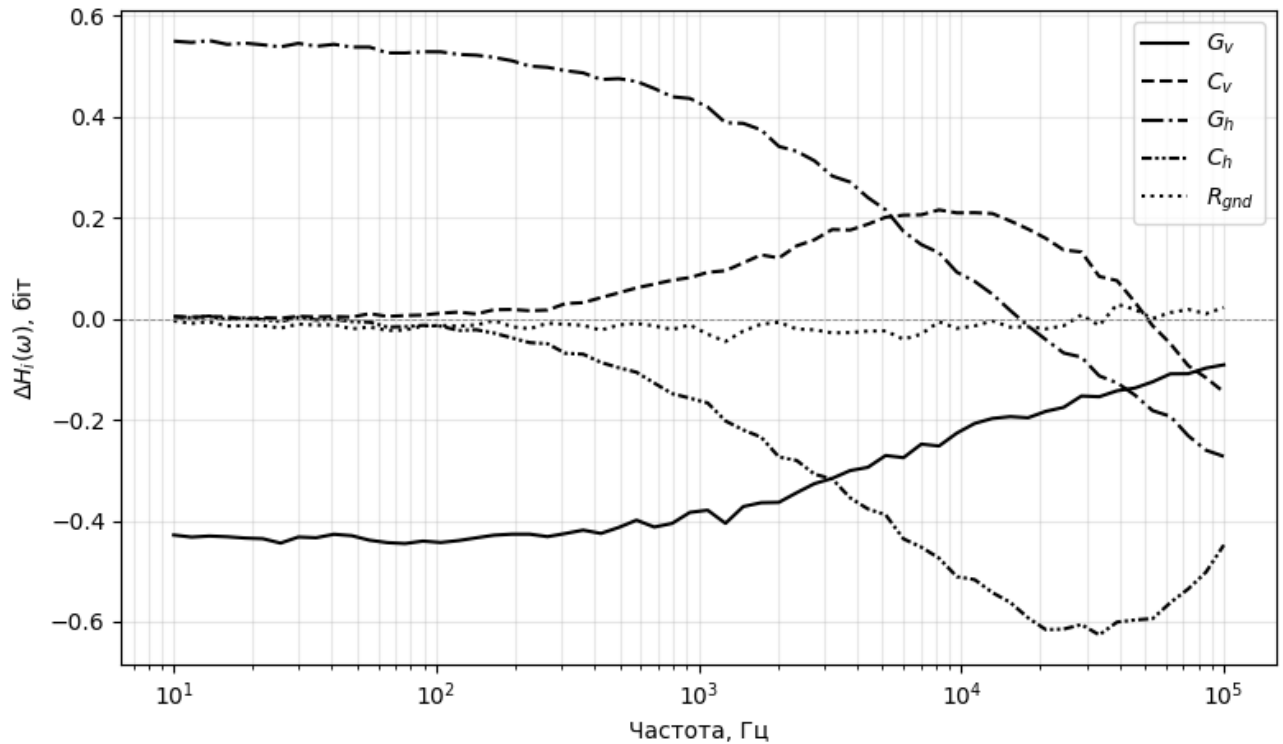


Рисунок 2.10 — Приріст інформативності параметрів через коефіцієнт  $K(j\omega)$

Вертикальна ємність  $C_v$  демонструє додатний приріст  $\Delta H(C_v) \approx +0.55$  біт у зоні 10–3000 Гц з поступовим спаданням і переходом у від'ємну зону на частотах вище 30 кГц. Це означає, що  $C_v$  є найбільш інформативним параметром  $K$  у низькочастотній і середньочастотній зонах: знання  $C_v$  суттєво зменшує невизначеність  $|K|$ . Оскільки у реальній схемі  $C_v$  містить ємність нафтового шару  $C_{oil}$ , цей результат є прямим кількісним підтвердженням того, що  $K(j\omega)$  несе інформацію про товщину нафтового шару в зоні 10–3000 Гц.

Вертикальна провідність  $G_v$  дає від'ємний приріст  $\Delta H(G_v) \approx -0.4$  біт у всьому низько- і середньочастотному діапазоні зі зростанням за абсолютним значенням до  $-0.5$  біт на 10–50 кГц. Характер від'ємного приросту аналогічний до  $G_h$ :  $G_v$  входить у чисельник  $K$  через  $y_v$  і при фіксації розширює ефективний діапазон варіації  $K$  від інших параметрів.

Горизонтальна ємність  $C_h$  і опір витоку  $R_{gnd}$  мають приріст  $\Delta H$ , близький до нуля в усьому діапазоні частот. Для  $C_h$  це пояснюється тим, що на низьких частотах  $j\omega C_h \ll G_h$  і  $C_h$  практично не входить у  $y_h$ ; на високих частотах  $C_h$

стає вагомим, але одночасно  $C_v$  теж зростає в чисельнику і взаємодія між ними нівелює індивідуальний вплив  $C_h$ . Для  $R_{gnd}$  ситуація інша:  $R_{gnd}$  входить у  $y_v$  через добуток  $R_{gnd} \cdot (G_v + j\omega C_v)$  у знаменнику. Оскільки  $G_v$  варіює на чотири порядки (від  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  См), а  $R_{gnd}$  лише на один (від 500 до 5000 Ом), варіація  $G_v$  повністю перекриває вплив  $R_{gnd}$  на  $y_v$ . Фіксація  $R_{gnd}$  при вільному  $G_v$  практично не зменшує розкид  $|K|$ , тому  $\Delta H(R_{gnd}) \approx 0$ . Це означає, що  $K(j\omega)$  у даній конфігурації не дозволяє визначити  $R_{gnd}$  як самостійний параметр.

Розкид  $|K(\omega)|$  по ансамблю (рис. 2.11) показує, що при варіації параметрів у фізично допустимих межах  $|K|$  змінюється від  $\sim 1$  до  $\sim 15$  на низьких частотах і від  $\sim 1$  до  $\sim 3$  на 100 кГц. Медіана  $|K|$  залишається поблизу 1.1–1.5 у всьому діапазоні, тоді як 90-й перцентиль на порядок вищий. Це означає, що відображення «параметри середовища  $\rightarrow K(j\omega)$ » є суттєво нелінійним: рівномірний розподіл параметрів у логарифмічному просторі дає вкрай нерівномірний розподіл  $|K|$ .

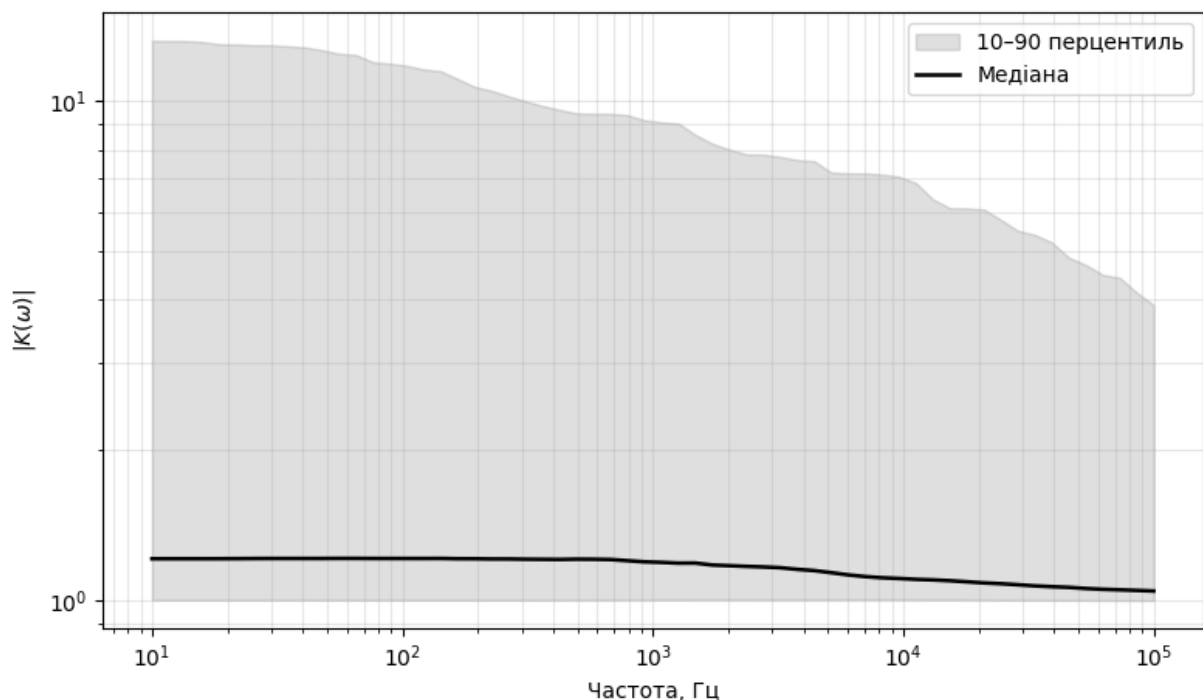


Рисунок 2.11 — Діапазон значень  $|K(\omega)|$  (10–90 перцентиль) по ансамблю параметрів середовища

Зворотна задача — визначення параметрів за вимірним  $K(j\omega)$  — є принципово нелінійною, що обґрунтовує необхідність нелінійного методу ідентифікації. Детальний аналіз обмежень і вибір методу ідентифікації розглядаються у розділі 2.5.

## 2.5. Аналітичне обґрунтування робочого діапазону комп'ютерної вимірювальної системи на основі апаратних обмежень

Для практичного проектування приладу необхідно встановити фізичні межі, у яких система здатна ідентифікувати товщину шару нафти. Попередні розділи довели, що  $K(j\omega)$  несе необхідну інформацію і не вироджується. Цей розділ визначає апаратні обмеження, що задають робоче вікно методу: нижню межу (режим закорочування при малих товщинах) і верхню межу (режим насичення при великих товщинах).

### 2.5.1 Умова балансу та безрозмірний параметр $\alpha$

Принцип компенсації і виведення  $K(j\omega)$  детально розглянуті в розділі 2.4. Використовуємо отримане там рівняння балансу вузла 1 при умові нульового струму через  $C1$ : Для аналізу апаратних обмежень зручно ввести безрозмірний параметр (2.38):

$$\alpha = \frac{y_v}{y_h}, \quad (2.38)$$

тоді (розділ 2.4) (2.39):

$$K = \frac{V_2}{V_1} = 1 + \alpha, \quad (2.39)$$

а необхідна напруга компенсації (2.40):

$$V_{comp} = K \cdot V_{exc} = (1 + \alpha) \cdot V_{exc}. \quad (2.40)$$

Оскільки  $\alpha$  є комплексним числом ( $y_v$  і  $y_h$  містять як активні, так і реактивні компоненти), апаратна частина має забезпечити двовимірне регулювання — підбір як амплітуди, так і фази  $V_{comp}$ . Граничні значення  $\alpha$  визначають два режими обмеженості, розглянуті нижче.

### 2.5.2 Нижня межа робочого вікна: ефект закорочування

При малій товщині шару нафти  $h \rightarrow 0$  вертикальна провідність зростає:  $y_v \rightarrow \infty$ ,  $\alpha \rightarrow \infty$ . Необхідна  $V_{comp} = (1 + \alpha) \cdot V_{exc}$  стрімко зростає. Апаратним обмеженням є максимальна вихідна напруга ЦАП — типowo 10 В. Якщо при  $V_{exc} = 1$  В розрахункова  $V_{comp}$  перевищує 10 В, баланс стає апаратно недосяжним.

З графіка (рис. 2.12) нижня межа робочого вікна відповідає  $h \approx 2.2$  см ( $0.02L$  для бази  $L = 1$  м). «Мертва зона» при  $h < 0.02L$  — наслідок не законів згасання поля, а енергетичної обмеженості генератора: при надто тонкому шарі нафти він фізично не здатний видати необхідну  $V_{comp}$  для подолання ефекту закорочування через провідну воду.

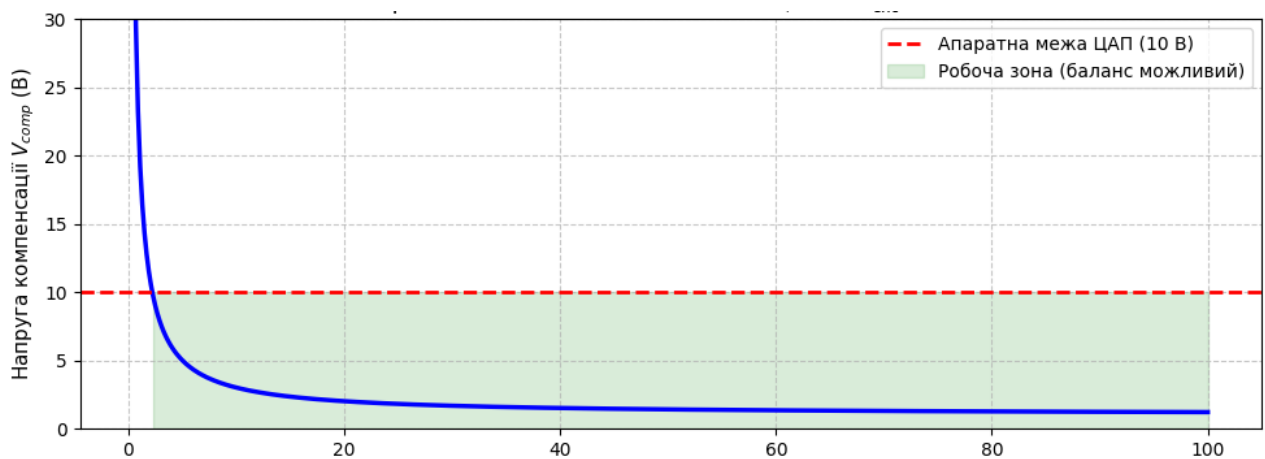


Рисунок 2.12 — Залежність необхідної напруги компенсації від товщини шару  $h$ . Робоча зона — нижче апаратної межі ЦАП (10 В)

Це накладає вимогу на проектування датчика: габаритний розмір  $L$  має обиратися так, щоб мінімально очікувана товщина нафтового шару не потрапила в зону  $h < 0.02L$ .

### 2.5.3 Верхня межа робочого вікна: ефект насичення

При великій товщині шару нафти  $h \rightarrow \infty$  вертикальний адмітанс  $y_v \rightarrow 0$ ,  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $K \rightarrow 1$ .  $V_{comp}$  наближається до  $V_{exc}$ , і залишковий струм витоку через вертикальну гілку (2.41):

$$|I_{leak}| = |y_v| \cdot |V_{exc}| = \sigma_{oil} \frac{S}{h} |V_{exc}|, \quad (2.41)$$

де  $\sigma_{oil} \sim 10^{-10}$  См/м — питома провідність нафти [115],  $S = 0.01$  м<sup>2</sup> — ефективна площа електрода. Критерієм працездатності є здатність нуля-індикатора (підсилювач з JFET-входом, наприклад TL082) виявити цей струм. Апаратний шумовий поріг — близько 20 пА. При  $I_{leak} < 20$  пА прилад фіксує «статичний нуль» і втрачає чутливість до дна.

З графіка (рис. 2.13) верхня межа відповідає  $h \approx 50$  см =  $0.5L$ , що збігається з правилом теорії зондування: ефективна глибина проникнення поля поверхневих електродів не може перевищувати  $\frac{L}{2}$ .

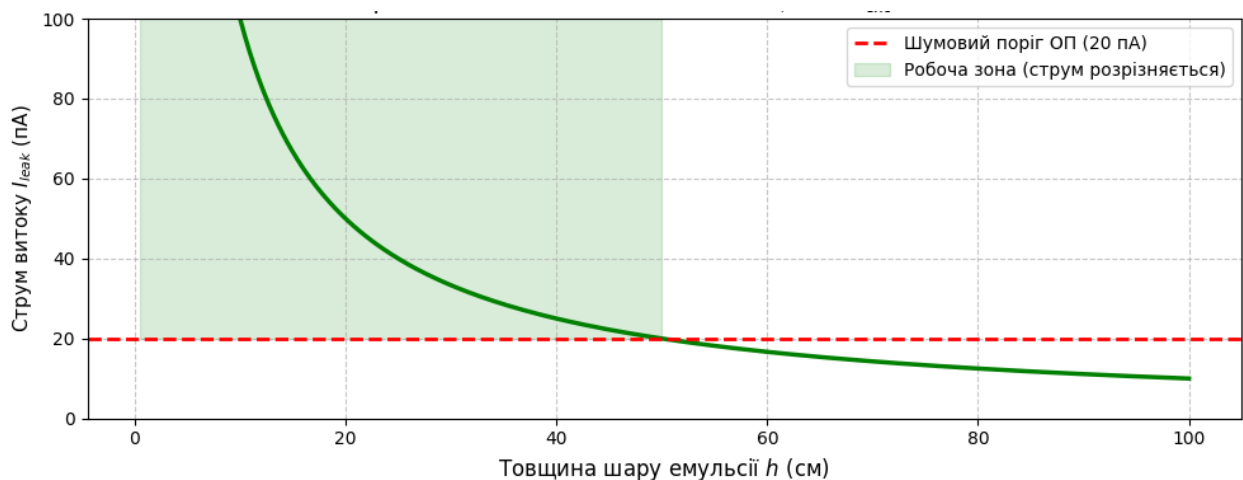


Рисунок 2.13 — Залежність струму витіку від товщини шару  $h$ . Робоча зона — вище шумового порогу підсилювача (20 пА)

Апаратна модель підтвердила це правило незалежно.

#### 2.5.4 Параметри числового моделювання

Моделювання виконано з такими базовими константами:  $L = 1$  м;  $\sigma_{oil} \sim 10^{-10}$  См/м;  $S = 0.01$  м<sup>2</sup>;  $G_h = 10^{-3}$  См. Апаратні ліміти:  $V_{comp,max} = 10$  В;  $I_{min} = 20$  пА. Нижня межа розрахована при  $V_{exc} = 1$  В, верхня — при  $V_{exc} = 10$  В. Вісь товщини  $h$  — у сантиметрах. Робоче вікно:  $0.02L < h < 0.5L$ , тобто від 2.2 см до 50 см для метрової бази.

### 2.5.5 АЧХ та ФЧХ коефіцієнта передачі для різних товщин нафтового шару

У режимі глибокого півпростору ( $h \gg L$ ) вплив провідного дна нівелюється і вертикальний адмітанс визначається виключно нафтовим шаром. Як показано в розділі 2.4, умова компенсації  $I_{C_1} = 0$  виключає  $C_{iz}$  з рівняння, і (2.42):

$$y_v \rightarrow j\omega C_{oil} = \frac{j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{oil} S}{h}. \quad (2.42)$$

Підставляючи в  $K = 1 + \frac{y_v}{y_h}$  (2.43):

$$K(j\omega) = 1 + \frac{j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{oil} S}{h \cdot y_h}. \quad (2.43)$$

Для наочної оцінки апаратних обмежень побудовано АЧХ ( $|V_{comp}|$ ) та ФЧХ (фазовий зсув  $K$ ) для трьох характерних товщин шару:  $h = 1$  см, 4 см і 10 см. Амплітуда обмежена рівнем 10 В — фізична межа вихідного каскаду ЦАП.

З графіка (рис. 2.14) випливає кілька важливих висновків. По-перше, для  $h = 1$  см амплітуда  $|V_{comp}|$  перевищує межу ЦАП (10 В) вже при частотах нижче  $\sim 8$  кГц. Це означає, що для тонкого шару нафти компенсація можлива лише у вузькому високочастотному вікні. По-друге, зі збільшенням товщини шару нижня частотна межа робочого вікна зсувається вліво: при  $h = 4$  см перетин з межею ЦАП відбувається близько 50 кГц, при  $h = 10$  см амплітуда залишається нижче 10 В у всьому діапазоні від 100 Гц до 1 МГц.

ФЧХ показує, що у всьому діапазоні товщин фазовий зсув  $K$  є значним (від  $-90^\circ$  на низьких частотах до  $\sim -10^\circ$  на 1 МГц). Це підтверджує необхідність фазового регулювання  $V_{comp}$ , на яку вказує вираз  $K = 1 + j\omega C_n / y_h$ : при переважно ємнісному  $y_v$  фаза  $K$  суттєво відхиляється від нуля. Криві для різних  $h$  розходяться в середньочастотній зоні 10–100 кГц, що є робочим діапазоном для розрізнення товщин — саме там фазові залежності максимально відрізняються одна від одної.

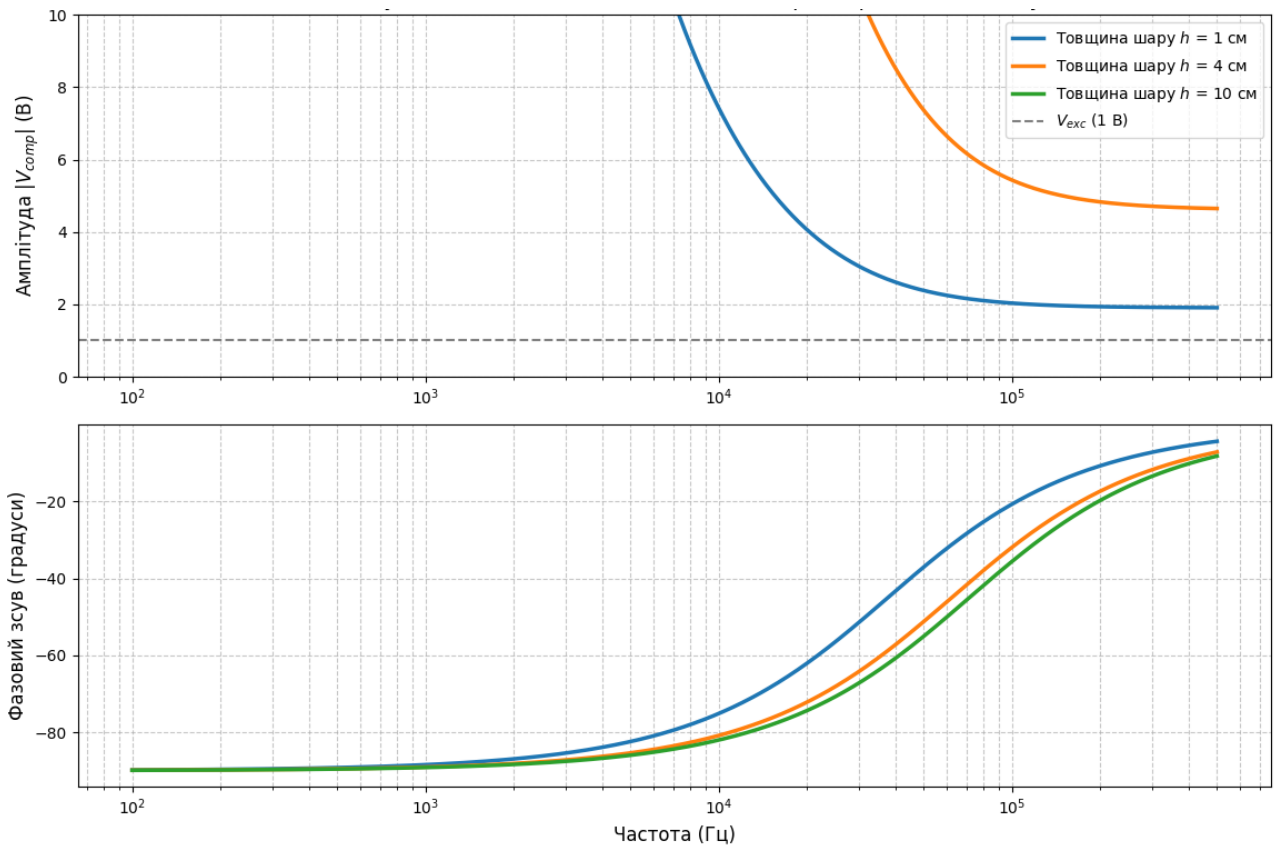


Рисунок 2.14 — АЧХ і ФЧХ коефіцієнта передачі  $K$  для товщин нафтового шару  $h = 1, 4, 10$  см.

Таким чином, вибір робочих частот для конкретного приладу має здійснюватися з урахуванням очікуваного діапазону товщин нафтового шару: для тонких шарів ( $h \sim 1 - 4$  см) необхідне вимірювання на частотах вище 50 – 100 кГц, де амплітуда  $V_{comp}$  не виходить за межу ЦАП; для товстих шарів ( $h > 10$  см) доступний увесь частотний діапазон.

## Висновки до розділу 2

1. У розділі обґрунтовано інформативність параметрів поверхневого електричного зондування копланарними ємнісними ізольованими електродами для аналізу багат шарового середовища типу «нафта–емульсія–вода». Показано, що діелектрична ізоляція електродів усуває електрохімічну

взаємодію з середовищем і переводить вимірювання у режим ємнісного зв'язку, придатний для багаточастотного зондування.

2. Побудовано електрофізичну макромодель у вигляді еквівалентної RC-мережі, що описує горизонтальні та вертикальні шляхи поширення струму в шаруватій рідині. На її основі встановлено, що модуль імпедансу  $|Z|$  залежить від п'яти ключових параметрів ( $G_v$ ,  $C_v$ ,  $G_h$ ,  $C_h$ ,  $R_{gnd}$ ), причому інформативність цих параметрів є суттєво частотно-залежною.

3. За результатами кореляційного аналізу, глобального аналізу чутливості та ентропійного підходу показано, що одночастотне вимірювання не забезпечує повної ідентифікації стану середовища. Інформація про параметри розподілена по частотному спектру нерівномірно, а істотна частина впливів має нелінійний характер і реалізується через взаємодію параметрів, що обґрунтовує необхідність багаточастотного вимірювання.

4. Встановлено обмеження прямого вимірювання  $|Z|$ : ємність нафтового шару та ємність ізоляції входять у сигнал через нероздільне послідовне поєднання, тому товщина нафтового шару не може бути визначена як самостійний параметр. Для подолання цієї недовизначеності обґрунтовано перехід до компенсаційного принципу вимірювання і введення комплексного коефіцієнта передачі  $K(j\omega)$ , який є чутливим до параметрів середовища та визначає робоче вікно вимірювальної системи.

## РОЗДІЛ 3

### ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БАГАТОШАРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

#### 3.1. Дискретна сіткова модель багат шарового середовища та електродної системи

##### 3.1.1 Обґрунтування необхідності математичної моделі

Розробка нейромережевого ідентифікатора параметрів багат шарового рідинного середовища потребує інструменту, здатного для будь-якої заданої комбінації фізичних параметрів середовища відтворити електричний відгук вимірювальної системи з точністю, що не поступається реальному вимірюванню. Таким інструментом є математична модель, яка виконує роль цифрового двійника вимірювальної установки [128, 129].

Отримання необхідного масиву пар «параметри середовища → електричний відгук» шляхом натурального фізичного експерименту є практично неможливим з кількох причин. По-перше, реальний промисловий резервуар-відстійник не допускає контрольованого й відтворюваного задання довільних комбінацій товщин і провідностей шарів: у виробничих умовах параметри рідини змінюються повільно і залежать від зовнішніх технологічних факторів. По-друге, систематичне варіювання параметрів у широкому діапазоні вимагало б тисяч годин вимірювань за умов постійного контролю складу середовища. По-третє, точне незалежне визначення істинних значень параметрів потребувало б інвазивних методів відбору проб, що суперечить концепції безконтактного вимірювання.

Таким чином, єдиним практично реалізованим шляхом є побудова математичної моделі електричного середовища резервуара, достатньо близької до реального фізичного об'єкта. Для будь-якої заданої комбінації параметрів середовища модель розраховує комплексний коефіцієнт передачі  $K(\omega)$  — той самий сигнал, який реєструє фізична вимірювальна установка. Вимоги до

моделі визначаються її призначенням: вона має бути одночасно фізично адекватною та обчислювально ефективною. Критерієм достатності точності у всіх чисельних оцінках є рівень апаратного шуму (3.1):

$$\delta_{ADC} = \frac{1}{2^{12}} \approx 2.44 \cdot 10^{-4}, \quad (3.1)$$

що відповідає роздільній здатності 12-бітного АЦП.

### 3.1.2 Фізична структура об'єкта моделювання

Об'єктом моделювання є поперечний переріз промислового резервуара-відстійника, у якому відбувається гравітаційне розшарування водонафтового флюїду. У вертикальному перерізі формуються три зони, принципово відмінні за електрофізичними властивостями: верхній діелектричний шар зневодненої нафти, проміжний шар водонафтової емульсії та нижній шар пластової води — провідного електроліту.

Електричні властивості кожного шару описуються комплексною діелектричною проникністю (3.2):

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon' - \frac{j\sigma}{\varepsilon_0\omega}, \quad (3.2)$$

де  $\varepsilon'$  — дійсна частина проникності;  $\sigma$  — питома провідність, См/м;  $\omega$  — кутова частота збудження, рад/с;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — електрична стала [99].

Зневоднена нафта є неполярним діелектриком ( $\varepsilon_r \approx 2,2$ ;  $\sigma \approx 10^{-12}$  См/м). Пластова вода являє собою висококонцентрований електроліт ( $\varepsilon_r \approx 80$ ;  $\sigma$  до 5 См/м). Проміжний емульсійний шар характеризується ефектом міжфазної поляризації Максвелла–Вагнера, що породжує виражену частотну дисперсію та аномально велику макроскопічну ємність [115]. Саме контраст електрофізичних властивостей між шарами є фізичною основою електрометричного зондування.

Вимірювальна система складається з чотирьох копланарних ємнісних ізольованих електродів: двох зовнішніх збуджувальних, до яких прикладається змінна напруга  $\pm V_0$ , та двох внутрішніх вимірювальних, на яких реєструється потенціал за умови нульового струму. Комплексний коефіцієнт передачі (3.3)

несе повну інформацію про розподіл електричного поля в середовищі і, відповідно, про параметри шарів [116].

$$K(\omega) = \frac{U_{\text{comp}}}{U_{\text{exc}}} \quad (3.3)$$

### 3.1.3 Дискретна сіткова модель та імпеданси елементарних ланок

Побудова адекватної просторової моделі зумовлена двома фундаментальними особливостями задачі. По-перше, силові лінії поля копланарних ємнісних ізольованих електродів мають складну криволінійну форму, що залежить від геометрії системи та просторового розподілу властивостей по вертикалі [99, 106]. По-друге, параметри середовища різко змінюються на міжфазних межах. Ці чинники виключають застосування схем із зосередженими параметрами і вимагають просторово розподіленої моделі. Побудована в роботі матрична модель спирається на підхід, апробований автором у [116].

Поперечний переріз резервуара апроксимується двовимірною прямокутною сіткою вузлів розміром  $N_x \times N_y$  з рівномірним кроком  $L$  між вузлами. Кожному вузлу  $(x, y)$  відповідає лінійний індекс (3.4):

$$i = y \cdot N_x + x, \quad x \in [0, N_x - 1], \quad y \in [0, N_y - 1]. \quad (3.4)$$

Кожна пара сусідніх вузлів з'єднується елементарним комплексним імпедансом, що імітує електричні властивості відповідної ділянки середовища. Для однорідного об'ємного середовища (вода, нафта, повітря) імпеданс RC-ланки при кроці сітки  $L$  визначається як (3.5):

$$Z(\omega) = \frac{R}{1 + j\omega RC}, \quad (3.5)$$

де  $R = \frac{1}{\sigma \cdot L}$  — активний опір ділянки, Ом;  $C = \varepsilon^0 \cdot \varepsilon_r \cdot L$  — ємність ділянки, Ф. Паралельна RC-структура коректно описує одночасну наявність активних і реактивних складових струму: при  $\omega \rightarrow 0$  імпеданс прямує до  $R$ , при  $\omega \rightarrow \infty$  — до нуля.

Фазова карта  $phase\_map[y, x]$  визначає тип речовини в кожному вузлі. Нафтовий шар займає верхні  $oil\_thickness$  рядків ( $y = 0 \dots oil\_thickness - 1$ ).

Положення межі нафта–вода кодує товщину нафтового шару  $d = oil\_thickness \cdot L$ , м.

На межі між вузлами двох різних шарів адмітанс ланки визначається за правилом гармонічного усереднення, що відповідає двом послідовно включеним провідностям половин ланки (3.6):

$$Y_{border} = \frac{2 \cdot Y_1 \cdot Y_2}{Y_1 + Y_2}. \quad (3.6)$$

Імпеданс металеві стінки резервуара описується через ємність подвійного електричного шару  $C_{dl}$  на межі метал–електроліт (3.7):

$$Z_{wall}(\omega) = \frac{R_{wall}}{1 + j\omega R_{wall} C_{dl}}, \quad (3.7)$$

де  $R_{wall} = 0,01$  Ом — малий активний опір стінки;  $C_{dl} = C_{dl/m^2} \cdot L^2$  — ємність подвійного шару для ділянки площею  $L^2$ .

Ізоляційне тефлонове покриття вимірювальних електродів моделюється аналогічною RC-структурою тонкого шару товщиною  $t$  (3.8):

$$Z_{coat}(\omega) = \frac{R_{coat}}{1 + j\omega R_{coat} C_{coat}}, \quad (3.8)$$

де  $R_{coat} = \frac{1}{\sigma_{coat} \cdot L}$ ;  $C_{coat} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{rcoat} \cdot \frac{L^2}{t}$ . Це забезпечує гальванічну розв'язку при збереженні ємнісного струму ( $\sim 1$  нФ на електрод).

Таблиця 3.1 — Електричні параметри речовин моделі

Речовина	$\sigma$ , См/м	$\epsilon_r$	Модель імпедансу
Вода (електроліт)	1,0	80,0	RC-паралель (об'ємний)
Нафта	$10^{-12}$	2,2	RC-паралель (об'ємний)
Повітря	$10^{-14}$	1,0	RC-паралель (об'ємний)
Тефлонова ізоляція	$10^{-12}$	2,1	RC тонкого шару
Металева стінка	$10^4$	1,0	RC через подвійний шар
Емульсія	0,005	$\approx 5-205$	Дебаєвська релаксація

### 3.1.4 Геометрія електродної системи та граничні умови

Граничні умови задаються відповідно до фізичної конфігурації резервуара. Металеві стінки ( $x = 0$  і  $x = N_x - 1$ ) та дно ( $y = N_y - 1$ ) є провідниками з імпедансом  $Z_{wall}$  до нульового потенціалу. Для кожного крайового вузла  $i$  до діагональної компоненти матриці адмітансів додається шунтуючий внесок (3.9):

$$Y[i, i] = Y[i, i] + \frac{1}{Z_{wall}}. \quad (3.9)$$

Два зовнішніх збуджувальних електроди розміщені симетрично у вузлах верхнього рядка ( $y = 0$ ). Перший електрод збуджується напругою  $+V_0$ , другий —  $-V_0$  (диференційна схема). До вузла збуджувального електрода підключається імпеданс  $Z_{elec}$ , через який вводиться збуджувальний струм (3.10):

$$Y[i, i] = Y[i, i] + \frac{1}{Z_{elec}}; I[i] = I[i] \pm \frac{V_0}{Z_{elec}}, \quad (3.10)$$

де  $Z_{elec} = \frac{R_{elec}}{1 + j\omega R_{elec} C_{elec}}$ ;  $R_{elec} = 10^9$  Ом — опір ізоляції;  $C_{elec} = 10^{-9}$  Ф — ємність зв'язку.

Внутрішні вимірювальні електроди залишаються звичайними внутрішніми вузлами з нульовою правою частиною (умова нульового зовнішнього струму). Вимірювальна (референсна) точка розміщена симетрично між збуджувальними електродами; відносно неї обчислюється просторовий профіль потенціалу верхнього рядка, що забезпечує диференційне вимірювання.

Зберігання у форматі розріджених матриць (CSR) скорочує витрати пам'яті з  $O(N^2)$  до  $O(N)$ : для  $N = 62500$  структура розміром 60 ГБ перетворюється на масив менше 10 МБ. Розв'язання розрідженої системи скорочує час симуляції одного стану до часток секунди.

## 3.2. Формування матриці адмітансів

### 3.2.1 Структура матриці вузлових адмітансів

Центральним математичним об'єктом моделі є матриця вузлових адмітансів  $Y \in \mathbb{C}^{(N \times N)}$ , де  $N = N_x \cdot N_y$  — загальна кількість вузлів сітки. Діагональний елемент  $Y_{ii}$  дорівнює сумі всіх адмітансів гілок, що з'єднують вузол  $i$  з його сусідами; позадіагональний елемент  $Y_{ij} = -Y_{\text{гілки}}$  між  $i$  та  $j$  є ненульовим лише для безпосередньо суміжних вузлів. Матриця є симетричною ( $Y_{ij} = Y_{ji}$ ) — наслідок принципу взаємності; будь-яке порушення симетрії однозначно вказує на помилку в реалізації.

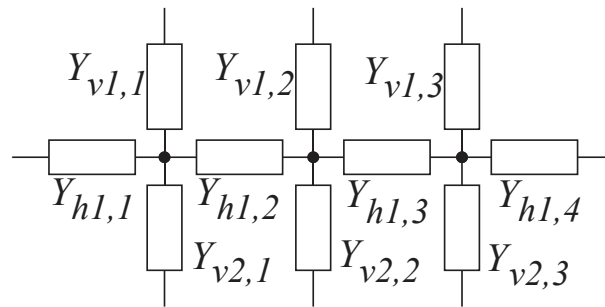


Рисунок 3.1 — Фрагмент схеми моделі

Алгоритм формування матриці є послідовним обходом усіх вузлів сітки з урахуванням їхньої зонної належності. Для горизонтальної гілки між вузлами  $(x, y)$  і  $(x+1, y)$  адмітанс (3.11):

$$Y_h = (\sigma_{\text{local}} + j \omega \varepsilon_0 \varepsilon'_{\text{local}}) \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (3.11)$$

де локальні параметри визначаються зоною, якій належить середина гілки. Для вертикальних гілок  $\Delta x$  і  $\Delta y$  переставляються місцями.

Для кожної пари сусідніх вузлів  $(i, j)$  внески до матриці (3.12):

$$Y[i, i] = Y[i, i] + Y_{ij}, \quad Y[i, j] = Y[i, j] - Y_{ij}. \quad (3.12)$$

Вузли на міжшарових межах опрацьовуються за правилом гармонічного усереднення (дві послідовні напівланки різних середовищ) (3.13):

$$Y_{\text{border}} = \frac{2Y_1Y_2}{Y_1+Y_2}. \quad (3.13)$$

Граничні вузли стінок та збуджувальних електродів опрацьовуються методом виключення: діагональний елемент  $Y_{ii}$  доповнюється шунтуючою провідністю до нуля ( $\frac{1}{Z_{\text{wall}}}$  або  $\frac{1}{Z_{\text{elec}}}$ ), а відповідний зовнішній струм вноситься у вектор правої частини. Це фіксує потенціал вузла без порушення симетрії матриці.

Фторопластовий ізоляційний шар електродів має суто ємнісний адмітанс (3.14):

$$Y_{\text{ptfe}} = j \omega \varepsilon_0 \varepsilon'_{\text{ptfe}} \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (3.14)$$

що формує ємнісний бар'єр між металевими електродами і рідиною. Реактанс ізоляції одного електрода змінюється від  $\sim 1,9$  МОм (10 Гц) до  $\sim 190$  Ом (100 кГц), визначаючи діапазон струму збудження від одиниць нА до 5,25 мА.

### 3.2.2 Розріджена алгебра та обчислювальна ефективність

При кроці сітки  $L = 20$  мм і розрахунковій області  $500 \times 500$  мм число вузлів  $N = 625000$ . Щільна матриця  $Y$  потребувала б  $\sim 60$  ГБ пам'яті і часу розв'язання  $O(N^3)$ . Цей бар'єр долається переходом до алгебри розріджених матриць: оскільки кожен вузол взаємодіє лише з чотирма сусідами, у кожному рядку матриці є не більше п'яти ненульових елементів.

Система лінійних алгебраїчних рівнянь записується у матричній формі (3.15):

$$A \cdot V = B, \quad (3.15)$$

де  $A$  — розріджена комплексна матриця адмітансів  $N \times N$ ;  $V$  — вектор невідомих потенціалів у вузлах;  $B$  — вектор зовнішніх струмів. Матриця є діагонально-домінантною і симетричною.

### 3.2.3 Методи розв'язання та передобумовлення

Для симетричних позитивно напіввизначених систем найефективнішим є метод спряжених градієнтів (CG) [130], що потребує на кожній ітерації лише множення розрідженої матриці на вектор (складність  $O(nnz) \sim O(5N)$ ). Кількість ітерацій пропорційна (3.16):

$$\sqrt{\kappa(Y)} \cdot \ln\left(\frac{2}{\delta}\right), \quad (3.16)$$

де  $\kappa(Y)$  — число обумовленості матриці;  $\delta$  — задана точність.

Для стабілізації збіжності на всіх робочих частотах застосовується діагональне передобумовлення Якобі: рядки системи нормуються на відповідний діагональний елемент  $Y_{ii}$ . Ця процедура є ефективною завдяки властивості матриць вузлових адмітансів:  $Y_{ii}$  завжди дорівнює сумі модулів позадіагональних елементів рядка  $i$  є найбільшим елементом. Передобумовлення скорочує кількість ітерацій CG на порядок.

На практиці, для матриць порядку  $N \leq 15\,000$ , застосовується прямий розв'язувач LU-факторизації (*scipy.sparse.linalg.spsolve*), що гарантує точний результат за один прохід без накопичення похибок ітерацій [131]. Для більших систем ( $N > 15\,000$ ) перевагу має ітераційний CG з передобумовленням.

### 3.2.4 Частотна декомпозиція матриці та розрахунок коефіцієнта передачі

Декомпозиція матриці за частотою (3.17):

$$Y(\omega) = G + j \cdot \omega \cdot C, \quad (3.17)$$

де  $G$  — матриця активних провідностей;  $C$  — матриця ємностей. Обидві матриці залежать лише від просторового розподілу параметрів  $(d, \sigma)$ , але не від частоти. Тому для фіксованих  $(d, \sigma)$  матриці  $G$  і  $C$  будуються одноразово, після чого для кожної робочої частоти лише масштабується  $C$  і складається з  $G$ . Зміна параметрів  $(d, \sigma)$  зводиться до локального оновлення елементів  $G$  і  $C$  у відповідних рядках без перебудови всієї структури [116, 114].

Для суміжних частот логарифмічної сітки розв'язок попередньої частоти використовується як початкове наближення (warm start), що скорочує обчислювальну вартість у 3–5 разів порівняно з незалежним розв'язанням на кожній частоті [106].

Результатом розв'язання є вектор комплексних потенціалів  $V$  у всіх вузлах. Комплексний коефіцієнт передачі обчислюється як (3.18):

$$K(\omega) = \frac{V_{\text{comp}}(\omega)}{V_{\text{exc}}}, \quad (3.18)$$

де  $V_{\text{comp}}$  — потенціал вимірювального електрода (за умови нульового зовнішнього струму через нього),  $V_{\text{exc}}$  — амплітуда збуджувальної напруги. Безрозмірне комплексне число  $K(\omega)$  є функцією параметрів шарів ( $d, \sigma$ ) і частоти  $\omega$ , і є вихідним сигналом моделі на кожній з робочих частот діапазону 10 Гц–100 кГц.

### 3.2.5 Верифікація моделі

Верифікація сформованої матриці виконується на двох граничних конфігураціях, для яких існують аналітичні або апроксимаційні оцінки.

При  $d = 0$  (провідна вода безпосередньо під ізоляцією) аналітичне значення  $|K|$  для симетричної геометрії становить  $\sim 0,175$ ; числова модель дає  $0,171$ – $0,176$  залежно від кроку сітки (розбіжність  $< 3\%$ ).

При  $d = d_{\text{max}}$  (суцільний нафтовий шар по всій висоті)  $|K|$  прямує до  $\sim 0,23$ , що відповідає геометричному коефіцієнту ємності в середовищі з  $\epsilon_{\text{roil}} \approx 2,2$ ; числова модель дає  $0,226$  ( $< 2\%$  від аналітичного значення).

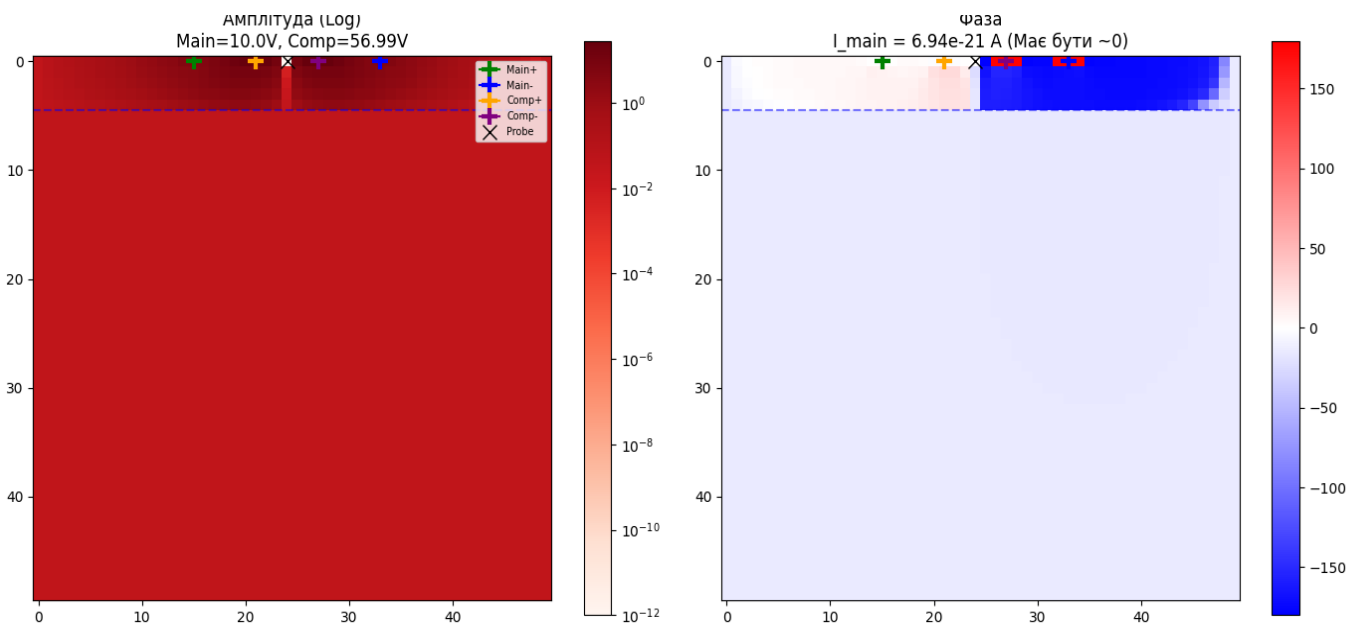


Рисунок 3.2 — Результат моделювання напруги у вузлах розробленої моделі резервуара із багат шаровим розподілом рідини

Збіг у обох граничних випадках є необхідною умовою прийняття моделі як коректної основи для подальшого використання. Додатково перевіряється

симетрія матриці  $Y_{ij} = Y_{ji}$ : будь-яке її порушення є однозначним індикатором помилки в опрацюванні міжшарових гілок або граничних вузлів.

### 3.3. Структура часового вхідного тензора нейромережі

#### 3.3.1 Динаміка процесу розшарування та обґрунтування експоненційної моделі

Процес гравітаційного розділення нафтоводяної емульсії у резервуарі-відстійнику є динамічним: товщина нафтового шару  $d$  поступово зростає від нуля до рівноважного значення  $d_\infty$ , а його швидкість визначається балансом між силою плавучості крапель нафти та в'язким опором середовища [132]. Фізичний аналіз цього балансу приводить до рівняння першого порядку (3.19):

$$\frac{dd}{dt} = k \cdot (d_\infty - d), \quad (3.19)$$

де  $k$  — кінетичний коефіцієнт розшарування,  $\text{хв}^{-1}$ , що залежить від температури, обводнення та дисперсності емульсії. Розв'язок цього рівняння при початковій умові  $d(0) = 0$  має вигляд (3.20):

$$d(t) = d_\infty \cdot (1 - e^{-k \cdot t}). \quad (3.20)$$

Ця форма є математичним еквівалентом процесу заряджання RC-кола, де роль ємності відіграє резервуар, а роль опору — в'язкість середовища. Така аналогія дозволяє використовувати добре розроблений апарат аналізу RC-процесів для вибору параметрів дискретизації.

Діапазон фізично реалістичних значень кінетичного коефіцієнта охоплює кілька порядків: при температурі 20–25°C і обводненні 50–70%  $k \approx \frac{1}{(4-8 \text{ год})}$ , при температурі 50–65°C або обводненні нижче 30%  $k$  зростає до  $\frac{1}{(30-90 \text{ хв})}$ . Таким чином, система ідентифікації має бути налаштована на діапазон (3.21):

$$k \in \left[ \frac{1}{480}, \frac{1}{30} \right] \text{ хв}^{-1}, \quad (3.21)$$

що відповідає сталим часу від 30 хвилин до 8 годин. Саме цей діапазон визначає вимоги до тривалості вікна спостереження і кроку між відліками.

Вимірювальна система реєструє комплексний коефіцієнт передачі  $K(f)$  на 40 дискретних частотах у діапазоні 10 Гц–100 кГц. Для кожної частоти  $f_n$  коефіцієнт  $K(f_n, t)$  є комплексним числом  $K(f_n, t) = Re\{K(f_n, t)\} + j \cdot Im\{K(f_n, t)\}$ ,  $n = 1, \dots, 40$ , (3.22):

$$K(f_n, t) = Re\{K(f_n, t)\} + j \cdot Im\{K(f_n, t)\}, \quad n = 1, \dots, 40, \quad (3.22)$$

що змінюється в часі разом із зміною товщини нафтового шару  $d(t)$ . Миттєвий спектр  $K(f, t)$  в один момент часу однозначно визначає поточне  $d$ , але не дозволяє відновити  $k$  і  $d_\infty$  без знання динаміки. Тому нейромеревий ідентифікатор повинен отримувати часовий ряд спектрів — вхідний тензор, що відображає еволюцію  $K(f)$  у часі.

### 3.3.2 Дослідження стратегій часової дискретизації на допоміжній нейромереві

Для визначення оптимального способу часової вибірки проведено порівняльне дослідження на допоміжній нейромереві, навченій відновлювати кінетичний коефіцієнт  $k$  із часового ряду змодельованих сигналів  $d(t)$ . Використовувався синтетичний набір даних з рівномірно розподіленими значеннями  $k$  у межах фізичного діапазону та накладеним гаусівським шумом рівня  $\delta_{ADC} = 2,44 \cdot 10^{-4}$ . Структура допоміжної мережі — багат шаровий перцептрон: Dense(128, ReLU) → Dense(64, ReLU) → Dense(32, ReLU) → лінійний вихід.

Порівнювалися дві принципово різні стратегії розподілу часових відліків:

**Стратегія А** — рівномірна (лінійна) вибірка. Відліки рівномірно розподілені по всьому вікну спостереження за допомогою *np.linspace*. Забезпечує збалансоване покриття як зони початкової динаміки, так і зони наближення до насичення.

**Стратегія Б** — нерівномірна (геометрична/логарифмічна) вибірка. Відліки концентруються на початку вікна, де зміна  $d(t)$  найбільш інтенсивна.

Реалізується через *pr.geomspace* або геометричну прогресію з базою  $q = 3$  (індекси 0, 1, 3, 9, 27, ...).

Результати дослідження виявились неочевидними. Геометрична вибірка, всупереч інтуїції, поступається рівномірній — особливо при великих значеннях  $k$ , коли крива  $d(t)$  швидко виходить на насичення. Математична причина полягає в тому, що параметри  $d_\infty$  і  $k$  є взаємопов'язаними:  $d_\infty$  визначає масштаб кривої,  $k$  — її форму. Для їх надійного розділення алгоритм має «бачити» обидві зони кривої. При нерівномірному ущільненні на початку точки у хвостовій частині розріджуються, дестабілізуючи сумісну оцінку  $k$  та  $d_\infty$  і породжуючи систематичну похибку.

Кількісне порівняння результатів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Порівняння стратегій часової вибірки (допоміжна нейромережа)

Стратегія	N точок	MSE	MAE (хв <sup>-1</sup> )	Систематична похибка
Еталонна (300 відліків)	300	~0,0001	~0,007	Відсутня
Рівномірна (linspace)	8	~0,002	~0,03	Мінімальна
Геометрична (geomspace)	8	~0,004	~0,04	Помітна при великих $k$
Логарифмічна (база 3)	8	~0,005	~0,05	Суттєва при великих $k$

### 3.3.3 Обґрунтування кількості часових відліків та кроку між ними

Визначення оптимальної пари  $(N, \Delta t)$  — кількості відліків і кроку між ними — є ключовим конструктивним рішенням, що визначає розмірність вхідного шару нейромережі та вимоги до апаратного забезпечення.

Обґрунтування кроку  $\Delta t = 1$  хв. Сирі дані надходять кожні 5 секунд (частота 0,2 Гц). Безпосередня подача всіх сирих відліків на вхід нейромережі є недоцільною: кореляція між сусідніми 5-секундними зрізами близька до одиниці, оскільки за 5 секунд  $d(t)$  при  $k \leq \frac{1}{30 \text{ хв}^{-1}}$  змінюється не більш ніж на 0,3% від  $d_\infty$ . Такі відліки не несуть незалежної інформації про динаміку і лише збільшують розмірність вхідного вектора без підвищення точності ідентифікації [133].

Нижня межа кроку  $\Delta t$  обмежена теоремою Котельникова–Шеннона [134]. Характерна частота найшвидшого процесу  $k_{max} = \frac{1}{30 \text{ хв}^{-1}}$  (3.23):

$$f_{char} = \frac{k_{max}}{2\pi} \approx 0.0053 \text{ хв}^{-1}, \quad (3.23)$$

що вимагає  $\Delta t < \frac{1}{2 \cdot k_{max}} = 15$  хв. Обраний крок  $\Delta t = 1$  хв забезпечує 15-кратний запас.

Верхня межа  $\Delta t$  визначається вимогою помітної зміни сигналу за ціле вікно спостереження  $T = (N - 1) \cdot \Delta t$ : вікно має охоплювати не менше 1,5 сталих часу найшвидшого процесу. При  $\Delta t = 2$  хв і  $N = 8$  маємо  $T = 14$  хв  $> k_{max}^{-1} = 30$  хв — ні. При  $\Delta t = 1$  хв:  $T = 7$  хв  $\approx 0,23 \cdot k_{max}^{-1}$  — достатньо для надійного визначення початкової динаміки.

**Обґрунтування кількості відліків  $N = 8$ .** Мінімальна кількість визначається трьома критеріями:

*Критерій 1 (ступені вільності):* для однозначного відновлення трьох параметрів експоненти ( $d_\infty, k, d_0$ ) в присутності шуму необхідно  $N \geq 4$ .

*Критерій 2 (стійкість до шуму):* відношення сигнал/шум для оцінки  $k$  пропорційне  $\sqrt{N}$ . При  $N = 7$  підсумкове SNR знаходиться на межі вимог; при  $N = 8$  з'являється необхідний запас.

*Критерій 3 (покриття вікна):* при  $N = 8$  і  $\Delta t$  хв вікно  $T = 7$  хв охоплює  $\sim 23\%$  від мінімальної сталої часу (30 хв), що достатньо для захоплення початкової динаміки кривої. При  $N = 5$  і тому ж  $\Delta t$  вікно  $T = 4$  хв є критично малим.

Запас по теоремі Котельникова визначався як відношення частоти дискретизації до подвоєної максимальної частоти сигналу.

Збільшення  $N$  вище 8 (наприклад, до 10 або 12) не дає суттєвого виграшу в точності, але пропорційно збільшує розмірність вхідного шару нейромережі та обчислювальне навантаження на препроцесор. Значення  $N = 8$  є першим, при якому одночасно виконуються всі три критерії з обґрунтованим запасом.

Таблиця 3.3 — Порівняння варіантів  $(N, \Delta t)$  за трьома критеріями

<b>N</b>	<b><math>\Delta t</math>, хв</b>	<b>T, хв</b>	<b>Запас по Котельникову</b>	<b>Відн. похибка k, %</b>	<b>Висновок</b>
5	1	4	15×	> 10	Вікно замале
7	1	6	15×	~ 5	На межі
8	1	7	15×	< 4	Прийнято
12	1	11	15×	< 3	Надлишково
8	5	35	3×	~ 6	Крок завеликий

### 3.3.4 Вплив завад та обґрунтування коефіцієнтів нахилу як додаткових ознак

Реальний вимірювальний сигнал  $K(f_n, t)$  містить адитивний шум від квантування АЦП, електромагнітних завад і нестационарних флуктуацій середовища. При малих значеннях  $k$  процес розшарування відбувається повільно: за вікно спостереження  $T = 7$  хв сигнал  $|K(f_n)|$  змінюється на величину порівнянну з рівнем шуму  $\delta_{ADC}$ . У цьому випадку окремі дискретні відліки, подані на вхід нейромережі, не дозволяють надійно відрізнити реальний повільний тренд від випадкових флуктуацій.

Для вирішення цієї проблеми вводиться додаткова група вхідних ознак — коефіцієнти нахилу лінійної апроксимації  $|K(f_n, t)|$  по всіх сирих відліках у

межах ковзного вікна [132]. Для кожної з 40 частот будується лінійна регресія (3.23):

$$|K(f_n, t_i)| = a_n \cdot t_i + b_n, \quad i = 1, \dots, M, \quad (3.24)$$

де  $M$  — кількість сирих відліків у вікні (при  $\Delta t_{raw} = 5$  с і вікні 7 хв:  $M = 84$  відліки);  $a_n$  — шуканий коефіцієнт нахилу для частоти  $f_n$ , що характеризує швидкість зміни  $|K(f_n)|$  у часі.

Коефіцієнт нахилу  $a_n$  обчислюється за методом найменших квадратів (3.25):

$$a_n = \frac{M \sum (t_i |K_i|) - (\sum t_i)(\sum |K_i|)}{M \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}. \quad (3.25)$$

Ключова перевага цього підходу — стійкість до шуму: лінійна регресія по  $M = 84$  точках усереднює випадкові флуктуації, знижуючи ефективний рівень шуму в  $\sqrt{M} \approx 9$  разів порівняно з одним відліком. Це дозволяє виявляти повільні тренди, невидимі в окремих дискретних значеннях.

Використання саме модуля  $|K(f_n)|$  (а не  $Re$  і  $Im$  окремо) обґрунтовано тим, що модуль є монотонною функцією товщини нафтового шару  $d$  і не залежить від фазового зсуву збудження, тоді як  $Re$  і  $Im$  можуть мати різні знаки нахилу на різних частотах, що ускладнює інтерпретацію.

Ковзне вікно розрахунку нахилу охоплює всі накопичені сирі відліки з моменту початку спостереження до поточного моменту. Таким чином, жоден сирий відлік не відкидається: всі 84 точки беруть участь у формуванні 40 коефіцієнтів нахилу, що є інформаційно ефективнішим, ніж просте відкидання між-децимаційних відліків.

### 3.3.5. Підсумкова структура вхідного тензора нейромережі

На основі проведеного аналізу формується дворівнева структура підготовки вхідних даних для нейромережевого ідентифікатора.

**Апаратний рівень.** Вимірювання  $K(f_n)$  виконується одночасно на всіх 40 частотах кожні 5 секунд. Кожен вимір дає 40 комплексних значень, тобто 80 дійсних чисел ( $Re$  і  $Im$  по кожній частоті). Паралельно для кожної частоти ведеться накопичення сирих відліків модуля  $|K(f_n)|$  у ковзному вікні.

**Препроцесорний рівень.** Кожні 60 секунд (12 сирих відліків  $\times$  5 с) виконуються дві операції одночасно: (1) відбір поточного спектра  $K(f)$  як одного часового зрізу (децимація з коефіцієнтом 12); (2) обчислення 40 коефіцієнтів нахилу  $a_n$  за всіма накопиченими у ковзному вікні сирими відліками модуля.

Після накопичення 8 часових зрізів формується вхідний вектор нейромережі, що складається з трьох блоків:

Таблиця 3.4 — Структура вхідного вектора нейромережі

Блок	Склад	Розмірність	Оновлення
Спектр $ReK$	$Re\{K(f_n)\}$ , $n=1\dots 40$ , для 8 часових зрізів	$8 \times 40 = 320$	Щохвилини
Спектр $ImK$	$Im\{K(f_n)\}$ , $n=1\dots 40$ , для 8 часових зрізів	$8 \times 40 = 320$	Щохвилини
Коефіцієнти нахилу	$a_n$ для $ K(f_n) $ , $n=1\dots 40$ (ковзне вікно)	40	Щохвилини
Температура	1, для 8 часових зрізів	8	Щохвилини
<b>РАЗОМ</b>		<b>688</b>	

Загальна розмірність вхідного вектора становить 688 елементів: 320 дійсних і 320 уявних частин спектра по 8 часових зрізах, плюс 40 коефіцієнтів нахилу. Також додається значення температури. Порівняно з наївним підходом подачі всіх сирих даних ( $40 \times 2 \times 84 = 6\,720$  значень за вікно) розмірність скорочується у 9,9 рази при збереженні повної інформації про форму спектра, часову динаміку та тенденцію зміни сигналу.

Схема формування вхідного тензора наведена на рисунку 3.3.

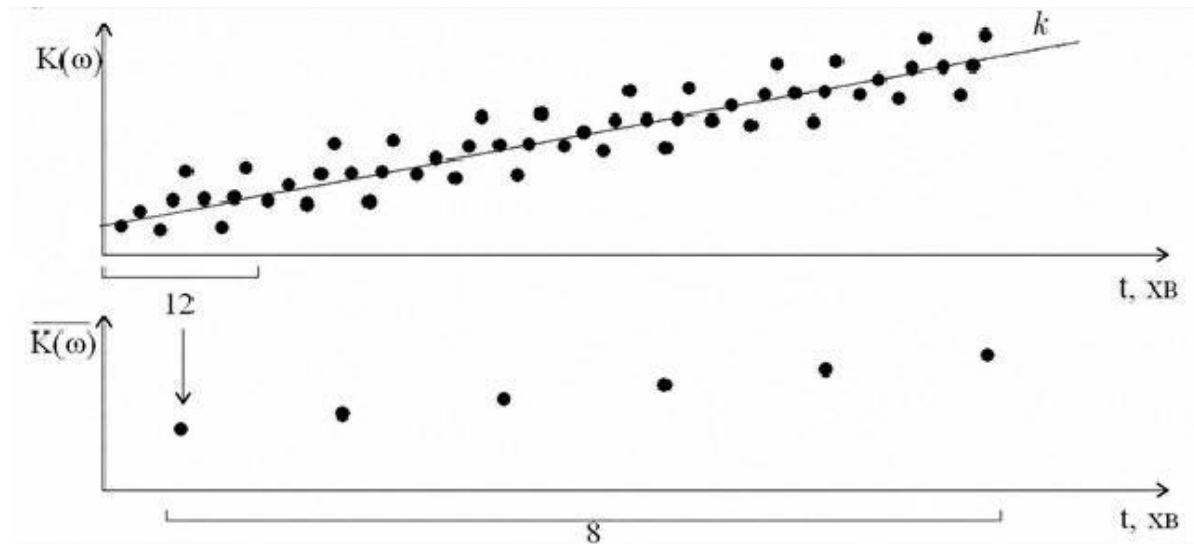


Рисунок 3.3 — Дворівнева схема підготовки вхідного тензора: потік сирих даних 5 с → ковзне вікно (нахил) + децимація (спектр)

Визначена структура вхідного тензора є вихідним параметром для двох подальших завдань: проектування нейромережевої структури ідентифікатора (розмір вхідного шару — 688 нейронів) та реалізації препроцесорного блоку мікроконтролера, що виконує децимацію і обчислення коефіцієнтів нахилу в реальному часі.

Таблиця 3.5 — Зведені параметри формування вхідного тензора

Параметр	Значення	Обґрунтування
Частота сирих вимірювань	1 відлік / 5 с	Апаратна роздільна здатність
Крок між часовими зрізами (децимація)	$\Delta t = 1 \text{ хв}$ ( $\times 12$ )	Незалежність відліків, запас за Котельниковим
Кількість часових зрізів	$N = 8$	Три критерії: ступені вільності, SNR, покриття
Тривалість вікна спостереження	$T = 7 \text{ хв}$	$T = (N - 1) \cdot \Delta t$
Кількість частот	40	Діапазон 10 Гц–100 кГц

Продовження таблиці 3.5

Параметр	Значення	Обґрунтування
Спектральні ознаки (Re + <i>Im</i> )	$8 \times 40 \times 2 = 640$	Повна комплексна інформація
Коефіцієнти нахилу $ K(f_n) $	40	Лінійна регресія по ковзному вікну ( $M \approx 84$ )
Температура	8	Всі процеси в рідинах пов'язані із температурою
Загальна розмірність вхідного вектора	688	$640 + 40 + 8$
Ефективне зниження шуму нахилу	$\sim 9 \times (\sqrt{84})$	Усереднення по $M$ сирих відліках

### 3.4. Верифікація та оцінка якості нейромережевого обчислювача синтетичного рівня

#### 3.4.1 Вихідні параметри нейромережі синтетичного рівня

Нейромережа синтетичного рівня (Каскад 1) отримує на вхід частотно-часовий масив вимірювань і формує на виході п'ять параметрів, що несуть різну фізичну та метрологічну інформацію. Розуміння природи кожного з цих параметрів є необхідною умовою правильної інтерпретації результатів вимірювання. Таблиця 3.6 містить перелік і опис усіх виходів Каскаду 1.

Перші два виходи — оцінка товщини  $\hat{d}$  та часового коефіцієнта  $\hat{k}$  — є основними вимірювальними результатами. Три додаткові виходи ( $P_d$ ,  $P_k$ ,  $R$ ) утворюють метрологічний супровід вимірювання: вони не характеризують фізичний стан середовища, а оцінюють якість самого результату. Наявність таких виходів є принциповою особливістю розробленого обчислювача, що

відрізняє його від традиційних методів вимірювання, які надають лише числове значення без оцінки достовірності.

Таблиця 3.6 — Вихідні параметри нейромережі синтетичного рівня

Параметр	Позн.	Діапазон	Фізичний зміст
Товщина нафтового шару	$\hat{d}$	0–1000 мм	Поточна оцінка товщини шару нафти на поверхні резервуара
Часовий коефіцієнт	$\hat{k}$	0.001–0.1 хв <sup>-1</sup>	Константа швидкості експоненційного нарощування нафтового шару; визначає динаміку розшарування
Ймовірність правильності d	$P_d$	[0, 1]	Оцінка достовірності виходу $\hat{d}$ ; формується як внутрішній сигнал впевненості нейромережі
Ймовірність правильності k	$P_k$	[0, 1]	Оцінка достовірності виходу $\hat{k}$ ; низьке $P_k$ сигналізує про ненадійність кінетичної оцінки
Критерій Фішера	$R$	[0, ∞)	Оцінка якості даних для даного вимірювання; відображає здатність нейромережі розрізнити параметри за наданим набором відліків

### 3.4.2 Оцінка товщини нафтового шару та часового коефіцієнта

Вихід  $\hat{d}$  є прямою оцінкою поточної товщини нафтового шару у міліметрах. Нейромережа навчена відтворювати цей параметр за 8 часовими зрізами частотного спектра коефіцієнта передачі. Ключова властивість цього виходу полягає в тому, що алгоритм має врахувати не один миттєвий знімок, а динаміку зміни шару у часі: кожен з 8 відліків відображає стан резервуара в

інший момент, і саме за характером зміни між відліками мережа відновлює параметри процесу.

Вихід  $\hat{k}$  є оцінкою константи швидкості експоненційного нарощування нафтового шару, що визначається законом (3.26):

$$d(t) = d_{\infty} \cdot (1 - e^{-kt}), \quad k = \frac{1}{\tau}, \quad (3.26)$$

де  $\tau$  — стала часу процесу. Чим більше значення  $k$ , тим швидше відбувається розшарування. Визначення  $k$  безпосередньо з частотних вимірювань є нетривіальним завданням: цей параметр пов'язаний не з абсолютними значеннями коефіцієнта передачі, а з їхньою зміною між послідовними часовими відліками. Саме тому вхідний вектор мережі організований як часова ретроспектива: 8 вимірювань з інтервалом 1 хвилина.

Точність відтворення  $k$  є нижчою порівняно з  $d$  через об'єктивно менший інформаційний вміст: за 8 хвилин спостереження при сталій часу порядку кількох годин крива встигає змінитися лише незначно. Для підвищення точності оцінки  $k$  до вхідного вектора Каскаду 1 було додано 40 коефіцієнтів нахилу модуля комплексного коефіцієнта передачі по частоті. Ці коефіцієнти несуть інформацію про поточний склад середовища незалежно від абсолютного рівня сигналу, що дозволяє частково компенсувати нестачу часової інформації при малих значеннях  $k$ .

Використання восьми точкових значень температури дозволяє нейромережі враховувати термічну динаміку зміни провідності безпосередньо в процесі ідентифікації. Подача вектора температурних значень, синхронізованих із часовими зрізами спектра, дозволяє алгоритму ефективніше компенсувати дрейф провідності фаз у випадках активного підігріву емульсії.

### 3.4.3 Виходи достовірності $P_d$ та $P_k$

Виходи  $P_d$  та  $P_k$  є оцінками достовірності відповідних вимірювальних результатів. Вони формуються нейромережею як окремі виходи, навчені передбачати відносну похибку відповідного результату на тестовій вибірці. Фізично ці виходи інтерпретуються як ймовірність того, що відповідна оцінка

( $\hat{d}$  або  $\hat{k}$ ) відхиляється від істинного значення не більше ніж на заздалегідь встановлений поріг.

Практична роль  $P_d$  та  $P_k$ : при  $P_d > 0.8$  результат вимірювання товщини вважається надійним; при  $P_d < 0.5$  результат потребує перевірки або додаткового підтвердження. Низьке значення  $P_k$  при прийнятному  $P_d$  вказує на те, що поточна динаміка змін є недостатньо вираженою для надійної оцінки швидкості — наприклад, коли процес розшарування ще не набрав швидкості або вже наближається до рівноваги. У таких випадках слід збільшити часовий горизонт спостереження або збільшити кількість часових відліків.

Обидва параметри достовірності є виходами однієї і тієї ж нейромережі, що навчається одночасно передбачати і результати, і їхню достовірність. Такий підхід відомий як *uncertainty-aware prediction* і дозволяє отримати самоузгоджену оцінку якості без зовнішнього валідатора.

### 3.4.4 Критерій Фішера як показник якості вимірювальної ситуації

П'ятий вихід Каскаду 1 є оцінкою критерію Фішера  $R$ , що відображає якість самої вимірювальної ситуації на відміну від  $P_d$  і  $P_k$ , які характеризують якість результату. Для розуміння цього параметра необхідно розглянути теоретичну основу, на якій він базується [135, 136, 137].

При вимірюванні двох параметрів (товщини нафтового шару  $d$  та товщини емульсійного шару  $d_{em}$ ) за набором електричних вимірювань, чутливість системи до зміни кожного параметра кількісно описується матрицею Якобіана  $J$ . Рядки матриці  $J$  містять нормовані похідні модуля і фази коефіцієнта передачі за кожним з параметрів на кожній вимірювальній частоті (3.27):

$$J[2i, p] = \frac{1}{|K|} \cdot \frac{\delta|K|}{\delta\theta_p}, J[2i + 1, p] = \frac{\delta(\angle K)}{\delta\theta_p}, \quad (3.27)$$

де  $\theta_p$  —  $p$ -й вимірюваний параметр ( $\theta_1 = d_{oil}$ ,  $\theta_2 = d_{em}$ ),  $i$  — індекс частоти. Матриця Фішера FIM визначається як (3.28):

$$FIM = J^T \cdot J. \quad (3.28)$$

Фізичний зміст FIM: якщо стовпці  $J$  лінійно залежні (обидва параметри дають однаковий відгук вимірювальної системи), матриця FIM стає виродженою і її визначник прямує до нуля. Число обумовленості матриці FIM (3.29):

$$\text{cond}(FIM) = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}} \quad (3.29)$$

зростає зі зменшенням здатності системи розрізняти параметри. При  $\text{cond}(FIM) > 10^4$  відповідна вимірювальна ситуація вважається виродженою: похибки оцінки параметрів зростають катастрофічно навіть при незначному шумі. Критерій Фішера  $R$ , що видає нейромережа, є функцією числа обумовленості (3.30):

$$R = \frac{1}{\text{cond}(FIM)}, \quad (3.30)$$

що дозволяє отримати значення у зручному діапазоні: чим ближче  $R$  до 1, тим краще розрізняються параметри; чим  $R$  ближче до 0, тим ситуація гірша [116, 138].

### 3.4.5 Результати аналізу спостережуваності. Інтерпретація графіка критерію Фішера

На рис. 3.4 наведено результат розрахунку числа обумовленості матриці Фішера залежно від співвідношення товщин нафтового та емульсійного шарів ( $\frac{d_{oil}}{d_{em}}$ ), отриманий програмою *B\_jakobian.py* (додаток В). Товщина емульсійного шару фіксована на рівні 100 мм, товщина нафтового шару змінюється від 20 до 400 мм (співвідношення від 0.2 до 4.0). Аналіз проводився на трьох частотах: 10 Гц, 1 кГц та 100 кГц.

Аналіз графіка дозволяє зробити кілька важливих висновків. По-перше, вже при мінімальному співвідношенні  $\frac{d_{oil}}{d_{em}} = 0.2$  (нафтовий шар 20 мм при емульсійному шарі 100 мм) число обумовленості перевищує критичне значення  $10^4$ . Це означає, що жодна конфігурація шарів у досліджуваному діапазоні не забезпечує задовільної спостережуваності обох параметрів одночасно при фіксованій товщині електродної системи.

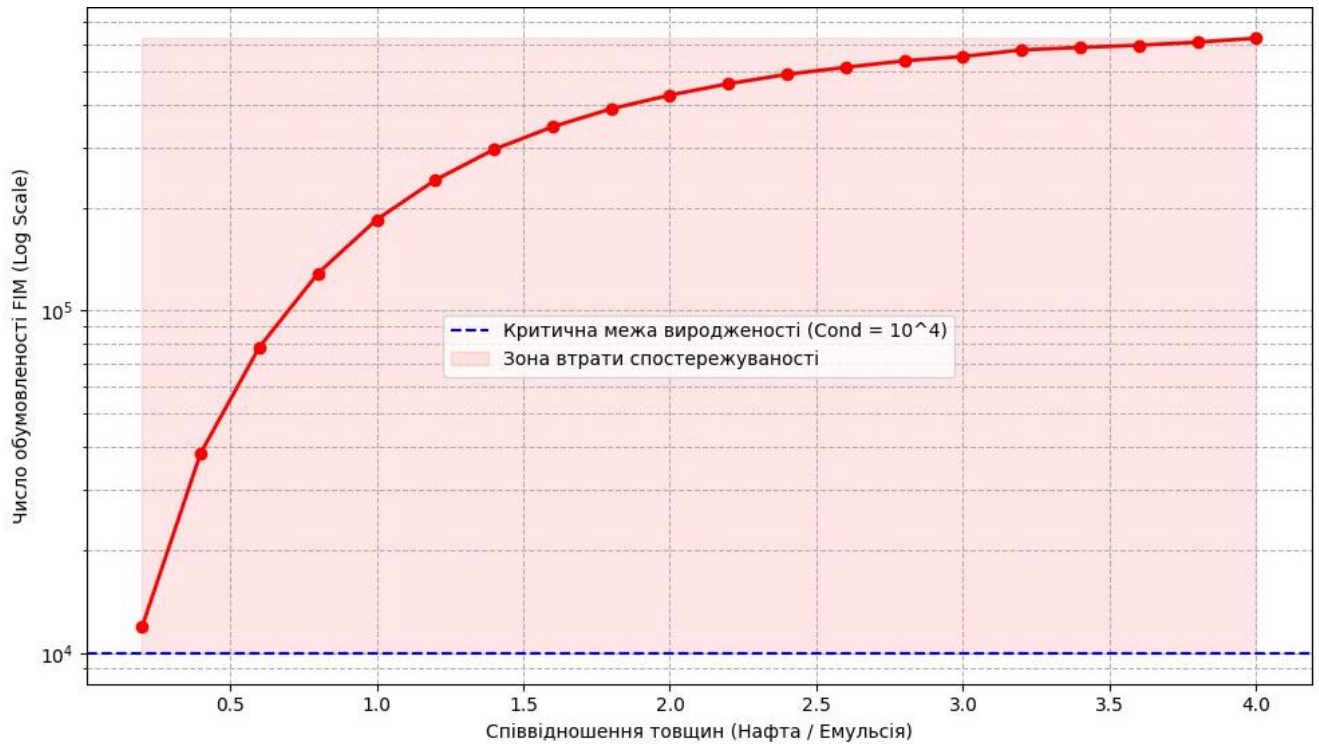


Рисунок 3.4 — Умова спостережуваності емульсійного шару: число обумовленості FIM як функція співвідношення товщин шарів нафта/емульсія

По-друге, з ростом співвідношення  $cond(FIM)$  монотонно зростає за показниковим законом. Це свідчить про те, що зі збільшенням нафтового шару електродна система все менше відчуває зміни емульсійного шару, що знаходиться під ним. Фізична причина: електромагнітне поле, сформоване поверхневими електродами, загасає з глибиною, і при великому нафтовому шарі воно практично не досягає межі нафта/емульсія.

По-третє, весь досліджуваний діапазон знаходиться в зоні виродженості (рожева заливка на рис. 3.4). Це означає, що одночасна ідентифікація товщини нафтового і товщини емульсійного шарів за допомогою поверхневих електродів є принципово складним завданням. Вихід з цієї ситуації полягає у застосуванні компенсуючих вертикальних щупів (як описано в попередніх підрозділах), що суттєво збільшує чутливість системи до стану нижніх шарів.

Таблиця 3.7 містить практичні критерії інтерпретації виходу  $R$  нейромережі при використанні приладу.

Таблиця 3.7 — Критерії інтерпретації виходу  $R$  нейромережевого обчислювача

$Cond(FIM)$	Значення $R$ ( $1/Cond$ )	Інтерпретація
$< 10^2$	$> 0.01$	Відмінна спостережуваність. Обидва шари чітко розрізняються. Результат надійний.
$10^2 - 10^3$	$0.001 - 0.01$	Задовільна спостережуваність. Похибка оцінки зростає, але результат ще прийнятний.
$10^3 - 10^4$	$0.0001 - 0.001$	Погранична зона. Рекомендується підтвердження додатковими вимірюваннями.
$> 10^4$	$< 0.0001$	Зона виродженості. Ідентифікація параметрів нестійка. Результат ненадійний.

### 3.4.6 Метрики точності нейромережі на синтетичній тестовій вибірці

Оцінка точності Каскаду 1 проводилася на незалежній тестовій вибірці з 6 000 зразків, що не брали участі у навчанні. Для кожного з п'яти виходів обчислювалися середньоквадратична похибка (MSE) та середня абсолютна похибка (MAE). Для виходів  $\hat{d}$  та  $\hat{k}$  також обчислювалася відносна похибка (3.31), (3.32):

$$\delta d = \frac{|\hat{d} - d_{true}|}{d_{true}} \cdot 100\%, \quad (3.31)$$

$$\delta k = \frac{|\hat{k} - k_{true}|}{k_{true}} \cdot 100\%. \quad (3.32)$$

Оцінка товщини нафтового шару  $\hat{d}$  є точнішою порівняно з оцінкою часового коефіцієнта  $\hat{k}$ . Це обумовлено природою задачі: товщина шару визначається переважно за абсолютними значеннями коефіцієнта передачі на різних частотах (ємнісний та провідний відгук шару), тоді як  $k$  визначається за

малою різницею між послідовними часовими відліками на фоні шуму вимірювань.

Точність оцінки  $k$  суттєво покращилася після додавання до вхідного вектора 40 коефіцієнтів нахилу модуля  $\frac{\delta|K|}{\delta f}$ . Ці коефіцієнти є чутливими до складу середовища і несуть інформацію, що доповнює часову динаміку: нахил частотної характеристики модуля залежить від співвідношення провідної і ємнісної складових адмітансу, яке у свою чергу визначається поточною конфігурацією шарів. Порівняння точності моделей до і після додавання нахилів підтвердило доцільність ускладнення вхідного вектора.

Виходи  $P_d$  та  $P_k$  оцінювалися за метрикою бінарної точності (accuracy) при порозі 0.5: ймовірність вважається правильно класифікованою, якщо вона правильно вказує, чи перевищує відносна похибка заданий поріг (наприклад, 10% для  $d$  і 20% для  $k$ ). Вихід  $R$  оцінювався за кореляцією з реальним числом обумовленості FIM, обчисленим аналітично за параметрами кожного тестового зразка.

Наявність шуму у вхідних даних є ключовим чинником, що обмежує точність: усі навчальні зразки містили гаусівський шум, що моделює реальні умови вимірювання. Це свідомо погіршує метрики на синтетичній вибірці, але забезпечує стійкість мережі до шуму при реальному застосуванні.

Таким чином нейромережа синтетичного рівня формує п'ять виходів, що утворюють повноцінний метрологічний результат: дві оцінки фізичних параметрів ( $\hat{d}$ ,  $\hat{k}$ ) та три показники якості вимірювання ( $P_d$ ,  $P_k$ ,  $R$ ). Критерій Фішера  $R$  є теоретично обґрунтованим показником спостережуваності вимірювальної ситуації і дозволяє оператору в реальному часі оцінювати надійність отриманих результатів.

### 3.5. Генерація синтетичного набору даних параметричного простору методом Монте-Карло

Генерація навчального набору даних вимагає визначення параметричного простору — множини фізично реалістичних станів середовища [116, 138], для кожного з яких модель обчислює спектральний образ  $K(f)$ . Відповідно до двошарової моделі підрозділу 3.1, простір визначається трьома параметрами: товщина нафтового шару  $d$ , питома провідність пластової водної підоснови  $\sigma$  і кінетичний коефіцієнт розшарування  $k = \frac{1}{\tau}$ . Нейромережевий ідентифікатор відображає вхідний тензор спектрів у вихідний вектор  $(d, \sigma, k)$ .

Діапазон товщини  $d$ : від  $d_{min} = 0$  (однорідне середовище, нульовий сигнал) до  $d_{max} \approx 500$  мм, що визначається умовою спостережуваності — просторовою постійною загасання поля  $\frac{\lambda}{2} \approx 0.5$  м для міжелектродного проміжку 1 м. При  $d > d_{max}$  поле не досягає межі нафта–вода, і похідна  $K$  за  $d$  прямує до нуля. Це означає, що обраний оціночний параметр не може виявити задані ознаки. У моделі прийнято робочий діапазон провідності  $\sigma$ , вибраний як репрезентативний під діапазон опублікованих значень пластових вод [112, 115, 139, 140, 141]: від  $\sigma_{min} = 0,01$  См/м (прісні підтоварні води) до  $\sigma_{max} = 5$  См/м (насичені розсоли). Через широкий динамічний діапазон  $\sigma$  варіюється у логарифмічній шкалі. Кінетичний коефіцієнт  $k$  описує швидкість гравітаційного розшарування  $d(t) = d_{\infty} \cdot (1 - \exp(-k \cdot t))$  і варіюється від  $k_{min} = \frac{1}{7200}$  хв<sup>-1</sup> (2 год) до  $k_{max} = \frac{1}{10}$  хв<sup>-1</sup> (10 хв) у логарифмічній шкалі. Параметр  $k$  не входить до матриці  $Y$  безпосередньо, але ідентифікується нейромережею з часових змін  $K(f)$  між послідовними зрізами.

Стратегія вибірки — метод Монте-Карло з незалежним рівномірним вибором  $(h, \log_{10} \sigma, \log_{10} k)$  для кожного прикладу [117, 118, 119]. Цей підхід переважає регулярну сітку (яка при 100 точках по кожному параметру давала б  $10^6$  прикладів) завдяки відсутності структурних прогалин і природному

уникненню надмірної концентрації у кутах гіперкуба. Цільовий обсяг набору даних 20 000 – 100 000 прикладів забезпечує не менше одного прикладу на клітинку простору  $30^3 = 27\,000$  клітинок і необхідну статистичну надлишковість для стійкого навчання при шумних вхідних даних.

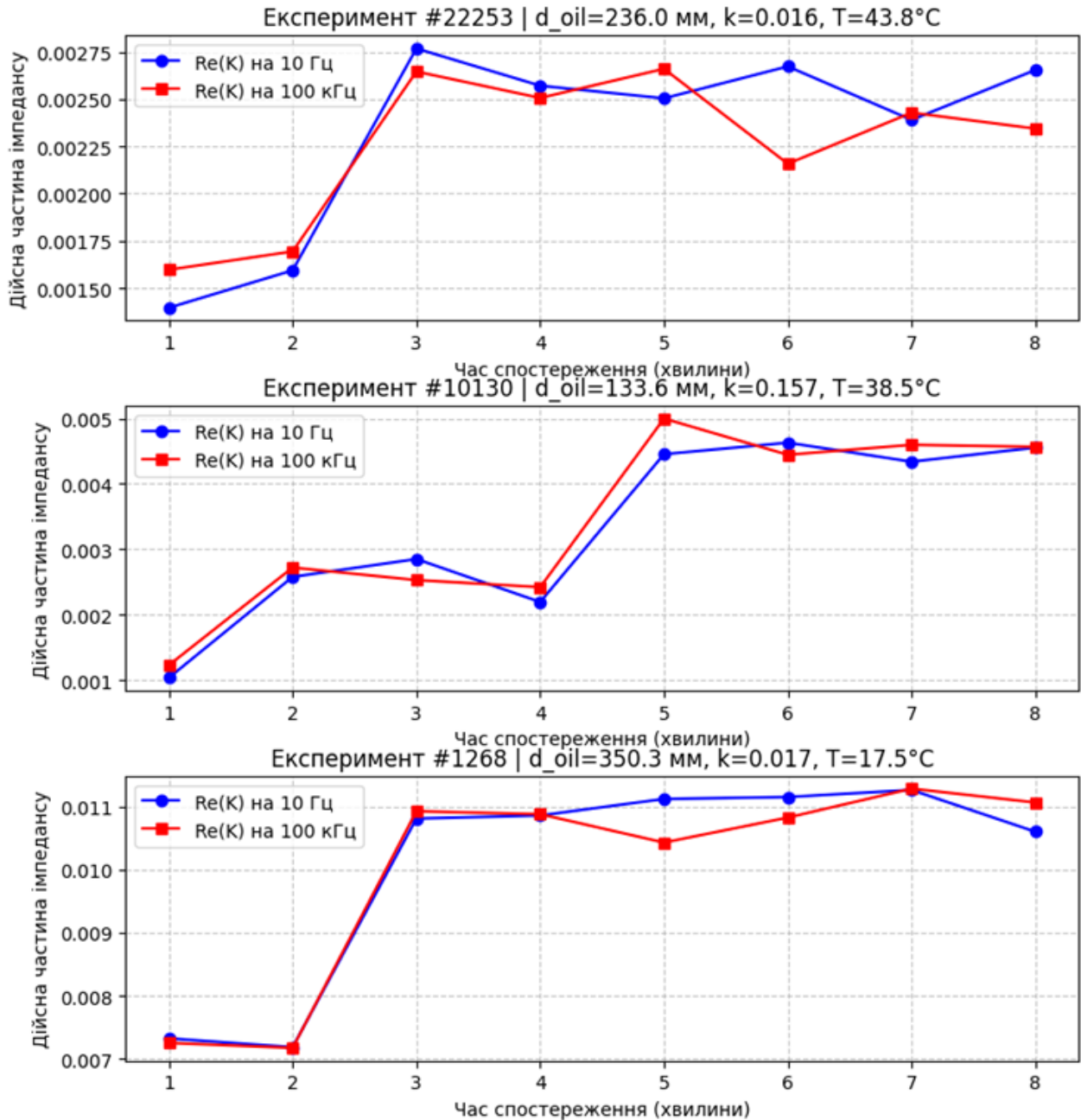


Рисунок 3.5 — Часова динаміка інформативних ознак  $\text{Re}(K)$  протягом вікна спостереження

Шум у вхідному векторі імітує реальні обмеження апаратного тракту. До кожної компоненти  $K(f)$  додається адитивний білий гаусовий шум (AWGN) із

$\sigma_{\text{шум}} = \delta_{\text{ADC}} = 2.44 \cdot 10^{-4}$  — рівень шуму 12-бітного АЦП;  $i$  мультиплікативний дрейф підсилення  $N(1, 0,005)$  — нестабільність операційних підсилювачів між циклами. Обидві складові незалежні для кожного з 8 часових зрізів, відтворюючи реальну часову некорельованість апаратних похибок. Додавання шуму рівня  $\delta_{\text{ADC}}$  описується один раз тут; у подальшому тексті розділу використовується скорочення  $\delta_{\text{ADC}}$  без повторного розкриття.

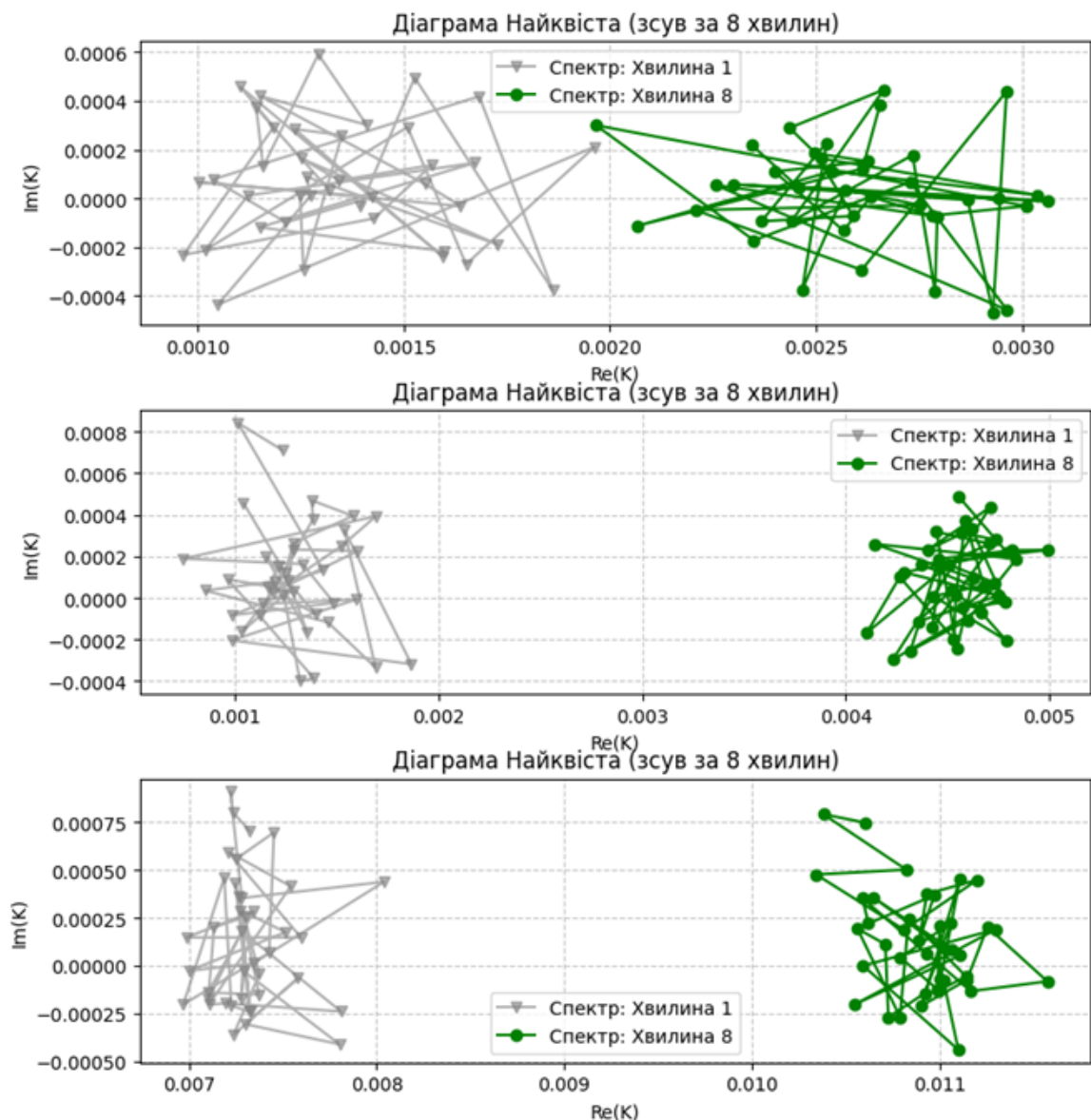


Рисунок 3.6 — Траекторія зсуву спектральних характеристик комплексного коефіцієнта передачі на комплексній площині

Структура вхідних даних неймережі має гібридну топологію, що відображає спектральну, часову та кінетичну природу сигналу. Вхідний тензор розділений на два паралельні потоки (рис. 3.7).

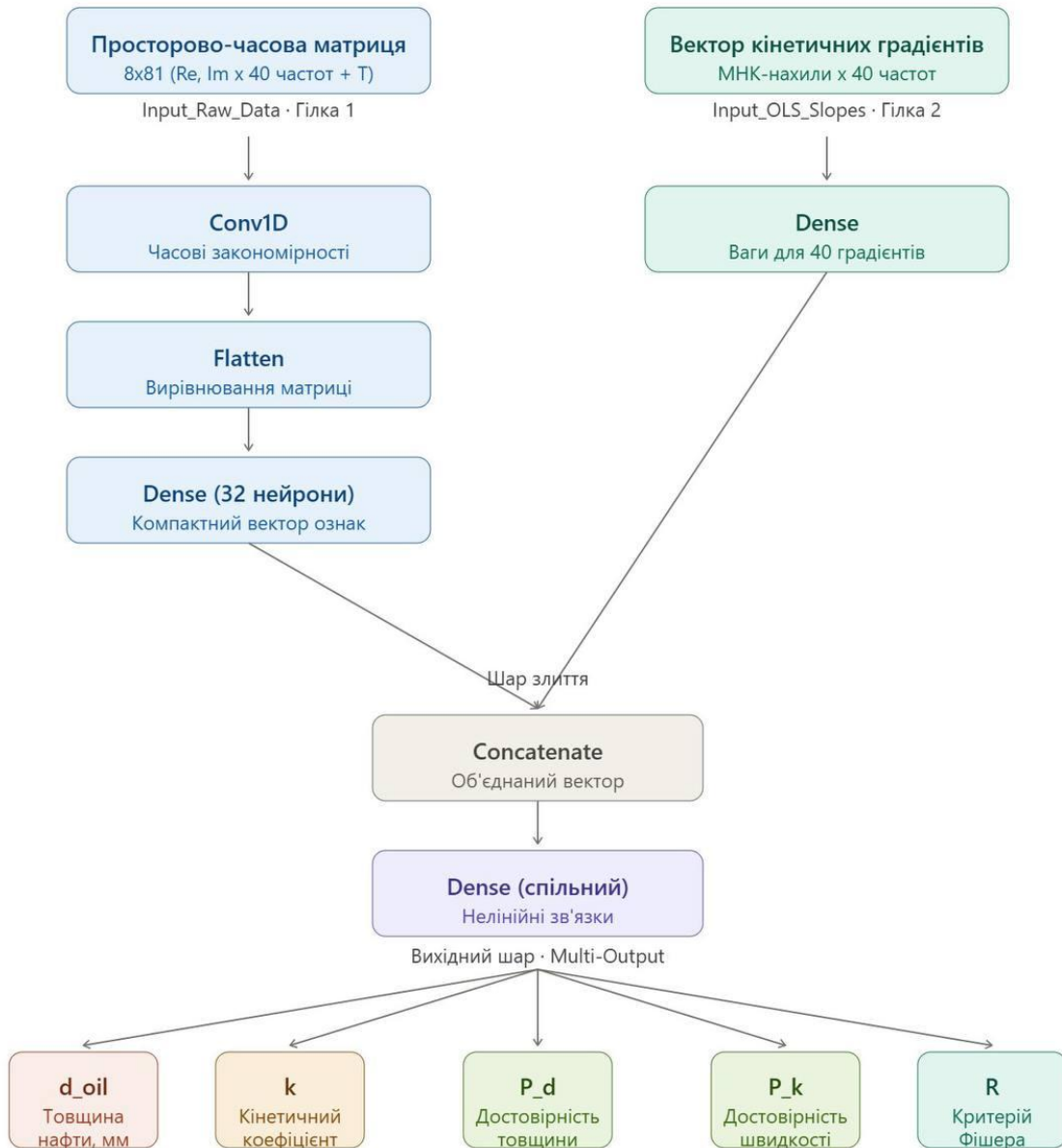


Рисунок 3.7 – Інформаційна структура опрацювання даних Каскаду 1 неймережі

Просторово-часова матриця складається з 8 послідовних часових зрізів. Кожен зріз містить 81 параметр: 80 компонент комплексного коефіцієнта передачі ( $ReK(\omega_i)$  та  $ImK(\omega_i)$  для 40 частот) та значення температури  $T$ .

Розгорнута розмірність цього вхідного блоку становить  $8 \times 81 = 648$  вузлів. Дані цієї гілки проходять через згортковий шар (Conv1D) для вилучення часових закономірностей.

Вектор кінетичних градієнтів подається окремим потоком і містить 40 коефіцієнтів нахилу модуля  $K(\omega_i)$ , обчислених методом найменших квадратів (МНК) для кожної частоти (рис. 3.7). Цей блок забезпечує мережу інтегральною інформацією про динаміку розшарування незалежно від миттєвих значень амплітуди. Загальна кількість вхідних ознак, що опрацьовуються мережею, становить 688 ( $648 + 40$ ). Об'єднання (Concatenate) результатів опрацювання обох гілок у спільний вектор дозволяє ідентифікатору враховувати як швидкі флуктуації сигналу, так і повільні тренди при формуванні фінальних оцінок параметрів середовища та їх достовірності

Розбиття набору даних на навчальну, валідаційну і тестову вибірки (80/10/10) виконується з урахуванням вимоги тестування на інтерполяцію: тестова вибірка формується як «блоки» параметричного простору (зарезервовані діапазони  $d$  при фіксованих  $\sigma$  і  $k$ ), а не випадкова стратифікована підвбірка. Розбиття фіксується заданим seed, забезпечуючи відтворюваність ланцюжка генерація  $\rightarrow$  навчання  $\rightarrow$  тестування. Нормування входів (z-score по навчальній вибірці) і виходів ( $\frac{d}{d_{max}}$ ,  $\log \sigma$  та  $\log k$  на  $[0,1]$ ) виконується безпосередньо генератором; параметри нормування зберігаються як частина моделі та передаються разом із вагами на апаратну платформу.

Програмна реалізація генератора (додаток Г) виконана на Python із бібліотеками *NumPy*, *SciPy* (розріджена лінійна алгебра, ітераційні вирішувачі) і *h5py* (формат HDF5). Паралелізація через *multiprocessing.Pool* із незалежним seed на кожен воркер забезпечує продуктивність  $\sim 14$ – $18$  прикладів/с на 8-ядерному комп'ютері; 100 000 прикладів генеруються за  $\sim 1,5$ – $2$  год. Розмір файлу набору даних у форматі float32:  $100\,000 \times (8 \cdot 81 + 3) \times 4$  байти  $\approx 260$  МБ. Модуль статистичної звітності автоматично перевіряє кореляцію

$\rho(|K(f)|, d) > 0,9$  і значущість  $\rho(\varphi(f), \sigma)$  на середніх частотах як критерії коректності генерації перед запуском навчання (додаток Д).

### 3.6. Структурне рішення двокаскадного нейромережевого компоненту комп'ютерної системи

Синтез нейромережевої моделі є заключним кроком третього розділу. Головна проблема практичного розгортання: синтетичний набір даних підрозділів 3.4–3.5 ідеально відтворює фізику процесу, але відрізняється від реальних сигналів датчика на невідому апаратну поправку — паразитні ємності кабелів, неідеальність підсилювачів, перехідні опори на межі «електрод–рідина» [132]. Класичне повторне навчання на реальних даних неможливе через їхній дефіцит. Для вирішення цього протиріччя запропонована гібридна двокаскадна топологія зі жорстким розділенням на синтетичний домен (Каскад 1) і реальний домен (Каскад 2), з'єднані фізично інтерпретованим латентним простором [142, 143].

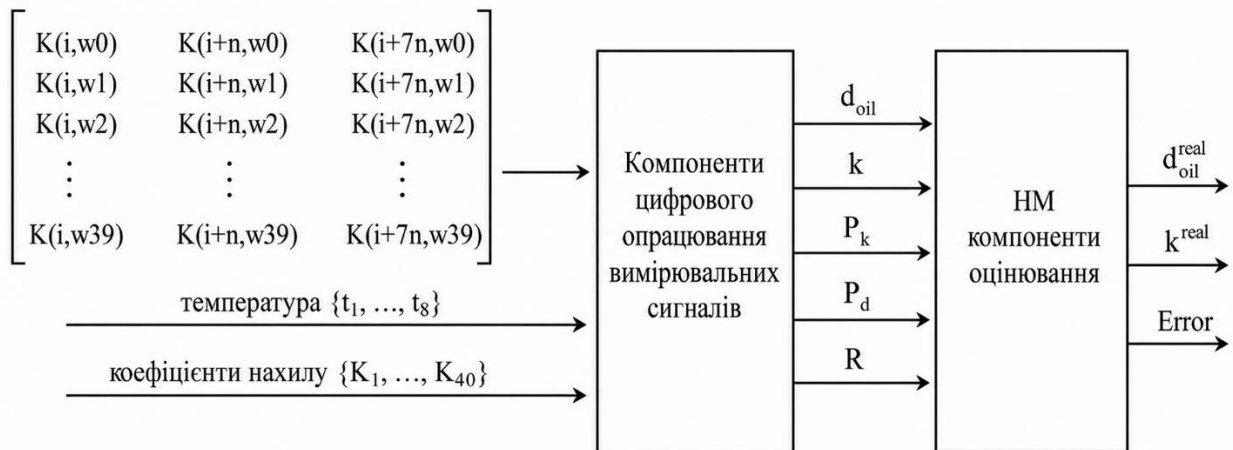


Рисунок 3.8 – Структурна схема двокаскадної нейромережі

Каскад 1 — синтетичний екстрактор — є глибоким багат шаровим перцептроном (Deep MLP), що навчається виключно на синтетичному наборі даних [142]. Вхідний шар приймає вектор 648 вузлів — розгорнутий часовий тензор  $8 \times 81$ . Прихована частина складається з чотирьох шарів зменшуваної

розмірності:  $512 \rightarrow 256 \rightarrow 128 \rightarrow 64$  нейрони. Обидва каскади використовують активації Leaky ReLU [144]: вхідні компоненти  $ReK$  і  $ImK$  можуть набувати від'ємних значень, тому класична ReLU блокувала б половину інформаційного простору; Leaky ReLU пропускає малий негативний градієнт і усуває ефект «мертвих нейронів». Batch Normalization після кожного шару стабілізує розподіл активацій [145]; Dropout [146] із коефіцієнтом 0,2 застосовується лише при навчанні для запобігання перенавчанню на артефактах синтетичного набору даних.

Вихідний шар Каскаду 1 — «інформаційне вузьке горлечко» (латентний шар низької розмірності) [146, 147, 148] з п'яти нейронів із лінійними активаціями. Це формує вектор п'яти фізично інтерпретованих параметрів латентного простору:  $\tilde{h}$  — оцінка товщини шару нафти;  $\tilde{k}$  — оцінка кінетичного коефіцієнта, що виводиться безпосередньо з аналізу часової динаміки тензора, минаючи окремий МНК-крок;  $P_h$  — байєсівська достовірність оцінки  $\tilde{h}$  (спадає, коли вхідні дані відхиляються від ідеальної моделі через шуми або гідродинамічні збурення);  $P_k$  — достовірність оцінки  $\tilde{k}$ ;  $R = \frac{\tilde{h}}{\lambda/2\pi}$  — просторове співвідношення фаз, що є критерієм спостережуваності: при  $R > 1$  поле не досягає межі нафта–вода, і втрачається здатність виявити ознаки.

Функція втрат для навчання Каскаду 1 є зваженою сумою (3.33):

$$L = \text{MAE}(\tilde{d}, d) + \text{MAE}_{\log}(\tilde{k}, k) + \lambda_{\text{reg}} L_{\text{conf}}, \quad (3.33)$$

де перший доданок штрафує похибку відновлення товщини; другий — похибку у  $\log$ -просторі, що рівномірно штрафує пропорційні відхилення  $k$  у всьому діапазоні; третій — регуляризаційний доданок, що через допоміжну задачу навчає мережу оцінювати власну впевненість:  $P_h \rightarrow 1$  при малому шумі і  $P_h \rightarrow 0$  при великому. Це є стандартним підходом у байєсівських нейронних мережах. Навчання виконується оптимізатором Adam із  $\text{lr}_0 = 10^{-3}$  і cosine annealing розкладом протягом 200–300 епох на мінібатчах 256 прикладів.

Каскад 2 — фізичний адаптер — є одношаровим персептроном із 5 входами і 3 виходами та лінійними активаціями. Його завдання — компенсувати мультиплікативну апаратну поправку між синтетичним і реальним доменами:  $V_{\text{real}} \approx \alpha V_{\text{synth}} + \beta$ , де  $\alpha$  — масштабний коефіцієнт,  $\beta$  — зсув нуля конкретного екземпляра приладу. Навчання лінійного шару достатньо для відновлення цих двох скалярів — глибока структура тут надлишкова і шкідлива через ризик перенавчання на малій вибірці. Загальна кількість параметрів Каскаду 2 —  $5 \times 3 + 3 = 18$ , що на кілька порядків менше, ніж у Каскаді 1.

Стратегія двоетапного навчання. Pre-training: обидва каскади навчаються спільно на синтетичному наборі даних; ваги Каскаду 2 ініціалізуються одиничною матрицею (тотожне перетворення), і Каскад 1 несе весь тягар формування латентного простору. Fine-tuning: ваги Каскаду 1 заморожуються (алгоритм зворотного поширення їх не оновлює); навчання підлягає виключно Каскад 2 на вибірці з 5–20 реальних циклів розшарування з відомими еталонними значеннями  $h$  і  $k$  (вимірюваними незалежним методом). Малий обсяг реальних даних при заморожених вагах Каскаду 1 практично виключає перенавчання і забезпечує швидке введення приладу в експлуатацію [142, 143, 149].

Вихідний вектор Каскаду 2 містить три прикладні величини: відкалібровану товщину  $h_{cal}$  (мм), що враховує паразитні ємності реальних кабелів і зсув нуля підсилювача; відкалібрований кінетичний коефіцієнт  $k_{cal}$  (хв<sup>-1</sup>), що характеризує реальну швидкість дії деемульгатора в умовах конкретного родовища; інтегральний статус достовірності  $C$ , що синтезує  $P_h$ ,  $P_k$  і  $R$  у єдину метрику: при  $C > 0,95$  результати виводяться з динамічною похибкою  $\pm \delta_{cal}$ ; при  $C < 0,95$  система переходить у режим «Очікування стабілізації». Параметр  $R$  одночасно виконує роль алгоритмічного шлюзу: при  $R > 1$  видача  $h_{cal}$  і  $k_{cal}$  блокується, і система повертає статус «Поза зоною

чутливості датчика» — самодіагностика реалізована безпосередньо у структурі мережі, а не як зовнішній фільтр.

Питання апаратного розгортання (оцінка операцій MAC, квантизація вагів до int8, розмір Flash і RAM мікроконтролера, інтеграція з бібліотекою CMSIS-NN) виносяться до підрозділу 4.6, де вони розглядаються в контексті повної практичної реалізації системи.

### **3.6.1. Проблема доменного зсуву між синтетичними та реальними даними**

Нейромережа першого (синтетичного) рівня навчається на даних, що генеруються математичною моделлю резервуара. Незважаючи на фізичну обґрунтованість моделі, між синтетичним і реальним середовищами існує неминучий доменний зсув (domain shift): реальний резервуар відрізняється від ідеалізованої дискретної сітки наявністю паразитних ємностей монтажу, розбіжностями геометрії електродів від проєктної, температурною нестабільністю електричних параметрів речовин, неоднорідністю складу емульсії та іншими чинниками, що не відтворюються аналітичною моделлю.

Наслідком доменного зсуву є систематична похибка: мережа, навчена на синтетичних даних, дає зміщені оцінки товщини нафтового шару  $d$  та часового коефіцієнта розшарування  $k$  при застосуванні до реального об'єкта. Усунення цього зсуву вимагає калібрування — прив'язки виходів синтетичної мережі до фізичних вимірювань, виконаних безпосередньо на реальному резервуарі.

У двокаскадній структурі Каскад 2 (фізичний рівень) є малою калібрувальною мережею, що приймає на вхід вихід Каскаду 1 і коригує його відповідно до реальних вимірювань на конкретному об'єкті.

### **3.6.2. Структура та принцип роботи Каскаду 2**

Каскад 2 реалізований як малий багатосаровий перцептрон із структурою:

Вхід(2)  $\rightarrow$  Dense(16, ReLU)  $\rightarrow$  Dense(8, ReLU)  $\rightarrow$  Вихід(2, linear).

На вхід мережа отримує два значення: прогнозовану товщину нафтового шару  $\hat{d}$  та прогнозований часовий коефіцієнт  $\hat{k}$ , що видає Каскад 1. На виході формуються скориговані значення: справжня товщина  $d_{true}$  та справжній коефіцієнт  $k_{true}$ . Загальна кількість вагових коефіцієнтів Каскаду 2 не перевищує кількох сотень, що є на три порядки менше, ніж у Каскаді 1. Це принципово важливо, оскільки означає, що для задовільного навчання достатньо лише кількох десятків реальних вимірювань.

Перед навчанням вхідні та вихідні дані нормалізуються за формулою (3.34):

$$X_{scaled} = \frac{(X - \mu_X)}{\sigma_X}, \quad Y_{scaled} = \frac{(Y - \mu_Y)}{\sigma_Y}, \quad (3.34)$$

де  $\mu$  та  $\sigma$  — вибіркові середнє та стандартне відхилення, обчислені за калібрувальною вибіркою. Параметри нормалізації зберігаються разом з вагами мережі і використовуються при інференсі. Навчання виконується оптимізатором Adam зі швидкістю навчання 0.01, функцією втрат MSE, протягом 500 епох з розміром батчу 8. Такі гіперпараметри обрані виходячи з малого обсягу навчальних даних: малий батч забезпечує стохастичність оновлень, а велика кількість епох — збіжність при малій вибірці.

### 3.6.3. Формування калібрувальної вибірки

Для навчання Каскаду 2 необхідна вибірка пар: (вихід Каскаду 1, еталонне фізичне вимірювання). Еталонним значенням товщини шару є безпосередній замір лінійкою або ультразвуковим товщиноміром на реальному резервуарі. Еталонне значення часового коефіцієнта  $k_{true}$  є відомим з умов лабораторного експерименту або визначається за відомою методикою незалежно від вимірювача.

Калібрувальна вибірка формується зі рядків файлу *simulation\_results.csv* (додаток II), у яких заповнена колонка фізичного виміру (*ruler\_measurement*). Такий підхід дозволяє накопичувати калібрувальні точки поступово, у міру проведення фізичних вимірювань в процесі штатної експлуатації приладу.

Кожен рядок з еталонним значенням автоматично включається у вибірку при черговому перенавчанні Каскаду 2.

У рамках даної роботи для верифікації алгоритму калібрувальні дані фізичного об'єкта формувалися програмно — шляхом симуляції роботи реального резервуара з відомими параметрами. Це дозволило відтворити умови реального калібрування без необхідності залучення фізичного стенду на етапі розробки.

Програмна реалізація (додаток Е) підтримує два режими формування вхідних даних для Каскаду 2: на основі виходів Каскаду 1 безпосередньо (режим `USE_KALMAN_DATA = False`) або після попереднього згладжування фільтром Калмана (режим `USE_KALMAN_DATA = True`). Застосування фільтра Калмана перед калібруванням дозволяє зменшити вплив випадкових шумів поодиноких вимірювань на якість навченої калібрувальної моделі.

Таблиця 3.8 містить порівняння ключових характеристик двох каскадів нейромережевого обчислювача.

Таблиця 3.8 — Порівняльні характеристики каскадів нейромережевого обчислювача

Характеристика	Каскад 1 (синтетичний рівень)	Каскад 2 (фізичний рівень)
Дані для навчання	30 000 синтетичних зразків з математичної моделі	Реальні виміри лінійкою на фізичному об'єкті
Кількість входів	$2 \times 40 \times 8 + 8 + 40 = 688$ значень	2 значення ( $\hat{d}$ , $\hat{k}$ з Каскаду 1)
Кількість виходів	$5 (\hat{d}, \hat{k}, P_d, P_k, R)$	$2 (d_{true}, k_{true})$
Розмір мережі	Велика (сотні нейронів)	Мала: Dense(16) → Dense(8) → Dense(2)
Коли навчається	Один раз, до розгортання	У процесі експлуатації об'єкта

## Продовження таблиці 3.8

Характеристика	Каскад 1 (синтетичний рівень)	Каскад 2 (фізичний рівень)
Мета	Вилучення ознак з частотно-часових даних	Калібрування до конкретного фізичного об'єкта

Така дворівнева структура реалізує концепцію розділення знань: Каскад 1 акумулює загальні фізичні закономірності розповсюдження електромагнітного поля у шаруватому середовищі, здобуті з великого синтетичного набору даних. Каскад 2 акумулює специфічні характеристики конкретного фізичного об'єкта, здобуті з малої кількості реальних вимірювань.

#### 3.6.4. Процедура перенавчання та оновлення моделі в процесі експлуатації

Принциповою перевагою запропонованої структури є можливість адаптивного уточнення Каскаду 2 без повторного навчання великої синтетичної мережі. Алгоритм оновлення передбачає такі кроки. На першому кроці оператор виконує серію фізичних вимірювань товщини шару при відомих умовах (наприклад, після зупинки резервуара та безпосереднього вимірювання рівня). На другому кроці отримані пари (вихід Каскаду 1, фізичний замір) додаються до файлу калібрувальних даних. На третьому кроці запускається процедура перенавчання Каскаду 2, яка займає лічені секунди завдяки малому розміру мережі та малій вибірці. На четвертому кроці оновлені ваги зберігаються і негайно набувають чинності у подальших вимірюваннях.

Така процедура може виконуватися автоматично у фоновому режимі без переривання роботи приладу. Частота перенавчання визначається темпом накопичення нових фізичних вимірювань: на практиці достатньо кількох вимірювань на місяць для підтримання актуальності калібрування при поступовому дрейфі характеристик об'єкта.

Двоканальне калібрування — одночасне уточнення товщини та коефіцієнта кінетики — є необхідним, оскільки ці параметри є взаємопов'язаними у вихідному просторі Каскаду 1: систематична похибка оцінки товщини зазвичай супроводжується похибкою оцінки швидкості розшарування через спільну основу вхідних ознак.

### 3.6.5 Формування комплексного критерію достовірності ( $Err$ )

Одночасне калібрування фізичних величин ( $d, k$ ) та оцінки достовірності в рамках однієї нейромережі (Каскаду 2) є недоцільним. Спроба інтегрувати цільову константу достовірності (наприклад,  $Err = 1.0$  у точках калібрування) у функцію втрат нейромережі на малій вибірці призводить до явища перенавчання (overfitting). Нейромережа оптимізує ваги для мінімізації похибки статичної константи, критично дестабілізуючи розрахунок динамічних фізичних величин, зокрема, кінетичного коефіцієнта  $k$ .

З огляду на це, формування фінального критерію достовірності  $Err$  винесено за межі нейромережевого обчислювача. Комплексна достовірність розраховується аналітично на основі суперпозиції ймовірнісних параметрів, отриманих з Каскаду 1 ( $P_d, P_k, R$ ), а також шляхом оцінки стабільності виходу фільтра Калмана. Такий гібридний підхід гарантує високу стабільність вимірювального комплексу та стійкість до електронних шумів на малих товщинах рідини.

## Висновки до розділу 3

1. У третьому розділі розроблено дискретну макромодель багатoshарового середовища типу «нафта–емульсія–вода», яка описує електрофізичну взаємодію копланарного ємнісного перетворювача з вертикально стратифікованим середовищем на основі матриці вузлових адмітансів. Побудована модель забезпечила формування цифрового двійника вимірювальної системи та створила обчислювальну основу для розрахунку

спектра комплексних коефіцієнтів передачі, необхідного для подальшого розв'язання оберненої задачі ідентифікації параметрів середовища.

2. Показано, що використання багаточастотного підходу є необхідною умовою однозначного визначення параметрів середовища, оскільки окремі частотні області відображають вплив різних фізичних чинників. На основі цифрового двійника сформовано параметричний простір станів і згенеровано синтетичний набір даних методом Монте-Карло, який охоплює варіації геометричних, електрофізичних і температурних характеристик системи. Для навчання моделі використано 30 тис. синтетичних прикладів, що дало змогу відмовитися від надмірного обсягу натурних експериментів.

3. Сформовано структури вхідних даних і дворівневої нейромережевої моделі для оцінювання товщини нафтового шару та часового коефіцієнта розшарування. Встановлено, що достатньою є інформативність 8 часових зрізів з кроком 1 хвилина, кожен з яких містить спектральні ознаки, сформовані за 40 частотами. Для підвищення точності оцінювання динамічних параметрів до вхідного опису додано похідні характеристики спектра, а перехід від синтетичного до фізичного рівня реалізовано через компактний проміжний простір ознак, придатний для подальшого калібрування на реальному об'єкті.

## РОЗДІЛ 4

# АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РОЗДІЛУ ФАЗ НАФТОВОЇ ЕМУЛЬСІЇ

### 4.1. Апаратно-програмна структура підсистеми первинного збору даних

#### 4.1.1 Цифровий синтез двоканального збудження

Вибір мікроконтролера для реалізації методу активної компенсації визначається необхідністю формування двох когерентних синусоїдальних сигналів – напруги збудження та напруги компенсації – з однаковою частотою та керованим співвідношенням амплітуд і фаз. Використання зовнішніх генераторів або спеціалізованих DDS-синтезаторів ускладнює конструкцію та підвищує її вартість. Тому в якості базового елемента обрано мікроконтролери родини STM32, які поєднують продуктивне ядро ARM Cortex-M4 з блоком обчислень з плаваючою комою (FPU) та багату аналогову периферію. Застосування одного мікроконтролера забезпечує когерентність сигналів, оскільки обидві напруги генеруються від одного тактового генератора та спільних таймерів, що унеможливорює різницю частот та паразитний фазовий дрейф. Крім того, інтеграція вбудованих цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП), операційних підсилювачів та компараторів дозволяє реалізувати повний вимірювальний тракт на одному кристалі, зменшуючи кількість зовнішніх компонентів та споживану потужність. Наявність ядра Cortex-M4 з FPU та DSP-інструкціями забезпечує виконання алгоритмів цифрового опрацювання сигналів у реальному часі.

Генерація синусоїдальних напруг збудження та компенсації покладена на вбудовані 12-бітні ЦАП мікроконтролера. Це дозволяє відмовитися від зовнішніх перетворювачів та забезпечує програмну гнучкість. Синтез сигналу базується на методі прямого цифрового синтезу (DDS). У пам'яті мікроконтролера зберігається попередньо розрахована таблиця (look-up table),

що містить 32 дискретних значень для одного періоду синусоїди. Частота вихідного сигналу визначається частотою дискретизації, з якою ЦАП отримує нові значення з таблиці. Для мінімізації навантаження на центральний процесор застосовується апаратний механізм: таймер налаштовується на генерацію періодичних оновлень, канал прямого доступу до пам'яті (DMA) в режимі циркулярного буфера автоматично переносить чергове значення з таблиці в регістр даних ЦАП при кожному сигналі від таймера, а сам ЦАП працює в режимі зовнішнього тригера. Така комбінація «таймер – DMA – ЦАП» утворює апаратний DDS-синтезатор, який не потребує участі процесора для формування кожної точки сигналу; процесор лише змінює частоту таймера або вміст таблиці для перебудови частоти.

Вбудовані ЦАП мікроконтролерів STM32 є типовими реліктовими перетворювачами з напругою живлення 3.3 В, яка також використовується як опорна. Тому програмно-генерований сигнал має амплітуду в діапазоні від 0 до 3.3 В. Оскільки розроблена вимірювальна система потребує напруги збудження амплітудою 10 В для забезпечення необхідного співвідношення сигнал/шум, вихід ЦАП не може безпосередньо використовуватись для керування електродами. Для узгодження рівнів сигнал з ЦАП (0...3.3 В) подається на неінвертуючий вхід вбудованого операційного підсилювача, який за допомогою зовнішніх резисторів конфігурується як неінвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення близько 3, підвищуючи амплітуду до необхідних 10 В. Живлення цього операційного підсилювача здійснюється від шини 12 В, що дозволяє отримати вихідний сигнал з необхідним розмахом. Такий підхід дозволяє використовувати простий однополярний вихід ЦАП, переносячи задачу формування високовольтного сигналу на периферійний підсилювач, що забезпечує гнучкість та простоту цифрової частини системи. Архітектурні рішення підсистеми збору та обробки даних узгоджуються з підходом до побудови кіберфізичних систем моніторингу, розглянутим у [150].

#### 4.1.2 Прецизійний трансїмпедансний тракт (ТІА) з адаптивним діапазоном

Вимірювальний тракт системи повинен реєструвати струми, що протікають через внутрішні потенціальні електроди, в діапазоні від одиниць наноампер (при товстому шарі зневодненої нафти та низьких частотах) до декількох міліампер (при суцільному провідному середовищі води на частотах до 100 кГц). Такий надширокий динамічний діапазон, що охоплює шість порядків, унеможлиблює використання фіксованого коефіцієнта підсилення в трансїмпедансному підсилювачі (ТІА). Тому розроблено каскад з адаптивним керуванням коефіцієнтом перетворення на базі операційного підсилювача TL082 та аналогового комутатора.

Операційний підсилювач TL082 належить до родини приладів з польовими транзисторами на вході (JFET), що забезпечує надзвичайно малий вхідний струм зміщення (типово 30 пА) та високий вхідний опір (близько  $10^{12}$  Ом). Це дозволяє підключати підсилювач безпосередньо до потенціальних електродів без помітного шунтування сигналу. Крім того, TL082 має низький рівень шуму напруги ( $18 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ) та достатню швидкодію (час наростання 13 В/мкс) для роботи в діапазоні до 100 кГц. Недоліками є відносно велика напруга зміщення (3 мВ), однак вона не є критичною в даному застосуванні, оскільки вимірювання проводиться змінним струмом, а постійна складова відфільтровується синхронним детектуванням.

Класична схема трансїмпедансного підсилювача являє собою інвертуючий операційний підсилювач з резистором зворотного зв'язку  $R_f$ , підключеним між виходом та інвертуючим входом. Неінвертуючий вхід заземлюється. Вхідний струм  $I_{in}$  протікає через  $R_f$ , створюючи вихідну напругу  $U_{out} = -I_{in}R_f$ . Для забезпечення змінного коефіцієнта перетворення в розробленому пристрої застосовано аналоговий комутатор (серії 74НС4051), який підключає один з кількох резисторів зворотного зв'язку між виходом та інвертуючим входом. Номінали резисторів обрані так, щоб перекрити весь

діапазон струмів з необхідним запасом. При максимальному очікуваному струмі 5 мА для отримання вихідної напруги, що не перевищує  $\pm 10$  В (типовий діапазон TL082), потрібен опір  $R_f \leq \frac{10 \text{ В}}{0.005 \text{ А}} = 2 \text{ кОм}$ . Для найменших струмів 1 нА доцільно мати  $R_f = \frac{10}{10^{-9}} = 10^{10} \text{ Ом}$ , однак на практиці такі високоомні резистори мають значний власний шум та температурну нестабільність, тому використовується компромісне значення 10 МОм, що дає напругу 10 мВ при струмі 1 нА. Реальний набір резисторів включає номінали 1 кОм, 10 кОм, 100 кОм, 1 МОм та 10 МОм. Перемикання здійснюється мікроконтролером на основі попереднього вимірювання: спочатку використовується найменший коефіцієнт (1 кОм), а якщо вихідна напруга виявляється меншою за 0,1 В (що відповідає струму 100 мкА), система поступово збільшує  $R_f$  до наступного діапазону, доки сигнал не досягне рівня 1–8 В, оптимального для оцифровки.

Важливою проблемою трансїмпедансного підсилювача з великими значеннями  $R_f$  (понад 1 МОм) є чутливість до паразитної ємності, що шунтує резистор зворотного зв'язку. Навіть ємність монтажу 1 пФ при  $R_f = 10 \text{ МОм}$  створює частоту полюса близько 16 кГц, що викликає підйом амплітуди та фазовий зсув на вищих частотах. Для компенсації цього ефекту паралельно резистору зворотного зв'язку вмикається невеликий конденсатор (типово 0,5 – 2 пФ), який вносить додатковий нуль в передавальну характеристику та стабілізує підсилювач. Крім того, вхідна ємність самого операційного підсилювача (близько 10 пФ) та ємність кабелю (якщо використовується активне екранування) також впливають на стійкість. Тому в схемі передбачено регульований конденсатор в ланцюзі зворотного зв'язку, підбір якого здійснюється при калібруванні.

Вихідний сигнал трансїмпедансного підсилювача є двополярним (симетричним відносно землі) та має амплітуду до  $\pm 10$  В, що перевищує допустимий вхідний діапазон аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера (0...3,3 В). Для узгодження рівнів застосовано каскад зсуву рівня (level shifter), виконаний на операційному підсилювачі в диференціальній

або суматорній схемі. Сигнал з ТІА подається на один вхід через резистивний дільник, який послаблює його до амплітуди приблизно 1,5 В. Одночасно на другий вхід подається опорна напруга 1,65 В (отримана від вбудованого джерела мікроконтролера). Суматор на операційному підсилювачі виконує перетворення (4.1):

$$U_{\text{ADC}} = k \cdot U_{\text{ТІА}} + 1.65, \quad (4.1)$$

де  $k$  вибрано таким, що при  $U_{\text{ТІА}} = -10$  В вихід дорівнює 0 В, а при  $U_{\text{ТІА}} = +10$  В вихід дорівнює 3,3 В. Типові значення резисторів: для вхідного сигналу 20 кОм і 10 кОм (подільник 1/3), а для опорної напруги – відповідні резистори, що забезпечують потрібне зміщення. Така схема дозволяє використовувати весь динамічний діапазон 16-бітного АЦП мікроконтролера без втрати роздільної здатності.

Для мінімізації шумів та паразитних наведень весь трансімпедансний тракт разом з аналоговим комутатором та зсувом рівня розміщено на окремій друкованій платі з окремим аналоговим заземленням, з'єднаним із цифровою землею в одній точці. Живлення операційних підсилювачів TL082 здійснюється від двополярного джерела  $\pm 12$  В або  $\pm 15$  В, що забезпечує лінійність сигналу в повному діапазоні. Аналоговий комутатор керується від мікроконтролера через оптично ізольовані лінії для запобігання проникненню цифрових перешкод у вимірювальний тракт. Така структура дозволяє реєструвати струми від 1 нА до 5 мА з похибкою, що не перевищує 1% у всьому діапазоні, що підтверджено експериментальними вимірюваннями.

#### 4.1.3 Математична компенсація апаратних фазових зсувів

У реальній вимірювальній системі сигнали, що формуються мікроконтролером, проходять через цифро-аналогові перетворювачі, масштабуючі підсилювачі, довгі кабельні лінії та комутаційні елементи. Кожен з цих компонентів вносить власний фазовий зсув та зміну амплітуди, які залежать від частоти зондувального сигналу. Якщо не враховувати ці спотворення, алгоритм компенсації може втрачати стійкість або потребувати значної кількості ітерацій для досягнення балансу. Для розв'язання цієї

проблеми застосовується математичний апарат, що базується на симетрії генераторних каналів та повороті координат у комплексній площині.

Нехай мікроконтролер формує дві ідеальні синусоїдальні напруги у цифровій формі: напругу збудження (4.2):

$$\dot{U}_{\text{exc,math}} = A \cdot e^{j0}, \quad (4.2)$$

та напругу компенсації (4.3):

$$\dot{U}_{\text{comp,math}} = B \cdot e^{j\theta}, \quad (4.3)$$

де  $A$  – фіксована амплітуда збудження,  $B$  та  $\theta$  – змінні параметри, які регулюються алгоритмом для досягнення нульового струму. Ці сигнали проходять через однакові апаратні канали: ЦАП, підсилювачі, кабелі. Оскільки обидва канали є фізично ідентичними (використовуються однакові типи компонентів, симетрична топологія друкованої плати, кабелі однакової довжини та типу), їх комплексна передавальна характеристика є однаковою і може бути записана як (4.4):

$$\dot{K}_{hw} = M \cdot e^{j\beta}, \quad (4.4)$$

де  $M$  – коефіцієнт передачі за амплітудою, а  $\beta$  – паразитний фазовий зсув, внесений апаратурою. Тоді реальні напруги, які досягають електродів, розташованих усередині бака, визначаються виразами (4.5) та (4.6):

$$\dot{U}_{\text{exc,math}} = A \cdot M \cdot e^{j(0+\beta)} = AMe^{j\beta}, \quad (4.5)$$

$$\dot{U}_{\text{comp,real}} = B \cdot M \cdot e^{j(\theta+\beta)} = BMe^{j(\theta+\beta)}. \quad (4.6)$$

Метою вимірювання є визначення комплексного коефіцієнта передачі середовища (4.7):

$$\dot{K}_{\text{real}} = \frac{\dot{U}_{\text{comp,real}}}{\dot{U}_{\text{exc,real}}}. \quad (4.7)$$

Підставляючи наведені вирази, отримуємо (4.8):

$$\dot{K}_{\text{real}} = \frac{BMe^{j(\theta+\beta)}}{AMe^{j\beta}} = \frac{B}{A} e^{j\theta}. \quad (4.8)$$

Як видно з останнього співвідношення, апаратний коефіцієнт передачі  $M$  та паразитна фаза  $\beta$  повністю скорочуються. Отже, відношення реальних напруг на електродах дорівнює відношенню цифрових кодів, які задаються

мікроконтролером. Це фундаментальна властивість ратіометричного вимірювання при симетричних каналах збудження: точне знання абсолютних значень амплітуд або фазових затримок кабелів не є необхідним, оскільки вони автоматично компенсуються при обчисленні відношення.

Струм, що виникає в середовищі під дією різниці потенціалів між електродами, протікає через потенціальний електрод, кабель вимірювального каналу, трансімпедансний підсилювач та надходить на АЦП. Кожен з цих елементів також вносить свій коефіцієнт передачі. Нехай сумарна комплексна передавальна характеристика приймального тракту (від потенціального електрода до цифрового відліку АЦП) дорівнює (4.9):

$$\dot{K}_{rx} = L \cdot e^{j\gamma}, \quad (4.9)$$

де  $L$  – коефіцієнт перетворення струму в напругу (з урахуванням підсилення ТІА та масштабування), а  $\gamma$  – сумарний фазовий зсув приймального тракту. Тоді значення, яке бачить мікроконтролер після оцифровки, дорівнює (4.10):

$$\dot{I}_{adc} = \dot{I}_{re} \cdot L e^{j\gamma}, \quad (4.10)$$

де  $\dot{I}_{re}$  – фізичний струм, що протікає через електрод. Алгоритм компенсації змінює параметри  $B$  та  $\theta$  напруги компенсації доти, доки  $\dot{I}_{adc}$  не стане дорівнювати нулю (з точністю до квантування АЦП). Підставляючи умову балансу  $\dot{I}_{adc} = 0$  у наведене рівняння, отримуємо (4.11):

$$0 = \dot{I}_{re} \cdot L e^{j\gamma}. \quad (4.11)$$

Оскільки  $L \neq 0$  (підсилювач має скінченний коефіцієнт підсилення) та  $e^{j\gamma} \neq 0$  (експонента ніколи не перетворюється на нуль), єдиним розв'язком цього рівняння є  $\dot{I}_{re} = 0$ . Це означає, що в момент, коли мікроконтролер фіксує нульове значення оцифрованого струму, фізичний струм на електроді також дорівнює нулю. Паразитна фаза приймального тракту  $\gamma$  не впливає на положення точки балансу, оскільки нуль, помножений на будь-яке комплексне число, залишається нулем.

З наведених міркувань випливає, що для досягнення правильного балансу в сталому режимі не потрібно знати ні фазових зсувів каналів збудження, ні

фазових зсувів приймального тракту. Однак ці фазові зсуви суттєво впливають на динаміку процесу компенсації – швидкість збіжності та стійкість алгоритму. Без урахування паразитної фази регулятор може обирати неправильний напрямок зміни напруги компенсації, що призводить до коливань або повільного наближення до нуля. Для ілюстрації припустимо, що реальний струм у середовищі має суто реактивний характер, тобто (4.12):

$$\dot{I}_{re} = jI_0. \quad (4.12)$$

Нехай сумарний фазовий зсув каналів збудження та приймального тракту дорівнює (4.13):

$$\Sigma \phi = \beta + \gamma. \quad (4.13)$$

Тоді оцифрований струм становитиме (4.14):

$$\dot{I}_{adc} = jI_0 L e^{j\Sigma \phi}. \quad (4.14)$$

Якщо  $\Sigma \phi = 90$ , то (4.15):

$$e^{j90^\circ} = j \quad (4.15)$$

і (4.16):

$$\dot{I}_{adc} = j^2 I_0 L = -I_0 L, \quad (4.16)$$

тобто стає суто дійсною від'ємною величиною. Алгоритм, який орієнтується на компоненти  $\dot{I}_{adc}$  без корекції, буде змінювати дійсну складову напруги компенсації, тоді як для компенсації реактивного струму потрібно змінювати уявну складову. В результаті регулятор буде «промахуватися» і витратити зайві ітерації.

Для усунення цього ефекту застосовується алгоритм повороту координат. Сумарний паразитний фазовий зсув  $\Sigma \phi$  визначається попередньо під час калібрування. Для цього до електродів підключається еталонний резистор з відомим активним опором, для якого фізичний струм має бути суто дійсним ( $\dot{I}_{real} = I_0$ ). Виміряний АЦП комплексний струм (4.17):

$$\dot{I}_{adc} = I_0 L e^{j\Sigma \phi} \quad (4.17)$$

дозволяє обчислити (4.18):

$$\Sigma \phi = \arg(\dot{I}_{adc}). \quad (4.18)$$

Після визначення цього кута він зберігається в пам'яті мікроконтролера як калібрувальна константа. У робочому режимі кожен вимірний вектор струму  $I_{adc}$  повертається на кут  $-\Sigma \phi$  (4.19):

$$I_{corrected} = I_{adc} \cdot e^{-j\Sigma \phi}. \quad (4.19)$$

У координатній формі це перетворення реалізується за допомогою матриці повороту (4.20):

$$\begin{cases} I_{corr}^{re} = I_{adc}^{re} \cos(\Sigma \phi) + I_{adc}^{im} \sin(\Sigma \phi) \\ I_{corr}^{im} = I_{adc}^{im} \cos(\Sigma \phi) - I_{adc}^{re} \sin(\Sigma \phi) \end{cases} \quad (4.20)$$

Після такого повороту синфазний та квадратурний канали стають розв'язаними: зміна дійсної складової напруги компенсації впливає переважно на дійсну складову скоригованого струму, а зміна уявної – на уявну. Це дозволяє застосувати два незалежні пропорційні регулятори (або один комплексний регулятор) для кожної компоненти окремо. В результаті алгоритм компенсації досягає нульового струму за 2–3 ітерації незалежно від початкового фазового розузгодження, що забезпечує високу швидкодію та стійкість системи у всьому діапазоні частот.

## **4.2. Алгоритми опрацювання сигналів первинного перетворювача комп'ютерною системою**

Для реалізації методу активної компенсації розроблено алгоритм, що базується на цифровому синтезі двох когерентних синусоїдальних сигналів, керованому зменшенні струму збудження до нуля та лінійній апроксимації для точного визначення напруги балансу. Алгоритм враховує апаратні особливості мікроконтролера STM32G474, який обрано через наявність вбудованих операційних підсилювачів, високошвидкісних АЦП та можливість апаратного запуску DMA від таймерів, що забезпечує синхронну генерацію двох незалежних сигналів з мінімальним навантаженням на центральний процесор. Алгоритм компенсаційного вимірювання реалізовано як послідовність взаємопов'язаних етапів, що виконуються у фіксованому порядку та

забезпечують досягнення режиму нульового струму. Формалізація алгоритму у вигляді впорядкованої послідовності станів і переходів узгоджується з підходами до моделювання та планування інтелектуальних автоматизованих систем, розглянутими в [151].

#### 4.2.1 Формування опорних таблиць та налаштування DMA

У пам'яті мікроконтролера створюються дві таблиці (look-up tables) для кожного з двох 12-бітних ЦАП. Перша таблиця (DAC0) містить відліки синусоїди для каналу збудження. Друга таблиця (DAC1) містить відліки синусоїди для каналу компенсації. Розмір таблиці обрано рівним 32 точки на період, що забезпечує низький рівень гармонічних спотворень (THD менше 0,1%) при роботі на частотах до 100 кГц. Амплітуда сигналу задається масштабуванням значень таблиці: для збудження використовується постійний масштабний коефіцієнт  $A$ , для компенсації – змінний коефіцієнт  $B$  та фаза  $\theta$ , яка реалізується як циклічний зсув покажчика читання таблиці. Для генерації сигналу використовуються два канали DMA, налаштовані в режим циркулярного буфера. Кожен канал DMA підключений до відповідного таймера (наприклад, TIM2 для DAC0 та TIM3 для DAC1), який генерує оновлення з частотою дискретизації  $f_s = N \cdot f_{out}$ , де  $N = 512$  – довжина таблиці. Це забезпечує апаратне формування синусоїд без участі процесора.

#### 4.2.2 Вимірювання фоновго зсуву (Offset Calibration)

Перед початком активного пошуку нульового струму система виконує калібрування нуля вимірювального тракту. Напряга збудження та напряга компенсації встановлюються рівними нулю (таблиці обнулені, DMA вимкнено). Трансїмпедансний підсилювач працює з максимальним коефіцієнтом перетворення (найбільшим резистором зворотного зв'язку, наприклад 10 МОм). Проводиться серія з  $N_{offset}$  вимірювань (типово 100) АЦП з накопиченням та усередненням. Отримане середнє значення  $I_{offset}$  зберігається як константа зсуву і в подальшому віднімається від усіх вимірювань струму. Ця процедура компенсує статичний струм зміщення операційних підсилювачів та напругу зсуву АЦП.

### 4.2.3 Початкове встановлення параметрів збудження

Для забезпечення стабільної роботи алгоритму на всіх частотах зондування використовується адаптивне встановлення амплітуди збудження. На першому кроці система встановлює мінімальний коефіцієнт підсилення ТІА (найменший резистор зворотного зв'язку, наприклад 1 кОм), що відповідає найбільшому очікуваному струму. Потім вмикається генерація сигналу збудження з фіксованою амплітудою  $A_{init}$  (наприклад, 0,5 В після масштабування) та нульовою напругою компенсації. Вимірюється амплітуда струму  $I_{exc}$ . Якщо  $I_{exc}$  перевищує поріг насичення ТІА (наприклад, 80% від максимально допустимої напруги на виході), амплітуда збудження зменшується вдвічі. Якщо  $I_{exc}$  є занадто малою (менше 10% від шкали АЦП), амплітуда збудження збільшується вдвічі. Процес повторюється доти, доки вимірний струм не опиниться в діапазоні 20–80% від шкали АЦП при поточному коефіцієнті підсилення ТІА. Це гарантує оптимальне використання динамічного діапазону АЦП та запобігає перевантаженню. Для зміни амплітуди збудження використовується перерахунок таблиці DAC0: всі значення таблиці множаться на новий масштабний коефіцієнт. Оскільки таблиця має розмір 512 слів, перерахунок виконується за допомогою DMA з використанням копіювання з попередньо розрахованого базового масиву.

### 4.2.4 Грубе налаштування амплітуди компенсації

Після встановлення стабільної амплітуди збудження алгоритм переходить до грубого наближення напруги компенсації. Напруга компенсації формується з нульовою фазою ( $\theta = 0$ ) і змінною амплітудою  $V$ . Амплітуда змінюється дискретно з кроком, який забезпечує перекриття очікуваного діапазону. Для кожної амплітуди вимірюється комплексний струм  $I$  (синфазна та квадратурна складові) після віднімання  $I_{offset}$ . Вимірювання проводиться шляхом синхронного детектування: АЦП оцифровує вихід ТІА з частотою, синхронізованою з частотою збудження (наприклад, 16 відліків на період), і обчислюються проекції на синусну та косинусну функції. Після накопичення достатньої кількості періодів (типово 10–100) обчислюються усереднені

значення  $I_{re}$  та  $I_{im}$ . За результатами вимірювань будується залежність струму від амплітуди компенсації. Оскільки струм лінійно залежить від амплітуди компенсації (при фіксованій фазі), точка, де струм змінює знак, визначається інтерполяцією. Алгоритм обирає дві амплітуди  $B_1$  та  $B_2$ , для яких синфазна складова струму має протилежні знаки, і обчислює орієнтовну амплітуду нульового струму  $B_{zero}$  за формулою лінійної інтерполяції (4.21):

$$B_{zero} = B_1 - I_{re}(B_1) \cdot \frac{B_2 - B_1}{I_{re}(B_2) - I_{re}(B_1)}. \quad (4.21)$$

Це грубе наближення дозволяє зменшити струм до рівня, при якому можна переходити до тонкого налаштування фази.

#### 4.2.5 Тонке налаштування фази компенсації

Після встановлення амплітуди компенсації, близької до точки балансу, алгоритм переходить до регулювання фази. Фаза  $\theta$  змінюється дискретно з кроком, що відповідає фазовому розрізненню 1–2 градуси. Для кожної фази вимірюється квадратурна складова струму  $I_{im}$ . Оскільки при правильній амплітуді квадратурна складова залежить переважно від фази, точка зміни знаку  $I_{im}$  визначається аналогічно лінійною інтерполяцією. На цьому етапі використовується вже скоригована амплітуда  $B_{zero}$ , а фаза підлаштовується так, щоб  $I_{im}$  наблизилася до нуля. Отримана пара  $(B_{zero}, \theta_{zero})$  забезпечує мінімум струму, однак через нелінійності та шуми вона не є ідеальною.

#### 4.2.6 Лінійна апроксимація для точного визначення точки балансу

Для підвищення точності та нівелювання впливу шумів алгоритм виконує локальне сканування в околиці знайденого наближення. Визначаються чотири точки: дві за амплітудою (при фіксованій оптимальній фазі) та дві за фазою (при фіксованій оптимальній амплітуді). Для амплітудного каналу обираються значення  $B_{zero} \pm \Delta B$ , де  $\Delta B$  вибирається таким, щоб зміна струму становила не менше 10% від шкали АЦП (типово  $\Delta B = 0,05B_{zero}$ ). Для кожного значення вимірюється комплексний струм  $\dot{I}$ , з якого виділяються синфазна складова  $I_{re}$ . Аналогічно для фазового каналу обираються  $\theta_{zero} \pm \Delta\theta$  (наприклад,  $\Delta\theta = 3$ ) і вимірюється квадратурна складова  $I_{im}$ .

За отриманими даними будується лінійна модель (4.22), (4.23):

$$I_{re}(B) = a_B \cdot (B - B_{zero}) + I_{re0}, \quad (4.22)$$

$$I_{im}(\theta) = a_\theta \cdot (\theta - \theta_{zero}) + I_{im0}, \quad (4.23)$$

де  $I_{re0}$  та  $I_{im0}$  – залишкові струми в точці наближення. Коефіцієнти  $a_B$  та  $a_\theta$  обчислюються методом найменших квадратів за двома точками (або більше, якщо використовується додаткове сканування). Точне положення нуля для амплітуди та фази визначається як (4.24), (4.25):

$$B_{exact} = B_{zero} - \frac{I_{re0}}{a_B}, \quad (4.24)$$

$$\theta_{exact} = \theta_{zero} - \frac{I_{im0}}{a_\theta}. \quad (4.25)$$

Цей підхід дозволяє отримати напругу компенсації (4.26):

$$\dot{U}_{comp} = B_{exact} e^{j\theta_{exact}}, \quad (4.26)$$

при якій очікуваний струм збудження дорівнює нулю з похибкою, що визначається лінійністю системи та рівнем шуму. Оскільки вимірювання проводяться в лінійній області (малі відхилення від точки балансу), апроксимація дає високу точність навіть при помірному відношенні сигнал/шум.

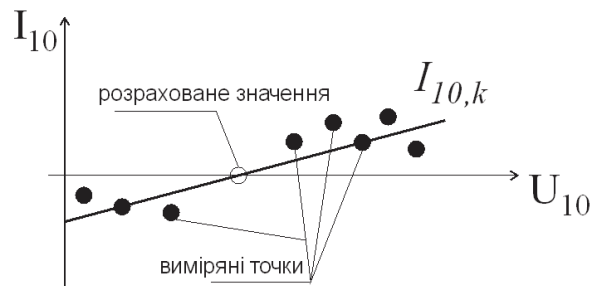


Рисунок 4.1 — Принцип знаходження напруги збудження при 0 значення струму

#### 4.2.7 Програмна реалізація фазового зсуву компенсаційної напруги

Для формування двох когерентних синусоїдальних сигналів з керованим фазовим співвідношенням у мікроконтролері STM32G474 застосовується апаратний механізм DMA (Direct Memory Access), налаштований на роботу з двома 12-бітними ЦАП (DAC1 та DAC2). Вибір STM32G474 обумовлений

наявністю двох незалежних DMA-контролерів (DMA1 та DMA2) у старших моделях серії, що дозволяє одночасно використовувати DMA для обох каналів ЦАП та для АЦП без взаємних затримок. У конфігурації з чотирма АЦП (ADC1–ADC4) можлива організація синхронного перетворення з об'єднанням результатів у регістрі ADCx\_CDR, що зменшує кількість необхідних DMA-каналів.

Базова таблиця відліків синусоїди (look-up table) формується в пам'яті як масив 16-бітних значень (оскільки ЦАП працює в 12-бітному режимі з правим вирівнюванням). Довжина таблиці  $N$  обирається з умови мінімізації спектральних витікань при заданій частоті дискретизації. Частота вихідного сигналу визначається частотою оновлення ЦАП, яка задається таймером (наприклад, TIM2). Для отримання частоти  $f_{out}$  при довжині таблиці  $N$  та частоті дискретизації  $f_s$  виконується співвідношення  $f_{out} = \frac{f_s}{N}$ . Для уникнення витікань необхідно, щоб  $f_s$  була кратною  $f_{out}$ , що досягається вибором відповідних значень таймера. Типово  $N = 64$ , що забезпечує низький рівень гармонік при роботі на частотах до 100 кГц.

Фазовий зсув компенсаційної напруги відносно напруги збудження реалізується шляхом зміщення покажчика читання DMA для каналу DAC1 (компенсація) відносно початку таблиці. Оскільки DMA працює в циркулярному режимі (*DMA\_Mode\_Circular*), для зміни фази достатньо змінити значення регістра DMA\_CNDTR (*Current Number of Data Register*), який визначає поточну позицію в буфері. При цьому необхідно тимчасово вимкнути DMA-канал, змінити початкову адресу або лічильник, а потім знову ввімкнути канал. Альтернативним підходом є використання двох окремих буферів для компенсації – з нульовою фазою та з фазовим зсувом  $90^\circ$ , з подальшим перемиканням між ними через DMA. Однак для довільних фаз зручнішим є програмне обчислення таблиці з потрібним зсувом і завантаження її в пам'ять з наступним переналаштуванням DMA.

#### 4.2.8 Синхронна генерація і когерентне накопичення гармонійного сигналу

У розробленій системі реалізовано жорстку синхронізацію процесів формування зондуючих напруг та оцифрування струму. Як джерело тактування використано один таймер (TIM2), який генерує періодичні події оновлення з частотою  $f_{\text{trig}}$ . Ці події одночасно використовуються як зовнішній тригер для обох каналів ЦАП (DAC1 та DAC2) та для запуску АЦП (ADC1). Завдяки цьому досягається абсолютна синхронність між формуванням напруг та реєстрацією струму.

Для кожного каналу ЦАП налаштовано DMA в циркулярному режимі (*DMA\_Mode\_Circular*). Буфер DMA містить таблицю відліків синусоїди довжиною  $N = 32$  точки на один період. При кожній події тригера від таймера DMA передає чергове значення з таблиці до відповідного регістра даних ЦАП, формуючи безперервний синусоїдальний сигнал з частотою  $f_{\text{out}} = \frac{f_{\text{trig}}}{N}$ . Таблиця для каналу збудження має фіксовану амплітуду  $A$ , таблиця для каналу компенсації оновлюється перед кожним циклом вимірювання відповідно до поточних параметрів амплітуди  $B$  та фази  $\theta$ . Фазовий зсув реалізується шляхом зміщення покажчика читання DMA в межах таблиці.

АЦП налаштовано на зовнішній тригер від того ж таймера TIM2. При кожній події оновлення таймера АЦП виконує одне перетворення, а результат через DMA передається до кільцевого буфера в пам'яті. Оскільки частота тригера дорівнює  $f_{\text{trig}}$ , а таблиця ЦАП містить 32 точки, на один період сигналу припадає рівно 32 відліки АЦП. Така кратність забезпечує природну когерентність дискретизації без необхідності додаткового перерахунку.

Для накопичення сигналу протягом великої кількості періодів DMA АЦП налаштовано в режим однократної передачі з перериванням по завершенню. Кількість передач встановлюється рівною  $M \cdot N$ , де  $M$  – задана кількість періодів (типово  $M = 100 \dots 1000$ ). Це означає, що DMA автоматично припиняє роботу після заповнення буфера даними з ММ повних періодів. Після зупинки

DMA генерується переривання, яке сигналізує про готовність масиву відліків для подальшого опрацювання.

Перед запуском вимірювання на заданій частоті виконується скидання показників DMA: для ЦАП значення регістра DMA\_CNDTR встановлюється в  $N$  (початок таблиці), для АЦП – в  $M \cdot N$ . Після цього одночасно запускаються DMA обох ЦАП, DMA АЦП та таймер TIM2. Така процедура гарантує, що початок накопичення збігається з початком періоду сигналу (нульовим фазовим кутом) і що в буфер АЦП потрапляє рівно  $M$  цілих періодів. Завдяки цьому відпадає необхідність у додатковому лічильнику переповнень DMA ЦАП – тривалість накопичення визначається виключно параметром  $M$ , заданим для АЦП.

Після отримання переривання від DMA АЦП накопичений масив відліків містить  $M \cdot N$  значень, які відповідають  $M$  періодам сигналу, синхронізованим з початком періоду. Для обчислення синфазної та квадратурної складових струму виконується одночастотне дискретне перетворення Фур'є (квадратурна кореляція) з використанням попередньо розрахованих таблиць синуса та косинуса довжиною  $N$ . Кожен відлік масиву множиться на відповідне значення косинуса та синуса з урахуванням його позиції всередині періоду (4.27), (4.28):

$$I_{re} = \frac{2}{M \cdot N} \sum_{k=0}^{MN-1} I[k] \cdot \cos\left(\frac{2\pi(k \bmod N)}{N}\right), \quad (4.27)$$

$$I_{im} = \frac{2}{M \cdot N} \sum_{k=0}^{MN-1} I[k] \cdot \sin\left(\frac{2\pi(k \bmod N)}{N}\right). \quad (4.28)$$

Обчислення виконується без розбиття на окремі періоди та наступного усереднення – суми накопичуються безпосередньо за всім масивом. Такий підхід забезпечує максимальне відношення сигнал/шум, пропорційне  $M \cdot N$ , та мінімальну обчислювальну складність, оскільки коефіцієнти (4.29) та (4.30):

$$\cos\left(\frac{2\pi(k \bmod N)}{N}\right) \quad (4.29)$$

$$\sin\left(\frac{2\pi(k \bmod N)}{N}\right) \quad (4.30)$$

заздалегідь розраховані для  $k = 0 \dots N - 1$  і використовуються циклічно. Реалізована схема синхронізації забезпечує абсолютну когерентність

вимірювань, що дозволяє досягти високої точності оцінювання амплітуди та фази струму, необхідної для стабільної роботи алгоритму компенсації.

#### 4.2.9 Вимірювання струму та синхронне детектування

Оцифровані значення струму з виходу ТІА надходять у буфер АЦП з частотою, синхронізованою з частотою генерованих сигналів. Для кожної частоти зондування накопичується масив відліків, кількість яких вибирається кратною періоду сигналу для забезпечення когерентності. Якщо частота дискретизації  $f_s = N \cdot f_{out}$ , де  $N$  – довжина таблиці, то за  $M$  періодів накопичується  $M \cdot N$  відліків, що дозволяє виконати синхронне детектування шляхом помноження на синусну та косинусну функції, згенеровані з тією ж частотою.

Для зменшення обчислювального навантаження операції синхронного детектування можна виконувати безпосередньо під час заповнення буфера, використовуючи переривання завершення DMA. Кожен новий відлік  $I[k]$  множиться на значення  $\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$  та  $\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$ , а результати накопичуються в окремих змінних. Після завершення накопичення синфазна та квадратурна складові обчислюються як (4.31), (4.32):

$$I_{re} = \frac{2}{M \cdot N} \sum_{k=0}^{MN-1} I[k] \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right), \quad (4.31)$$

$$I_{im} = \frac{2}{M \cdot N} \sum_{k=0}^{MN-1} I[k] \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right). \quad (4.32)$$

Коефіцієнт  $\frac{2}{M \cdot N}$  забезпечує правильне масштабування амплітуди. Для підвищення точності використовується 16-бітна або 32-бітна акумуляція з наступним усередненням.

Для виділення корисного сигналу на частоті збудження в умовах високого рівня шумів та завад у розробленому програмному забезпеченні реалізовано метод цифрового синхронного детектування (lock-in amplification) з використанням апаратно-орієнтованої бібліотеки CMSIS-DSP. Цей підхід дозволяє ефективно обчислювати синфазну та квадратурну складові струму без

виконання повного спектрального аналізу, що критично для збереження обчислювальних ресурсів мікроконтролера.

Після заповнення DMA-буфера АЦП масивом відліків  $I[k]$  (розміром  $M \cdot N$ , де  $N = 32$  – кількість точок на період,  $M$  – кількість накопичених періодів) виконується його підготовка до опрацювання. Оскільки дані з АЦП надходять у 12- або 16-бітному цілочисельному форматі, першим кроком є перетворення їх у 32-бітні числа з плаваючою комою. Для цього використовується функція `arm_q15_to_float` (або `arm_q31_to_float` залежно від налаштувань АЦП) бібліотеки CMSIS-DSP, яка виконує масштабування зі збереженням динамічного діапазону. Перетворений масив зберігається в окремому буфері у форматі `float32_t`.

Опорні сигнали – косинус та синус частоти збудження – попередньо розраховуються для одного періоду ( $N$  точок) і зберігаються у вигляді двох статичних масивів `cos_table[N]` та `sin_table[N]`. Розрахунок виконується один раз при ініціалізації системи за допомогою функції `arm_sin_cos_f32`, яка обчислює одночасно синус та косинус заданого кута з високою точністю. Завдяки цьому значення опорних сигналів є ідеально когерентними з таблицями ЦАП, що виключає додаткові фазові похибки.

Обчислення скалярних добутків масиву відліків з опорними масивами виконується функцією `arm_dot_prod_f32`. Для синфазної складової викликається `arm_dot_prod_f32(I_float, cos_table, M * N, &sum_re)`, для квадратурної – `arm_dot_prod_f32(I_float, sin_table, M * N, &sum_im)`. Оскільки масив `cos_table` та `sin_table` мають довжину лише  $N$ , а довжина вхідного масиву становить  $M \cdot N$ , функція `arm_dot_prod_f32` автоматично обробляє весь масив, послідовно перемножуючи відліки з циклічним повторенням опорних таблиць завдяки звичайному індексуванню – фактично вхідний масив і опорний масив однакової довжини, тому опорний масив попередньо розширюється шляхом повторення  $M$  разів. Це робиться на етапі підготовки: створюються два розширені масиви `cos_ref[M*N]` та `sin_ref[M*N]`, які формуються копіюванням базових таблиць за допомогою `arm_copy_f32` у

циклі. Такий підхід дозволяє уникнути обчислення індексів за модулем на кожному кроці та максимізує продуктивність.

Отримані суми `sum_re` та `sum_im` містять накопичені значення кореляції. Для отримання дійсних синфазної та квадратурної складових струму вони масштабуються множителем  $\frac{2}{M \cdot N}$ . Ця операція виконується за допомогою звичайних арифметичних операцій з плаваючою комою. Після цього за необхідності обчислюються амплітуда (`arm_sqrt_f32` для суми квадратів) та фаза (`atan2f`).

Використання CMSIS-DSP забезпечує кілька важливих переваг. По-перше, функції бібліотеки максимально оптимізовані для архітектури ARM Cortex-M4: вони використовують SIMD-інструкції (наприклад, `arm_dot_prod_f32` обробляє по два числа за такт) та апаратний FPU, що зменшує час виконання до декількох мікросекунд для типових розмірів масивів ( $M = 500$ ,  $N = 32$ ). По-друге, код стає компактним і менш схильним до помилок порівняно з ручним написанням циклів. По-третє, оскільки обчислення виконуються з плаваючою комою, динамічний діапазон не обмежується, що особливо важливо при вимірюванні малих струмів поблизу точки балансу.

Альтернативне застосування швидкого перетворення Фур'є (FFT) для цієї задачі є недоцільним. FFT потребує обробки всього масиву зі складністю  $\mathcal{O}(L \log L)$ , де  $L = M \cdot N$ , і надає інформацію про всі спектральні компоненти, тоді як необхідна лише одна частота. Крім того, для досягнення когерентності довжина масиву має бути степенем двійки, що призводить до або збільшення часу накопичення, або втрати частини даних. Синхронне детектування з використанням скалярних добутків дає змогу гнучко обирати час накопичення (будь-яке ціле число періодів) і використовувати мінімум обчислювальних ресурсів. У розробленій системі час обробки одного буфера даних (1024 відліки) становить менше 200 мкс при тактовій частоті 170 МГц, що дозволяє виконувати вимірювання з частотою до 10 Гц на кожен частотну

точку і залишає достатньо ресурсів для роботи нейромережевого ідентифікатора.

#### 4.2.10 Розробка алгоритму пошуку нульового струму з лінійною апроксимацією

Процес пошуку нульового струму для кожної частоти зондування складається з наступних кроків, які реалізуються програмно з використанням описаних апаратних механізмів.

Крок 1. Ініціалізація параметрів. Для поточної частоти  $f$  обчислюється період таймера, що забезпечує  $f_s = N \cdot f$ . DMA для DAC0 (збудження) налаштовується на статичну таблицю з фіксованою амплітудою  $A_0$ . DMA для DAC1 (компенсація) налаштовується на початкову таблицю з нульовою амплітудою ( $B = 0$ ). DMA для АЦП налаштовується на накопичення  $M \cdot N$  відліків. Таймер запускається, і система очікує завершення першого циклу накопичення.

Крок 2. Вимірювання фонового струму. При нульовій напрузі компенсації ( $B = 0$ ) вимірюється струм  $I_{\text{offset}}$  (синфазна та квадратурна складові). Це значення зберігається і в подальшому віднімається з усіх вимірювань для компенсації власних струмів зміщення ТІА та АЦП.

Крок 3. Грубе налаштування амплітуди. Алгоритм послідовно встановлює значення амплітуди компенсації  $B_j$  з кроком, що перебиває очікуваний діапазон (наприклад, 10%, 20%, ..., 100% від максимальної). Для кожного  $B_j$  вимірюється струм  $I_j = I_{\text{meas}} - I_{\text{offset}}$ . За результатами визначаються дві точки  $B_1$  та  $B_2$ , для яких синфазна складова струму  $I_{re}$  має протилежні знаки. Орієнтовна амплітуда нульового струму обчислюється лінійною інтерполяцією (4.33):

$$B_{\text{zero}} = B_1 - I_{re}(B_1) \cdot \frac{B_2 - B_1}{I_{re}(B_2) - I_{re}(B_1)}. \quad (4.33)$$

Крок 4. Грубе налаштування фази. Встановлюється амплітуда компенсації  $B = B_{\text{zero}}$ . Фаза  $\theta$  змінюється дискретно з кроком  $\Delta\theta$  (наприклад,  $5^\circ$ ) в діапазоні, що охоплює очікуваний фазовий зсув. Для кожного  $\theta_k$

вимірюється квадратурна складова струму  $I_{im}(\theta_k)$ . Визначаються дві точки  $\theta_1$  та  $\theta_2$  з протилежними знаками  $I_{im}$ , і обчислюється орієнтовна фаза (4.34):

$$\theta_{zero} = \theta_1 - I_{im}(\theta_1) \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{I_{im}(\theta_2) - I_{im}(\theta_1)}. \quad (4.34)$$

Крок 5. Тонке сканування та лінійна апроксимація. Після отримання наближених значень  $(B_{zero}, \theta_{zero})$  виконується локальне сканування в малій околиці. Формуються чотири додаткові точки:

для амплітуди:  $B_{zero} \pm \Delta B$  при фіксованій фазі  $\theta_{zero}$ ;

для фази:  $\theta_{zero} \pm \Delta \theta$  при фіксованій амплітуді  $B_{zero}$ .

Для кожної точки вимірюється комплексний струм, і будуються дві лінійні моделі (4.35), (4.36):

$$I_{re}(B) = a_B \cdot (B - B_{zero}) + I_{re0}, \quad (4.35)$$

$$I_{im}(\theta) = a_\theta \cdot (\theta - \theta_{zero}) + I_{im0}. \quad (4.36)$$

Коефіцієнти  $a_B$  та  $a_\theta$  обчислюються за двома точками (або методом найменших квадратів при більшій кількості точок). Уточнені значення амплітуди та фази, при яких струм дорівнює нулю, визначаються як (4.37), (4.38):

$$B_{exact} = B_{zero} - \frac{I_{re0}}{a_B}, \quad (4.37)$$

$$\theta_{exact} = \theta_{zero} - \frac{I_{im0}}{a_\theta}. \quad (4.38)$$

Крок 6. Фінальна перевірка. Встановлюються знайдені параметри  $(B_{exact}, \theta_{exact})$  і проводиться контрольне вимірювання струму. Якщо модуль струму не перевищує заданого порогу (наприклад, 0,1% від максимального очікуваного), результат вважається достовірним. Якщо перевищує, процедура повторюється з більш дрібним кроком.

#### 4.2.11 Калібрування та компенсація фазових зсувів тракту

Описані процедури грубого та тонкого налаштування дозволяють знайти точку балансу без попереднього знання паразитних фазових зсувів генераторних каналів. Однак для прискорення збіжності доцільно виконати калібрування з використанням еталонного резистора. При підключенні

резистора  $R_{cal}$  відомого номіналу між вихідними електродами (струмовими) та вхідними (потенціальними), фізичний струм має бути суто активним ( $I_{real} = \frac{U_{exc}}{R_{cal}}$ ). Вимірний АЦП струм  $I_{adc} = I_{real} \cdot L \cdot e_{j\gamma}$  дозволяє обчислити сумарний фазовий зсув приймального тракту  $\gamma$ . Для компенсації цього зсуву під час роботи використовується матриця повороту (4.39):

$$\begin{pmatrix} I_{corr,re} \\ I_{corr,im} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{adc,re} \\ I_{adc,im} \end{pmatrix}. \quad (4.39)$$

Після такого повороту координат синфазна та квадратурна складові струму стають розв'язаними, що дозволяє регулювати амплітуду та фазу компенсації незалежно. Калібрувальний кут  $\gamma$  зберігається в пам'яті мікроконтролера і використовується для всіх подальших вимірювань на даній частоті. Калібрування тракту та компенсація фазових зсувів є необхідними для забезпечення відтворюваності вимірювань і зменшення похибок, пов'язаних з нестабільністю апаратних компонентів. Такий підхід узгоджується з практикою запобігання помилкам і підвищення надійності інтелектуальних автоматизованих систем, описаною в [152].

#### **4.2.12 Послідовність операцій для повного спектрального вимірювання**

Для сканування всього частотного діапазону (10 Гц – 100 кГц) алгоритм виконує наступну послідовність:

1. Встановлюється перша частота  $f_1 = 10$  Гц. Обчислюються параметри таймера та довжина таблиці  $N$ .
2. Виконується калібрування нуля (вимірювання  $I_{offset}$ ).
3. Виконується пошук нульового струму за описаною процедурою, результатом якого є комплексне значення  $\dot{U}_{comp}$ .
4. Значення  $\dot{K} = \frac{\dot{U}_{comp}}{\dot{U}_{exc}}$  зберігається в масиві спектральних даних.
5. Перехід до наступної частоти з логарифмічною сіткою. Для прискорення збіжності початкові наближення  $B_{init}$  та  $\theta_{init}$  беруться з результатів попередньої частоти.

6. Після завершення сканування всіх 40 частот масив комплексних коефіцієнтів передачі передається до нейромережевого ідентифікатора.

Використання описаних програмних рішень дозволяє реалізувати повністю автоматизований вимірювальний цикл з мінімальною участю процесора завдяки широкому застосуванню DMA-каналів, апаратних тригерів та переривань. Така структура забезпечує високу швидкість (повний спектральний цикл займає менше 4 секунд) та низьке енергоспоживання, що є критичним для вбудованих систем промислового призначення.

#### **4.2.13. Розгортання нейромережевого ідентифікатора на мікроконтролері STM32G474**

Після розробки та навчання нейромережевих моделей на персональному комп'ютері постає задача їх розгортання на вбудованому мікроконтролері. Вибір цільової платформи визначається вимогами до обсягу пам'яті для зберігання ваг мережі та обчислювальної потужності, достатньої для виконання інференсу в реальному часі. Для реалізації системи обрано мікроконтролер STM32G474 на ядрі Cortex-M4 з апаратним модулем обчислень з рухомою комою, тактовою частотою 170 МГц та обсягом Flash-пам'яті 512 КБайт. Платформа підтримується екосистемою ST Edge AI, що дозволяє конвертувати навчені моделі у C-код, оптимізований для даної серії мікроконтролерів. Навчені моделі попередньо перетворено у формат TensorFlow Lite на стороні ПК, після чого виконано статичний аналіз з формуванням звіту про вимоги до пам'яті та обчислювальне навантаження на цільовій платформі.

За результатами аналізу сформовано порівняльну характеристику обох моделей (таблиця 4.1).

Як видно з таблиці, модель *cascade1\_dual* є значно більшою: її ваги займають майже 297 КБайт Flash-пам'яті, а разом з бібліотекою виконання — понад 314 КБайт. Модель *cascade2\_calibrator* є на три порядки меншою і займає лише близько 9,3 КБайт Flash та менш ніж 2 КБайт ОЗП. Сумарна потреба у Flash для обох моделей становить близько 331 КБайт, що вміщується

у 512 КБайт Flash-пам'яті мікроконтролера STM32G474 з достатнім запасом для розміщення основної програми.

Таблиця 4.1 — Порівняльні характеристики нейромережових моделей

Параметр	<i>cascade1_dual</i> (велика)	<i>cascade2_calibrator</i> (мала)
Формат моделі	TensorFlow Lite (.tflite)	TensorFlow Lite (.tflite)
Кількість параметрів (ваг)	76 133 (297,39 КБайт)	202 (808 Байт)
Кількість операцій (MACC)	155 109	226
Вхід 1	f32(1×40) — OLS Slopes	f32(1×2)
Вхід 2	f32(1×8×81) — Raw Data	—
Вихід 1	f32(1×4) — 4 параметри	f32(1×2)
Вихід 2	f32(1×1) — скалярне значення	—
Ваги у Flash (лише модель)	304 532 Байт (297,39 КБайт)	808 Байт
Бібліотека RT у Flash	17 032 Байт (16,63 КБайт)	8 752 Байт (8,55 КБайт)
Flash РАЗОМ	321 564 Байт (314,03 КБайт)	9 560 Байт (9,34 КБайт)
Активації у ОЗП	5 260 Байт (5,14 КБайт)	96 Байт
ОЗП РАЗОМ (з бібліотекою RT)	10 712 Байт (10,46 КБайт)	1 908 Байт (1,86 КБайт)
Час виконання (інференс, Host)	~0,183 мс / вибірку	—

Модель *cascade1\_dual* має двогілкову структуру. Перша гілка обробляє вектор нахилів OLS і складається з двох послідовних повнозв'язних шарів з активацією.

Друга гілка обробляє сирі спектральні дані за допомогою двовимірної згорткової операції з подальшим пулінгом та повнозв'язним шаром. Згорткова операція є найбільш обчислювально інтенсивною і становить близько 60% від загального навантаження моделі.

Вихідні вектори обох гілок об'єднуються і передаються до спільного класифікатора, що складається з трьох повнозв'язних шарів зі зменшенням розмірності. З останнього шару паралельно формуються два виходи: скалярний регресійний вихід та вектор з чотирьох параметрів.

Переважає більшість операцій (99,5%) є множеннями з накопиченням типу *smul\_f32\_f32*, тобто скалярними добутками у форматі *float32*, що добре узгоджується з оптимізованими ядрами бібліотеки CMSIS-DSP та ST Edge AI Runtime для архітектури Cortex-M4 з FPU.

Розподіл ресурсів пам'яті між двома нейромережами та іншими компонентами прошивки наведено у таблиці 4.2.

Сумарне використання Flash-пам'яті для нейромережевих компонентів становить близько 331 КБайт. З урахуванням того, що мікроконтролер STM32G474 надає 512 КБайт Flash, залишається понад 180 КБайт для розміщення основного коду прошивки, включаючи драйвери периферії, алгоритм компенсаційного вимірювання, бібліотеку CMSIS-DSP та системні бібліотеки. Це забезпечує достатній запас навіть з урахуванням подальшого розвитку функціональності пристрою.

Використання оперативної пам'яті є особливо економним: обидві нейромережі разом займають лише близько 12,6 КБайт з наявних 128 КБайт. Це досягається завдяки розміщенню вхідних та вихідних буферів моделі всередині вже виділеного буфера активацій, що виключає необхідність додаткового виділення пам'яті. Таким чином, понад 115 КБайт оперативної пам'яті

залишається доступним для буферів прямого доступу до пам'яті, стека та інших компонентів прошивки.

Таблиця 4.2 — Використання ресурсів Flash та ОЗП обома нейромережевими моделями

Компонент	<code>cascade1_dual</code>	<code>cascade2_calibrator</code>	Разом
Ваги неймережі (Flash, ro)	304 532 Байт	808 Байт	305 340 Байт
Бібліотека ST AI RT (Flash)	17 032 Байт	8 752 Байт	~17 032 Байт*
Flash РАЗОМ	321 564 Байт	9 560 Байт	~331 КБайт
Буфер активацій (ОЗП)	5 260 Байт	96 Байт	5 356 Байт
Бібліотека RT (ОЗП)	5 452 Байт	1 812 Байт	~7 264 Байт
ОЗП РАЗОМ	10 712 Байт	1 908 Байт	~12 620 Байт

Для інтеграції згенерованого коду неймережі у проєкт мікроконтролера використовується пакет X-CUBE-AI, який автоматично додає необхідні файли вихідного коду. Ваги мережі зберігаються у Flash-пам'яті у режимі лише для читання і не копіюються до оперативної пам'яті під час роботи.

Інференс запускається після отримання спектральних даних від алгоритму компенсаційного вимірювання. Час виконання основної моделі на обраній платформі не перевищує 1 мс, що є цілком прийнятним для системи, в якій результат оновлюється один раз на вимірювальний цикл тривалістю кілька секунд.

Послідовність роботи системи після завершення спектрального вимірювального циклу така: виміряні коефіцієнти передачі обробляються алгоритмом OLS для отримання вектора нахилів; отримані дані подаються на вхід основної моделі *cascade1\_dual*; два вихідні значення цієї моделі передаються на вхід калібрувальної моделі *cascade2\_calibrator*; відкалібрований результат надходить до модуля відображення або комунікаційного інтерфейсу.

Таким чином, мікроконтролер STM32G474 завдяки достатньому обсягу Flash-пам'яті (512 КБайт), потужному ядру Cortex-M4 з FPU та підтримці оптимізованої бібліотеки ST Edge AI Runtime забезпечує повноцінне розгортання двокаскадної нейромережевої системи ідентифікації параметрів нафти безпосередньо на вбудованому рівні без необхідності використання зовнішніх обчислювачів або хмарних сервісів. Описаний ланцюжок — вибір платформи, конвертація моделей у формат *.flite*, статичний аналіз ресурсів та інтеграція С-коду через X-CUBE-AI — забезпечує відтворюваний і верифікований процес розгортання системи на цільовому апаратному забезпеченні.

#### **4.3. Апробація комп'ютерної системи та адаптація нейромережевої моделі**

Для верифікації розробленого нейромережевого обчислювача та налаштування калібрувальної мережі фізичного рівня (Каскад 2) було проведено натурний експеримент на спеціально підготовленій дослідній установці (додаток К).

Установка складалася з металевої бочки циліндричної форми діаметром 600 мм та висотою 600 мм. У якості робочої суміші використовувалася пластова вода з додаванням нафти. Перед початком кожного циклу вимірювань вміст бочки інтенсивно перемішували до утворення однорідної нафтоводяної

емульсії, після чого перемішування припиняли і фіксували момент початку гравітаційного розшарування (рис. 4.2).

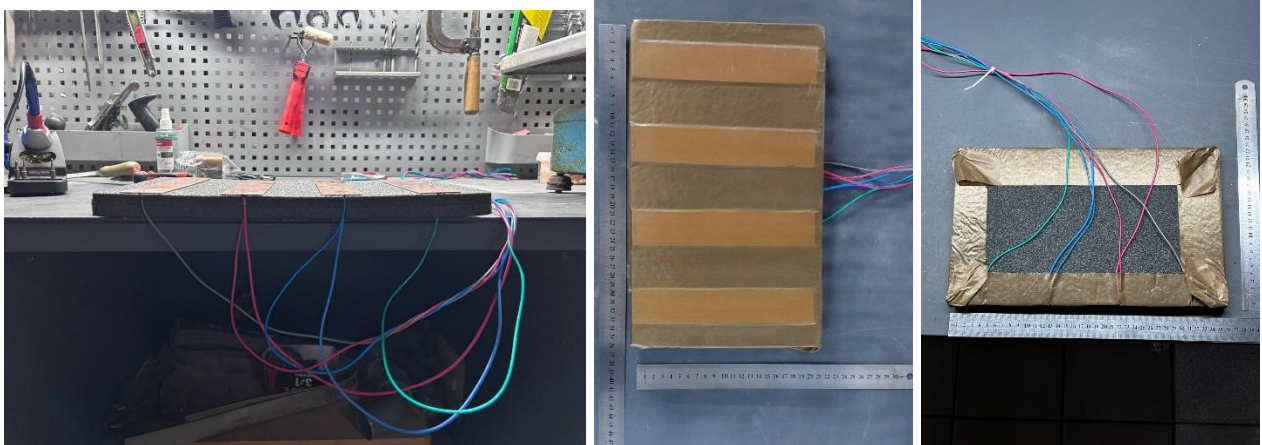


Рисунок 4.2 — Копланарні ємнісні ізольовані електроди

На поверхні рідини у копланарній конфігурації розташовано чотири електроди. Усі електроди виготовлено з металевих пластин розміром  $50 \times 100$  мм (площа одного електрода  $S = 0.005 \text{ м}^2$ ) та вкрито фторопластовою плівкою товщиною  $0.8$  мм ( $\epsilon_r \approx 2.1$ ). Фторопластова плівка використовується у якості ізолюючого покриття, аналогічного тому, що застосовується в апаратах для теплового зварювання поліетилену. Покриття забезпечує ємнісний (безконтактний) зв'язок електродів з рідиною, унеможливаючи гальванічну корозію та електрохімічні реакції.

Конфігурація електродів є чотириелектродною копланарною: два зовнішніх електроди (Main+, Main-) виконують роль збуджувальних, два внутрішніх (Comp+, Comp-) — вимірювальних (компенсуючих). Така схема дозволяє виключити вплив імпедансу контакту електрод/ізоляція на результат вимірювання. Відстань між центрами зовнішніх електродів становить близько  $500\text{--}550$  мм, між внутрішніми — близько  $250\text{--}280$  мм.

Вибір розмірів електродів обумовлений балансом між трьома вимогами. По-перше, достатній рівень вимірювального струму: при напрузі збудження  $V = 1$  В та ємності ізоляції одного електрода  $C_{el} \approx 115$  пФ (розрахунок наведено нижче) струм через систему перевищує поріг чутливості

вимірювального тракту у 20–30 разів на нижній межі робочого діапазону частот. По-друге, прийнятна глибина зондування: при базі між струмовим та потенціальним електродом близько 250 мм ефективна глибина проникнення поля у рідину становить 80–120 мм, що відповідає очікуваному діапазону товщин нафтового шару. По-третє, відсутність екранування стінками: бочка виконана з металу, і при центральному розташуванні електродів відстань від краю електрода до стінки перевищує 200 мм, що суттєво більше глибини зондування.

Вимірювальний тракт реєструє комплексну напругу на компенсуючих електродах  $V_{comp} = V_{compRe} + j \cdot V_{compIm}$ , що є прямою мірою комплексного коефіцієнта передачі  $K(\omega)$  між збуджувальною та компенсуючою парами. Ця напруга є основним вимірювальним сигналом, що надходить у нейромережевий обчислювач.

За даними першого експерименту (додаток Є) дійсна складова напруги компенсації  $V_{compRe}$  монотонно зростала від 23 мВ на початку (товщина нафти 3 мм) до 243 мВ наприкінці (товщина 21.8 мм) (рис. 4.3). Уявна складова  $V_{compIm}$  змінювалася у діапазоні від –65 мВ до +73 мВ, відображаючи зміну фазового зсуву між збуджувальним струмом та компенсуючою напругою при зміні діелектричних та провідних властивостей шаруватого середовища.

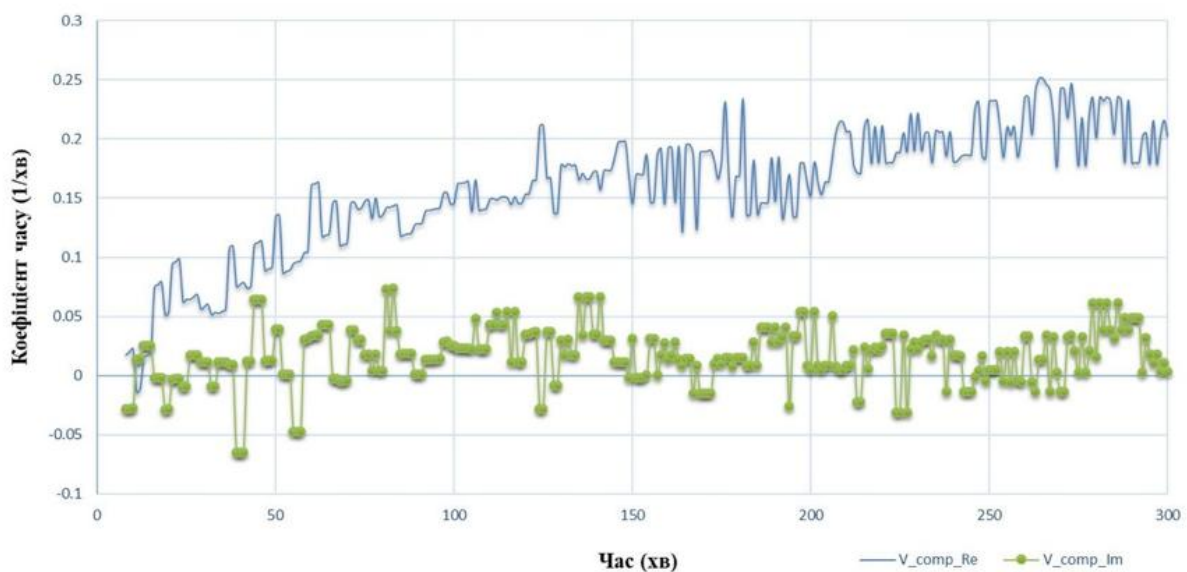


Рисунок 4.3 — Результат підбору напруги компенсації впродовж експерименту

Зростання  $V_{compRe}$  зі збільшенням товщини нафтового шару пояснюється фізично: провідність нафти на 7–8 порядків нижча за провідність води, тому шар нафти збільшує імпеданс між електродами. Частотна залежність  $V_{compIm}$  відображає діелектричну релаксацію системи і несе інформацію про товщину і склад шарів, недоступну із суто активної складової.

#### 4.3.1 Методика еталонного вимірювання товщини шару

Еталонні значення товщини нафтового шару отримувались методом механічного зондування. Оператор занурював тонку металеву дrottину вертикально крізь шар нафти до поверхні нижньої фази (вода або емульсія). Критерієм досягнення межі розділу слугувало різке зменшення електричного опору між дrottиною і рідиною: нафта є практично діелектриком ( $\sigma \sim 10^{-10} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ), тоді як вода є провідником ( $\sigma \approx 0.05 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ). Глибина занурення дrottини вимірювалась лінійкою з точністю 1 мм.

Еталонні виміри виконувались з інтервалом 10 хвилин. За час першого циклу (300 хвилин) отримано 30 еталонних точок. Ці дані слугували одночасно для оцінки похибки Каскаду 1 та як навчальна вибірка для Каскаду 2. Результати вимірювання в графічному виді наведено на рис. 4.4, 4.5 та 4.6.

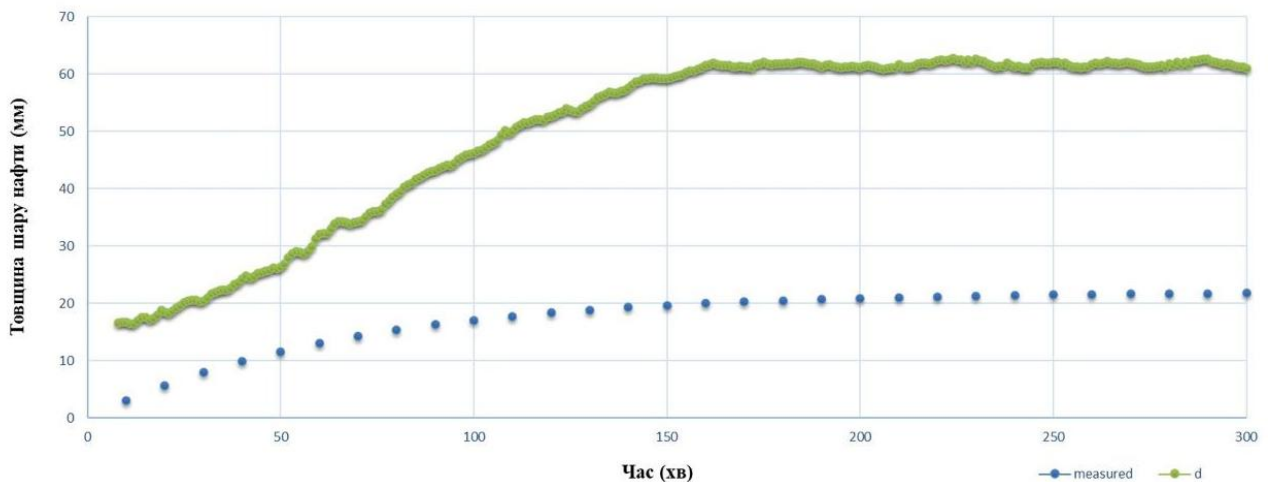


Рисунок 4.4 — Результат роботи системи для  $d_{oil}$  на виході каскаду 1 (синтезований рівень) мм товщини нафтового шару від часу в хв

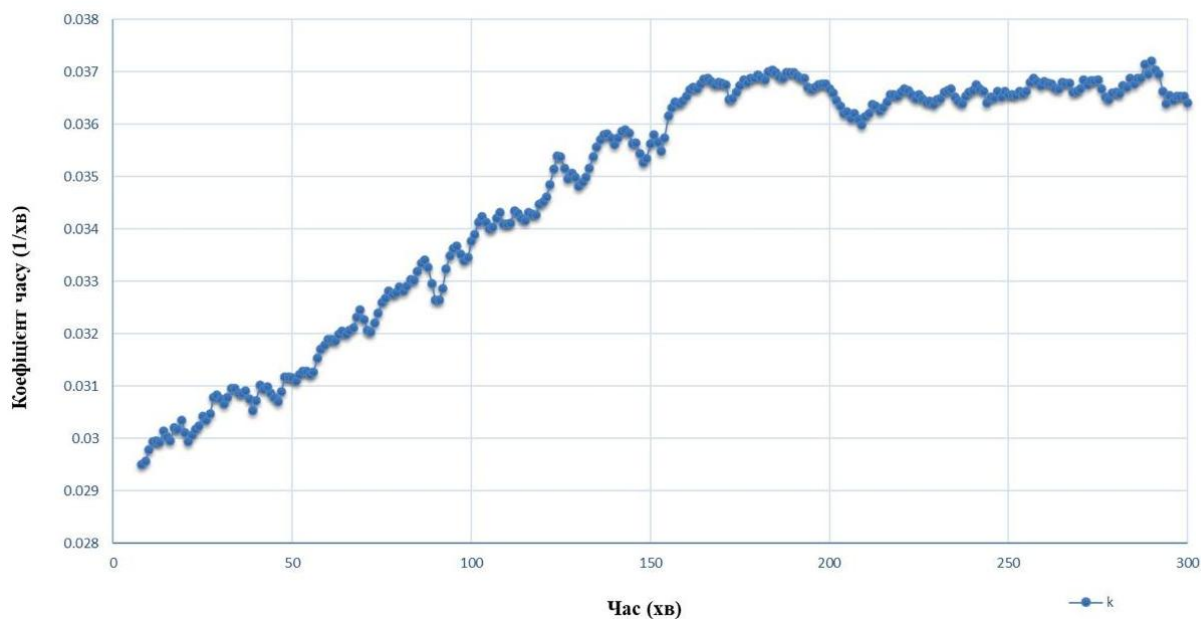


Рисунок 4.5 — Результат роботи системи для  $k_{oil}$  на виході каскаду 1 (синтезований рівень) 1/хв постійна кінетичної швидкості утворення нафтового шару від часу в хв

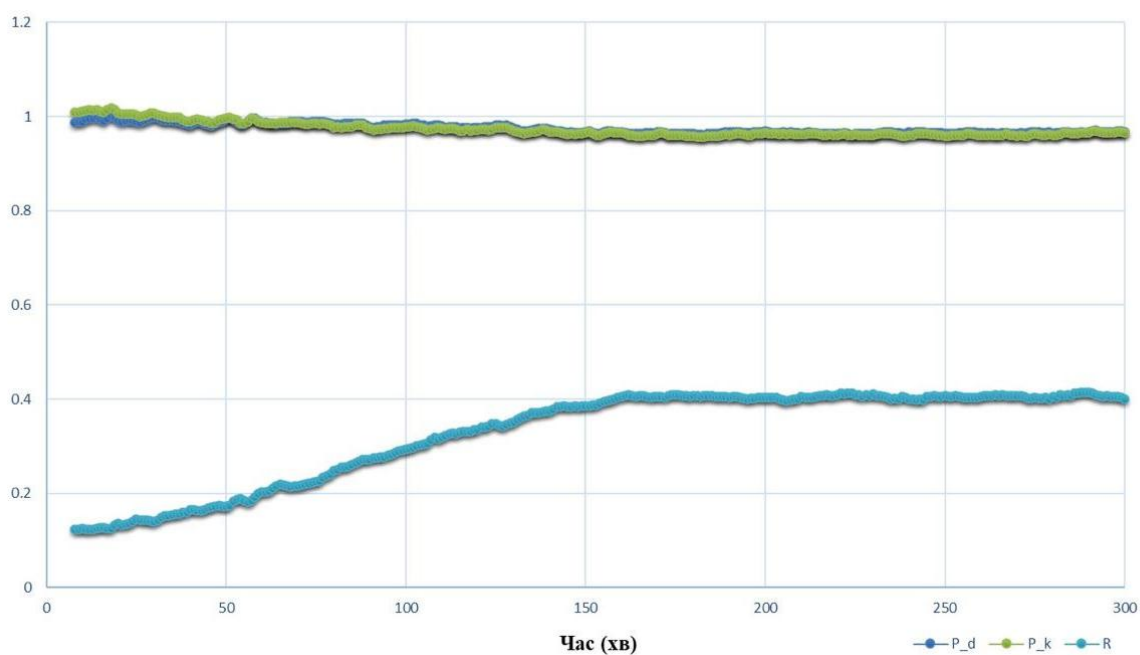


Рисунок 4.6 — Результат роботи системи для  $P_d$ ,  $P_k$ ,  $R$  на виході каскаду 1 (синтезований рівень) залежність в часі, хв

Метод механічного зондування є простим і надійним, але потребує присутності оператора і не може бути автоматизований. Саме це обмеження і є мотивацією для розробки автоматизованого нейромережевого вимірювача.

#### 4.3.2 Виявлення доменного зсуву та збір калібрувальних даних

На першому етапі вимірювальна система працювала виключно на основі Каскаду 1 — нейромережі, навченої на синтетичних даних. Паралельно кожні 10 хвилин виконувались еталонні виміри лінійкою. Таблиця 4.3 містить ключові точки результатів першого циклу.

Аналіз таблиці виявляє систематичний доменний зсув: Каскад 1 стабільно завищував товщину нафтового шару в середньому на 32.5 мм ( $\sigma = 10.5$  мм). Ця систематична похибка є наслідком невідповідності між геометрією навчальної математичної моделі (резервуар 2×3 м, крок сітки 20 мм) та реальною дослідною установкою (бочка Ø600 мм). Незважаючи на значне абсолютне відхилення у мм, відносний тренд зміни сигналу відтворювався правильно: Каскад 1 коректно фіксував монотонне зростання товщини шару та наближення до насичення після 150 хвилин.

Таблиця 4.3 — Порівняння виходів Каскаду 1 з еталонними вимірюваннями (Експеримент А)

$t$ , хв	$d_{true}$ , мм	$d$ , мм	$\Delta d$ , мм	$R$	$V_{compRe}$ , мВ
10	3.06	16.78	+13.72	0.126	23.0
60	13.06	32.13	+19.07	0.203	98.4
120	18.36	52.63	+34.27	0.336	152.3
180	20.52	61.87	+41.35	0.407	189.6
240	21.40	61.32	+39.92	0.401	218.4
300	21.76	61.01	+39.25	0.400	242.7

Значення критерію спостережуваності  $R$  монотонно зростало від 0.126 до 0.415, що є очікуваним: зі збільшенням нафтового шару системі стає важче

розрізняти параметри нижніх шарів (числа обумовленості FIM зростають). Незважаючи на значення  $R > 0.3$  наприкінці експерименту, оцінки ймовірностей  $P_d$  та  $P_k$  залишались на рівні 0.96–0.99, що свідчить про стабільну роботу Каскаду 1 у межах його навченого розподілу.

За результатами Експерименту А сформовано калібрувальну вибірку з 30 пар:  $(d, k) \rightarrow (d_{true}, k_{true})$ . Ця вибірка передавалась на вхід процедури навчання Каскаду 2.

### 4.3.3 Навчання нейромережі фізичного рівня (Каскад 2)

Структура Каскаду 2 реалізована у вигляді малого багатошарового персептрона:

Вхід(2)  $\rightarrow$  Dense(16, ReLU)  $\rightarrow$  Dense(8, ReLU)  $\rightarrow$  Вихід(2, linear)

На вхід мережі подаються два значення:  $C1_d$  та  $C1_k$  — виходи Каскаду 1. На виході формуються скориговані значення  $d_{cal}$  та  $k_{cal}$ . Загальна кількість вагових коефіцієнтів — близько 170, що є на два порядки менше, ніж у Каскаді 1. Таким чином, 30 калібрувальних точок є достатньою вибіркою для навчання без перенавчання.

Перед навчанням вхідні та вихідні дані нормалізуються:  $X_{scaled} = \frac{X - \mu_X}{\sigma_X}$ . Параметри нормалізації ( $\mu_X$ ,  $\sigma_X$ ,  $\mu_Y$ ,  $\sigma_Y$ ) зберігаються разом із вагами і застосовуються під час інференсу. Навчання виконується оптимізатором Adam ( $lr = 0.01$ ) протягом 500 епох з розміром батчу 8.

Малий батч обраний навмисне: при вибірці 30 точок він забезпечує необхідну стохастичність оновлень вагових коефіцієнтів. Для підготовки даних Каскаду 2 застосовувалися виходи Каскаду 1, попередньо згладжені фільтром Калмана (режим USE\_KALMAN\_DATA = True).

Фільтр Калмана застосовувався виключно для зменшення шумності вхідних даних при навчанні калібрувальної мережі і не є частиною основного вимірювального конвеєра при інференсі.

#### 4.3.4 Верифікація відкаліброваної системи

Після завершення навчання Каскаду 2 вміст бочки було перемішано повторно і запущено новий цикл гравітаційного розшарування. В цьому циклі вимірювальна система працювала у повній конфігурації: Каскад 1 → Каскад 2, тобто виходи нейромережі синтетичного рівня передавалися на вхід навченої калібрувальної мережі.

Результати Експерименту Б наведено на рисунках 4.7 — 4.10.

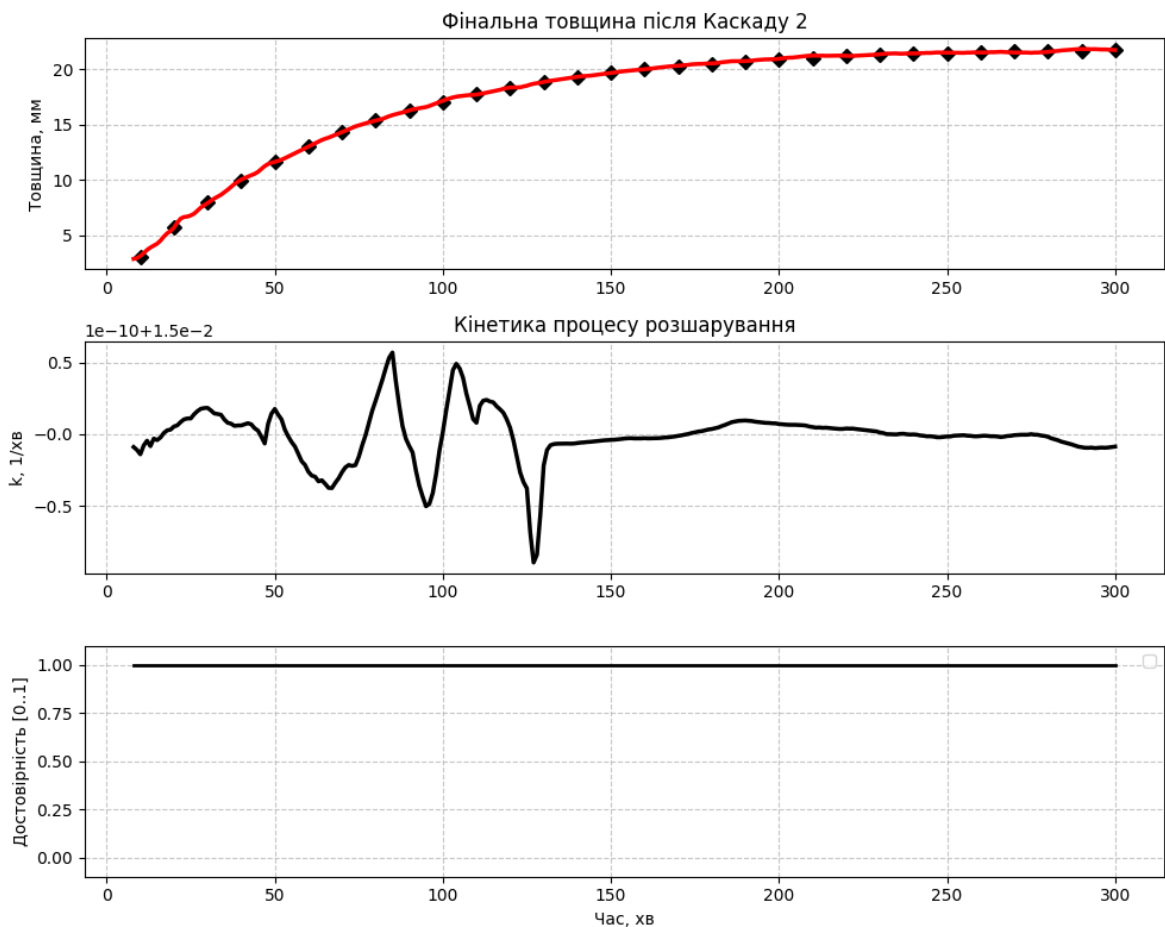


Рисунок 4.7 — Результати Експерименту А: виходи двокаскадної системи. Зелена крива — еталонна товщина, синя — Каскад 1, червона — фінальний результат Каскаду 2

Каскад 2 продемонстрував ефективну компенсацію систематичного доменного зсуву. Відкалібрована оцінка товщини нафтового шару практично збігається з еталонними вимірами на всьому інтервалі спостереження. Мережа

успішно відтворила нелінійну характеристику конкретного фізичного об'єкта — бочки діаметром 600 мм з реальними електродами та кріпленням.

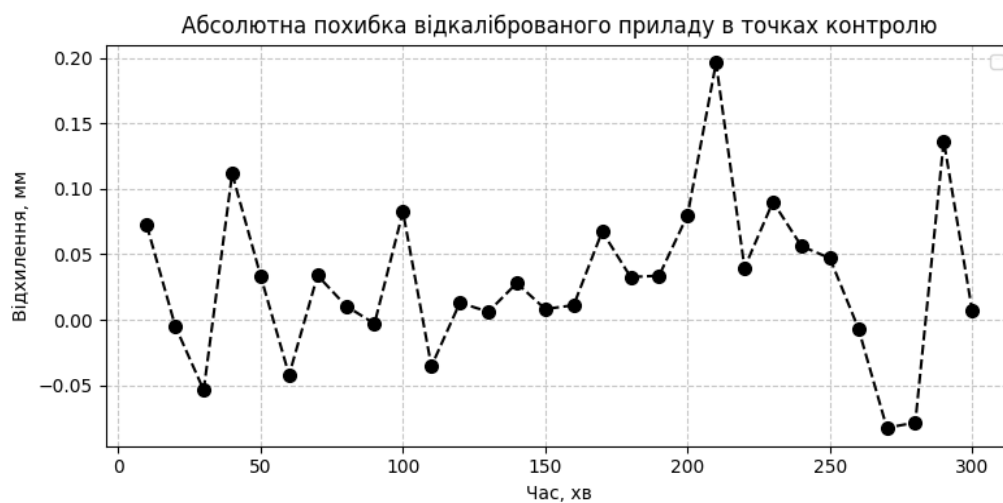


Рисунок 4.8 — Відхилення результатів вимірювання від еталону в Експерименті А

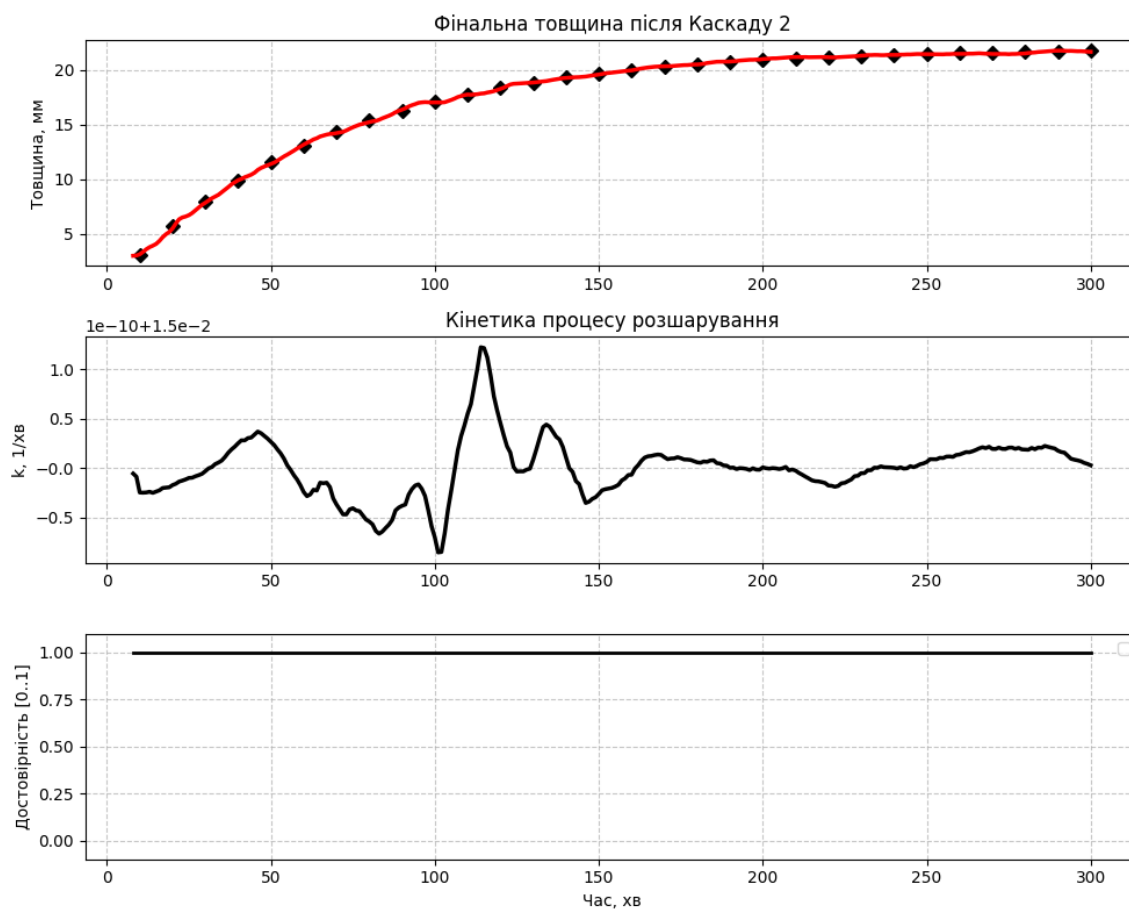


Рисунок 4.9 — Результати Експерименту Б (контрольний): відкалібрована система. Каскад 2 коректно відтворює криву зростання нафтового шару

Оцінка кінетичного коефіцієнта  $k$  на виході Каскаду 2 виявилася більш нестабільною порівняно з оцінкою товщини.

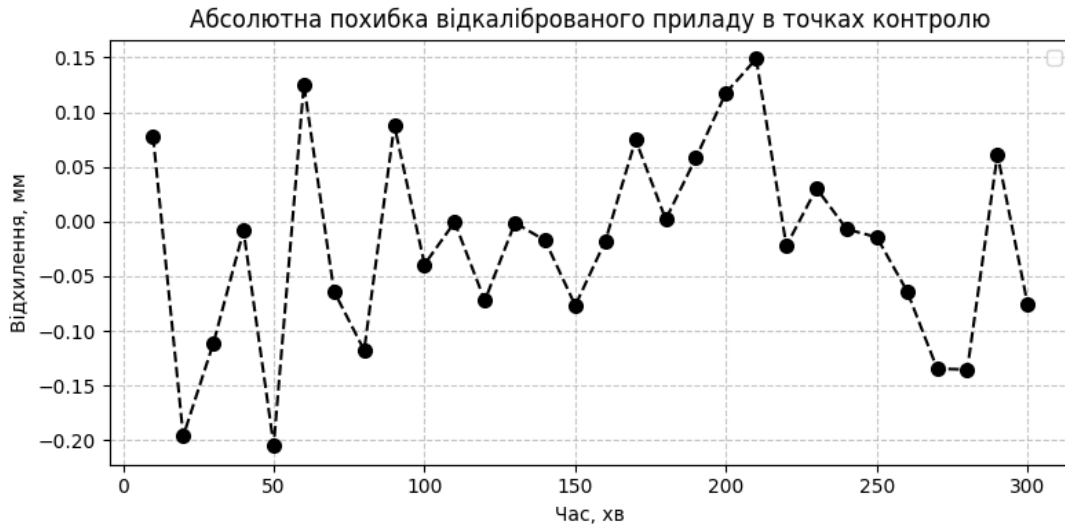


Рисунок 4.10 — Відхилення результатів вимірювання від еталону в Експерименті Б

Це є очікуваним:  $k$  визначається за малою зміною сигналу між послідовними часовими відліками, і при суттєвому доменному зсуві градієнти сигналу у реальному баці відрізняються від тих, що відповідають навчальному розподілу Каскаду 1.

Каскад 2 здатен вивести середній рівень  $k$  на правильне значення, проте не може повністю усунути флуктуації, що пов'язані з шумами окремих вимірювань.

#### 4.3.5 Алгоритм формування інтегрального критерію достовірності

Аналіз результатів обох експериментів підтвердив, що спроба навчити Каскад 2 безпосередньо видавати значення достовірності (третій вихід) на малій вибірці з 30 точок призводить до перенавчання і не стабілізує динамічні виходи. Тому в системі реалізовано аналітичний підхід до формування критерію достовірності  $Err$ .

Критерій  $Err$  обчислюється як функція трьох метрик, що видає Каскад 1: ймовірності правильності оцінки товщини  $P_d$ , ймовірності правильності

кінетичного коефіцієнта  $P_k$  та критерію спостережуваності  $R$ . Загальна формула має вигляд (4.40):

$$Err = f(P_d, P_k, R) \in [0,1], \quad (4.40)$$

де функція  $f$  побудована так, що  $Err = 1$  відповідає повній достовірності результату (всі три показники якості знаходяться у нормальному діапазоні), а  $Err \rightarrow 0$  свідчить про ненадійність результату через низькі  $P_d$ ,  $P_k$  або надто високий  $R$ .

Перевага аналітичного підходу над нейромережевим:  $P_d$ ,  $P_k$  та  $R$  обчислюються Каскадом 1, навченим на 30 000 синтетичних зразків, тому вони є статистично надійними показниками навіть при доменному зсуві. Комбінування цих трьох показників в один критерій  $Err$  дозволяє відрізнити ситуації, коли товщина визначена правильно, але кінетика є нестабільною (високий  $P_d$ , низький  $P_k$  —  $Err \sim 0.7$ ), від ситуацій, коли обидва параметри є сумнівними (обидва низькі —  $Err < 0.5$ ). Таблиця 4.4 ілюструє логіку формування  $Err$ .

Таблиця 4.4 — Логіка формування інтегрального критерію достовірності  $Err$

Умова	Значення $Err$	Фізичний зміст
$P_d \geq 0.9$ та $P_k \geq 0.9$ та $R < 0.2$	1.0	Повна достовірність. Обидва параметри визначено надійно.
$P_d \geq 0.8$ та $P_k < 0.9$ , або $R \in [0.2, 0.5)$	$\approx 0.7$	Товщина надійна, кінетика нестабільна або $R$ наближається до межі.
$P_d < 0.8$ або $R \geq 0.5$	$< 0.5$	Низька достовірність. Результат потребує верифікації.

У реальній системі обчислення  $Err$  виконується щохвилини одночасно з виходами Каскаду 2. При зниженні  $Err$  нижче порогу 0.5 система верхнього рівня отримує сигнал про необхідність перевірки результату або збору додаткових вимірювань для перенавчання Каскаду 2. Такий підхід гарантує

метрологічну безпеку приладу: навіть при роботі з об'єктами, що значно відрізняються від навчального розподілу, система не видає хибно-впевнений результат.

#### **Висновки до розділу 4**

1. У четвертому розділі синтезовано апаратно-програмне рішення комп'ютерної системи ідентифікації, орієнтовану на реалізацію багаточастотного вимірювального циклу в умовах обмежених ресурсів вбудованої мікроконтролерної платформи. Запропоновано рішення, що поєднує двоканальний цифровий синтез сигналів, активне екранування ліній зв'язку, прецизійний трансімпедансний тракт та програмну компенсацію фазових зсувів, забезпечує зменшення впливу паразитних ємностей і підвищує відтворюваність спектральних вимірювань у промислово наближених умовах.

2. Розроблено алгоритм компенсаційного вимірювання з адаптивним пошуком нульового струму, який реалізує принцип алгоритмічного визначення стану балансу замість його прямого апаратного досягнення. Поєднання поетапного налаштування амплітуди і фази компенсаційної напруги, когерентного накопичення, синхронного детектування та лінійної апроксимації в околі точки балансу дозволило підвищити роздільну здатність вимірювального каналу та забезпечити коректне визначення безрозмірного комплексного коефіцієнта передачі як інформаційно-вимірювального параметра за обмежень, зумовлених використанням стандартних 12-бітних цифро-аналогових і аналого-цифрових перетворювачів.

3. Натурний експеримент підтвердив працездатність запропонованого підходу до визначення товщини нафтового шару та оцінювання кінетики його формування. Первинні результати вимірювань коректно відтворили загальний характер процесу, а подальше застосування фільтра Калмана і калібрувальної нейромережі фізичного рівня забезпечило приведення розрахункових результатів до фізично спостережуваних величин. Отримані дані засвідчили,

що поєднання апаратної реалізації, компенсаційного алгоритму та дворівневої моделі опрацювання є достатньою основою для практичної реалізації системи безперервного моніторингу та оцінювання кінетики розшарування в реальному часі.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу створення комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів нафтової емульсії за спектром комплексних коефіцієнтів передачі копланарного ємнісного перетворювача з ізольованими електродами. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. На основі огляду та аналізу існуючих методів контролю параметрів нафтових емульсій виокремлено інформативні характеристики контрольованого середовища — товщина нафтового шару та кінетичний коефіцієнт розшарування — та визначено перспективність ємнісних методів поверхневого зондування з ізольованими електродами як основи для побудови неінвазивної комп'ютерної системи моніторингу.

2. Розроблено інформаційну модель апаратної підсистеми первинного перетворення сигналів та обґрунтовано інформативність безрозмірного комплексного коефіцієнта передачі як інформаційно-вимірювального параметра. На основі аналізу приросту ентропії Шеннона доведено власний вплив кожного з параметрів середовища на спектр відгуків копланарного перетворювача незалежно від міжпараметричних взаємодій. Запропонований коефіцієнт забезпечує визначення товщини нафтової плівки та часового коефіцієнта гравітаційного розшарування без прямого контакту сенсора з агресивним середовищем.

4. Розроблено математичну модель електричних властивостей багатошарового середовища на основі матричного методу вузлових потенціалів для сітки простору станів розмірністю понад 62 тис. вузлів. Модель забезпечила формування синтетичного набору даних методом Монте-Карло в діапазоні зондувальних частот від 10 Гц до 100 кГц та попереднє навчання нейромережевого компонента комп'ютерної системи без проведення повномасштабного фізичного експерименту.

5. Розроблено апаратно-програмну структуру з цифровими компонентами опрацювання сигналів для визначення комплексного коефіцієнта передачі на основі принципу віртуального пошуку точки нульового струму, де визначення точки балансу в умовах адитивних завад здійснюється лінійною апроксимацією за двома вимірами в її околі із застосуванням адаптивного оверсемплінгу. Це дозволило алгоритмічно розширити ефективну роздільну здатність стандартного 12-бітного АЦП до еквівалентних 16–18 біт та знизити неінформативну волатильність даних у 10–15 разів.

6. Розроблено алгоритм двокаскадного трансферного навчання нейромережевого компонента, в якій перший каскад, адаптований до ресурсних обмежень вбудованих систем шляхом децимації часового набору вхідних даних із доповненням вектора ознак статистиками ковзного вікна, навчається методами машинного навчання на синтетичному наборі даних та формує узагальнений спектральний відгук середовища, а другий каскад фізичного узгодження дотреновується на обмеженому наборі натурних вимірювань в процесі адаптації алгоритму до конкретного фізичного об'єкта. Доведено, що просторово-часова децимація до 8 дискретних зрізів зберігає необхідну інформаційну ємність, зменшуючи обчислювальну складність на два порядки.

7. Комп'ютерна система, розроблена на базі мікроконтролера STM32G474 з ядром ARM Cortex-M, завдяки дистанційному зондуванню з ізольованими електродами, забезпечує визначення у режимі реального часу геометричної товщини шару нафти та кінетичного коефіцієнта розшарування емульсії, а також обчислення фінальних параметрів розшарування на основі аналізу лише перших 15–20% часу технологічного процесу за умови досягнення байєсівського критерію достовірності  $\geq 0.9$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] A. Fakhru'l-Razi, A. Pendashteh, L. C. Abdullah, et al., “Review of technologies for oil and gas produced water treatment,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, no. 2–3, pp. 530–551, 2009. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.044.
- [2] G. G. Stokes, “On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums,” *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 9, pp. 8–106, 1851.
- [3] J. Sjöblom, N. Aske, I. H. Auflem, et al., “Our current understanding of water-in-crude oil emulsions. Recent characterization techniques and high pressure performance,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 100–102, pp. 399–473, 2003, doi: 10.1016/S0001-8686(02)00066-0.
- [4] J. Sjöblom, P. V. Hemmingsen, and H. Kallevik, “The role of asphaltenes in stabilizing water-in-crude oil emulsions,” in *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*, O. C. Mullins et al., Eds. New York: Springer, 2007, pp. 549–587, doi: 10.1007/0-387-68903-6\_21.
- [5] R. A. Mohammed, A. I. Bailey, P. F. Luckham, and S. E. Taylor, “Dewatering of crude oil emulsions. 1. Rheological behaviour of the crude oil–water interface,” *Colloids and Surfaces A*, vol. 80, no. 2–3, pp. 223–235, 1993.
- [6] С. І. Чистяков і А. К. Мановян, *Технологія первинної переробки нафти і природного газу*. М.: Хімія, 2002.
- [7] J. Gregory, “Approximate expressions for retarded van der Waals interaction,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 83, no. 1, pp. 138–145, 1981.
- [8] E. J. W. Verwey and J. T. G. Overbeek, *Theory of the Stability of Lyophobic Colloids*. Amsterdam: Elsevier, 1948.
- [9] J. S. Hadamard, “Mouvement permanent lent d'une sphère liquide et visqueuse dans un liquide visqueux,” *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol. 152, pp. 1735–1738, 1911.

- [10] Г. Г. Рабинович, П. М. Рябих, П. А. Хохряков та ін., *Розрахунки основних процесів і апаратів нафтопереробки*. М.: Хімія, 1979.
- [11] M.-H. Ese, X. Yang, and J. Sjöblom, "Film forming properties of asphaltenes and resins. A comparative Langmuir-Blodgett study of crude oils from North Sea, European continent and Venezuela," *Colloid and Polymer Science*, vol. 276, no. 9, pp. 800–809, 1998.
- [12] W. Kang, B. Xu, Y. Wang, et al., "Stability mechanism of W/O crude oil emulsion stabilized by polymer and surfactant," *Colloids and Surfaces A*, vol. 384, no. 1–3, pp. 555–560, 2011. doi: 10.1016/j.colsurfa.2011.05.017
- [13] R. Moosai and R. A. Dawe, "Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup," *Separation and Purification Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 303–314, 2003. doi: 10.1016/S1383-5866(03)00091-1
- [14] K. Arnold and M. Stewart, *Surface Production Operations. Vol. 1: Design of Oil Handling Systems and Facilities*, 3rd ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008.
- [15] Z. Khatib, "Handling, treatment and disposal of produced water in the offshore oil industry," presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Paper SPE-121287, 2007. doi:10.2118/48992-MS
- [16] J. A. Boxall, C. A. Koh, E. D. Sloan, et al., "Droplet size scaling of water-in-oil emulsions under turbulent flow," *Langmuir*, vol. 28, no. 1, pp. 104–110, 2012. doi: 10.1021/la202293t
- [17] J. S. Eow and M. Ghadiri, "Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: A review of the technology," *Chemical Engineering Journal*, vol. 85, no. 2–3, pp. 357–368, 2002. doi: 10.1016/S1385-8947(01)00250-9
- [18] B. Franklin, "Of the stilling of waves by means of oil," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 64, pp. 445–460, 1774.
- [19] M. Ehrhardt and G. Petrick, "On the composition of dissolved and particle-associated fossil fuel residues in Mediterranean surface water," *Marine Chemistry*, vol. 42, pp. 57–70, 1993, doi: 10.1016/0304-4203(93)90249-N.

[20] F. E. Hoge and R. N. Swift, “Oil film thickness measurement using airborne laser-induced water Raman backscatter,” *Applied Optics*, vol. 19, no. 19, pp. 3269–3281, 1980. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-19-19-3269>.

[21] M. Fingas and C. E. Brown, “Review of oil spill remote sensing,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 83, no. 1, pp. 9–23, 2014. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.03.059

[22] A. Gericke and D. Möbius, “The effect of cations on the order of saturated fatty acid monolayers at the air-water interface as determined by infrared reflection-absorption spectrometry,” *J. Phys. Chem.*, vol. 98, no. 35, pp. 8792–8797, 1994. <https://oipub.com/papers/108521281>.

[23] O. S. Heavens, *Optical Properties of Thin Solid Films*. London: Butterworths, 1955.

[24] I. Leifer, W. J. Lehr, D. Simecek-Beatty, et al., “State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 124, pp. 185–209, 2012. doi: 10.1016/j.rse.2012.03.024

[25] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*. Amsterdam: North-Holland, 1977.

[26] T. Hengstermann and R. Reuter, “Lidar fluorosensing of mineral oil spills on the sea surface,” *Applied Optics*, vol. 29, no. 22, pp. 3218–3227, 1990. doi: 10.1364/AO.29.003218

[27] D. R. Lide, Ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

[28] P. Hauptmann, R. Lucklum, A. Püttmer, and B. Henning, “Ultrasonic sensors for process monitoring and chemical analysis: State-of-the-art and trends,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 67, nos. 1–3, pp. 32–42, 1998. doi: 10.1016/S0924-4247(97)01725-1.

[29] R. Dwyer-Joyce, P. Harper, and B. Drinkwater, “A method for the measurement of hydrodynamic oil films using ultrasonic reflection,” *Tribology*

*Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 337–348, 2004, doi: 10.1023/B:TRIL.0000032472.64419.1f.

[30] C. P. Nemarich, “Time domain reflectometry liquid level sensors,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 4, no. 4, pp. 40–44, 2001. doi: 10.1109/5289.975464

[31] G. A. Johansen, T. Frøystein, B. T. Hjertaker, and Ø. Olsen, “A dual sensor flow imaging tomographic system,” *Measurement Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 297–307, 1996. doi: 10.1088/0957-0233/7/3/010.

[32] Q. Xue, “Study on dielectric properties of oil/water random composites,” *J. Electrostat.*, vol. 50, no. 3, pp. 169–175, 2001. doi: 10.1016/S0304-3886(00)00034-6.

[33] E. A. Hammer and G. A. Johansen, “Process tomography in the oil industry — state of the art and future possibilities,” *Measurement and Control*, vol. 30, no. 8, pp. 212–216, 1997. doi: 10.1177/002029409703000705

[34] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. New York: Wiley, 2001.

[35] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, vol. 1, 3rd ed. Oxford: Clarendon Press, 1891.

[36] C. N. Strizzolo and J. Converti, “Capacitance sensors for measurement of phase volume fraction in two-phase pipelines,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 42, no. 3, pp. 726–729, Jun. 1993. doi: 10.1109/19.231597.

[37] W. Q. Yang, A. L. Stott, M. S. Beck, and C. G. Yates, “Development of capacitance tomographic imaging systems for oil pipeline measurements,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 66, no. 8, pp. 4326–4332, 1995. doi: 10.1063/1.1145322

[38] W. Warsito and L. S. Fan, “Measurement of real-time flow structures in gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems using electrical capacitance tomography (ECT),” *Chemical Engineering Science*, vol. 56, no. 21–22, pp. 6455–6462, 2001. doi: 10.1016/S0009-2509(01)00234-2

- [39] Y. Ren, B. Luo, X. Feng, Z. Feng, Y. Song, and F. Yan, "Capacitive and Non-Contact Liquid Level Detection Sensor Based on Interdigitated Electrodes with Flexible Substrate," *Electronics*, vol. 13, no. 11, p. 2228, 2024. doi: 10.3390/electronics13112228.
- [40] M. Qing, H. Liang, J. Zhang, and H. Zhan, "The mechanism of detecting water content in oil-water emulsions using impedance spectroscopy," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 188, Art. no. 106863, 2020. doi: 10.1016/j.petrol.2019.106863.
- [41] A. Jaworek, A. Krupa, and M. Trela, "Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 15, no. 5–6, pp. 317–324, 2004. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2004.04.002
- [42] K. E. Arnold and M. Stewart, *Surface Production Operations. Vol. 2: Design of Gas-Handling Systems and Facilities*, 2nd ed. Houston: Gulf Publishing, 1999.
- [43] R. Dai, N. Jin, Q. Hao, W. Ren, and L. Zhai, "Measurement of Water Holdup in Vertical Upward Oil–Water Two-Phase Flow Pipes Using a Helical Capacitance Sensor," *Sensors*, vol. 22, no. 2, Art. no. 690, 2022. doi: 10.3390/s22020690.
- [44] L. L. Schramm, *Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. doi: 10.1002/3527606750.
- [45] J. Sjöblom, Ed., *Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology*. New York: Marcel Dekker, 2001.
- [46] J. Duan and J. Gregory, "Coagulation by hydrolysing metal salts," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 100–102, pp. 475–502, 2003. doi: 10.1016/S0001-8686(02)00067-2
- [47] J. Gregory, "Flocculation fundamentals," in *Encyclopedia of Colloid and Interface Science*, T. Tadros, Ed. Berlin: Springer, 2013, pp. 459–491. doi: 10.1007/978-3-642-20665-8\_17.

[48] J. Pereira, I. Velasquez, R. Blanco, M. Sanchez, C. Pernalet, and C. Canelón, "Crude Oil Desalting Process," in *Advances in Petrochemicals*. IntechOpen, 2015. doi: 10.5772/61274.

[49] S. Less and R. Vilagines, "The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 81, pp. 57–63, 2012. doi: 10.1016/j.petrol.2011.12.003

[50] C. H. Rawlins, "Flotation of fine oil droplets in petroleum production circuits," presented at the *Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference*, Paper SPE-134589, 2010.

[51] G. Raynel, D. Salomon Marques, S. Al-Khabaz, M. Al-Thabet, and L. Oshinowo, "A new method to select demulsifiers and optimize dosage at wet crude oil separation facilities," *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, vol. 76, Art. no. 19, 2021. doi: 10.2516/ogst/2020096.

[52] C. W. Angle, "Chemical demulsification of stable crude oil and bitumen emulsions in petroleum recovery — a review," in *Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology*, J. Sjöblom, Ed. New York: Marcel Dekker, 2001, pp. 541–594.

[53] R. J. Farn, Ed., *Chemistry and Technology of Surfactants*. Oxford: Blackwell, 2006. doi: 10.1002/9780470988596.

[54] S. A. Huber and F. H. Frimmel, "Direct gel chromatographic characterization and quantification of marine dissolved organic carbon using high-sensitivity DOC detection," *Environmental Science & Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 1194–1197, 1994. doi: 10.1021/es00055a035

[55] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*. New York: McGraw-Hill, 1941.

[56] C. G. Xie, S. M. Huang, B. S. Hoyle, et al., "Electrical capacitance tomography for flow imaging: System model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors," *IEE Proceedings G: Circuits, Devices and Systems*, vol. 139, no. 1, pp. 89–98, 1992.

- [57] A. Sihvola, *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. London: IEE, 1999. doi: 10.1049/PBEW047E.
- [58] D. A. G. Bruggeman, "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen," *Annalen der Physik*, vol. 416, no. 7, pp. 636–664, 1935. doi: 10.1002/andp.19354160705
- [59] M. Z. Aslam and T. B. Tang, "A high resolution capacitive sensing system for the measurement of water content in crude oil," *Sensors*, vol. 14, no. 7, pp. 11351–11361, 2014. doi: 10.3390/s140711351.
- [60] J. V. Keller, "Level measurement using capacitive sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 41–42, pp. 558–561, 1994.
- [61] W. Q. Yang and L. Peng, "Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography," *Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. R1–R13, 2003. doi: 10.1088/0957-0233/14/1/201
- [62] S. M. Huang, A. B. Plaskowski, C. G. Xie, and M. S. Beck, "Capacitance-based tomographic flow imaging system," *Electronics Letters*, vol. 24, no. 7, pp. 418–419, 1988. doi: 10.1049/el:19880283
- [63] E. Nyfors and P. Vainikainen, *Industrial Microwave Sensors*. Norwood, MA: Artech House, 1989. doi: 10.1109/MWSYM.1991.147182
- [64] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors: Design and Applications*. New York: IEEE Press, 1997.
- [65] E. Barsoukov and J. R. Macdonald, *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018. doi: 10.1002/9781119381860.
- [66] B. Jakoby, R. Beigelbeck, F. Keplinger, et al., "Miniaturized sensors for the viscosity and density of liquids — performance and issues," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 1, pp. 111–120, 2010. doi: 10.1109/TUFFC.2010.1386

[67] J. B. Hasted, D. M. Ritson, and C. H. Collie, "Dielectric properties of aqueous ionic solutions," *Journal of Chemical Physics*, vol. 16, no. 1, pp. 1–21, 1948. doi: 10.1063/1.1746645

[68] M. H. Al-Hajeri, S. R. Wylie, A. Shaw, and A. I. Al-Shamma'a, "Real time EM wave for oil and gas two phase flow measurement," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 76, art. no. 012035, 2008. doi: 10.1088/1742-6596/178/1/012030

[69] R. Thorn, G. A. Johansen, and B. T. Hjertaker, "Three-phase flow measurement in the petroleum industry," *Measurement Science and Technology*, vol. 24, no. 1, art. no. 012003, 2013. doi: 10.1088/0957-0233/24/1/012003

[70] G. A. Gregory, "Dielectric constant of mixtures of water and oil," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 71–75, 1976.

[71] A. Krupa, M. Lackowski, and A. Jaworek, "Capacitance sensor for measuring void fraction in small channels," *Measurement*, vol. 175, Art. no. 109046, 2021. doi: 10.1016/j.measurement.2021.109046.

[72] Y. Zhao, Q. C. Bi, and R. L. Hu, "Recognition and measurement in the flow pattern and void fraction of gas–liquid two-phase flow in vertical upward pipes using the gamma densitometer," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp. 235–243, 2013. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.07.006

[73] A. J. Jaworski and T. Dyakowski, "Measurements of oil–water separation dynamics in primary separation systems using distributed capacitance sensors," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 16, no. 2–3, pp. 113–127, 2005. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2005.02.012.

[74] M. W. E. Coney, "The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 6, no. 9, pp. 903–910, 1973. doi: 10.1088/0022-3735/6/9/030

[75] H. Farahani, R. Wagiran, and M. N. Hamidon, "Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 7881–7939, 2014. doi: 10.3390/s140507881.

[76] S. M. Huang, C. G. Xie, R. Thorn, D. Snowden, and M. S. Beck, "Design of sensor electronics for electrical capacitance tomography," *IEE Proceedings G: Circuits, Devices and Systems*, vol. 139, no. 1, pp. 83–88, 1992. doi: 10.1049/ip-g-2.1992.0014

[77] T. Bretterkieber, H. Zangl, M. Motz, T. Werth, and D. Hammerschmidt, "Versatile Sensor Front End for Low-Depth Modulation Capacitive Sensors," in *Proc. 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2008, pp. 830–835. doi: 10.1109/IMTC.2008.4547152.

[78] M. A. Kelland, *Production Chemicals for the Oil and Gas Industry*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b16648.

[79] G. P. Lucas, J. Cory, R. C. Waterfall, et al., "Measurement of the solids volume fraction and velocity distributions in solids–liquid flows using dual-plane electrical resistance tomography," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 10, no. 4, pp. 249–258, 1999. doi: 10.1016/S0955-5986(99)00010-2

[80] B. I. Merenko and V. B. Кропуньська, "Аналіз сучасних підходів до моніторингу рідин та обґрунтування необхідності кіберфізичних систем [Analysis of modern approaches to liquid monitoring and justification of the need for cyber-physical systems]," in *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів*, Івано-Франківськ, Україна, Oct. 9, 2025, pp. 197–198.

[81] A. M. Pasqualetti, F. M. Shimizu, L. P. de Oliveira, R. A. G. de Oliveira, R. M. de Carvalho, R. A. Fontes, A. L. Gobbi, and R. S. Lima, "Sensors for detection of production chemicals and oil in produced water," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 168, Art. no. 117305, 2023. doi: 10.1016/j.trac.2023.117305.

[82] P. Lambert, M. Goldthorp, B. Fieldhouse, Z. Wang, M. Fingas, L. Pearson, and E. Collazzi, "Field fluorometers as dispersed oil-in-water monitors,"

Journal of Hazardous Materials, vol. 102, no. 1, pp. 57–79, 2003. doi: 10.1016/S0304-3894(03)00202-4.

[83] D. S. Hansen, S. Jespersen, M. V. Bram, and Z. Yang, "Uncertainty Analysis of Fluorescence-Based Oil-In-Water Monitors for Oil and Gas Produced Water," *Sensors*, vol. 20, no. 16, Art. no. 4435, 2020. doi: 10.3390/s20164435.

[84] M. Ebrahimi, A. A. Schmidt, C. Kaplan, O. Schmitz, and P. Czermak, "Innovative Optical-Sensing Technology for the Online Fouling Characterization of Silicon Carbide Membranes during the Treatment of Oily Water," *Sensors*, vol. 20, no. 4, Art. no. 1161, 2020. doi: 10.3390/s20041161.

[85] Waltron Bull & Roberts, LLC, *2410 Oil in Water Analyzer: Instruction Manual*, 2022.

[86] A. Hannisdal, P. V. Hemmingsen, and J. Sjöblom, "Group-type analysis of heavy crude oils using vibrational spectroscopy in combination with multivariate analysis," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 5, pp. 1349–1357, 2005. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie0401354>

[87] S. R. Wylie, A. Shaw, and A. I. Al-Shamma'a, "RF sensor for multiphase flow measurement through an oil pipeline," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 8, pp. 2141–2149, 2006. doi: 10.1088/0957-0233/17/8/013

[88] Emerson/Rosemount, *Guided Wave Radar Level Transmitter Model 5402. Reference Manual 00809-0100-4402*. Emerson Electric Co., 2021.

[89] P. Dou, Y. Jia, P. Zheng, T. Wu, M. Yu, T. Reddyhoff, and Z. Peng, "Review of ultrasonic-based technology for oil film thickness measurement in lubrication," *Tribology International*, vol. 165, Art. no. 107290, 2022. doi: 10.1016/j.triboint.2021.107290.

[90] K. J. Dunn, D. J. Bergman, and G. A. Latorraca, *Nuclear Magnetic Resonance: Petrophysical and Logging Applications*. Oxford: Pergamon Press (Elsevier), 2002.

[91] N. Reinecke, G. Petritsch, D. Schmitz, and D. Mewes, "Tomographic measurement techniques — visualization of multiphase flows," *Chemical*

*Engineering & Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 7–18, 1998. doi: 10.1002/(SICI)1521-4125(199801)21:1%3C7::AID-CEAT7%3E3.0.CO;2-K

[92] J. O'M. Bockris and A. K. N. Reddy, *Modern Electrochemistry. Vol. 2: Electrode Processes in Chemistry, Engineering, Biology and Environmental Science*, 2nd ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.

[93] F. Reverter, X. Li, and G. C. M. Meijer, "Stability and accuracy of active shielding for grounded capacitive sensors," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 11, pp. 2884–2890, 2006. doi: 10.1088/0957-0233/17/11/004.

[94] VEGA Grieshaber KG, "Oil separators – pressure, level, interface," VEGA. [Online]. Available: VEGA application page for oil separators. Accessed: Apr. 10, 2026.

[95] American Petroleum Institute, *API Recommended Practice 19B: Evaluation of Well Perforators*, 2nd ed. API Publishing Services, 2006.

[96] H. Fordedal, O. Midttun, J. Sjöblom, O. M. Kvalheim, Y. Schildberg, and J. L. Volle, "A multivariate screening analysis of W/O emulsions in high external electric fields as studied by means of dielectric spectroscopy," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 182, no. 1, pp. 117–125, 1996. doi: 10.1006/jcis.1996.0442

[97] B. I. Merenko and V. B. Кropyvnytska, "Архітектура та функціональні можливості кіберфізичної системи для моніторингу та керування рівнем рідин [Architecture and functional capabilities of a cyber-physical system for monitoring and control of liquid levels]," in *Proc. 2nd Int. Sci. and Practical Conf. "Scientific Research: Emerging Theories and Practical Breakthroughs"*, Edinburgh, Scotland, Nov. 17–19, 2025, pp. 122–123.

[98] R. Igreja and C. J. Dias, "Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 112, no. 2–3, pp. 291–301, 2004. doi: 10.1016/j.sna.2004.01.040

[99] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, and M. Zahn, "Interdigital sensors and transducers," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 5, pp. 808–845, 2004. doi: 10.1109/JPROC.2004.826603

[100] S. Ebnesajjad, Ed., *Fluoroplastics. Vol. 1: Non-Melt Processible Fluoropolymers*. Norwich, NY: Plastics Design Library/William Andrew, 2014.

[101] V. F. Lvovich, *Impedance Spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*. Hoboken, NJ: Wiley, 2012. doi: 10.1002/9781118164075.

[102] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

[103] R. Igreja and C. J. Dias, "Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 112, nos. 2–3, pp. 291–301, 2004. doi: 10.1016/j.sna.2004.01.040.

[104] G. Cybenko, "Approximation by superpositions of a sigmoidal function," *Mathematics of Control, Signals and Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 303–314, 1989. doi: 10.1007/BF02551274

[105] S. Hartland, Ed., *Surface and Interfacial Tension: Measurement, Theory, and Applications*. New York: Marcel Dekker, 2004. doi: 10.1021/ja041019v.

[106] B. C. Lesieutre, A. V. Mamishev, Y. Du, E. Keskiner, M. Zahn, and G. C. Verghese, "Forward and inverse parameter estimation algorithms of interdigital dielectrometry sensors," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, no. 4, pp. 577–588, 2001. doi: 10.1109/94.946710.

[107] O. Ryabokin, "Theoretical Basics of Monitoring the Condition of the Electrodes of Chemical Current Sources by the Method of Electrochemical Impedance Spectroscopy," *Ukrainian Chemistry Journal*, vol. 89, no. 7, pp. 40–60, 2023. doi: 10.33609/2708-129X.89.07.2023.40-60.

[108] H. S. Vasylyev and Yu. S. Herasymenko, "Corrosion Meters of New Generation Based on the Improved Method of Polarization Resistance," *Materials Science*, vol. 52, pp. 722–731, 2017. doi: 10.1007/s11003-017-0015-9.

[109] W. A. Abdallah and S. D. Taylor, "Study of Asphaltenes Adsorption on Metallic Surface Using XPS and TOF-SIMS," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 112, no. 48, pp. 18963–18972, 2008. doi: 10.1021/jp804483t.

[110] A. Klimek et al., "Polytetrafluoroethylene Films in Rigid Polyurethane Foams' Dielectric Permittivity Measurements with a One-Side Access Capacitive Sensor," *Sensors*, vol. 21, no. 7, p. 2465, 2021. doi: 10.3390/polym13071173

[111] M. Meribout et al., "A High Resolution Capacitive Sensing System for the Measurement of Water Content in Crude Oil," *Sensors*, vol. 14, no. 7, pp. 11351–11369, 2014. doi: 10.3390/s140711351.

[112] C. Lesaint et al., "Analysis of Crude Oils by Frequency Domain Spectroscopy — Effect of Composition and Physical Properties on Conductivity and Dielectric Response," *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 32, no. 6, pp. 874–880, 2011. doi: 10.1080/01932691.2010.488461.

[113] F. Abdollahi-Mamoudan et al., "Influence of different design parameters on a coplanar capacitive sensor performance," *NDT & E International*, vol. 126, p. 102600, 2022. doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102588.

[114] J. Hong, D. S. Yoon, S. K. Kim et al., "AC frequency characteristics of coplanar impedance sensors as design parameters," *Lab on a Chip*, vol. 5, pp. 270–279, 2005. doi: 10.1039/B410325D.

[115] N. Perini, A. R. Prado, C. M. S. Sad, E. V. R. Castro, and M. B. J. G. Freitas, "Electrochemical Impedance Spectroscopy for In Situ Petroleum Analysis and Water-in-Oil Emulsion Characterization," *Fuel*, vol. 91, no. 1, pp. 224–228, 2012. doi: 10.1016/j.fuel.2011.06.057.

[116] B. Merenko, "Modeling and Algorithmic Support of a Computer System for Estimating the Thickness of Oil Films," *Measuring Equipment and Metrology*, vol. 87, no. 1, pp. 86–94, 2026. doi: 10.23939/istcmtm2026.01.086.

[117] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 239–245, 1979. doi: 10.2307/1268522.

[118] M. M. Rajabi, B. Ataie-Ashtiani, and H. Janssen, "Efficiency enhancement of optimized Latin hypercube sampling strategies: Application to

Monte Carlo uncertainty analysis and meta-modeling," *Advances in Water Resources*, vol. 76, pp. 127–139, 2015. doi: 10.1016/j.advwatres.2014.12.008.

[119] A. Karatzetzou, "Uncertainty and Latin Hypercube Sampling in Geotechnical Earthquake Engineering," *Geotechnics*, vol. 4, no. 4, pp. 1007–1025, 2024. doi: 10.3390/geotechnics4040051.

[120] M. Ginocchi, F. Ponci, and A. Monti, "Sensitivity Analysis and Power Systems: Can We Bridge the Gap? A Review and a Guide to Getting Started," *Energies*, vol. 14, no. 24, Art. 8274, 2021. doi: 10.3390/en14248274.

[121] T. Homma and A. Saltelli, "Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 52, no. 1, pp. 1–17, 1996. doi: 10.1016/0951-8320(96)00002-6.

[122] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, and S. Tarantola, "Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index," *Computer Physics Communications*, vol. 181, no. 2, pp. 259–270, 2010. doi: 10.1016/j.cpc.2009.09.018.

[123] A. Saltelli, "Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices," *Computer Physics Communications*, vol. 145, no. 2, pp. 280–297, 2002. doi: 10.1016/S0010-4655(02)00280-1.

[124] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 623–656, 1948.

[125] Z. Kala, "Global Sensitivity Analysis Based on Entropy: From Differential Entropy to Alternative Measures," *Entropy*, vol. 23, no. 6, Art. 778, 2021. doi: 10.3390/e23060778.

[126] A. Yazdani, A. Nicknam, E. Y. Dadras, and S. N. Eftekhari, "Entropy-based sensitivity analysis of global seismic demand of concrete structures," *Engineering Structures*, vol. 146, pp. 118–126, 2017. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.05.023.

[127] X. Zeng, D. Wang, and J. Wu, "Sensitivity analysis of the probability distribution of groundwater level series based on information entropy," *Stochastic*

*Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 26, pp. 345–356, 2012. doi: 10.1007/s00477-012-0556-2.

[128] F. Tao, M. Zhang, Y. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment," *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1, pp. 169–172, 2018. doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.055.

[129] Y. Lu, C. Liu, K. I. K. Wang, H. Huang, and X. Xu, "Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 61, Art. no. 101837, 2020. doi: 10.1016/j.rcim.2019.101837.

[130] M. R. Hestenes and E. Stiefel, "Methods of conjugate gradients for solving linear systems," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 49, pp. 409–436, 1952. doi: 10.6028/jres.049.044.

[131] T. A. Davis, "Algorithm 832: UMFPAК V4.3—An unsymmetric-pattern multifrontal method," *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 30, no. 2, pp. 196–199, 2004. doi: 10.1145/992200.992206.

[132] B. I. Merenko, "Інтелектуальний предиктивний аналіз процесу розшарування водонафтових емульсій [Intelligent predictive analysis of the stratification process of water-oil emulsions]," in *Proc. 5th Int. Sci. and Practical Conf. Global Trends in Science, Technology and Economy*, Graz, Austria, Mar. 25–27, 2026, pp. 67–70. doi: 10.70286/isu-25.03.2026.006.

[133] R. E. Crochiere and L. R. Rabiner, "Interpolation and decimation of digital signals—A tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 69, no. 3, pp. 300–331, 1981. doi: 10.1109/PROC.1981.11969.

[134] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," *Proceedings of the IRE*, vol. 37, pp. 10–21, 1949. doi: 10.1109/JRPROC.1949.232969.

[135] A. Raue, C. Kreutz, T. Maiwald, J. Bachmann, M. Schilling, U. Klingmüller, and J. Timmer, "Structural and practical identifiability analysis of partially observed dynamical models by exploiting the profile likelihood,"

*Bioinformatics*, vol. 25, no. 15, pp. 1923–1929, 2009. doi: 10.1093/bioinformatics/btp358.

[136] N. N. Lam, P. D. Docherty, and R. Murray, "Practical identifiability of parametrised models: A review of benefits and limitations of various approaches," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 199, pp. 202–216, 2022. doi: 10.1016/j.matcom.2022.03.020.

[137] S. Borguet and O. Léonard, "The Fisher Information Matrix as a relevant tool for sensor selection in engine health monitoring," *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2008, Art. no. 784749, 2008. doi: 10.1155/2008/784749.

[138] B. I. Merenko, "Аналіз можливостей вивчення багат шарового середовища методами багаточастотного імпедансного зондування [Analysis of the possibilities of studying a multilayer medium by multifrequency impedance probing methods]," in *Proc. XXVI Vseukr. Nauk.-Tekhn. Konf. Molodykh Vchenykh, Aspirantiv ta Studentiv 'Stan, Dosiahennia i Perspektyvy Informatsiinykh System i Tekhnologii'*, Odesa, Ukraine, Apr. 16–17, 2026.

[139] H. D. Dawoud, H. Saleem, N. A. Alnuaimi, and S. J. Zaidi, "Characterization and treatment technologies applied for produced water in Qatar," *Water*, vol. 13, no. 24, Art. no. 3573, 2021. doi: 10.3390/w13243573.

[140] A. R. Ferreira, L. M. Skjolding, D. F. Sanchez, A. G. B. Ntynez, Y. D. Ivanova, K. L. Feilberg, R. K. Chhetri, and H. R. Andersen, "Offshore produced water treatment by a biofilm reactor on the seabed: The effect of temperature and matrix characteristics," *Journal of Environmental Management*, vol. 365, Art. no. 121391, 2024. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121391.

[141] J. A. Al-Sudani, H. K. Mustafa, D. F. Al-Sudani, and H. Falih, "Analytical water saturation model using capacitance-resistance simulation: Clean and shaly formations," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 82, Art. no. 103325, Oct. 2020. doi: 10.1016/j.jngse.2020.103325.

[142] S. J. Pan and Q. Yang, "A survey on transfer learning," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 22, no. 10, pp. 1345–1359, 2010. doi: 10.1109/TKDE.2009.191.

[143] F. Zhuang, Z. Qi, K. Duan, D. Xi, Y. Zhu, H. Zhu, H. Xiong, and Q. He, "A comprehensive survey on transfer learning," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 1, pp. 43–76, 2021. doi: 10.1109/JPROC.2020.3004555.

[144] A. L. Maas, A. Y. Hannun, and A. Y. Ng, "Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models," in *Proc. 30th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML) Workshop on Deep Learning for Audio, Speech, and Language Processing*, Atlanta, GA, USA, 2013, pp. 1–6.

[145] S. Ioffe and C. Szegedy, "Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift," in *Proc. 32nd Int. Conf. Mach. Learn. (ICML)*, Lille, France, 2015, pp. 448–456.

[146] N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, and R. Salakhutdinov, "Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 15, pp. 1929–1958, 2014.

[147] G. E. Hinton and R. R. Salakhutdinov, "Reducing the dimensionality of data with neural networks," *Science*, vol. 313, no. 5786, pp. 504–507, 2006. doi: 10.1126/science.1127647.

[148] B. C. Geiger and G. Kubin, "Information Bottleneck: Theory and applications in deep learning," *Entropy*, vol. 22, no. 12, Art. no. 1408, 2020. doi: 10.3390/e22121408.

[149] B. Merenko, "Hardware-software implementation of a computerized system for predictive identification of multilayer medium parameters," in *Proc. 8th Int. Sci. and Practical Conf. Global Directions in Scientific Research and Technological Development*, Valencia, Spain, Apr. 6–8, 2026, pp. 74–77. doi: 10.70286/EOSS-06.04.2026.006.74-77.

[150] V. B. Кropyvnytska and B. I. Merenko, "Модель кіберфізичної системи моніторингу та керування рівнем рідин у високих резервуарах [Model

of a cyber-physical system for monitoring and control of liquid levels in high tanks]," *Komunalne Hospodarstvo Mist. Serii: Informatsiini Tekhnolohii ta Inzheneriia*, no. 4(192), pp. 22–28, 2025. doi: 10.33042/3083-6727-2025-4-192-22-28.

[151] V. A. Kornuta and B. I. Merenko, "Комплексний підхід до моделювання та планування інтелектуальних автоматизованих систем на основі SAT-планування [A comprehensive approach to modeling and planning intelligent automated systems based on SAT planning]," *Vcheni Zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni Nauky*, vol. 36(75), no. 5, pt. 2, pp. 133–141, 2025. doi: 10.32782/2663-5941/2025.5.2/19.

[152] V. A. Kornuta, B. I. Merenko, Y. V. Katamai, I. Ya. Dmytriv, N. T. Ivantsiv, and A. V. Diachuk, "Методи убезпечення від помилок інтелектуальних автоматизованих систем нафтогазової галузі [Methods for safeguarding intelligent automated systems in the oil and gas industry against errors]," *Vcheni Zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni Nauky*, vol. 36(75), no. 1, pt. 2, pp. 117–123, 2025. doi: 10.32782/2663-5941/2025.1.2/18.

## **ДОДАТКИ**

**Програма для обчислення приростів ентропії**

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

N_MC    = 2000
N_BINS  = 256
N_FREQ  = 60
F_MIN   = 10.0
F_MAX   = 1e5
SEED    = 42

rng = np.random.default_rng(SEED)

PARAM_BOUNDS = {
    "Gv": (1e-5, 1e-1),
    "Cv": (1e-11, 1e-7),
    "Gh": (1e-5, 1e-1),
    "Ch": (1e-11, 1e-7),
    "Rgnd": (500, 5000),
}

PARAM_NAMES = list(PARAM_BOUNDS.keys())
PARAM_LABELS = {
    "Gv": r"$G_v$",
    "Cv": r"$C_v$",
    "Gh": r"$G_h$",
    "Ch": r"$C_h$",
    "Rgnd": r"$R_{gnd}$",
}

LINE_STYLES = {
    "Gv": "solid",
    "Cv": "dashed",
    "Gh": "dashdot",
    "Ch": (0, (3, 1, 1, 1, 1, 1)),
```

## Продовження додатку А

```

    "Rgnd": "dotted",
}

freqs = np.logspace(np.log10(F_MIN), np.log10(F_MAX), N_FREQ)

def compute_impedance(Gv, Cv, Gh, Ch, Rgnd, omega):
    yrc = Gv + 1j * omega * Cv
    yv = yrc / (1.0 + Rgnd * yrc)
    yh = Gh + 1j * omega * Ch
    Y = np.array([
        [ yh + yv, -yh, 0, 0 ],
        [-yh, 2*yh + yv, -yh, 0 ],
        [ 0, -yh, 2*yh + yv, -yh ],
        [ 0, 0, -yh, yh + yv ],
    ], dtype=complex)
    I = np.array([1.0+0j, 0.0+0j, 0.0+0j, -1.0+0j])
    V = np.linalg.solve(Y, I)
    return np.abs(V[1] - V[2])

def lhs_sample(n, bounds_dict, rng):
    samples = np.zeros((n, len(bounds_dict)))
    for j, (lo, hi) in enumerate(bounds_dict.values()):
        lo_l, hi_l = np.log10(lo), np.log10(hi)
        cuts = np.linspace(0, 1, n + 1)
        u = rng.uniform(cuts[:-1], cuts[1:])
        idx = rng.permutation(n)
        samples[:, j] = 10 ** (lo_l + u[idx] * (hi_l - lo_l))
    return samples

def shannon_entropy(z_vals, z_min, z_max, n_bins):
    if z_max <= z_min:
        return 0.0
    edges = np.logspace(np.log10(z_min), np.log10(z_max), n_bins + 1)

```

## Продовження додатку А

```

counts, _ = np.histogram(z_vals, bins=edges)
total = counts.sum()
if total == 0:
    return 0.0
p = counts[counts > 0] / total
return float(-np.sum(p * np.log2(p)))

print("Генерація ансамблю параметрів...")
X = lhs_sample(N_MC, PARAM_BOUNDS, rng)

X_med = np.median(X, axis=0)

H_all = np.zeros(N_FREQ)
delta_H = {name: np.zeros(N_FREQ) for name in PARAM_NAMES}

print("Обчислення ентропій...")
for fi, freq in enumerate(freqs):
    omega = 2 * np.pi * freq

    Z_all = np.array([
        compute_impedance(X[i,0], X[i,1], X[i,2], X[i,3], X[i,4], omega)
        for i in range(N_MC)
    ])
    z_min = Z_all.min()
    z_max = Z_all.max()
    H_all[fi] = shannon_entropy(Z_all, z_min, z_max, N_BINS)

for j, name in enumerate(PARAM_NAMES):
    X_fix = X.copy()
    X_fix[:, j] = X_med[j]

    Z_fix = np.array([
        compute_impedance(X_fix[i,0], X_fix[i,1], X_fix[i,2],

```

## Продовження додатку А

```

        X_fix[i,3], X_fix[i,4], omega)
    for i in range(N_MC)
])
H_fix = shannon_entropy(Z_fix, z_min, z_max, N_BINS)

delta_H[name][fi] = H_all[fi] - H_fix

if (fi + 1) % 10 == 0:
    print(f" {fi+1}/{N_FREQ} частотних точок опрацьовано")

fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(8, 5))
ax1.set_title(r"Глобальна ентропія  $H_{\text{all}}(\omega)$ ")
ax1.plot(freqs, H_all, color="black", linestyle="solid", linewidth=1.8,
        label=r" $H_{\text{all}}$ ")
ax1.set_xscale("log")
ax1.set_xlabel("Частота, Гц")
ax1.set_ylabel("Ентропія, біт")
ax1.legend(fontsize=10)
ax1.grid(True, which="both", alpha=0.3)
fig1.tight_layout()
fig1.savefig("entropy_global.png", dpi=150, bbox_inches="tight")
print("Збережено: entropy_global.png")

fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(8, 5))
ax2.set_title(r"Спектр приростів інформативності  $\Delta H_i(\omega)$ ")
for name in PARAM_NAMES:
    ax2.plot(freqs, delta_H[name],
            label=PARAM_LABELS[name],
            color="black",
            linestyle=LINE_STYLES[name],
            linewidth=1.5)
ax2.axhline(0, color="gray", linewidth=0.6, linestyle="--")
ax2.set_xscale("log")

```

**Продовження додатку А**

```
ax2.set_xlabel("Частота, Гц")
ax2.set_ylabel(r"$\Delta H_i(\omega)$, біт")
ax2.legend(fontsize=10)
ax2.grid(True, which="both", alpha=0.3)
fig2.tight_layout()
fig2.savefig("entropy_increment_spectrum.png", dpi=150,
bbox_inches="tight")
print("Збережено: entropy_increment_spectrum.png")

plt.show()
print(f"\nМаксимальна теоретична ентропія при N_BINS={N_BINS}: "
      f"{np.log2(N_BINS):.2f} біт")
```

### Реалізація алгоритму ентропійного аналізу інформативності

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def calculate_jacobian_info(freqs, R1, R2, C1, C2):

    w = 2 * np.pi * freqs

    Z1 = R1 - 1j/(w * C1)
    Z2 = R2 - 1j/(w * C2)
    SumZ = Z1 + Z2

    dK_dR1 = -Z2 / (SumZ**2)
    dK_dC1 = (1j / (w * C1**2)) * (Z2 / (SumZ**2))

    S_R = np.abs(dK_dR1 * R1)
    S_C = np.abs(dK_dC1 * C1)

    return S_R, S_C

R1, R2 = 1000, 500
C1, C2 = 200e-12, 150e-12
freqs = np.logspace(1, 5, 100)

S_R, S_C = calculate_jacobian_info(freqs, R1, R2, C1, C2)

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.loglog(freqs, S_R, label='Чутливість до опору R (Signal)',
linewidth=2)
plt.loglog(freqs, S_C, label='Чутливість до ємності C (Barrier)',
linewidth=2)
plt.grid(True, which="both", ls="--", alpha=0.5)
plt.title("Аналіз Якобіана: Роздільність R та C у спектрі частот")

```

**Продовження додатку Б**

```
plt.xlabel("Частота, Гц")
plt.ylabel("Нормована чутливість  $|(\partial K / \partial P) * P|$ ")
plt.legend()
plt.annotate('Зона домінування ізоляції', xy=(100, 1e-3), xytext=(20, 1e-1),
            arrowprops=dict(facecolor='black', shrink=0.05))
plt.annotate('Зона домінування середовища', xy=(5e4, 1e-1), xytext=(5e3, 5e-1),
            arrowprops=dict(facecolor='black', shrink=0.05))
plt.show()
```

## ДОДАТОК В

**Розрахунок числа обумовленості матриці Фішера (B\_jakobian.py)**

```

import numpy as np
import scipy.sparse as sp
import scipy.sparse.linalg as spl
import matplotlib.pyplot as plt
import time

CELL_SIZE = 0.02
ROWS, COLS = 75, 150
R_SURF, R_LIQUID = 10, 11

MAIN_PLUS_COL, MAIN_MINUS_COL = 15, 135
COMP_PLUS_COL, COMP_MINUS_COL = 45, 105
ELECTRODE_WIDTH = 15

EPS0 = 8.854e-12
V_MAIN = 10.0

MAT_TEFLON = {'sigma': 1e-12, 'eps': 2.1}
MAT_METAL = {'sigma': 1e4, 'eps': 1.0}
MAT_AIR = {'sigma': 1e-14, 'eps': 1.0}
MAT_WATER = {'sigma': 0.05, 'eps': 80.0}
MAT_OIL = {'sigma': 1e-9, 'eps': 2.2}
MAT_EMUL = {'sigma_dc': 0.005, 'eps_inf': 5.0, 'delta_eps': 200.0,
'tau': 1e-5}

def get_Y_bulk(mat, omega, d=CELL_SIZE):
    return mat['sigma']*d + 1j*omega*EPS0*mat['eps']*d
def get_Y_coating(mat, omega, d=CELL_SIZE, thick=1e-3):
    return mat['sigma']*(d/thick) + 1j*omega*EPS0*mat['eps']*(d/thick)
def get_Y_emul(omega):
    eps_real = MAT_EMUL['eps_inf'] + MAT_EMUL['delta_eps'] / (1 + (omega
* MAT_EMUL['tau'])**2)

```

## Продовження додатку В

```

G_em = MAT_EMUL['sigma_dc'] + (omega**2 * EPS0 *
MAT_EMUL['delta_eps'] * MAT_EMUL['tau']) / (1 + (omega *
MAT_EMUL['tau'])**2)
return G_em * CELL_SIZE + 1j * omega * EPS0 * eps_real * CELL_SIZE

def solve_for_K(th_oil_mm, th_emul_mm, freq):
    omega = 2 * np.pi * freq
    oil_l = int(round(th_oil_mm * 1e-3 / CELL_SIZE))
    emul_l = int(round(th_emul_mm * 1e-3 / CELL_SIZE))

    Y_h = np.full((ROWS, COLS-1), get_Y_bulk(MAT_AIR, omega),
dtype=complex)
    Y_v = np.full((ROWS-1, COLS), get_Y_bulk(MAT_AIR, omega),
dtype=complex)

    Y_h[R_LIQUID:, :] = get_Y_bulk(MAT_WATER, omega)
    if R_LIQUID < ROWS-1: Y_v[R_LIQUID:, :] = get_Y_bulk(MAT_WATER,
omega)

    r_em_start = R_LIQUID + oil_l
    for r in range(r_em_start, min(r_em_start + emul_l, ROWS)):
        Y_h[r, :] = get_Y_emul(omega)
        if r < ROWS - 1: Y_v[r, :] = get_Y_emul(omega)

    r_oil_start = R_LIQUID
    for r in range(r_oil_start, min(r_oil_start + oil_l, ROWS)):
        Y_h[r, :] = get_Y_bulk(MAT_OIL, omega)
        if r < ROWS - 1: Y_v[r, :] = get_Y_bulk(MAT_OIL, omega)

    Y_met = get_Y_bulk(MAT_METAL, omega); Y_coat =
get_Y_coating(MAT_TEFLON, omega)
    Y_v[:, 0] = Y_met; Y_v[:, -1] = Y_met; Y_h[-1, :] = Y_met

```

## Продовження додатку В

```

def place_el(center):
    start, end = max(1, center - ELECTRODE_WIDTH//2), min(COLS - 2,
center + ELECTRODE_WIDTH//2)
    for c in range(start, end + 1):
        Y_v[R_SURF, c] = Y_coat
        if c > start: Y_h[R_SURF, c-1] = Y_met
        if c < end: Y_h[R_SURF, c] = Y_met

place_el(MAIN_PLUS_COL); place_el(MAIN_MINUS_COL)
place_el(COMP_PLUS_COL); place_el(COMP_MINUS_COL)

dim = ROWS * COLS + 2
row_idx, col_idx, data = [], [], []
def add_el(r, c, val): row_idx.append(r); col_idx.append(c);
data.append(val)
def get_idx(r, c): return r * COLS + c

for r in range(ROWS):
    for c in range(COLS):
        idx = get_idx(r, c)
        if c == 0 or c == COLS - 1 or r == ROWS - 1:
            add_el(idx, idx, 1.0); continue
        sum_y = 0.0
        if c < COLS - 1: y = Y_h[r, c]; sum_y += y; add_el(idx, idx +
1, -y)
        if c > 0: y = Y_h[r, c - 1]; sum_y += y; add_el(idx, idx - 1,
-y)
        if r < ROWS - 1: y = Y_v[r, c]; sum_y += y; add_el(idx, idx +
COLS, -y)
        if r > 0: y = Y_v[r - 1, c]; sum_y += y; add_el(idx, idx -
COLS, -y)
        add_el(idx, idx, sum_y)

```

## Продовження додатку В

```

    idx_Im, idx_Ic = dim - 2, dim - 1
    pm, mm = get_idx(R_SURF, MAIN_PLUS_COL), get_idx(R_SURF,
MAIN_MINUS_COL)
    pc, mc = get_idx(R_SURF, COMP_PLUS_COL), get_idx(R_SURF,
COMP_MINUS_COL)

    add_el(pm, idx_Im, 1); add_el(mm, idx_Im, -1); add_el(idx_Im, pm, 1);
add_el(idx_Im, mm, -1)
    add_el(pc, idx_Ic, 1); add_el(mc, idx_Ic, -1); add_el(idx_Ic, pc, 1);
add_el(idx_Ic, mc, -1)

    A_sparse = sp.csr_matrix((data, (row_idx, col_idx)), shape=(dim,
dim))
    B = np.zeros(dim, dtype=complex); B[idx_Im] = V_MAIN
    I_base = spl.spsolve(A_sparse, B)[idx_Ic]

    B = np.zeros(dim, dtype=complex); B[idx_Ic] = 1.0
    I_test = spl.spsolve(A_sparse, B)[idx_Ic]

    return -I_base / I_test / V_MAIN if abs(I_test) > 1e-20 else 0

def calculate_FIM_condition():
    FREQS = [10, 1000, 100000]
    TH_EMUL = 100.0
    DELTA_D = CELL_SIZE * 1000

    oil_thicknesses = np.arange(20, 420, 20)
    cond_numbers = []
    ratios = []

    print(f"Розрахунок матриці Фішера (Крок: {DELTA_D} мм, Емульсія:
{TH_EMUL} мм)...")

```

## Продовження додатку В

```

for th_oil in oil_thicknesses:
    ratio = th_oil / TH_EMUL

    J = np.zeros((len(FREQS) * 2, 2))

    for i, freq in enumerate(FREQS):
        K_base = solve_for_K(th_oil, TH_EMUL, freq)
        K_doil = solve_for_K(th_oil + DELTA_D, TH_EMUL, freq)
        K_dem = solve_for_K(th_oil, TH_EMUL + DELTA_D, freq)

        J[2*i, 0] = (np.abs(K_doil) - np.abs(K_base)) / DELTA_D /
np.abs(K_base)
        J[2*i, 1] = (np.abs(K_dem) - np.abs(K_base)) / DELTA_D /
np.abs(K_base)

        J[2*i+1, 0] = (np.angle(K_doil) - np.angle(K_base)) / DELTA_D
        J[2*i+1, 1] = (np.angle(K_dem) - np.angle(K_base)) / DELTA_D

    FIM = J.T @ J

    cond_num = np.linalg.cond(FIM)
    cond_numbers.append(cond_num)
    ratios.append(ratio)

    print(f"Співвідношення doil/demul = {ratio:.1f} | Cond(FIM) =
{cond_num:.2e}")

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(ratios, cond_numbers, 'r-o', lw=2)
plt.yscale('log')
plt.axhline(y=1e4, color='b', linestyle='--', label='Критична межа
виродженості (Cond = 10^4)')

```

**Продовження додатку В**

```
plt.fill_between(ratios, 1e4, max(cond_numbers), color='red',
alpha=0.1, label='Зона втрати спостережуваності')

plt.title('Умова спостережуваності емульсійного шару (Аналіз матриці
Фішера)')
plt.xlabel('Співвідношення товщин (Нафта / Емульсія)')
plt.ylabel('Число обумовленості FIM (Log Scale)')
plt.grid(True, which="both", ls="--")
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

if __name__ == '__main__':
    calculate_FIM_condition()
```

### Генератор набору даних

```

import numpy as np
import scipy.sparse as sp
import scipy.sparse.linalg as spl
import time
import os
import multiprocessing as mp

CELL_SIZE = 0.02
ROWS, COLS = 50, 150
R_SURF, R_LIQUID = 5, 6

MAIN_PLUS_COL, COMP_PLUS_COL = 20, 55
COMP_MINUS_COL, MAIN_MINUS_COL = 95, 130
ELECTRODE_WIDTH = 10

EPS0 = 8.854e-12
V_MAIN = 10.0

MAT_TEFLON = {'sigma': 1e-12, 'eps': 2.1}
MAT_METAL = {'sigma': 1e4, 'eps': 1.0}
MAT_AIR = {'sigma': 1e-14, 'eps': 1.0}
MAT_OIL = {'sigma': 1e-10, 'eps': 2.2}

def get_Y_bulk(mat, omega, d=CELL_SIZE):
    return mat['sigma']*d + 1j*omega*EPS0*mat['eps']*d
def get_Y_coating(mat, omega, d=CELL_SIZE, thick=1e-3):
    return mat['sigma']*(d/thick) + 1j*omega*EPS0*mat['eps']*(d/thick)

def solve_for_K(th_oil_mm, sigma_water, freq):
    omega = 2 * np.pi * freq
    oil_l = int(round(th_oil_mm * 1e-3 / CELL_SIZE))
    MAT_WATER = {'sigma': sigma_water, 'eps': 80.0}

```

## Продовження додатку Г

```

Y_h = np.full((ROWS, COLS-1), get_Y_bulk(MAT_AIR, omega),
dtype=complex)
Y_v = np.full((ROWS-1, COLS), get_Y_bulk(MAT_AIR, omega),
dtype=complex)

Y_h[R_LIQUID:, :] = get_Y_bulk(MAT_WATER, omega)
if R_LIQUID < ROWS-1: Y_v[R_LIQUID:, :] = get_Y_bulk(MAT_WATER,
omega)

if oil_l > 0:
    r_oil_end = min(R_LIQUID + oil_l, ROWS)
    Y_h[R_LIQUID:r_oil_end, :] = get_Y_bulk(MAT_OIL, omega)
    if R_LIQUID < ROWS - 1: Y_v[R_LIQUID:r_oil_end, :] =
get_Y_bulk(MAT_OIL, omega)

Y_met = get_Y_bulk(MAT_METAL, omega); Y_coat =
get_Y_coating(MAT_TEFLON, omega)
Y_v[:, 0] = Y_met; Y_v[:, -1] = Y_met; Y_h[-1, :] = Y_met

def place_el(center):
    start, end = max(1, center - ELECTRODE_WIDTH//2), min(COLS - 2,
center + ELECTRODE_WIDTH//2)
    for c in range(start, end + 1):
        Y_v[R_SURF, c] = Y_coat
        if c > start: Y_h[R_SURF, c-1] = Y_met
        if c < end: Y_h[R_SURF, c] = Y_met

place_el(MAIN_PLUS_COL); place_el(MAIN_MINUS_COL)
place_el(COMP_PLUS_COL); place_el(COMP_MINUS_COL)

dim = ROWS * COLS + 2
row_idx, col_idx, data = [], [], []

```

## Продовження додатку Г

```

def add_el(r, c, val): row_idx.append(r); col_idx.append(c);
data.append(val)
def get_idx(r, c): return r * COLS + c

for r in range(ROWS):
    for c in range(COLS):
        idx = get_idx(r, c)
        if c == 0 or c == COLS - 1 or r == ROWS - 1:
            add_el(idx, idx, 1.0); continue
        sum_y = 0.0
        if c < COLS - 1: y = Y_h[r, c]; sum_y += y; add_el(idx, idx +
1, -y)
        if c > 0: y = Y_h[r, c - 1]; sum_y += y; add_el(idx,
idx - 1, -y)
        if r < ROWS - 1: y = Y_v[r, c]; sum_y += y; add_el(idx, idx +
COLS, -y)
        if r > 0: y = Y_v[r - 1, c]; sum_y += y; add_el(idx,
idx - COLS, -y)
        add_el(idx, idx, sum_y)

    idx_Im, idx_Ic = dim - 2, dim - 1
    pm, mm = get_idx(R_SURF, MAIN_PLUS_COL), get_idx(R_SURF,
MAIN_MINUS_COL)
    pc, mc = get_idx(R_SURF, COMP_PLUS_COL), get_idx(R_SURF,
COMP_MINUS_COL)

    add_el(pm, idx_Im, 1); add_el(mm, idx_Im, -1); add_el(idx_Im, pm, 1);
add_el(idx_Im, mm, -1)
    add_el(pc, idx_Ic, 1); add_el(mc, idx_Ic, -1); add_el(idx_Ic, pc, 1);
add_el(idx_Ic, mc, -1)

A_sparse = sp.csr_matrix((data, (row_idx, col_idx)), shape=(dim,
dim))

```

## Продовження додатку Г

```

B = np.zeros(dim, dtype=complex); B[idx_Im] = V_MAIN
I_base = spl.spsolve(A_sparse, B)[idx_Ic]

B = np.zeros(dim, dtype=complex); B[idx_Ic] = 1.0
I_test = spl.spsolve(A_sparse, B)[idx_Ic]

return -I_base / I_test / V_MAIN if abs(I_test) > 1e-20 else 0

def generate_one_sample(process_id):
    np.random.seed((os.getpid() * int(time.time()) * 1000) + process_id) %
123456789)

    FREQS = np.logspace(1, 5, 40)

    X_sample = np.zeros((8, 81), dtype=np.float32)

    d_oil = np.random.uniform(0.0, 400.0)
    k_coeff = 10 ** np.random.uniform(-2, -0.5)
    temperature = np.random.uniform(10.0, 60.0)
    base_sigma = 10 ** np.random.uniform(-2, 0.7)
    sigma_water = base_sigma * (1 + 0.02 * (temperature - 20.0))
    t_start = np.random.uniform(0, 30)

    R = d_oil / 150.0
    P_d = np.clip(1.0 - max(0, R - 1.0), 0.0, 1.0)
    P_k = P_d

    for step in range(8):
        current_time = t_start + step
        current_d = d_oil * (1 - np.exp(-k_coeff * current_time))

        for f_idx, freq in enumerate(FREQS):
            K_val = solve_for_K(current_d, sigma_water, freq)

```

## Продовження додатку Г

```

X_sample[step, 2*f_idx] = np.real(K_val) +
np.random.normal(0, 2.4e-4)
X_sample[step, 2*f_idx+1] = np.imag(K_val) +
np.random.normal(0, 2.4e-4)
X_sample[step, 80] = temperature
Y_sample = np.array([d_oil, k_coeff, P_k, P_d, R], dtype=np.float32)
return X_sample, Y_sample
if __name__ == '__main__':
    N_SAMPLES = 15000
    CORES = mp.cpu_count()
    print(f"Починаємо генерацію {N_SAMPLES} експериментів.")
    print(f"Знайдено ядер процесора: {CORES}. Запускаємо
розпаралелювання...")
    start_time = time.time()
    with mp.Pool(processes=CORES) as pool:
        results = []
        for i, res in enumerate(pool.imap_unordered(generate_one_sample,
range(N_SAMPLES))):
            results.append(res)
            if (i + 1) % 100 == 0:
                print(f"Готово: {i+1}/{N_SAMPLES} ... Час: {time.time() -
start_time:.1f} сек")
    X_train = np.array([res[0] for res in results])
    Y_train = np.array([res[1] for res in results])
    current_dir = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
    np.save(os.path.join(current_dir, "X_train_dataset.npy"), X_train)
    np.save(os.path.join(current_dir, "Y_train_dataset.npy"), Y_train)

    print(f"\nУспішно! Згенеровано {len(X_train)} зразків за {time.time()
- start_time:.1f} сек.")

```

## ДОДАТОК Д

**Навчання першої нейромережі із формуванням коефіцієнтів**

```
import os
os.environ['OMP_NUM_THREADS'] = '1'
os.environ['OPENBLAS_NUM_THREADS'] = '1'
os.environ['MKL_NUM_THREADS'] = '1'
os.environ['VECLIB_MAXIMUM_THREADS'] = '1'
os.environ['TF_CPP_MIN_LOG_LEVEL'] = '3'

import numpy as np
import scipy.sparse as sp
import scipy.sparse.linalg as spl
import time
import multiprocessing as mp
import csv

CELL_SIZE = 0.02
ROWS, COLS = 50, 150
R_SURF, R_LIQUID = 5, 6

MAIN_PLUS_COL, COMP_PLUS_COL = 20, 55
COMP_MINUS_COL, MAIN_MINUS_COL = 95, 130
ELECTRODE_WIDTH = 10
EPS0 = 8.854e-12

DESIRED_V = 1.0 # Замість 10.0
V_MAIN = min(DESIRED_V, 10.5)

MAT_TEFLON = {'sigma': 1e-12, 'eps': 2.1}
MAT_METAL = {'sigma': 1e4, 'eps': 1.0}
MAT_AIR = {'sigma': 1e-14, 'eps': 1.0}
MAT_OIL = {'sigma': 1e-10, 'eps': 2.2}

FREQS = np.logspace(1, 5, 40)
```

## Продовження додатку Д

```

def get_Y_bulk(mat, omega, d=CELL_SIZE):
    return mat['sigma']*d + 1j*omega*EPS0*mat['eps']*d
def get_Y_coating(mat, omega, d=CELL_SIZE, thick=1e-3):
    return mat['sigma']*(d/thick) + 1j*omega*EPS0*mat['eps']*(d/thick)

def solve_for_K(th_oil_mm, sigma_water, freq):
    omega = 2 * np.pi * freq
    oil_l = int(round(th_oil_mm * 1e-3 / CELL_SIZE))
    MAT_WATER = {'sigma': sigma_water, 'eps': 80.0}

    Y_h = np.full((ROWS, COLS-1), get_Y_bulk(MAT_AIR, omega),
dtype=complex)
    Y_v = np.full((ROWS-1, COLS), get_Y_bulk(MAT_AIR, omega),
dtype=complex)

    Y_h[R_LIQUID:, :] = get_Y_bulk(MAT_WATER, omega)
    if R_LIQUID < ROWS-1: Y_v[R_LIQUID:, :] = get_Y_bulk(MAT_WATER,
omega)

    if oil_l > 0:
        r_oil_end = min(R_LIQUID + oil_l, ROWS)
        Y_h[R_LIQUID:r_oil_end, :] = get_Y_bulk(MAT_OIL, omega)
        if R_LIQUID < ROWS - 1: Y_v[R_LIQUID:r_oil_end, :] =
get_Y_bulk(MAT_OIL, omega)

    Y_met = get_Y_bulk(MAT_METAL, omega); Y_coat =
get_Y_coating(MAT_TEFLON, omega)
    Y_v[:, 0] = Y_met; Y_v[:, -1] = Y_met; Y_h[-1, :] = Y_met

def place_el(center):
    start, end = max(1, center - ELECTRODE_WIDTH//2), min(COLS - 2,
center + ELECTRODE_WIDTH//2)
    for c in range(start, end + 1):

```

## Продовження додатку Д

```

Y_v[R_SURF, c] = Y_coat
if c > start: Y_h[R_SURF, c-1] = Y_met
if c < end:   Y_h[R_SURF, c] = Y_met

place_el(MAIN_PLUS_COL); place_el(MAIN_MINUS_COL)
place_el(COMP_PLUS_COL); place_el(COMP_MINUS_COL)

dim = ROWS * COLS + 2
row_idx, col_idx, data = [], [], []
def add_el(r, c, val): row_idx.append(r); col_idx.append(c);
data.append(val)
def get_idx(r, c): return r * COLS + c

for r in range(ROWS):
    for c in range(COLS):
        idx = get_idx(r, c)
        if c == 0 or c == COLS - 1 or r == ROWS - 1: add_el(idx, idx,
1.0); continue
        sum_y = 0.0
        if c < COLS - 1: y = Y_h[r, c]; sum_y += y; add_el(idx, idx +
1, -y)
        if c > 0:       y = Y_h[r, c - 1]; sum_y += y; add_el(idx,
idx - 1, -y)
        if r < ROWS - 1: y = Y_v[r, c]; sum_y += y; add_el(idx, idx +
COLS, -y)
        if r > 0:       y = Y_v[r - 1, c]; sum_y += y; add_el(idx,
idx - COLS, -y)
        add_el(idx, idx, sum_y)

idx_Im, idx_Ic = dim - 2, dim - 1
pm, mm = get_idx(R_SURF, MAIN_PLUS_COL), get_idx(R_SURF,
MAIN_MINUS_COL)

```

## Продовження додатку Д

```

pc, mc = get_idx(R_SURF, COMP_PLUS_COL), get_idx(R_SURF,
COMP_MINUS_COL)

    add_el(pm, idx_Im, 1); add_el(mm, idx_Im, -1); add_el(idx_Im, pm, 1);
add_el(idx_Im, mm, -1)
    add_el(pc, idx_Ic, 1); add_el(mc, idx_Ic, -1); add_el(idx_Ic, pc, 1);
add_el(idx_Ic, mc, -1)

A_sparse = sp.csr_matrix((data, (row_idx, col_idx)), shape=(dim,
dim))
B = np.zeros(dim, dtype=complex); B[idx_Im] = V_MAIN
I_base = spl.spsolve(A_sparse, B)[idx_Ic]
B = np.zeros(dim, dtype=complex); B[idx_Ic] = 1.0
I_test = spl.spsolve(A_sparse, B)[idx_Ic]

return -I_base / I_test / V_MAIN if abs(I_test) > 1e-20 else 0

def solve_for_K_continuous(th_oil_mm, sigma_water, freq):
    cell_mm = CELL_SIZE * 1000.0
    exact_cells = th_oil_mm / cell_mm
    lower_cell = int(np.floor(exact_cells))
    fraction = exact_cells - lower_cell
    K_lower = solve_for_K(lower_cell * cell_mm, sigma_water, freq)
    if fraction > 0.0001:
        K_upper = solve_for_K((lower_cell + 1) * cell_mm, sigma_water,
freq)
        return K_lower * (1 - fraction) + K_upper * fraction
    return K_lower

def fem_worker(args):
    thickness_mm, temp_c = args
    sigma_water = 1.0 * (1 + 0.02 * (temp_c - 20.0))
    spectrum = np.zeros(80)

```

## Продовження додатку Д

```

for f_idx, freq in enumerate(FREQS):
    K_val = solve_for_K_continuous(thickness_mm, sigma_water, freq)
    noise_level = 2.4e-5
    spectrum[2*f_idx] = np.real(K_val) + np.random.normal(0,
noise_level)
    spectrum[2*f_idx+1] = np.imag(K_val) + np.random.normal(0,
noise_level)
    return np.append(spectrum, temp_c)

def calculate_high_res_ols(high_res_buffer):
    N = len(high_res_buffer)
    t = np.arange(N) * (5.0 / 60.0)
    sum_t = np.sum(t)
    sum_t2 = np.sum(t**2)
    den = N * sum_t2 - sum_t**2
    slopes = np.zeros(40)
    data_matrix = np.array(high_res_buffer)
    for f in range(40):
        re = data_matrix[:, 2*f]; im = data_matrix[:, 2*f+1]
        amp = np.sqrt(re**2 + im**2)
        slopes[f] = (N * np.sum(t * amp) - sum_t * np.sum(amp)) / den
    return slopes

if __name__ == '__main__':
    import tensorflow as tf
    import matplotlib.pyplot as plt
    current_dir = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))

    try:
        X_mean = np.mean(np.load(os.path.join(current_dir,
"X_mega_dataset.npy")), axis=0)
        X_std = np.std(np.load(os.path.join(current_dir,
"X_mega_dataset.npy")), axis=0) + 1e-8

```

## Продовження додатку Д

```

    Slopes_mean = np.load(os.path.join(current_dir,
"Slopes_mean.npy"))
    Slopes_std = np.load(os.path.join(current_dir, "Slopes_std.npy"))

    Y_data = np.load(os.path.join(current_dir, "Y_mega_dataset.npy"))
    Y_data_mod = np.copy(Y_data)
    Y_data_mod[:, 1] = np.log10(Y_data_mod[:, 1])
    Y_min = np.min(Y_data_mod, axis=0)
    Y_max = np.max(Y_data_mod, axis=0)
except Exception as e:
    print(f"Помилка завантаження файлів: {e}")
    exit()

print("Завантаження моделі Каскаду 1...")
model = tf.keras.models.load_model(os.path.join(current_dir,
"cascade1_dual.keras"))

TOTAL_MINUTES = 300
DT_SEC = 5
STEPS_PER_MIN = 60 // DT_SEC
TOTAL_STEPS = TOTAL_MINUTES * STEPS_PER_MIN

TRUE_D_MAX = 22.0
TRUE_K = 0.015
TEMP = 22.0

print(f"\nПідготовка параметрів: Макс. товщина = {TRUE_D_MAX} мм,
V_main = {V_MAIN} В")
params_list = [(TRUE_D_MAX * (1 - np.exp(-TRUE_K * step * (DT_SEC /
60.0))), TEMP) for step in range(1, TOTAL_STEPS + 1)]
num_cores = max(1, mp.cpu_count() - 1)
print(f"Запуск FEM-симуляції на {num_cores} ядрах...")

```

## Продовження додатку Д

```

all_sensor_readings = []
start_time = time.time()
with mp.Pool(processes=num_cores) as pool:
    for i, reading in enumerate(pool.imap(fem_worker, params_list)):
        all_sensor_readings.append(reading)
        if (i + 1) % (10 * STEPS_PER_MIN) == 0:
            print(f"[{time.strftime('%H:%M:%S')}]] Готово {i +
1}/{TOTAL_STEPS} кроків")
        high_res_buffer = []
        history = {'time': [], 'true_d': [], 'pred_d': [], 'pred_k': [],
'pred_Pd': [], 'pred_R': [], 'kf_d': [], 'kf_k': []}
        csv_export_data = []
        kf_X_d = None
        kf_P_d = np.eye(2) * 10.0
        k_filtered = None
        kf_A = np.array([[1.0, 1.0], [0.0, 1.0]])
        kf_H = np.array([[1.0, 0.0]])
        kf_Q = np.array([[0.1, 0.0], [0.0, 0.01]])
        kf_R = 100.0
        for step in range(1, TOTAL_STEPS + 1):
            current_time_min = step * (DT_SEC / 60.0)
            current_true_d = params_list[step-1][0]
            sensor_reading = all_sensor_readings[step-1]
            high_res_buffer.append(sensor_reading)
            if len(high_res_buffer) > 8 * STEPS_PER_MIN:
                high_res_buffer.pop(0)
            if step % STEPS_PER_MIN == 0 and len(high_res_buffer) == 8 *
STEPS_PER_MIN:
                snapshots_8 = [np.mean(high_res_buffer[m * STEPS_PER_MIN : (m
+ 1) * STEPS_PER_MIN], axis=0) for m in range(8)]
                X1_scaled = (np.array([snapshots_8]) - X_mean) / X_std
                X2_scaled =
np.array([(calculate_high_res_ols(high_res_buffer) - Slopes_mean) /
Slopes_std])

```

## Продовження додатку Д

```

    pred = model.predict({'Input_Raw_Data': X1_scaled,
'Input_OLS_Slopes': X2_scaled}, verbose=0)
    pred_d = pred[0][0][0] * (Y_max[0] - Y_min[0]) + Y_min[0]
    pred_k = 10 ** (pred[1][0][0] * (Y_max[1] - Y_min[1]) +
Y_min[1])

    pred_Pd = pred[1][0][2] * (Y_max[3] - Y_min[3]) + Y_min[3]
    pred_R = pred[1][0][3] * (Y_max[4] - Y_min[4]) + Y_min[4]
    if kf_X_d is None:
        kf_X_d = np.array([[pred_d], [0.0]])
        k_filtered = pred_k if pred_k < 0.15 else 0.015
    else:
        X_pred = kf_A.dot(kf_X_d)
        P_pred = kf_A.dot(kf_P_d).dot(kf_A.T) + kf_Q
        K_gain =
P_pred.dot(kf_H.T).dot(np.linalg.inv(kf_H.dot(P_pred).dot(kf_H.T) +
kf_R))
        kf_X_d = X_pred + K_gain.dot(np.array([[pred_d]])) -
kf_H.dot(X_pred))
        kf_P_d = (np.eye(2) - K_gain.dot(kf_H)).dot(P_pred)
        if pred_k < 0.15: k_filtered = 0.95 * k_filtered + 0.05 *
pred_k

    current_kf_d = kf_X_d[0, 0]
    history['time'].append(current_time_min)
    history['true_d'].append(current_true_d)
    history['pred_d'].append(pred_d)
    history['pred_k'].append(pred_k)
    history['pred_Pd'].append(pred_Pd)
    history['pred_R'].append(pred_R)
    history['kf_d'].append(current_kf_d)
    history['kf_k'].append(k_filtered)
    ruler_measurement = current_true_d if int(current_time_min) %
10 == 0 else ""
    v_comp_re_mv = sensor_reading[0] * V_MAIN * 1000

```

## Продовження додатку Д

```

v_comp_im_mv = sensor_reading[1] * V_MAIN * 1000
csv_export_data.append([
    int(current_time_min), f"{current_true_d:.2f}",
    f"{ruler_measurement:.2f}" if ruler_measurement != ""
else "",
    f"{pred_d:.2f}", f"{pred_k:.5f}", f"{current_kf_d:.2f}",
f"{k_filtered:.5f}",
    f"{V_MAIN:.1f}", f"{v_comp_re_mv:.4f}",
f"{v_comp_im_mv:.4f}"
    ])
csv_filepath = os.path.join(current_dir, "simulation_results.csv")
with open(csv_filepath, mode='w', newline='', encoding='utf-8') as f:
    writer = csv.writer(f, delimiter=';')
    writer.writerow(["Час (хв)", "Справжня безперервна товщина (мм)",
"Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)",
    "Каскад 1 Прогноз товщини (мм)", "Каскад 1
Прогноз k (1/хв)",
    "Фільтр Калмана Товщина (мм)", "Фільтр Калмана k
(1/хв)",
    "Напруга збудження V_exc (В)", "Напруга
компенсації V_comp_Re (мВ)", "Напруга компенсації V_comp_Im (мВ)"])
    writer.writerows(csv_export_data)
print(f"\nРезультати збережено у файл: {csv_filepath}.")

```

**Навчання другої нейромережі за результатами експерименту**

```
import pandas as pd
import numpy as np
import tensorflow as tf
import os
import matplotlib.pyplot as plt

csv_file = "simulation_results.csv"
current_dir = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
file_path = os.path.join(current_dir, csv_file)

try:
    df = pd.read_csv(file_path, sep=';', decimal=',')
except Exception as e:
    print(f"Помилка читання файлу: {e}")
    exit()

df_calib = df.dropna(subset=[df.columns[2]])

print(f"Знайдено {len(df_calib)} точок для калібрування.")
X_raw = df_calib.iloc[:, [5, 6]].values
Y_raw = df_calib.iloc[:, [2]].values
Y_k_true = np.full((len(Y_raw), 1), 0.015)
Y_raw = np.hstack((Y_raw, Y_k_true))

X_mean, X_std = X_raw.mean(axis=0), X_raw.std(axis=0) + 1e-8
Y_mean, Y_std = Y_raw.mean(axis=0), Y_raw.std(axis=0) + 1e-8

X_scaled = (X_raw - X_mean) / X_std
Y_scaled = (Y_raw - Y_mean) / Y_std

model = tf.keras.Sequential([
    tf.keras.layers.Input(shape=(2,)),
```

## Продовження додатку Е

```

tf.keras.layers.Dense(16, activation='relu'),
tf.keras.layers.Dense(8, activation='relu'),
tf.keras.layers.Dense(2, activation='linear')
])

model.compile(optimizer=tf.keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.01),
loss='mse')

print("Початок донавчання Каскаду 2...")
history = model.fit(X_scaled, Y_scaled, epochs=1000, verbose=0,
batch_size=4)

model.save("cascade2_calibrator.keras")
np.save("C2_norm_params.npy", {"X_mean": X_mean, "X_std": X_std,
"Y_mean": Y_mean, "Y_std": Y_std})

print("Каскад 2 успішно навчено та збережено.")

Y_pred_scaled = model.predict(X_scaled)
Y_pred = Y_pred_scaled * Y_std + Y_mean

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.scatter(Y_raw[:, 0], X_raw[:, 0], color='blue', label='До
калібрування (Калман)')
plt.scatter(Y_raw[:, 0], Y_pred[:, 0], color='red', marker='x',
label='Після Каскаду 2')
plt.plot([0, 250], [0, 250], 'g--', label='Ідеальна лінія')
plt.xlabel("Замір лінійкою (мм)")
plt.ylabel("Показання приладу (мм)")
plt.legend()
plt.title("Ефективність Каскаду 2 (Калібрування)")
plt.show()

```

## ДОДАТОК Ж

Результат роботи комп'ютерної системи у режимі донавчання  
(simulation\_results.csv)

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
1.00		15.94	0.03	1.00	0.02	0.01
2.00		16.06	0.03	1.00	0.02	0.01
3.00		16.19	0.03	1.00	0.02	0.01
4.00		16.31	0.03	1.00	0.02	0.01
5.00		16.44	0.03	1.00	0.02	0.01
6.00		16.56	0.03	1.00	0.02	0.01
7.00		16.69	0.03	1.00	0.03	0.01
8.00		16.92	0.03	1.00	-0.01	0.00
9.00		16.86	0.03	1.00	0.02	0.01
10.00	3	17.03	0.03	1.00	0.07	0.00
11.00		17.16	0.03	1.00	0.04	0.01
12.00		17.19	0.03	1.00	0.07	0.00
13.00		17.58	0.03	1.00	-0.03	0.00
14.00		17.58	0.03	1.00	0.02	-0.01
15.00		17.65	0.03	1.00	0.06	0.03
16.00		17.82	0.03	1.00	0.02	0.00
17.00		18.10	0.03	1.00	0.04	0.01
18.00		18.35	0.03	1.00	0.04	0.00
19.00		18.68	0.03	1.00	0.06	0.00
20.00	6	18.84	0.03	1.00	0.02	-0.01
21.00		19.12	0.03	1.00	0.09	-0.01
22.00		19.40	0.03	1.00	0.06	0.02
23.00		19.78	0.03	1.00	0.08	0.01
24.00		19.76	0.03	1.00	0.05	0.03
25.00		20.04	0.03	1.00	0.08	0.04
26.00		20.12	0.03	1.00	0.10	-0.03
27.00		20.33	0.03	1.00	0.05	0.01
28.00		20.48	0.03	1.00	0.05	0.04
29.00		20.79	0.03	1.00	0.08	0.00
30.00	8	21.03	0.03	1.00	0.07	-0.01
31.00		21.20	0.03	1.00	0.06	0.03
32.00		21.45	0.03	1.00	0.12	0.00
33.00		21.80	0.03	1.00	0.06	-0.04
34.00		21.88	0.03	1.00	0.09	-0.01
35.00		22.03	0.03	1.00	0.05	0.01
36.00		22.39	0.03	1.00	0.12	-0.01
37.00		22.67	0.03	1.00	0.08	0.02
38.00		22.89	0.03	1.00	0.09	0.02

## Продовження додатку Ж

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
39.00		23.35	0.03	1.00	0.10	0.03
40.00	10	23.74	0.03	1.00	0.10	0.00
41.00		23.98	0.03	1.00	0.09	-0.04
42.00		24.55	0.03	1.00	0.09	-0.03
43.00		24.76	0.03	1.00	0.09	-0.01
44.00		24.91	0.03	1.00	0.09	0.04
45.00		25.37	0.03	1.00	0.10	0.03
46.00		25.47	0.03	1.00	0.08	0.04
47.00		25.81	0.03	1.00	0.11	-0.01
48.00		26.13	0.03	1.00	0.07	-0.03
49.00		26.78	0.03	1.00	0.10	-0.01
50.00	12	26.95	0.03	1.00	0.09	0.01
51.00		27.51	0.03	1.00	0.07	0.01
52.00		27.97	0.03	1.00	0.10	0.03
53.00		28.31	0.03	1.00	0.10	-0.03
54.00		28.71	0.03	1.00	0.11	-0.01
55.00		29.28	0.03	1.00	0.10	0.06
56.00		29.77	0.03	1.00	0.15	0.02
57.00		30.08	0.03	1.00	0.13	0.04
58.00		30.29	0.03	1.00	0.12	0.01
59.00		30.99	0.03	1.00	0.15	-0.04
60.00	13	31.12	0.03	1.00	0.09	0.01
61.00		31.75	0.03	1.00	0.09	0.04
62.00		31.80	0.03	1.00	0.10	0.03
63.00		32.27	0.03	1.00	0.13	0.00
64.00		32.78	0.03	1.00	0.11	-0.01
65.00		32.89	0.03	1.00	0.13	0.02
66.00		33.62	0.03	1.00	0.17	0.01
67.00		33.99	0.03	1.00	0.08	0.02
68.00		34.42	0.03	1.00	0.15	-0.04
69.00		34.30	0.03	1.00	0.11	0.02
70.00	14	35.26	0.03	1.00	0.12	0.01
71.00		35.30	0.03	1.00	0.11	0.00
72.00		35.61	0.03	1.00	0.13	0.02
73.00		36.19	0.03	1.00	0.13	0.02
74.00		36.29	0.03	1.00	0.09	0.01
75.00		36.80	0.03	1.00	0.12	0.03
76.00		37.08	0.03	1.00	0.11	0.05
77.00		37.73	0.03	1.00	0.12	0.03
78.00		37.81	0.03	1.00	0.13	0.03
79.00		38.56	0.03	1.00	0.12	0.01

## Продовження додатку Ж

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
80.00	15	38.86	0.03	1.00	0.15	-0.05
81.00		39.70	0.03	1.00	0.11	-0.02
82.00		40.09	0.03	1.00	0.15	0.00
83.00		40.29	0.03	1.00	0.11	0.02
84.00		41.18	0.03	1.00	0.12	-0.01
85.00		40.99	0.03	1.00	0.20	0.02
86.00		41.83	0.03	1.00	0.15	0.03
87.00		41.77	0.03	1.00	0.15	0.04
88.00		42.60	0.03	1.00	0.11	0.06
89.00		42.57	0.03	1.00	0.17	0.00
90.00	16	43.19	0.03	1.00	0.17	0.04
91.00		43.56	0.03	1.00	0.15	-0.01
92.00		44.08	0.03	1.00	0.17	-0.02
93.00		44.56	0.03	1.00	0.15	0.01
94.00		44.82	0.03	1.00	0.16	0.06
95.00		45.11	0.03	1.00	0.17	0.01
96.00		45.43	0.03	1.00	0.14	0.01
97.00		45.62	0.03	1.00	0.10	0.03
98.00		46.35	0.03	1.00	0.20	0.02
99.00		46.46	0.03	1.00	0.16	0.03
100.00	17	46.59	0.03	1.00	0.16	0.02
101.00		46.94	0.03	1.00	0.18	0.04
102.00		47.30	0.03	1.00	0.18	0.06
103.00		47.95	0.03	1.00	0.16	0.03
104.00		48.20	0.03	1.00	0.17	0.03
105.00		48.52	0.03	1.00	0.16	-0.02
106.00		49.00	0.03	1.00	0.11	0.02
107.00		49.04	0.03	1.00	0.17	0.05
108.00		49.49	0.03	1.00	0.14	0.02
109.00		49.64	0.03	1.00	0.16	0.00
110.00	18	50.09	0.03	1.00	0.19	0.00
111.00		50.39	0.03	1.00	0.15	0.01
112.00		50.25	0.03	1.00	0.12	0.02
113.00		51.02	0.03	1.00	0.13	0.02
114.00		51.30	0.03	1.00	0.14	-0.01
115.00		51.68	0.03	1.00	0.22	0.02
116.00		52.06	0.03	1.00	0.19	0.03
117.00		52.10	0.03	1.00	0.13	0.02
118.00		52.41	0.03	1.00	0.16	0.06
119.00		52.83	0.03	1.00	0.12	0.08
120.00	18	53.00	0.03	1.00	0.19	0.04

## Продовження додатку Ж

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
121.00		53.23	0.04	1.00	0.17	0.05
122.00		53.70	0.04	1.00	0.15	0.00
123.00		53.57	0.04	1.00	0.16	0.00
124.00		54.09	0.04	1.00	0.16	0.04
125.00		54.10	0.04	1.00	0.17	0.00
126.00		54.61	0.04	1.00	0.19	0.01
127.00		54.64	0.04	1.00	0.18	-0.02
128.00		55.13	0.04	1.00	0.17	-0.01
129.00		54.94	0.04	1.00	0.18	0.04
130.00	19	55.33	0.04	1.00	0.20	0.02
131.00		55.59	0.04	1.00	0.19	0.05
132.00		55.86	0.04	1.00	0.14	0.04
133.00		55.92	0.04	1.00	0.19	0.00
134.00		56.57	0.04	1.00	0.20	0.01
135.00		56.63	0.04	1.00	0.16	0.01
136.00		56.76	0.04	1.00	0.16	0.03
137.00		57.05	0.04	1.00	0.19	0.04
138.00		57.28	0.04	1.00	0.18	0.01
139.00		57.68	0.04	1.00	0.17	0.02
140.00	19	57.51	0.04	1.00	0.21	0.00
141.00		57.86	0.04	1.00	0.14	0.05
142.00		58.14	0.04	1.00	0.16	0.02
143.00		58.44	0.04	1.00	0.19	0.01
144.00		58.62	0.04	1.00	0.16	0.02
145.00		58.54	0.04	1.00	0.17	0.03
146.00		58.69	0.04	1.00	0.22	0.00
147.00		58.83	0.04	1.00	0.17	0.02
148.00		58.98	0.04	1.00	0.17	0.02
149.00		59.39	0.04	1.00	0.19	0.08
150.00	20	59.46	0.04	1.00	0.16	0.00
151.00		59.45	0.04	1.00	0.18	0.00
152.00		59.56	0.04	1.00	0.18	0.00
153.00		59.62	0.04	1.00	0.20	-0.01
154.00		60.29	0.04	1.00	0.19	0.01
155.00		60.28	0.04	1.00	0.18	0.02
156.00		60.30	0.04	1.00	0.21	0.02
157.00		60.49	0.04	1.00	0.22	0.05
158.00		60.49	0.04	1.00	0.19	0.00
159.00		61.20	0.04	1.00	0.20	0.04
160.00	20	60.83	0.04	1.00	0.18	0.02
161.00		61.35	0.04	1.00	0.16	0.02

## Продовження додатку Ж

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
162.00		61.05	0.04	1.00	0.24	0.00
163.00		61.37	0.04	1.00	0.21	-0.01
164.00		61.57	0.04	1.00	0.18	0.04
165.00		61.56	0.04	1.00	0.21	0.02
166.00		61.71	0.04	1.00	0.21	0.07
167.00		61.17	0.04	1.00	0.17	0.05
168.00		61.40	0.04	1.00	0.19	-0.01
169.00		61.32	0.04	1.00	0.17	-0.02
170.00	20	61.43	0.04	1.00	0.20	0.05
171.00		61.88	0.04	1.00	0.12	0.04
172.00		61.46	0.04	1.00	0.19	0.01
173.00		61.70	0.04	1.00	0.27	0.01
174.00		61.33	0.04	1.00	0.17	0.00
175.00		61.39	0.04	1.00	0.18	0.09
176.00		61.46	0.04	1.00	0.24	0.02
177.00		61.47	0.04	1.00	0.18	-0.01
178.00		61.71	0.04	1.00	0.21	0.03
179.00		61.59	0.04	1.00	0.21	0.06
180.00	21	61.60	0.04	1.00	0.18	0.05
181.00		61.55	0.04	1.00	0.17	0.02
182.00		61.33	0.04	1.00	0.19	0.01
183.00		61.45	0.04	1.00	0.20	0.04
184.00		61.74	0.04	1.00	0.19	0.03
185.00		61.27	0.04	1.00	0.21	0.04
186.00		61.45	0.04	1.00	0.20	0.02
187.00		61.22	0.04	1.00	0.23	0.04
188.00		61.64	0.04	1.00	0.24	0.00
189.00		61.61	0.04	1.00	0.20	0.03
190.00	21	61.69	0.04	1.00	0.23	0.03
191.00		61.24	0.04	1.00	0.24	0.03
192.00		61.80	0.04	1.00	0.18	0.01
193.00		61.50	0.04	1.00	0.16	-0.02
194.00		61.45	0.04	1.00	0.18	0.04
195.00		61.39	0.04	1.00	0.23	0.00
196.00		61.30	0.04	1.00	0.16	-0.01
197.00		61.86	0.04	1.00	0.18	0.04
198.00		61.64	0.04	1.00	0.17	0.04
199.00		61.72	0.04	1.00	0.18	0.02
200.00	21	61.82	0.04	1.00	0.22	-0.01
201.00		61.59	0.04	1.00	0.18	0.02
202.00		61.69	0.04	1.00	0.16	0.04

## Продовження додатку Ж

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
203.00		61.81	0.04	1.00	0.19	0.04
204.00		61.52	0.04	1.00	0.21	0.06
205.00		61.43	0.04	1.00	0.20	0.02
206.00		61.54	0.04	1.00	0.23	0.01
207.00		61.78	0.04	1.00	0.20	0.04
208.00		61.72	0.04	1.00	0.25	0.02
209.00		61.74	0.04	1.00	0.20	0.07
210.00	21	61.42	0.04	1.00	0.21	0.02
211.00		61.66	0.04	1.00	0.18	-0.01
212.00		61.55	0.04	1.00	0.19	0.03
213.00		61.60	0.04	1.00	0.22	0.04
214.00		61.46	0.04	1.00	0.21	0.02
215.00		61.23	0.04	1.00	0.21	0.02
216.00		61.40	0.04	1.00	0.22	0.00
217.00		61.75	0.04	1.00	0.21	0.02
218.00		61.57	0.04	1.00	0.22	0.06
219.00		61.61	0.04	1.00	0.21	0.01
220.00	21	61.59	0.04	1.00	0.17	0.01
221.00		61.24	0.04	1.00	0.22	-0.03
222.00		61.65	0.04	1.00	0.21	0.01
223.00		61.36	0.04	1.00	0.19	0.01
224.00		61.65	0.04	1.00	0.15	0.02
225.00		61.57	0.04	1.00	0.20	0.01
226.00		61.32	0.04	1.00	0.23	0.02
227.00		61.39	0.04	1.00	0.22	-0.02
228.00		61.57	0.04	1.00	0.19	-0.01
229.00		61.59	0.04	1.00	0.22	0.04
230.00	21	61.81	0.04	1.00	0.18	0.00
231.00		61.34	0.04	1.00	0.24	0.00
232.00		61.50	0.04	1.00	0.23	0.08
233.00		61.44	0.04	1.00	0.24	-0.01
234.00		61.48	0.04	1.00	0.21	0.02
235.00		61.47	0.04	1.00	0.21	0.01
236.00		61.45	0.04	1.00	0.21	0.03
237.00		61.45	0.04	1.00	0.23	0.03
238.00		61.13	0.04	1.00	0.20	0.03
239.00		61.70	0.04	1.00	0.23	0.02
240.00	21	61.50	0.04	1.00	0.17	0.01
241.00		61.52	0.04	1.00	0.22	0.01
242.00		61.46	0.04	1.00	0.24	0.01
243.00		61.53	0.04	1.00	0.18	0.04

## Продовження додатку Ж

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
244.00		61.72	0.04	1.00	0.16	0.07
245.00		61.15	0.04	1.00	0.20	0.04
246.00		61.61	0.04	1.00	0.22	0.03
247.00		61.39	0.04	1.00	0.19	0.04
248.00		61.78	0.04	1.00	0.19	-0.03
249.00		61.22	0.04	1.00	0.21	0.03
250.00	21	61.29	0.04	1.00	0.23	0.02
251.00		61.11	0.04	1.00	0.19	0.04
252.00		61.13	0.04	1.00	0.24	-0.03
253.00		61.34	0.04	1.00	0.22	0.05
254.00		61.35	0.04	1.00	0.18	0.03
255.00		61.66	0.04	1.00	0.22	-0.01
256.00		61.33	0.04	1.00	0.25	0.01
257.00		61.51	0.04	1.00	0.21	0.01
258.00		61.37	0.04	1.00	0.19	0.03
259.00		61.70	0.04	1.00	0.21	0.05
260.00	22	61.37	0.04	1.00	0.20	0.07
261.00		61.70	0.04	1.00	0.19	0.00
262.00		61.28	0.04	1.00	0.20	0.04
263.00		61.87	0.04	1.00	0.20	0.08
264.00		61.36	0.04	1.00	0.23	-0.01
265.00		61.40	0.04	1.00	0.23	0.02
266.00		61.18	0.04	1.00	0.23	0.03
267.00		61.36	0.04	1.00	0.24	0.02
268.00		61.23	0.04	1.00	0.19	0.00
269.00		61.31	0.04	1.00	0.20	0.05
270.00	22	61.43	0.04	1.00	0.21	-0.01
271.00		61.12	0.04	1.00	0.22	0.01
272.00		61.21	0.04	1.00	0.22	0.00
273.00		61.39	0.04	1.00	0.18	0.04
274.00		61.39	0.04	1.00	0.21	0.05
275.00		61.55	0.04	1.00	0.21	0.04
276.00		61.16	0.04	1.00	0.18	0.09
277.00		61.29	0.04	1.00	0.24	0.06
278.00		61.23	0.04	1.00	0.24	0.00
279.00		61.94	0.04	1.00	0.26	0.00
280.00	22	61.28	0.04	1.00	0.17	0.04
281.00		61.74	0.04	1.00	0.21	0.04
282.00		61.48	0.04	1.00	0.21	0.01
283.00		61.35	0.04	1.00	0.22	0.03
284.00		61.52	0.04	1.00	0.21	0.03

## Продовження додатку Ж

Час (хв)	Замір лінійкою кожні 10 хв (мм)	Каскад 1 Прогноз товщини (мм)	Каскад 1 Прогноз k (1/хв)	Напруга збудження $V_{exc}$ (В)	Напруга компенсації $V_{compRe}$ (мВ)	Напруга компенсації $V_{compIm}$ (мВ)
285.00		61.31	0.04	1.00	0.18	0.02
286.00		61.38	0.04	1.00	0.19	0.01
287.00		61.17	0.04	1.00	0.24	0.02
288.00		61.42	0.04	1.00	0.23	0.02
289.00		61.24	0.04	1.00	0.17	0.02
290.00	22	61.71	0.04	1.00	0.22	0.02
291.00		61.35	0.04	1.00	0.17	0.02
292.00		61.45	0.04	1.00	0.24	0.00
293.00		61.33	0.04	1.00	0.25	-0.02
294.00		61.39	0.04	1.00	0.22	0.03
295.00		61.27	0.04	1.00	0.19	0.03
296.00		61.56	0.04	1.00	0.20	0.02
297.00		61.23	0.04	1.00	0.23	0.01
298.00		61.53	0.04	1.00	0.20	-0.01
299.00		61.49	0.04	1.00	0.21	0.07
300.00	22	61.47	0.04	1.00	0.21	0.01

**Програма для побудови спектру кореляцій**

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import pearsonr

N_MC      = 2000
N_SENS_IND = 1000
N_FREQ    = 60
F_MIN     = 10.0
F_MAX     = 1e5
SEED      = 42

rng = np.random.default_rng(SEED)

PARAM_BOUNDS = {
    "Gv": (1e-5, 1e-1),
    "Cv": (1e-11, 1e-7),
    "Gh": (1e-5, 1e-1),
    "Ch": (1e-11, 1e-7),
    "Rgnd": (500, 5000),
}

PARAM_NAMES = list(PARAM_BOUNDS.keys())
PARAM_LABELS = {
    "Gv": r"$G_v$",
    "Cv": r"$C_v$",
    "Gh": r"$G_h$",
    "Ch": r"$C_h$",
    "Rgnd": r"$R_{gnd}$",
}

LINE_STYLES = {
    "Gv": "solid",
    "Cv": "dashed",
    "Gh": "dashdot",
```

## Продовження додатку И

```

    "Ch": (0, (3, 1, 1, 1, 1, 1)),
    "Rgnd": "dotted",
}
freqs = np.logspace(np.log10(F_MIN), np.log10(F_MAX), N_FREQ)
def yv_func(Gv, Cv, Rgnd, omega):
    yrc = Gv + 1j * omega * Cv
    return yrc / (1.0 + Rgnd * yrc)
def yh_func(Gh, Ch, omega):
    return Gh + 1j * omega * Ch
def compute_impedance(Gv, Cv, Gh, Ch, Rgnd, omega):
    yv = yv_func(Gv, Cv, Rgnd, omega)
    yh = yh_func(Gh, Ch, omega)
    Y = np.array([
        [ yh + yv,   -yh,         0,         0   ],
        [-yh,       2*yh + yv,   -yh,         0   ],
        [ 0,        -yh,       2*yh + yv,   -yh   ],
        [ 0,         0,        -yh,       yh + yv  ],
    ], dtype=complex)
    I = np.array([1.0 + 0j, 0.0 + 0j, 0.0 + 0j, -1.0 + 0j])
    V = np.linalg.solve(Y, I)
    Z = np.abs(V[1] - V[2])
    return Z

def lhs_sample(n, bounds_dict, rng):
    k = len(bounds_dict)
    samples = np.zeros((n, k))
    for j, (lo, hi) in enumerate(bounds_dict.values()):
        lo_l, hi_l = np.log10(lo), np.log10(hi)
        cuts = np.linspace(0, 1, n + 1)
        u = rng.uniform(cuts[:-1], cuts[1:])
        idx = rng.permutation(n)
        samples[:, j] = 10 ** (lo_l + u[idx] * (hi_l - lo_l))
    return samples

```

## Продовження додатку И

```

print("Обчислення спектру кореляцій...")
X_mc = lhs_sample(N_MC, PARAM_BOUNDS, rng) # (N_MC, 5)
corr_spectra = {name: np.zeros(N_FREQ) for name in PARAM_NAMES}
for fi, freq in enumerate(freqs):
    omega = 2 * np.pi * freq
    Z_vals = np.array([
        compute_impedance(X_mc[i, 0], X_mc[i, 1],
                          X_mc[i, 2], X_mc[i, 3], X_mc[i, 4], omega)
        for i in range(N_MC)
    ])
    logZ = np.log10(Z_vals + 1e-30)
    for j, name in enumerate(PARAM_NAMES):
        x_col = X_mc[:, j]
        if name in ("Gv", "Cv", "Gh", "Ch", "Rgnd"):
            x_col = np.log10(x_col + 1e-30)
        r, _ = pearsonr(x_col, logZ)
        corr_spectra[name][fi] = r

print("Обчислення індексів чутливості...")

A = lhs_sample(N_SENS_IND, PARAM_BOUNDS, rng)
B = lhs_sample(N_SENS_IND, PARAM_BOUNDS, rng)
sens_ind_S1 = {name: np.zeros(N_FREQ) for name in PARAM_NAMES}
sens_ind_ST = {name: np.zeros(N_FREQ) for name in PARAM_NAMES}
for fi, freq in enumerate(freqs):
    omega = 2 * np.pi * freq

    def _eval(mat):
        return np.array([
            compute_impedance(mat[i,0], mat[i,1], mat[i,2],
                              mat[i,3], mat[i,4], omega)
            for i in range(N_SENS_IND)
        ])

```

## Продовження додатку И

```

fA = _eval(A)
fB = _eval(B)
Var_total = np.var(np.concatenate([fA, fB]))
if Var_total < 1e-30:
    continue

for j, name in enumerate(PARAM_NAMES):
    AB_i = A.copy()
    AB_i[:, j] = B[:, j]
    fAB_i = _eval(AB_i)

    V_i = np.mean(fB * (fAB_i - fA))
    VT_i = 0.5 * np.mean((fA - fAB_i) ** 2)

    sens_ind_S1[name][fi] = max(V_i / Var_total, 0.0)
    sens_ind_ST[name][fi] = max(VT_i / Var_total, 0.0)

fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(8, 5))
ax1.set_title("Коефіцієнти кореляції Пірсона")
for name in PARAM_NAMES:
    ax1.plot(freqs, corr_spectra[name],
            label=PARAM_LABELS[name],
            color="black",
            linestyle=LINE_STYLES[name],
            linewidth=1.5)
ax1.axhline(0, color="gray", linewidth=0.6, linestyle="--")
ax1.set_xscale("log")
ax1.set_xlabel("Частота, Гц")
ax1.set_ylabel(r"$r_{Z,x_i}(\omega)$")
ax1.set_ylim(-1.05, 1.05)
ax1.legend(fontsize=10)
ax1.grid(True, which="both", alpha=0.3)
fig1.tight_layout()

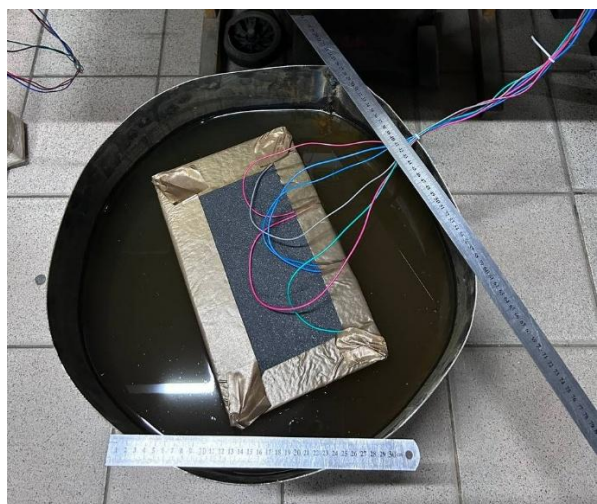
```

**Продовження додатку И**

```
fig1.savefig("spectral_correlation.png", dpi=150, bbox_inches="tight")
print("Збережено: spectral_correlation.png")
```

```
fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(8, 5))
ax2.set_title(r"Повні індекси чутливості  $S_i^T(\omega)$ ")
for name in PARAM_NAMES:
    ax2.plot(freqs, sens_ind_ST[name],
             label=PARAM_LABELS[name],
             color="black",
             linestyle=LINE_STYLES[name],
             linewidth=1.5)
ax2.set_xscale("log")
ax2.set_xlabel("Частота, Гц")
ax2.set_ylabel(r" $S_i^T(\omega)$ ")
ax2.set_ylim(-0.05, 1.05)
ax2.legend(fontsize=10)
ax2.grid(True, which="both", alpha=0.3)
fig2.tight_layout()
fig2.savefig("spectral_sensitivity_indices.png", dpi=150,
            bbox_inches="tight")
print("Збережено: spectral_sensitivity_indices.png")
plt.show()
```

## Ілюстративні матеріали дослідної установки



**Список публікацій здобувача**

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

1. Merenko V. Modeling and algorithmic support of a computer system for estimating the thickness of oil films. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2026. Volume 87, no.1. P.86-94. doi: [10.23939/istcmtm2026.01.086](https://doi.org/10.23939/istcmtm2026.01.086) (Фахове наукове видання України категорії Б).

2. Кропивницька В.Б., Меренько Б.І. Модель кіберфізичної системи моніторингу та керування рівнем рідин у високих резервуарах. *Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія»*. 2025. 4(192), с. 22–28. doi: [10.33042/3083-6727-2025-4-192-22-28](https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-22-28). (Фахове наукове видання України категорії Б).

3. Корнута В.А., Меренько Б.І. Комплексний підхід до моделювання та планування інтелектуальних автоматизованих систем на основі SAT-планування. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75) № 5. Частина 2. с.133-141. doi: [10.32782/2663-5941/2025.5.2/19](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/19) (Фахове наукове видання України категорії Б).

4. Корнута В.А., Меренько Б.І., Катамай Ю.В., Дмитрів І.Я., Іванців Н.Т., Дячук А.В. Методи убезпечення від помилок інтелектуальних автоматизованих систем нафтогазової галузі. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки* Том 36 (75). № 1. 2025. Частина 2. С.117-123. doi: [10.32782/2663-5941/2025.1.2/18](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/18) (Фахове наукове видання України категорії Б).

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

5. Меренько Б.І. Інтелектуальний предиктивний аналіз процесу розшарування водонафтових емульсій. *Global Trends in Science, Technology and Economy: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 5th International*

Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. Graz, Austria. March 25-27, 2026. P.67-70. doi: [10.70286/isu-25.03.2026.006](https://doi.org/10.70286/isu-25.03.2026.006).

6. Меренько Б.І. Аналіз можливостей вивчення багатопарового середовища методами багаточастотного імпедансного зондування. XXVI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «*Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій*» Одеса, 16-17 квітня 2026 р. - Одеса, Видавництво ОНТУ, 2026 р. С. 52-53. URL: [https://ontu.edu.ua/download/konfi/2026/Conference\\_abstract-IT-2026.pdf](https://ontu.edu.ua/download/konfi/2026/Conference_abstract-IT-2026.pdf).

7. Merenko B. Hardware-software implementation of a computerized system for predictive identification of multilayer medium parameters. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference «Global Directions in Scientific Research and Technological Development» April 6-8, 2026, Valencia, Spain 2026. 74-77 p. URL: [https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2026/04/Valencia\\_Spain\\_06.04.26.pdf](https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2026/04/Valencia_Spain_06.04.26.pdf) DOI: 10.70286/EOSS-06.04.2026.006.74-77.

8. Меренько Б. І., Кропивницька В. Б. Архітектура та функціональні можливості кіберфізичної системи для моніторингу та керування рівнем рідин. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «*Scientific Research: Emerging Theories and Practical Breakthroughs*», November 17-19, 2025. Edinburgh, Scotland. С. 122-123. URL: [https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2025/11/Edinburgh\\_Scotland\\_17.11.25.pdf](https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2025/11/Edinburgh_Scotland_17.11.25.pdf).

9. Меренько Б. І., Кропивницька В. Б. Аналіз сучасних підходів до моніторингу рідин та обґрунтування необхідності кіберфізичних систем. Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 9 жовтня, 2025 р. Івано-Франківськ, 2025. С. 197-198. URL: <https://drive.google.com/file/d/1sim7SKa62RzaS5XZrTGt248h5VAff1WQ/view>.