

Черкаський державний технологічний університет

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

Бут Вячеслав Олександрович

УДК [681.518.3:681.5.033]:622.276](043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ
ПАРАМЕТРІВ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО
ІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ НА ПРИВИБІЙНУ ЗОНУ НАФТОВИХ
СВЕРДЛОВИН

152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ (В. О. Бут)

Науковий керівник:

Туз Вячеслав Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Бут В.О. Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на приви́бійну зону нафтових свердловин – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (15 – Автоматизація та приладобудування) – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі – підвищенню достовірності контролю параметрів та точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на приви́бійну зону нафтових свердловин на основі створення інформаційно-вимірювальної системи нового покоління.

У роботі обґрунтовано та реалізовано інформаційно-вимірювальну систему, яка забезпечує комплексний контроль параметрів імпульсного впливу, реєстрацію реакції пласта та автоматизоване оцінювання його ефективності в режимі, наближеному до реального часу. Запропоновано методичне, математичне, інструментальне та інформаційне забезпечення системи, що дозволяє інтегрувати процеси вимірювання, оброблення сигналів і прийняття діагностичних рішень. Встановлено, що застосування розробленої системи забезпечує підвищення точності оцінювання ефективності впливу, зменшення залежності від експертних оцінок та підвищення відтворюваності результатів контролю.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності видобутку вуглеводнів в умовах виснажених родовищ, складних гірничо-геологічних умов та постійного зростання вимог до енергоефективності й технологічної надійності процесів, що потребує впровадження сучасних інформаційно-вимірювальних систем для оперативного контролю та адаптивного керування технологічними процесами.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційного дослідження, його актуальність, відповідність науковим темам; визначено наукову новизну та практичне значення результатів дисертації, а також предмет та об'єкт дослідження, сформульовано мету та задачі наукового дослідження.

У *першому розділі* виконано аналіз сучасного стану проблеми зниження продуктивності нафтових свердловин та методів впливу на привибійну зону пласта. Розглянуто основні причини погіршення фільтраційно-ємнісних властивостей привибійної зони, зокрема кольтатацію порового середовища, вплив технологічних рідин, зміну фазової проникності та зростання скінофактора. Проведено порівняльний аналіз наявних методів інтенсифікації припливу вуглеводнів, включаючи хімічні, гідродинамічні, гідророзривні та імпульсно-хвильові технології. Обґрунтовано необхідність створення інформаційно-вимірювальних систем, що поєднують функції контролю, аналізу та оцінювання ефективності впливу.

У розділі також обрано напрям дисертаційного дослідження та сформовано основні задачі наукової роботи.

У *другому розділі* удосконалено математичну модель електричного імпедансу багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, яка враховує вплив параметрів імпульсного навантаження, динаміки тиску, коливальних процесів, характеристик привибійної зони та дестабілізуючих чинників. Запропонована модель забезпечує підвищення адекватності опису процесів вимірювального перетворення та точності визначення інформативних параметрів реакції пласта, зокрема резонансних характеристик і енергетичних показників сигналу.

У *третьому розділі* розроблено метод і алгоритми автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на основі оброблення сигналів багатопараметричного п'єзоелектричного датчика. Реалізовано підхід до виділення часових, енергетичних і спектральних ознак динамічної реакції пласта, що дозволяє перейти від якісної експертної оцінки до кількісно обґрунтованого інтегрального показника ефективності. Обґрунтовано структуру та функціональну модель інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує

інтеграцію підсистем вимірювання, оброблення сигналів, аналізу та керування.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень і випробувань розробленої інформаційно-вимірювальної системи. Встановлено, що система забезпечує високу точність і відтворюваність вимірювань, дозволяє оцінювати ефективність адаптивного імпульсного впливу з високою достовірністю, а також визначати раціональні режими впливу для підвищення продуктивності свердловин. Показано можливість практичного впровадження розроблених методів і засобів у системи моніторингу та керування процесами нафтовидобутку.

Отримані результати можуть бути впроваджені у виробничу практику підприємств нафтогазовидобувної галузі, а також використані у навчальному процесі при підготовці фахівців за спеціальностями у галузі автоматизації, інформаційно-вимірювальних технологій та енергетики.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розв’язано науково-прикладну задачу контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин шляхом розроблення методичного, математичного, інструментального та інформаційного забезпечення, на основі якого створено інформаційно-вимірювальну систему, що забезпечує достовірні та відтворювані вимірювання параметрів процесу, інтерпретацію реакції пласта та підвищення точності діагностування стану привибійної зони;
- удосконалено математичну модель електричного імпедансу багатопараметричного п’єзоелектричного датчика, яка, на відміну від відомих, враховує вплив параметрів адаптивної імпульсної дії, характеристик привибійної зони, динаміки тиску, імпульсних навантажень, коливальних процесів і дестабілізуючих чинників контрольованого середовища, що дозволило підвищити адекватність опису процесів вимірювального перетворення та точність виділення інформативних ознак реакції пласта;
- вперше запропоновано підхід до автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин,

який ґрунтується на обробленні та інтерпретації вимірювальних сигналів багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з урахуванням сукупності інформативних параметрів динамічної реакції пласта, що дозволило підвищити достовірність оцінювання оперативної ефективності імпульсного впливу та покращити обґрунтованість прогнозу його результативності, зменшити залежність від експертної суб'єктивності та покращити обґрунтованість діагностичних рішень;

- дістали подальшого розвитку методи оцінювання стану привибійної зони нафтових свердловин завдяки використанню даних багатопараметричного п'єзоелектричного датчика та встановлення взаємозв'язку між параметрами динамічної реакції пласта і результативністю відновлення продуктивності свердловини, що дозволило підвищити інформативність контролю, обґрунтованість вибору режимів адаптивного імпульсного впливу та якість інтерпретації його ефективності.

Практичне значення одержаних результатів. У дисертаційному дослідженні розв'язано важливе науково-практичне питання підвищення достовірності контролю параметрів та точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин шляхом розроблення нового методичного, математичного, інструментального та інформаційного забезпечення, на основі якого створено інформаційно-вимірювальну систему, що забезпечує відтворювані вимірювання параметрів процесу, інтерпретацію реакції пласта та підвищення точності діагностування стану привибійної зони.

Практична цінність одержаних результатів полягає у такому:

- розроблено методичне та алгоритмічне забезпечення автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин, що дає змогу підвищити достовірність інтерпретації результатів впливу, зменшити залежність від експертної суб'єктивності та покращити обґрунтованість прийняття рішень щодо режимів відновлення продуктивності свердловин;

- створено математичну модель та розроблено програмне забезпечення на її основі для визначення електричного імпедансу багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, що дозволяє з достатньою адекватністю описувати процеси вимірювального перетворення параметрів адаптивного імпульсного впливу з урахуванням динаміки тиску, імпульсних навантажень, коливальних процесів, характеристик привибійної зони та впливу дестабілізуючих чинників контрольованого середовища;
- розроблено багатопараметричний п'єзоелектричний датчик для реєстрації інформативних параметрів стану привибійної зони нафтових свердловин, використання якого забезпечує розширення складу контрольованих параметрів, підвищення інформативності вимірювань та покращення відтворюваності результатів контролю;
- розроблено інформаційно-вимірювальну систему контролю параметрів і оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу, що поєднує підсистеми вимірювання, оброблення сигналів, аналізу інформативних ознак та формування діагностичних рішень, і яка дозволяє здійснювати комплексний автоматизований контроль параметрів процесу та оперативне оцінювання реакції пласта;
- запропоновані метод, алгоритми та інформаційно-вимірювальна система можуть бути використані під час дослідно-промислових робіт, налагодження та супроводу технологій імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин, а також у системах моніторингу та підтримки прийняття рішень на підприємствах нафтогазовидобувної галузі;
- результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі, методичне забезпечення, алгоритми оброблення та інтерпретації сигналів, а також побудована на їх основі інформаційно-вимірювальна система можуть бути впроваджені у практику на підприємствах нафтогазовидобувної галузі, в науково-дослідних установах і сервісних компаніях, що займаються моніторингом, діагностуванням та інтенсифікацією роботи нафтових свердловин;

– основні положення дисертаційної роботи використані у навчальних курсах кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету у межах дисциплін "Фізичні процеси у приладах та системах", "Проектування інформаційно-вимірювальних систем", "Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення параметрів об'єктів".

Ключові слова: привибійна зона нафтової свердловини, імплзійний ефект, хвильова дія на пласт, адаптивний імпульсний вплив, дискретно-неперервна модель, математична модель, крайова задача, п'єзоелектричний датчик, інформаційно-вимірювальна система, оброблення сигналів, резонанс, продуктивність, оцінювання ефективності, експериментальна верифікація ефективності, ймовірісно-статистичні характеристики, інтенсифікація нафтовидобутку, підвищення дебіту свердловини.

ABSTRACT

But V.O. Information and Measurement System for Parameter Control and Evaluation of the Efficiency of Adaptive Impulse Impact on the Bottomhole Zone of Oil Wells – Qualification Scientific Work as a Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 152 – Metrology and Information and Measuring Equipment (15 – Automation and Instrumentation) – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and applied problem - increasing the reliability of parameter control and accuracy of assessing the effectiveness of adaptive impulse impact on the bottomhole zone of oil wells based on the creation of a new generation information and measurement system.

The paper substantiates and implements an information and measurement system that provides comprehensive control of pulse impact parameters, registration of the reservoir reaction and automated assessment of its efficiency in a mode close to real time. Methodological, mathematical, instrumental and informational support of the system is proposed, which allows integrating the processes of measurement, signal processing and diagnostic decision-making. It is established that the application of the developed system provides an increase in the accuracy of assessing the effectiveness of impact, reducing dependence on expert assessments and increasing the reproducibility of control results.

The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of hydrocarbon production in the conditions of depleted deposits, complex mining and geological conditions and growing requirements for energy efficiency and technological reliability of processes, which requires the introduction of modern information and measurement systems for operational control and adaptive control of technological processes.

The introduction provides the general characteristics of the dissertation research, its relevance, compliance with scientific topics; the scientific novelty and practical

significance of the results of the dissertation, as well as the subject and object of research, are determined, the purpose and objectives of scientific research are formulated.

In the first section, the analysis of the current state of the problem of reducing the productivity of oil wells and methods of influencing the bottomhole zone of the reservoir is performed. The main reasons for the deterioration of the filtration-capacitive properties of the bottomhole zone are considered, in particular, the colmatation of the pore medium, the influence of process fluids, changes in phase permeability and the growth of the skin factor. A comparative analysis of existing methods of intensification of hydrocarbon inflow, including chemical, hydrodynamic, hydraulic fracturing and pulse-wave technologies, is carried out. The need to create information and measurement systems that combine the functions of control, analysis and evaluation of impact efficiency is substantiated.

The section also selects the direction of dissertation research and forms the main tasks of scientific work.

In the second section, the mathematical model of the electrical impedance of a multiparametric piezoelectric sensor, which takes into account the influence of pulse load parameters, pressure dynamics, oscillatory processes, characteristics of the bottomhole zone and destabilizing factors, is improved. The proposed model provides an increase in the adequacy of the description of the processes of measurement transformation and the accuracy of determining the informative parameters of the reservoir reaction, in particular the resonance characteristics and energy parameters of the signal.

In the third section, a method and algorithms for automated assessment of the efficiency of adaptive impulse action based on signal processing of a multiparameter piezoelectric sensor are developed. An approach to the selection of time, energy and spectral features of the dynamic reaction of the reservoir is implemented, which allows to move from a qualitative expert assessment to a quantitatively grounded integral indicator of efficiency. The structure and functional model of the information and

measurement system, which provides the integration of subsystems of measurement, signal processing, analysis and control, are substantiated.

The fourth section presents the results of experimental studies and tests of the developed information and measurement system. It is established that the system provides high accuracy and reproducibility of measurements, allows evaluating the effectiveness of adaptive impulse impact with high reliability, as well as determining rational modes of influence to increase the productivity of wells. The possibility of practical implementation of the developed methods and tools in the systems of monitoring and control of oil production processes is shown.

The results obtained can be implemented in the production practice of oil and gas production enterprises, as well as used in the educational process in the training of specialists in the specialties in the field of automation, information and measurement technologies and energy.

Scientific novelty of the results obtained:

- for the first time, the scientific and applied problem of parameter control and evaluation of the effectiveness of adaptive impulse impact on the bottomhole zone of oil wells was solved by developing methodological, mathematical, instrumental and information support, on the basis of which an information and measuring system was created, which provides reliable and reproducible measurements of process parameters, interpretation of the reservoir reaction and improving the accuracy of diagnosing the state of the bottomhole zone;
- the mathematical model of the electrical impedance of a multiparameter piezoelectric sensor has been improved, which, unlike the known ones, takes into account the influence of the parameters of adaptive impulse action, characteristics of the bottomhole zone, pressure dynamics, impulse loads, oscillatory processes and destabilizing factors of the controlled environment, which made it possible to increase the adequacy of the description of the processes of measuring transformation and the accuracy of highlighting informative features of the reservoir reaction;
- for the first time, an approach to automated assessment of the effectiveness of adaptive impulse impact on the bottomhole zone of oil wells was proposed, which is based on

the processing and interpretation of measuring signals of a multiparametric piezoelectric sensor, taking into account a set of informative parameters of the reservoir dynamic response, which made it possible to increase the reliability of assessing the effectiveness of the impact, reduce dependence on expert subjectivity and improve the validity of diagnostic decisions;

- methods for assessing the state of the bottomhole zone of oil wells were further developed due to the use of data from a multiparametric piezoelectric sensor and establishing a relationship between the parameters of the reservoir dynamic response and the effectiveness of well performance recovery, which made it possible to increase the information content of control, the validity of the choice of adaptive impulse action modes and the quality of interpretation of its efficiency.

Practical significance of the results obtained. In the dissertation research, an important scientific and practical issue of increasing the reliability of parameter control and accuracy of estimating the effectiveness of adaptive impulse impact on the bottomhole zone of oil wells was solved by developing a new methodological, mathematical, instrumental and information support, on the basis of which an information and measuring system was created, which provides reproducible measurements of process parameters, interpretation of the reservoir reaction and increasing the accuracy of diagnosing the state of the bottomhole zone.

The practical value of the results obtained is as follows:

- methodological and algorithmic support for automated assessment of the effectiveness of adaptive impulse impact on the bottomhole zone of oil wells has been developed, which makes it possible to increase the reliability of the interpretation of the impact results, reduce dependence on expert subjectivity and improve the validity of decision-making on the modes of well productivity recovery;
- a mathematical model has been created and software based on it has been developed to determine the electrical impedance of a multiparametric piezoelectric sensor, which allows to describe with sufficient adequacy the processes of measuring transformation of the parameters of adaptive impulse action, taking into account the dynamics of pressure, impulse loads, oscillatory processes, characteristics of the bottomhole zone

and the influence of destabilizing factors of the controlled environment;

- a multiparametric piezoelectric sensor has been developed to register informative parameters of the state of the bottomhole zone of oil wells, the use of which provides an expansion of the composition of controlled parameters, an increase in the information content of measurements and an improvement in the reproducibility of control results;
- an information-measuring system for monitoring parameters and evaluating the effectiveness of adaptive impulse impact has been developed, which combines subsystems for measurement, signal processing, analysis of informative features and formation of diagnostic solutions, and which allows for comprehensive automated control of process parameters and operational assessment of reservoir reaction;
- the proposed method, algorithms and information and measurement system can be used during pilot work, adjustment and maintenance of technologies of impulse impact on the bottomhole zone of oil wells, as well as in monitoring and decision support systems at oil and gas production enterprises;
- the results of theoretical and experimental research, mathematical models, methodological support, algorithms for processing and interpreting signals, as well as the information and measurement system built on their basis can be implemented in practice at oil and gas production enterprises, research institutions and service companies engaged in monitoring, diagnostics and intensification of oil well operation;
- the main provisions of the dissertation were used in the training courses of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies of Cherkasy State Technological University within the disciplines "Physical Processes in Devices and Systems", "Design of Information and Measuring Systems", "Methods for Improving the Metrological Characteristics of Control Devices and Determining the Parameters of Objects".

Keywords: bottomhole zone of an oil well, implosion effect, wave action on the reservoir, adaptive impulse effect, discrete-continuous model, mathematical model, boundary value problem, piezoelectric sensor, information and measurement system,

signal processing, resonance, productivity, efficiency estimation, experimental efficiency verification, probabilistic statistical characteristics, oil production intensification, well flow rate increase.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукометричних виданнях Scopus, Web of Science

1. Slidenko, V., Slidenko, O., Marchuk, L., & But, V. (2024). Development of a discrete-continuous mathematical model of a percussion device with parameters of influence on the characteristics of an impact pulse. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (125), 70–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290029>. ISSN 1729-3774, E- ISSN 1729-4061, ISSN-L 1729-3774 (Indexed in Scopus)
Здобувачем розроблено дискретно-неперервну математичну модель імпульсного пристрою, що описує процес передачі енергії удару та дозволяє визначати параметри імпульсу для формування інформативних ознак сигналів.
2. Slidenko, V., Slidenko, O., Listovshchyk, L., Novykov, A., & But, V. (2025). Construction of a mathematical model of an impact device with a two-element striker. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (133), 38–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322728>. ISSN 1729-3774, E- ISSN 1729-4061. (Indexed in Scopus).
Здобувачем побудовано математичну модель ударного пристрою з двоелементним бойком, яка забезпечує підвищення точності опису коливальних процесів і параметрів імпульсної дії.
3. Slidenko, V., But, V. (2026). Adaptive Electro-hydraulic Pulse System for Controlling the Technological Parameters of Oil Wells. In: Bazilo, C., Bondarenko, M., Faure, E., Antonyuk, V., Dzierwa, A., Usyk, L. (eds) *Sensors, Devices and Systems. SDaS 2025. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1570. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-18415-3_28. ISSN 1876-1100, E-ISSN 1876-1119. (Indexed in Scopus).
Здобувачем реалізовано PLC-орієнтовані алгоритми реального часу для автоматичного коригування параметрів системи за даними сенсорів і результатами стендових та промислових випробувань.

Статті у наукових фахових виданнях України

4. Сліденко, В.М., Шевчук, С.П., Лістовщик, Л.К., та Бут, В.О. (2024). Адаптивна імпульсна система впливу з поверхні на привибійну зону нафтової свердловини. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 45-51. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2024.315569> ISSN 1813-5420 (Print) ISSN 2308-7382 (Online) (Категорія Б).

Здобувачем розроблено структурно-функціональну модель адаптивної імпульсної системи з електрогідравлічним приводом та визначено раціональні режими генерації імпульсів тиску

5. Сліденко, В.М., Новиков, А.О., та Бут, В.О. (2025). Аналіз ефективності функціонування адаптивної імпульсної системи методом стохастичних характеристик. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 1, 72–78. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-72-78> ISSN 1997-9266. (Категорія Б).

Здобувачем здобувачем виконано оцінювання ефективності імпульсного впливу з урахуванням випадкових параметрів середовища та визначено діапазони стабільної генерації імпульсів

Матеріали й тези конференції

6. Сліденко, В. М., Лістовщик, Л. К., & Бут, В. О. (2018). Адаптивна мехатронна система імпульсно-хвильової дії на гірський масив. У *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації: Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів* (с. 27–28). Кременчук: КрНУ ім. М. Остроградського. ISSN 2079-5106.

Здобувачем досліджено методи моделювання імпульсних процесів та оптимізації параметрів електромеханічних систем

7. Сліденко, В. М., Поліщук, В. О., & Бут, В. О. (2019). Фізико-технічне обґрунтування вибору свердловин з раціональним покриттям експлуатаційного діапазону при імпульсній дії з поверхні. У *Проблеми вдосконалення машин та обладнання електромеханічних та мехатронних систем: Матеріали Першої*

міжнародної науково-методичної конференції (с. 52–55). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Здобувачем визначено критерії вибору свердловин і режимів імпульсного впливу, що забезпечують підвищення інформативності контролю

8. Бут, В. О., Лістовщик, Л. К., & Сліденко, В. М. (2021). Електрогідравлічний генератор імпульсної дії на привибійну зону нафтової свердловини. У *Енергетика. Екологія. Людина: Збірник наукових праць Інституту енергозбереження та енергоменеджменту* (с. 97–100). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». ISSN 2307-7239.

Здобувачем досліджено параметри формування імпульсних процесів у електротехнічних системах та їх вплив на ефективність енергетичного впливу

9. Сліденко, В. М., & Бут, В. О. (2023). Адаптивний генератор імпульсів для впливу на пластову систему без зупинки видобутку вуглеводнів. У *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку: Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-технічної конференції* (с. 103–104). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». <http://pems.kpi.ua/>

Здобувачем запропоновано підходи до адаптивного керування параметрами імпульсних систем та розроблено методи аналізу і моделювання енергетичних процесів у системах імпульсної дії для підвищення ефективності їх функціонування

10. Сліденко, В. М., & Бут, В. О. (2024). Електрогідравлічна імпульсна система впливу на привибійну зону нафтової свердловини. У *XLI International scientific and practical conference “Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential”* (с. 64–66). Toronto: International Scientific Unity. <https://doi.org/10.70286/ISU-02.10.2024>. ISBN 978-617-8427-31-3.

Здобувачем обґрунтовано принципи побудови імпульсно-хвильових систем впливу з урахуванням динамічних характеристик середовища

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	21
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ АДАПТИВНОГО ІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ НА ПРИВИБІЙНУ ЗОНУ НАФТОВИХ СВЕРДЛОВИН	32
1.1. Стан проблеми зниження продуктивності нафтових свердловин та методи впливу на привибійну зону пласта	32
1.2. Аналіз адаптивних імпульсних технологій інтенсифікації припливу вуглеводнів у привибійній зоні	37
1.3. Методи та засоби контролю параметрів імпульсного впливу і реєстрації реакції пласта	43
1.4. Аналіз підходів до оцінювання ефективності імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин	50
1.5. Особливості використання п'єзоелектричних датчиків у системах контролю динамічних процесів у свердловинах	58
1.6. Обґрунтування шляхів підвищення достовірності вимірювання, відтворюваності результатів контролю та точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу	65
1.7. Висновки до розділу 1	69
Список використаних джерел у розділі 1	70
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАТИВНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ АДАПТИВНОГО ІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ	88
2.1. Постановка задачі математичного моделювання процесів контролю параметрів адаптивного імпульсного впливу	88
2.2. Моделювання динамічної реакції пласта при адаптивному імпульсному впливі	95

2.3. Математичне моделювання вимірювального перетворення в багатопараметричному п'єзоелектричному датчику	101
2.4. Обґрунтування інформативних параметрів динамічної реакції пласта для оцінювання ефективності імпульсного впливу	112
2.5. Висновки до розділу 2	118
Список використаних джерел у розділі 2	119
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ, АЛГОРИТМІВ І СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	121
3.1. Обґрунтування вимог до інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу	122
3.2. Розроблення та технологічні засади виготовлення багатопараметричного п'єзоелектричного датчика для реєстрації інформативних параметрів стану привибійної зони	124
3.3. Розроблення методу автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу за даними багатопараметричного п'єзоелектричного датчика	129
3.4. Розроблення алгоритмів оброблення, аналізу та інтерпретації вимірювальних сигналів у системі контролю	134
3.5. Розроблення структурної схеми та функціональної моделі інформаційно-вимірювальної системи	139
3.6. Розроблення інформаційного та програмного забезпечення системи контролю параметрів і оцінювання ефективності імпульсного впливу	143
3.7. Висновки до розділу 3	147
Список використаних джерел у розділі 3	149
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	152

4.1. Методика експериментальних досліджень і випробувань розробленої інформаційно-вимірювальної системи	153
4.2. Оцінювання метрологічних характеристик багатопараметричного п'єзоелектричного датчика	168
4.3. Аналіз параметрів адаптивного імпульсного впливу та динамічної реакції пласта	177
4.4. Оцінювання достовірності контролю параметрів і точності автоматизованого визначення ефективності адаптивного імпульсного впливу	186
4.5. Практичне впровадження та використання результатів дослідження	194
4.6. Висновки до розділу 4	198
Список використаних джерел у розділі 4	200
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	201
ДОДАТКИ	204
Додаток А. Результати математичного моделювання процесів формування та передавання імпульсу на привибійну зону нафтових свердловин	204
Додаток Б. Цільові метролого-функціональні характеристики розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів та оцінювання ефективності	206
Додаток В. Технологічна послідовність процесу виготовлення багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з його основними конструктивними параметрами та розрахунковими режимами технологічних операцій	207
Додаток Г. Логіка частотного та функціонального розділення каналів датчика. Характерні форми багатоканального сигналу та його спектральної декомпозиції	208
Додаток Д. Експериментально-розрахункові дані методу автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу	210

Додаток Е. Лістинг програми візуалізації розподілу інтегрального показника ефективності η , як функції залежності від довжини імпульсної камери та частоти повторення імпульсів (Python)	211
Додаток Є. Лістинг ядра модуля керування ІВС (Python)	212
Додаток Ж. Результати, отримані при проведенні експериментів складені в матриці планування експерименту другого порядку	213
Додаток З. Оцінка невизначеності для p_{max} , t_f , J_p , η	216
Додаток И. Документація про впровадження результатів роботи в навчальний процес	218
Додаток І. Список опублікованих праць за темою дисертації	220

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

Абревіатури

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

Основні фізичні величини та параметри процесу

p – тиск, Па

p_0 – початковий тиск, Па

$p(t)$ – миттєве значення тиску як функції часу

$p_{\Sigma}(t)$ – сумарний тиск серії імпульсів

Δp – перепад тиску, Па

T – температура, °C

f – частота імпульсів, Гц

τ – тривалість імпульсу, с

t – час, с

A – амплітуда імпульсу тиску

β – коефіцієнт загасання

φ – початкова фаза

Параметри імпульсного впливу

E_{imp} – енергія імпульсу, Дж

f – частота імпульсів, Гц

t_{fr} – тривалість фронту імпульсу, с

P – робочий тиск у системі, Па

σ – електропровідність середовища, См/м

I_{imp} – імпульсний струм, А

Узагальнені показники та критерії

η – ефективність імпульсного впливу

N – кількість імпульсів

ВСТУП

Актуальність теми. Одним із стратегічно важливих завдань для енергетичної безпеки України на сьогодні є збереження та підвищення ефективності власного видобутку вуглеводневої сировини, зокрема шляхом інтенсифікації роботи наявного фонду нафтових свердловин та відновлення продуктивності виснажених об'єктів. Енергетична стратегія України до 2050 року орієнтує галузь на післявоєнне відновлення із застосуванням сучасних технологій, підвищення енергоефективності та технологічної стійкості паливно-енергетичного комплексу [1]. За цих умов особливого значення набувають технології, здатні не лише забезпечити вплив на пласт, а й дати достовірну вимірювальну інформацію про реальний стан свердловини, параметри процесу видобутку вуглеводнів та ефективність технологічного втручання.

Однією з причин зниження дебіту нафтових свердловин залишається погіршення фільтраційно-ємнісних властивостей привибійної зони пласта внаслідок її забруднення технологічними рідинами, проникнення механічних домішок, набухання глинистих компонентів, накопичення рідин у привибійній області та зростання фільтраційного опору [2]. Такі процеси призводять до зміни проникності, збільшення скін-фактора, погіршення гідродинамічного зв'язку свердловини з пластом і, як наслідок, до втрати продуктивності. Дослідження вчених – фахівців в області аналізу, контролю та оцінювання стану привибійної зони пласта (зокрема, С. В. Матківського, Л. І. Матіїшин, М. Притули, І. Купера та інших [3–5]), засвідчують, що зміна параметрів привибійної зони суттєво впливає на визначення експлуатаційних режимів свердловин і потребує застосування спеціалізованих інформаційно-вимірювальних засобів та технологічних підходів.

За сучасних умов, підвищення продуктивності нафтових свердловин не може розглядатися лише як технологічна задача фізико-хімічної, гідродинамічної чи імпульсної дії на пласт. Таке підвищення продуктивності більше пов'язане з якістю вимірювання параметрів процесу, своєчасністю виявлення змін у привибійній зоні, достовірністю оцінювання перехідних режимів, а також з автоматизованим аналізом великих масивів даних від свердловинних сенсорів.

Саме тому, розроблення інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів імпульсного впливу, оброблення сигналів тиску та витрат, визначення реакцій пласта на депресійно-репресійні або хвильові збурення, а також оцінювання ефективності таких впливів є перспективним і науково обґрунтованим напрямом дослідження.

У вітчизняній науковій спільноті дослідженням проблем оптимізації режимів експлуатації свердловин, впливу забруднення привибійної зони на продуктивність, а також математичного опису змін проникності та практичного вимірювання депресійно-репресійних параметрів займаються вчені: С.В. Матківський, Л.І. Матіїшин [3], М. Притула, Н. Притула, Я. П'янило, О. Химко [4], І. Купер, Б. Михайлишин [5] та інші. Їхні праці формують важливе підґрунтя для переходу від окремих технологічних операцій з очищення чи стимулювання привибійної зони до складніших систем, у яких процес впливу поєднаний із вимірюванням, діагностуванням та інтерпретацією стану свердловини в режимі, наближеному до реального часу.

У міжнародній науковій практиці суміжні проблеми розвивають колективи вчених, а саме: М. Y. Soliman, A. Rezaei, M. Khalaf [6], S. T. Nguyen, M. E.-S. El-Tayeb, M. Adel Gabry [7], Y. J. Chen, H. Y. Wang, M. Sharma [8], L. Li, M. Xie, R. Huang [9], A. T. Adeniyi [10], K. A. M. H. Abdalla, H. Khattab, M. Tantawy, I. S. Mohamed [11], D. F. Rossi, M. C. B. da Costa, K. S. Komati [12] та інші. У працях цих авторів [6–12] розглянуто імпульсно-плазмові методи стимулювання привибійної зони, системи моніторингу свердловин за даними постійно встановлених глибинних датчиків, методи аналізу перехідних змін тиску, кількісне оцінювання пошкодження навколосвердловинної області за результатами досліджень відновлення тиску після закачування, моделі оцінювання продуктивності низькопроникних колекторів, а також застосування методів машинного навчання для автоматизованої інтерпретації змін тиску в перехідних режимах та виявлення характерних ділянок у промислових сигналах.

Попри значну кількість досліджень, недостатньо опрацьованим залишається питання створення саме інформаційно-вимірювальної системи, яка б поєднувала: контроль параметрів адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону; реєстрацію реакції свердловини і пласта на імпульсне навантаження;

автоматизоване визначення інформативних ознак ефективності впливу; а також підтримку рішень щодо корекції режимів технологічного процесу. У більшості наявних робіт окремо досліджуються або технології стимулювання, або методи інтерпретації даних, тоді як інтеграція вимірювальних засобів, алгоритмів аналізу сигналів, діагностичних моделей і адаптивного керування процесом впливу все ще потребує подальшого наукового обґрунтування.

Отже, актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена потребою розвитку вітчизняного нафтовидобутку в умовах енергетичних викликів, необхідністю технологічного оновлення критичних галузей паливно-енергетичного комплексу, а також потребою створення сучасних вимірювальних засобів і систем аналітичного супроводу, що забезпечують підвищення достовірності контролю, оперативності діагностування та обґрунтованості оцінювання ефективності імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин.

Відповідність пріоритетним напрямкам. Розроблення інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин згідно із Законом України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» № 3715-VI від 08.09.2011 відповідає таким стратегічним пріоритетним напрямкам: освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних і ресурсощадних технологій, а також розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій і робототехніки [13].

Додатково тематика роботи узгоджується із середньостроковими пріоритетними напрямами інноваційної діяльності галузевого рівня, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 05.07.2024 № 787, зокрема щодо розроблення технологій моніторингу ефективного і раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів, а також комп'ютерної обробки сигналів, кіберфізичних систем та систем штучного інтелекту [14].

Згідно із Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 № 2623-III робота відповідає таким пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні, як інформаційні та комунікаційні технології і енергетика та енергоефективність [15].

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності контролю параметрів та оцінювання адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин шляхом розроблення нового методичного, математичного, інструментального та інформаційного забезпечення, на основі якого створюється інформаційно-вимірювальна система, що забезпечує достовірні та відтворювані вимірювання параметрів процесу, інтерпретацію реакції пласта і підвищення точності діагностування стану привибійної зони.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі задачі:

1. Провести аналіз відомих методів і засобів контролю параметрів імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин, методів реєстрації та інтерпретації реакції пласта, а також обґрунтувати шляхи підвищення достовірності вимірювання, відтворюваності результатів контролю та точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу.
2. Розробити математичну модель електричного імпедансу багатопараметричного п'єзоелектричного датчика для опису процесів вимірювального перетворення параметрів адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтової свердловини з урахуванням дії дестабілізаційних чинників та змін характеристик контрольованого середовища.
3. Розробити багатопараметричний п'єзоелектричний датчик для реєстрації інформативних параметрів стану привибійної зони на основі перетворення змін тиску, імпульсних навантажень і коливальних процесів у вимірювальні сигнали.
4. Розробити метод та алгоритми автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин на основі оброблення та інтерпретації вимірювальних сигналів багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з урахуванням сукупності інформативних параметрів динамічної реакції пласта.
5. Розробити структурну схему та функціональну модель інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів і оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу, що забезпечує автоматизоване вимірювання,

оброблення сигналів, аналіз інформативних ознак та формування діагностичних рішень.

6. Провести експериментальні дослідження та випробування розробленого методу й побудованої на його основі інформаційно-вимірювальної системи, що дозволить підвищити достовірність контролю параметрів процесу, точність оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу та обґрунтованість вибору режимів відновлення продуктивності нафтових свердловин.

Об'єкт дослідження – процеси контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин із використанням інформаційно-вимірювальних засобів в умовах змінних технологічних режимів функціонування нафтових свердловин.

Предмет дослідження – метод, модель та засоби вимірювання, оброблення й інтерпретації сигналів багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, а також закономірності формування інформативних ознак, що характеризують ефективність адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин.

Термінологічне уточнення. У дисертаційній роботі терміни «результативність» і «ефективність» не є тотожними. Так, під результативністю імпульсного впливу надалі розуміється фактичний ступінь досягнення технологічного результату, який проявляється у зміні дебіту, коефіцієнта продуктивності, індексу інжективності або зменшенні скін-фактору після оброблення. Тоді, як під ефективністю імпульсного впливу розуміється ширша комплексна характеристика, яка поєднує результативність, стійкість реакції пласта, енергетичну доцільність режиму та якість вимірювальної інформації.

У межах розробленої інформаційно-вимірювальної системи ефективність оперативно оцінюється за інтегральним показником η , тоді як результативність використовується для опису підтвердженого технологічного ефекту за продуктивними показниками свердловини.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених у дисертаційній роботі завдань використано комплекс експериментальних і теоретичних методів дослідження, що охоплює методи математичного та комп'ютерного моделювання, теорію вимірювань, теорію інформаційно-вимірювальних систем, методи аналізу

електричного імпедансу, цифрового оброблення сигналів, ідентифікації, статистичного аналізу та активного експерименту. Теоретичні дослідження виконано на основі положень інформаційно-вимірювальної техніки, теорії електричних кіл, п'єзоелектричного вимірювального перетворення, гідродинаміки та теорії динамічних систем. Для аналізу сигналів багатопараметричного п'єзоелектричного датчика застосовано методи цифрової фільтрації, спектрального, кореляційного та часово-частотного аналізу, а для оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу – методи математичної статистики, регресійного аналізу, класифікації та адаптивного оцінювання. Експериментальна перевірка розроблених моделей, алгоритмів і засобів виконувалася з використанням методів калібрування, метрологічного оцінювання та статистичної обробки результатів вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розв'язано науково-прикладну задачу контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин шляхом розроблення методичного, математичного, інструментального та інформаційного забезпечення, на основі якого створено інформаційно-вимірювальну систему, що забезпечує достовірні та відтворювані вимірювання параметрів процесу, інтерпретацію реакції пласта та підвищення точності діагностування стану привибійної зони;

- удосконалено математичну модель електричного імпедансу багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, яка, на відміну від відомих, враховує вплив параметрів адаптивної імпульсної дії, характеристик привибійної зони, динаміки тиску, імпульсних навантажень, коливальних процесів і дестабілізаційних чинників контрольованого середовища, що дозволило підвищити адекватність опису процесів вимірювального перетворення та точність виділення інформативних ознак реакції пласта;

- вперше запропоновано підхід до автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин, який ґрунтується на обробленні та інтерпретації вимірювальних сигналів багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з урахуванням

сукупності інформативних параметрів динамічної реакції пласта, що дозволило підвищити достовірність оцінювання результативності впливу, зменшити залежність від експертної суб'єктивності та покращити обґрунтованість діагностичних рішень;

– дістали подальшого розвитку методи оцінювання стану приви́бійної зони нафтових свердловин за рахунок використання даних багатопараметричного п'єзоелектричного датчика та встановлення взаємозв'язку між параметрами динамічної реакції пласта і результативністю відновлення продуктивності свердловини, що дозволило підвищити інформативність контролю, обґрунтованість вибору режимів адаптивного імпульсного впливу та якості інтерпретації його ефективності.

Практичне значення одержаних результатів. У дисертаційному дослідженні розв'язано важливу науково-практичну задачу підвищення достовірності контролю параметрів та точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на приви́бійну зону нафтових свердловин шляхом розроблення нового методичного, математичного, інструментального та інформаційного забезпечення, на основі якого створено інформаційно-вимірювальну систему, що забезпечує відтворювані вимірювання параметрів процесу, інтерпретацію реакції пласта та підвищення точності діагностування стану приви́бійної зони.

Практична цінність одержаних результатів полягає у такому:

– розроблено методичне та алгоритмічне забезпечення автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на приви́бійну зону нафтових свердловин, що дає змогу підвищити достовірність інтерпретації результатів впливу, зменшити залежність від експертної суб'єктивності та покращити обґрунтованість прийняття рішень щодо режимів відновлення продуктивності свердловин;

– створено математичну модель та розроблено програмне забезпечення на її основі для визначення електричного імпедансу багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, що дозволяє з достатньою адекватністю описувати

процеси вимірювального перетворення параметрів адаптивного імпульсного впливу з урахуванням динаміки тиску, імпульсних навантажень, коливальних процесів, характеристик приви́бійної зони та впливу дестабілізуючих чинників контрольованого середовища;

- розроблено багатопараметричний п'єзоелектричний датчик для реєстрації інформативних параметрів стану приви́бійної зони нафтових свердловин, використання якого забезпечує розширення складу контрольованих параметрів, підвищення інформативності вимірювань та покращення відтворюваності результатів контролю;

- розроблено інформаційно-вимірювальну систему контролю параметрів і оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу, що поєднує підсистеми вимірювання, оброблення сигналів, аналізу інформативних ознак та формування діагностичних рішень, і яка дозволяє здійснювати комплексний автоматизований контроль параметрів процесу та оперативне оцінювання реакції пласта;

- запропоновані метод, алгоритми та інформаційно-вимірювальна система можуть бути використані під час дослідно-промислових робіт, налагодження та супроводу технологій імпульсного впливу на приви́бійну зону нафтових свердловин, а також у системах моніторингу та підтримки прийняття рішень на підприємствах нафтогазовидобувної галузі;

- результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі, методичне забезпечення, алгоритми оброблення та інтерпретації сигналів, а також побудована на їх основі інформаційно-вимірювальна система можуть бути впроваджені у практику на підприємствах нафтогазовидобувної галузі, в науково-дослідних установах і сервісних компаніях, що займаються моніторингом, діагностуванням та інтенсифікацією роботи нафтових свердловин;

- основні положення дисертаційної роботи використані у навчальних курсах кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету у межах дисциплін "Фізичні процеси у приладах та системах", "Проектування

інформаційно-вимірювальних систем", "Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення параметрів об'єктів".

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист та висновки дисертації належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

- розроблено та досліджено математичні моделі імпульсного ударного пристрою, що дає змогу описувати складні режими формування імпульсного навантаження та підвищити точність розрахунку параметрів удару [1, 2];
- запропоновано концепцію та розроблено конструкцію адаптивної системи генерування імпульсного впливу з поверхні на приви́бійну зону нафтової свердловини, що забезпечує керування параметрами імпульсу залежно від умов експлуатації [3, 4, 9];
- проведено аналіз ефективності функціонування адаптивної імпульсної системи на основі стохастичних характеристик та запропоновано підходи до оцінювання стабільності й надійності імпульсного впливу з урахуванням випадкових змін параметрів середовища і системи, що забезпечує підвищення достовірності та обґрунтованості оцінювання результативності впливу [5];
- обґрунтовано принципи узгодження параметрів механічних і електрогідравлічних підсистем, що, забезпечує підвищення ефективності імпульсного впливу [6];
- визначено критерії ефективності застосування імпульсних методів з урахуванням геолого-технічних умов, що забезпечило підвищення інформативності контролю, обґрунтованості вибору режимів адаптивного імпульсного впливу та якості інтерпретації його результатів [7];
- розроблено та досліджено електрогідравлічний генератор імпульсної дії на приви́бійну зону свердловини та обґрунтовано взаємозв'язок параметрів імпульсного впливу (тиску, тривалості та частоти) з ефективністю очищення приви́бійної зони, що забезпечує підвищення результативності оброблення [8, 10].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися на наукових конференціях: XII International scientific conference «Sensors, Devices and Systems. SDaS 2025» (Черкаси, 18-20 вересня 2025 р.); XLI International scientific and practical conference «Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential» (Toronto, Canada, October 2-4, 2024); IX Міжнародній науково-технічній конференції "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку" (Київ, 22-24 листопада 2023 р.); XIII науково-технічна конференція "Енергетика. Екологія. Людина" (Київ, 13–14 травня 2021 р.); перша міжнародна науково-методична конференція "Проблеми вдосконалення машин та обладнання електромеханічних та мехатронних систем" (Київ, 10 грудня 2019 р.); XVI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук, 12–13 квітня 2018 р.)

Публікації результатів дисертації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у десяти наукових працях, у тому числі п'ятих статтях у наукових фахових виданнях (дві з них, у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб); три статті включені до періодичних наукових фахових видань проіндексованих у базі Scopus (Q3) та п'яти тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 221 сторінку, з них обсяг основного тексту – 157 сторінок, 47 рисунків, 36 таблиць, список використаних джерел складає 162 найменування і займає 23 сторінки, а також 11 додатків на 17 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ АДАПТИВНОГО ІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ НА ПРИВИБІЙНУ ЗОНУ НАФТОВИХ СВЕРДЛОВИН

У розділі проаналізовано сучасні методи оброблення приви́бійної зони нафтових свердловин (хімічні, фізичні, термічні та імпульсно-енергетичні) [14–28] та обґрунтовано перспективність електрогідравлічної імпульсної дії як ефективної, контрольованої та екологічно безпечної технології відновлення фільтраційних властивостей пласта. Визначено теоретичні основи формування імпульсної енергії в рідинному середовищі на основі електрогідравлічного ефекту та вплив ключових параметрів імпульсу і середовища на ефективність процесу [29–45]. Розглянуто методи дослідження імпульсних процесів, зокрема моделювання та експериментальні підходи, а також конструктивні особливості елементів імпульсних систем [46–70].

Показано, що ефективність передачі енергії визначається узгодженням параметрів системи з умовами свердловини, що обґрунтовує необхідність адаптивного керування режимами впливу [71–80].

Запропоновано підхід до оптимізації електротехнічної системи з урахуванням змінних факторів середовища та визначено режими імпульсної дії, що створює передумови для підвищення ефективності оброблення приви́бійної зони [76–92].

1.1. Стан проблеми зниження продуктивності нафтових свердловин та методи впливу на приви́бійну зону пласта

Стан продуктивності нафтових свердловин значною мірою визначається змінами у приви́бійній зоні пласта, де локальні порушення проникності та гідродинамічних параметрів призводять до зниження дебіту і погіршення ефективності видобутку [16–18]. Основними причинами цього є проникнення технологічних рідин у пласт, засмічення порового простору твердими

частинками, набухання глинистих мінералів, утворення відкладів і зміна фазових властивостей середовища, що навіть при незначних локальних ушкодженнях істотно зменшує продуктивність свердловини [18–20]. Наукова та виробнича практика засвідчує, що оцінювання стану привибійної зони зручно вести через поняття додаткового гідродинамічного опору (скін-фактор), який узагальнено характеризує ступінь її ушкодження та ефективність технологічного впливу на пласт [20, 21].

Для українських родовищ проблема зниження продуктивності свердловин є особливо актуальною через їх виснаженість, ускладнені режими роботи та зростання частки малодобітних об'єктів. Це насамперед зумовлено зниженням проникності привибійної зони внаслідок накопичення кольматантів і нераціональних умов експлуатації [16, 17, 36]. Як показано в табл. 1.1, ключовим узагальнювальним наслідком більшості негативних процесів є зростання локального фільтраційного опору поблизу вибою, що призводить до зменшення коефіцієнта продуктивності та погіршення режимів роботи свердловини [18–20].

Таблиця 1.1 – Основні причини зниження продуктивності нафтових свердловин у привибійній зоні. Джерело: складено автором за [18–20].

Група чинників	Характерний механізм	Типовий наслідок
Бурові та технологічні рідини	Інвазія фільтрату, утворення фільтраційної кірки	Зменшення проникності поблизу вибою
Механічні домішки та дрібно-дисперсні частинки породи	Міграція і повторне осадження частинок	Кольматація порових каналів
Глинисті мінерали	Набухання, диспергування, зміна структури пор	Зростання гідродинамічного опору
Органічні відклади	Асфальтени, смоли, парафіни	Блокування перфорацій і пор
Водяна блокада	Зміна фазової проникності	Погіршення припливу нафти
Післяфрактурні або післяремонтні ефекти	Залишки робочих рідин, нестійкі продукти реакцій	Нестабільна продуктивність, додатковий скін-ефект

Узагальнена причинно-наслідкова схема, наведена на рис. 1.1, показує, що зниження дебіту пов'язане з формуванням додаткового опору фільтрації в привибійній зоні.

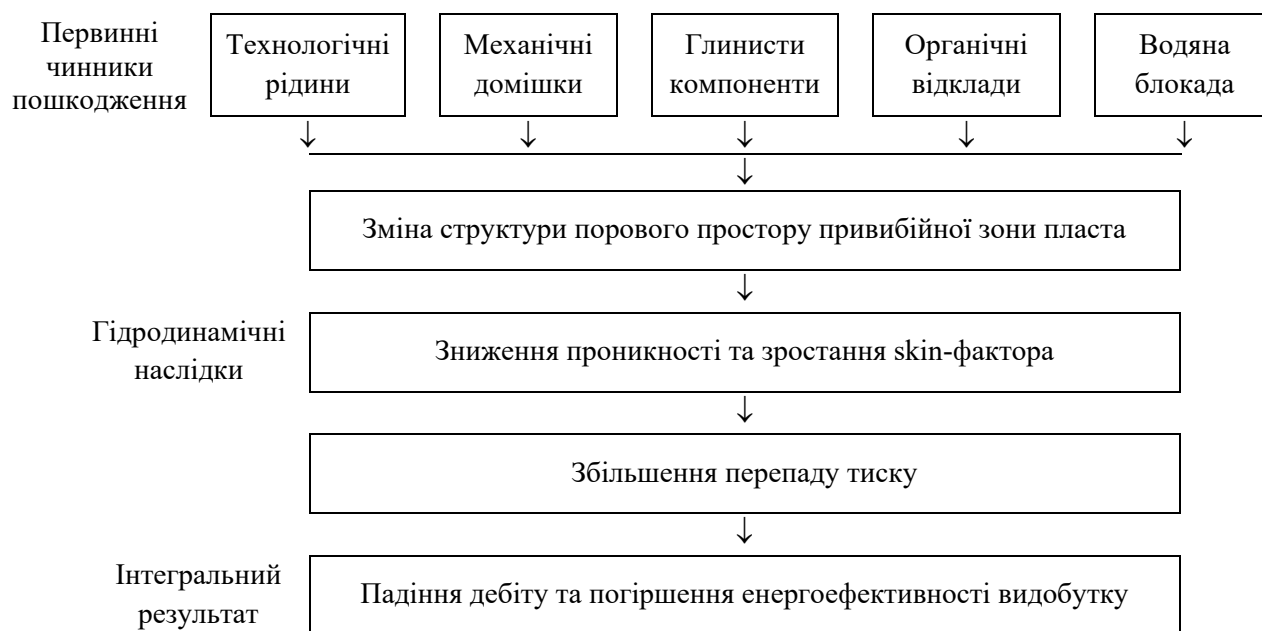


Рисунок 1.1 – Причинно-наслідкова схема зниження продуктивності нафтової свердловини. Джерело: розроблено автором.

Ефективність відомих методів відновлення продуктивності має відповідати умовам пошкодження пласта, що зумовлює необхідність урахування параметрів пласта, режимів роботи та результатів вимірювань [21, 27, 31]. Важливу роль у цьому відіграють методи діагностування за аналізом перехідних процесів тиску, які дозволяють визначати гідравлічні характеристики та оцінювати стан привибійної зони після технологічних впливів [21, 24].

Розвиток сучасних засобів моніторингу забезпечив перехід від разових вимірювань до безперервного контролю шляхом використання глибинних датчиків і моделей оцінювання параметрів свердловини. Водночас ключовими залишаються питання достовірності вимірювань і якості оброблення сигналів, оскільки саме вони визначають точність інтерпретації результатів [22, 25, 26].

Для відновлення проникності привибійної зони застосовуються різні методи впливу. Хімічні методи, зокрема метод кислотного оброблення, є поширеними, проте їх ефективність суттєво залежить від властивостей пласта та умов проведення робіт [27–30]. Для складних колекторів використовуються методи гідророзриву, ефективність яких визначається параметрами пласта та потребує комплексного аналізу його реакції [31, 33–35]. Перспективними, також є фізичні

методи (акустичні, ультразвукові, імпульсні), що дозволяють впливати на приви́бійну зону без значного хімічного навантаження [32]. Узагальнена класифікація методів наведена на рис. 1.2, а їх переваги та обмеження – у табл. 1.2, що свідчить про відсутність універсального підходу.

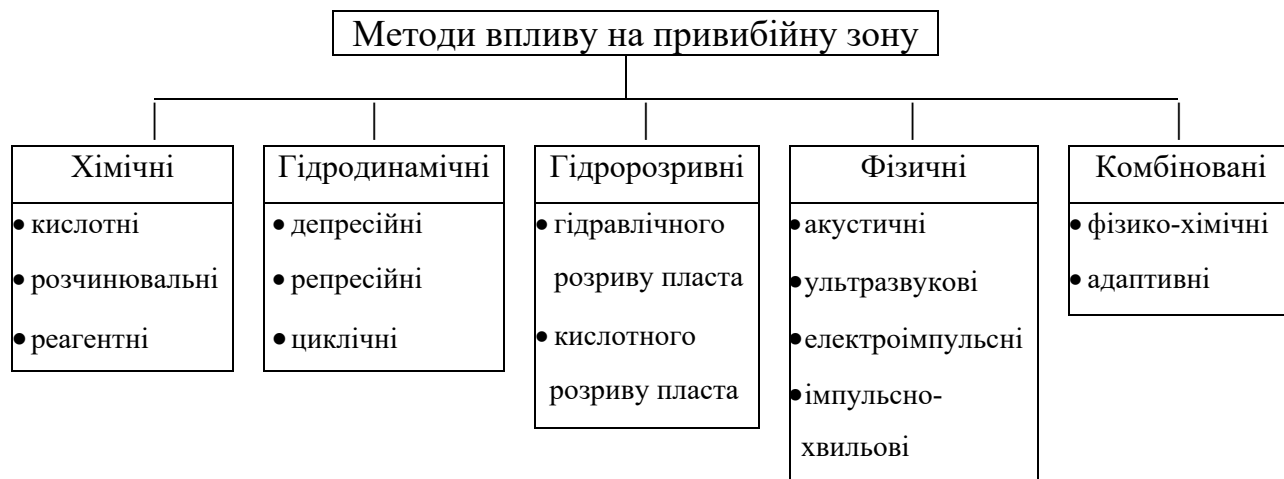


Рисунок 1.2 – Класифікація методів впливу на приви́бійну зону пласта.

Джерело: складено автором за [27–35].

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика сучасних методів впливу на приви́бійну зону пласта. Джерело: складено автором за [27–35].

Метод	Основний механізм	Переваги	Обмеження	Потреба в оперативному контролі
Кислотне оброблення приви́бійної зони пласта	Розчинення ушкодженої зони	Висока результативність для карбонатів	Залежність від властивостей пласта та умов оброблення	Висока
Кислотний розрив пласта	Формування провідних каналів у тріщинах	Значний приріст проникності	Складне проєктування і високі ризики	Дуже висока
Гідравлічний розрив пласта	Створення тріщинної мережі	Ефективний у пластах з низькою проникністю	Висока вартість, складний контроль результатів оброблення	Дуже висока
Акустичне та ультразвукове оброблення	Дезагрегація відкладів, хвильова мобілізація	Менше хімічне навантаження	Варіативність результату	Висока
Імпульсні, плазмові та хвильові методи стимулювання	Короточасні високі градієнти тиску та хвильові процеси	Потенційна селективність і адаптивність	Високі вимоги до контролю параметрів і реакції пласта	Критично висока

Разом з тим виникає суперечність: імпульсний вплив є швидкоплинним, тоді як оцінювання його ефективності часто базується на інтегральних показниках. Це призводить до невідповідності часових характеристик процесу впливу та методів його оцінювання, що може бути усунене лише шляхом оперативної реєстрації параметрів процесу та аналізу динамічної реакції пласта [21–26].

У цьому контексті сучасні підходи переходять до моделі, в якій вимірювання, аналіз і керування об'єднані в єдиний цикл, рис. 1.3.

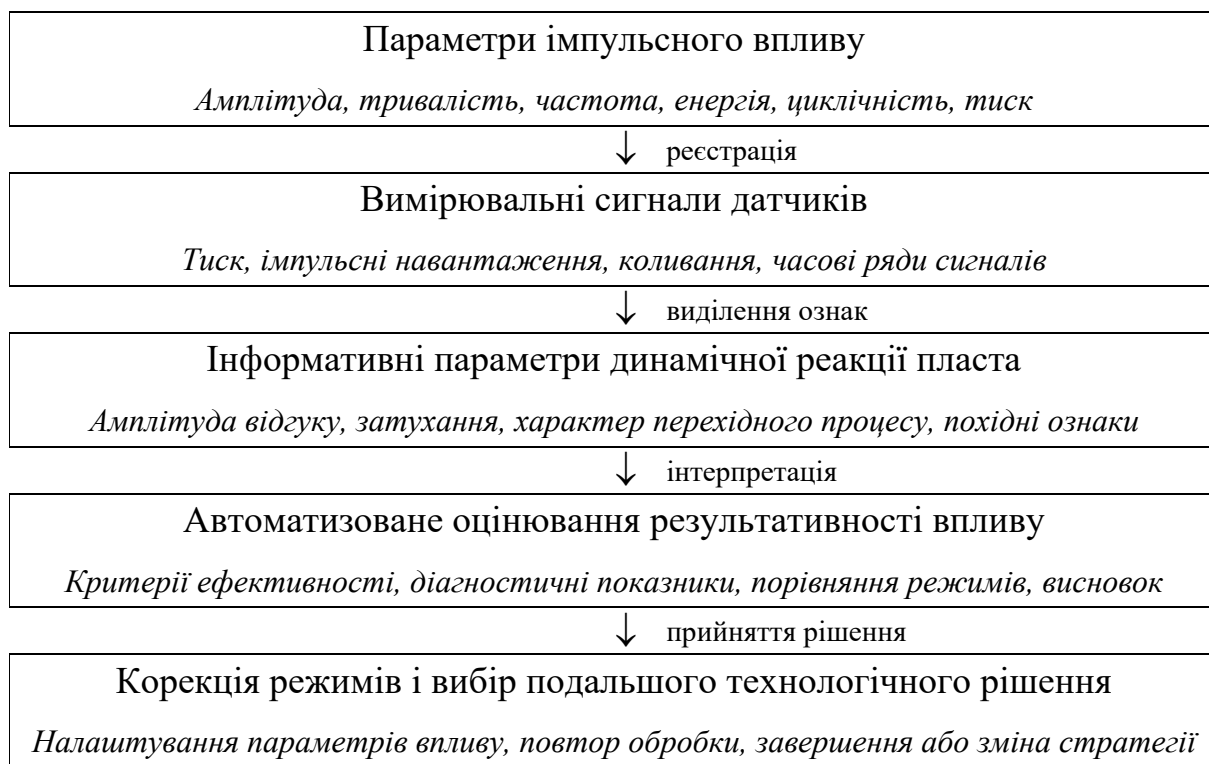


Рисунок 1.3 – Логічна схема оцінювання ефективності впливу на привибійну зону пласта. Джерело: складено автором за [21–26].

Це обґрунтовує необхідність створення спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) контролю параметрів адаптивного імпульсного впливу [22–25].

Отже, сучасний стан проблеми зниження продуктивності нафтових свердловин визначається ускладненням процесів ушкодження привибійної зони та необхідністю застосування більш точних і керованих методів впливу. Це зумовлює потребу не лише у виборі ефективних технологій стимулювання, а й у

створенні засобів достовірного контролю параметрів процесу та кількісного оцінювання його результативності [20–26, 31, 35].

У зв'язку з цим актуальним є розроблення ІВС, які забезпечують багатопараметричний контроль, аналіз реакції пласта та формування обґрунтованих діагностичних рішень щодо ефективності адаптивного імпульсного впливу, що є необхідною умовою підвищення продуктивності свердловин у сучасних умовах [21–26, 36].

1.2. Аналіз адаптивних імпульсних технологій інтенсифікації припливу вуглеводнів у привибійній зоні

Адаптивні імпульсні технології розглядаються як окремий клас методів інтенсифікації припливу, в яких енергетичний вплив на привибійну зону поєднується з керованою зміною параметрів імпульсів і оцінюванням реакції пласта. На відміну від традиційних підходів із фіксованими режимами, такі системи враховують змінні умови свердловини та передбачають корекцію параметрів дії за результатами контролю тиску, витрати, хвильових відгуків і продуктивності, що забезпечується наявністю контуру адаптації [37–40]. Необхідність цього підходу зумовлена неоднорідністю та мінливістю привибійної зони, де ефективність впливу залежить від комплексу геолого-технічних факторів, тому раціональний режим має визначатися за реакцією пласта з подальшим коригуванням параметрів у процесі оброблення [42, 54, 55].

Узагальнюючи сучасні дослідження, до адаптивних імпульсних технологій інтенсифікації припливу вуглеводнів відносять імпульсно-плазмові, електрогідравлічні, електроімпульсні, акустичні та комбіновані методи впливу, класифікація яких наведена на рис. 1.4, а їх порівняльні характеристики – у табл. 1.3 [37, 39–48].

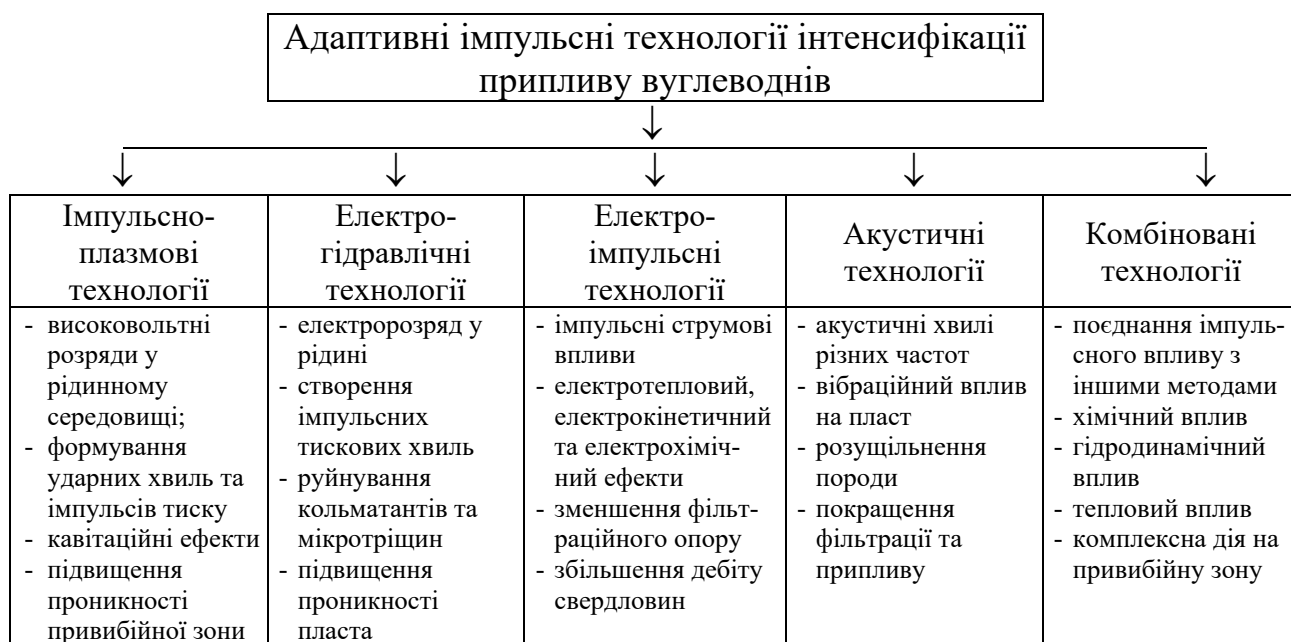


Рисунок 1.4 – Класифікація адаптивних імпульсних технологій інтенсифікації припливу вуглеводнів. Джерело: складено автором за [37, 39–48].

Таблиця 1.3 – Порівняльні характеристики адаптивних імпульсних технологій інтенсифікації припливу вуглеводнів. Джерело: складено автором за [37, 39–48].

Група технологій	Джерело енергії	Основний механізм впливу	Ключові керовані параметри	Переваги	Обмеження
Імпульсно-плазмові	Високовольтний розряд	Ударні хвилі, мікротріщини, підвищення проникності	Напруга, енергія імпульсу, частота, кількість циклів	Висока інтенсивність, мале використання води	Високі вимоги до узгодження енергії з пластом
Електро-імпульсні	Імпульси струму, електричне поле	Електрокінетичні, електротеплові та електрохімічні ефекти	Напруга, сила струму, тривалість, електропровідність середовища	Можливість впливу без використання складного обладнання	Залежність від складу флюїду та електропровідності
Ультразвукові	Високочастотні механічні коливання	Кавітація, мікрострумини, деємультасія, зниження в'язкості	Частота, амплітуда, експозиція, геометрія випромінювача	Менша хімічна агресивність, локальність	Нестійкість ефекту без адаптивного добору режиму
Низькочастотні вібраційні	Механічні коливання	Перерозподіл флюїдів, зменшення капілярного утримування	Частота, амплітуда, тривалість, циклічність	Краще охоплення неоднорідних зон	Нижча локальна інтенсивність
Гідравлічно-пульсаційні	Періодичні зміни тиску	Динамічне збурення потоку, зміна фільтраційних умов	Тиск, амплітуда пульсації, частота, фаза	Добра сумісність з промисловими системами	Потреба у точному моніторингу реакції пласта

Найбільш перспективними серед таких технологій, є технології, що формують короткочасні імпульси високої енергії в рідинному середовищі, які забезпечують виникнення хвильових і кавітаційних ефектів та сприяють підвищенню проникності привибійної зони [39, 40]. Електроімпульсні методи також демонструють значне зростання дебіту свердловин (до 25–36%), однак їх ефективність істотно залежить від фізико-хімічних властивостей середовища та умов експлуатації [42, 43]. У зв'язку з цим ключовим чинником підвищення результативності імпульсного впливу є узгодження параметрів імпульсу з характеристиками пласта, що обумовлює необхідність застосування систем контролю та оцінювання ефективності процесу [39–43].

Ультразвукові та акустичні технології є важливим напрямом інтенсифікації припливу вуглеводнів завдяки м'якому характеру впливу та зменшенню потреби у хімічних реагентах. Їх застосування забезпечує зниження в'язкості нафти, руйнування відкладів, очищення каналів та відновлення проникності привибійної зони [44, 45]. Основу дії становлять високочастотні механічні коливання, що викликають кавітаційні, теплові та інші ефекти у поровому середовищі, причому їх ефективність суттєво залежить від параметрів впливу та властивостей пласта [46–48]. Експериментальні дослідження підтверджують, що такі коливальні навантаження сприяють відновленню проникності порід і зменшенню ушкоджень, зокрема при наявності парафінових відкладів або впливі технологічних рідин [49–51]. Водночас ефективність цих технологій визначається необхідністю попередньої діагностики та адаптивного вибору режимів впливу.

Низькочастотні вібраційні та сейсмоакустичні методи впливу характеризуються меншими локальними амплітудами, проте забезпечують ефективніше поширення збурень у значних об'ємах пласта, сприяючи підвищенню рухливості флюїду, зменшенню капілярного утримування та покращенню витіснення в неоднорідних зонах [53]. Такі підходи є доцільними для родовищ із високою обводненістю, де більш ефективною є повторювана м'яка стимуляція. Подальшим розвитком є метод пульсуючого закачування рідини, який забезпечує підвищення нафтовилучення за рахунок періодичних

гідродинамічних збурень [54], причому встановлено існування оптимальних частот і амплітуд, за яких ефект інтенсифікації є максимальним [55], що підтверджує необхідність адаптивного вибору параметрів впливу.

Перспективним напрямом є імпульсні гідродинамічні методи впливу, в яких змінний тиск використовується для створення динамічного навантаження на систему тріщин і порових каналів привибійної зони. Показано, що такі підходи сприяють ініціюванню та розвитку тріщин, а також покращують фільтраційні характеристики пласта внаслідок поширення хвиль тиску та їх взаємодії з поровим середовищем [52, 56, 57].

Загалом, як видно з табл.1.3, спільною рисою більшості сучасних імпульсних технологій є наявність вузького раціонального діапазону параметрів, у межах якого забезпечується корисний технологічний ефект. За межами цього вікна енергія імпульсу або втрачається в системі «обладнання–рідина–свердловина», або породжує побічні ефекти, які не трансформуються у приріст продуктивності. Отже, адаптивність у таких системах має трактуватися не як додаткова опція, а як принципова умова забезпечення стабільності результату [39, 40, 45, 46, 55].

Вітчизняні дослідження адаптивних імпульсно-хвильових систем [37–57] підтверджують їх практичну ефективність: розроблено структурні рішення поверхневих систем, обґрунтовано раціональні параметри імпульсній камері (0,25–1,2 м) та доведено можливість підвищення продуктивності малодебітних свердловин на 20–30% [37], що узгоджується з результатами інших досліджень щодо доцільності застосування таких технологій у виснажених родовищах [38]. Встановлено, що ефективність імпульсного впливу визначається не лише приростом дебіту, а передусім механізмом дії в конкретних умовах (руйнування відкладень, покращення проникності, утворення мікротріщин), що обґрунтовує доцільність класифікації методів за домінуючим механізмом впливу (рис. 1.5) [39–57].

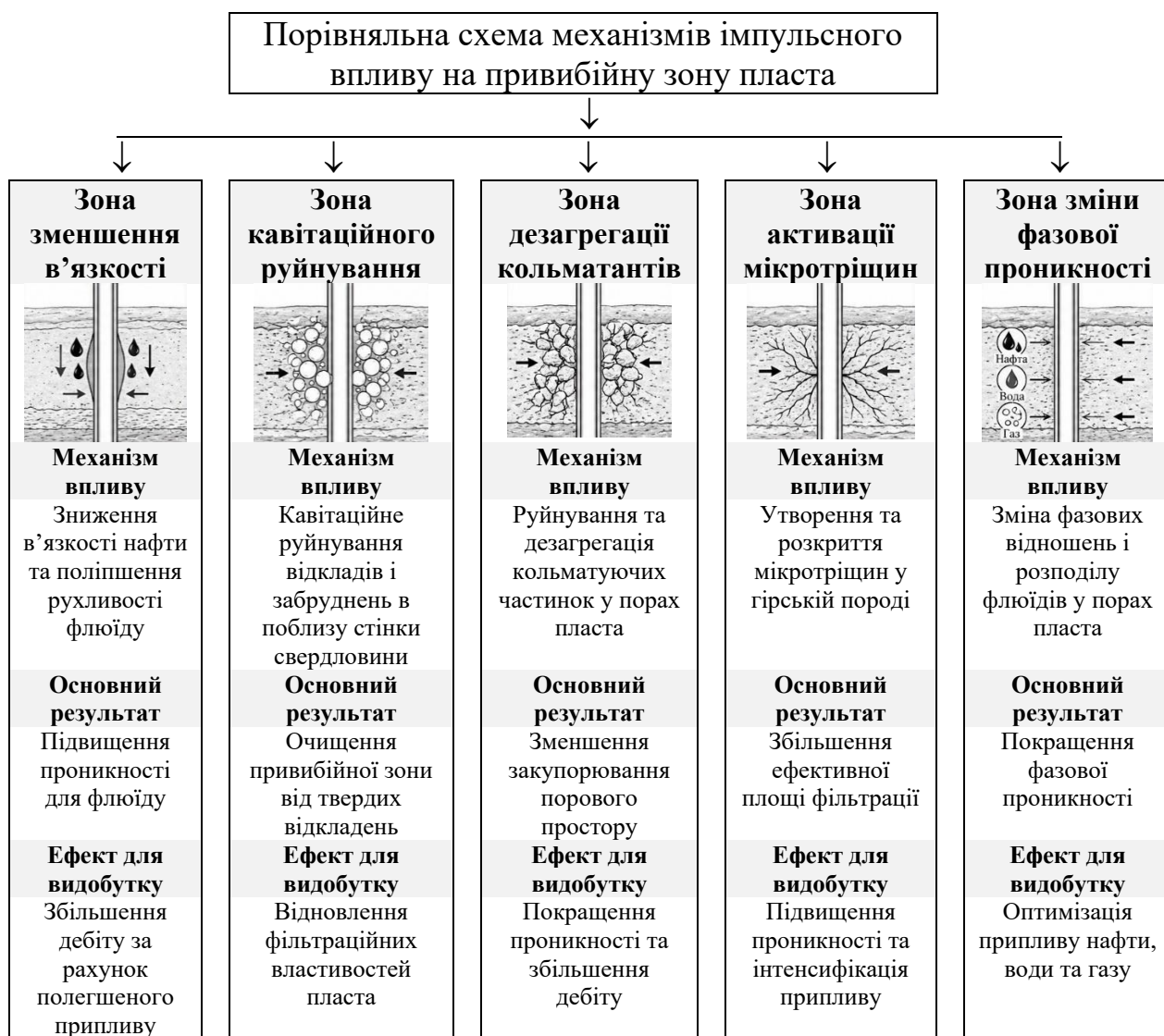


Рисунок 1.5 – Порівняльна схема механізмів імпульсного впливу на привибійну зону пласта. Джерело: складено автором за [37–57] з графікою, побудованою із залученням великої мовної моделі ChatGPT 5.5.

З огляду на це доцільно окремо виділити групу параметрів, за якими оцінюється адаптивність імпульсної технології: параметри самого збурення, параметри робочого середовища, параметри динамічної реакції пласта, а також результативні показники технологічного ефекту. Саме ця логіка покладена в основу схеми, поданої на рис. 1.6, де контур «імпульс – вимірювання – інтерпретація – корекція режиму» розглядається, як ядро адаптивної системи впливу [37, 40, 45, 55].



Рисунок 1.6 – Контур адаптивного імпульсного впливу: «формування імпульсу – вимірювання параметрів – інтерпретація реакції пласта – корекція режиму». Джерело: складено автором за [37, 40, 45, 55] з графікою, побудованою із залученням великої мовної моделі ChatGPT 5.5.

З практичного погляду ефективність імпульсного впливу визначається не лише параметрами генератора, а й характеристиками відгуку середовища, зокрема амплітудою і формою тискового імпульсу, швидкістю загасання коливань та змінами проникності і дебіту після серії впливів. Водночас аналіз літературних джерел [37, 39, 40, 42, 44–48, 54, 55] показує, що більшість досліджень зосереджена переважно на кінцевому технологічному ефекті, тоді як питання вимірювання та оперативного контролю процесу з метою корекції параметрів впливу залишаються недостатньо розробленими, табл. 1.4.

Підвищення ефективності імпульсного впливу на привибійну зону визначається не лише енергетичними параметрами, а передусім повнотою вимірювання параметрів процесу та обґрунтованістю інтерпретації реакції пласта [40, 42, 45, 54, 55]. У сучасних умовах доцільними є рішення, що забезпечують простоту впровадження, безпечність та можливість застосування без складного свердловинного обладнання, зокрема системи з поверхневим розміщенням енергоформувальних вузлів і достатньою глибиною передачі імпульсного впливу [37, 38, 42].

Встановлено, що параметри робочого середовища мають змінний характер і суттєво впливають на характеристики імпульсного процесу, що обумовлює необхідність їх урахування в багатопараметричних моделях та під час налаштування системи [37, 40, 55, 56].

Таблиця 1.4 – Узагальнення зафіксованих ефектів та вимог до інформаційно-вимірювального супроводу імпульсних технологій. Джерело: складено автором за [37–42, 44–48, 54, 55]

Технологія, джерело	Зафіксований ефект	Характеристика, що контролюється найчастіше	Характеристика, що контролюється недостатньо
Поверхнева адаптивна імпульсна система [37]	Зростання продуктивності малодебітних свердловин на 20–30%	Тиск, геометрія імпульсній камері, стохастичні параметри рідини	Реакція пласта в багатопараметричному вигляді
Імпульсна плазмова стимуляція [39, 40]	Підвищення проникності привибійної зони; польовий потенціал у нетрадиційних колекторах	Енергія імпульсу, напруга, частота	Локальна динаміка відгуку пласта
Імпульси електричного струму [42]	Збільшення дебіту нафти на 25–36%	Струм, енергоспоживання, продуктивність свердловини	Тонкі перехідні параметри реакції середовища
Ультразвуковий вплив [44–48]	Поліпшення мобільності нафти, очищення привибійної зони, відновлення проникності	Частота, час оброблення, властивості флюїду	Узгоджені критерії ефективності та адаптації
Гідравлічна пульсація, пульсуюче нагнітання [54, 55]	Покращення нафтовилучення за наявності оптимальних частоти й амплітуди	Частота, амплітуда, тиск, витрата	Формалізовані алгоритми зміни режиму за сигналами реакції

У зв'язку з цим найбільш перспективним є підхід, заснований на узгодженні параметрів імпульсу, властивостей середовища та реакції пласта, що потребує створення ІВС для реєстрації інформативних параметрів, оцінювання ефективності та адаптивного коригування режимів впливу [37, 40, 45, 55].

1.3. Методи та засоби контролю параметрів імпульсного впливу і реєстрації реакції пласта

У сучасних технологіях інтенсифікації припливу вуглеводнів імпульсний вплив розглядається як складова керованого процесу, ефективність якого

визначається повнотою контролю параметрів впливу та достовірністю реєстрації реакції пласта [58, 59]. Таким чином, задачі контролю доцільно поділяти на три групи: контроль параметрів імпульсу (амплітуда, тривалість, частота, енергія), контроль передавання енергії в свердловинній системі (тиск, втрати, затухання) та контроль реакції пласта (зміни тиску, показники продуктивності, ознаки відновлення проникності), що відображено на схемі, рис. 1.7 [60–64].

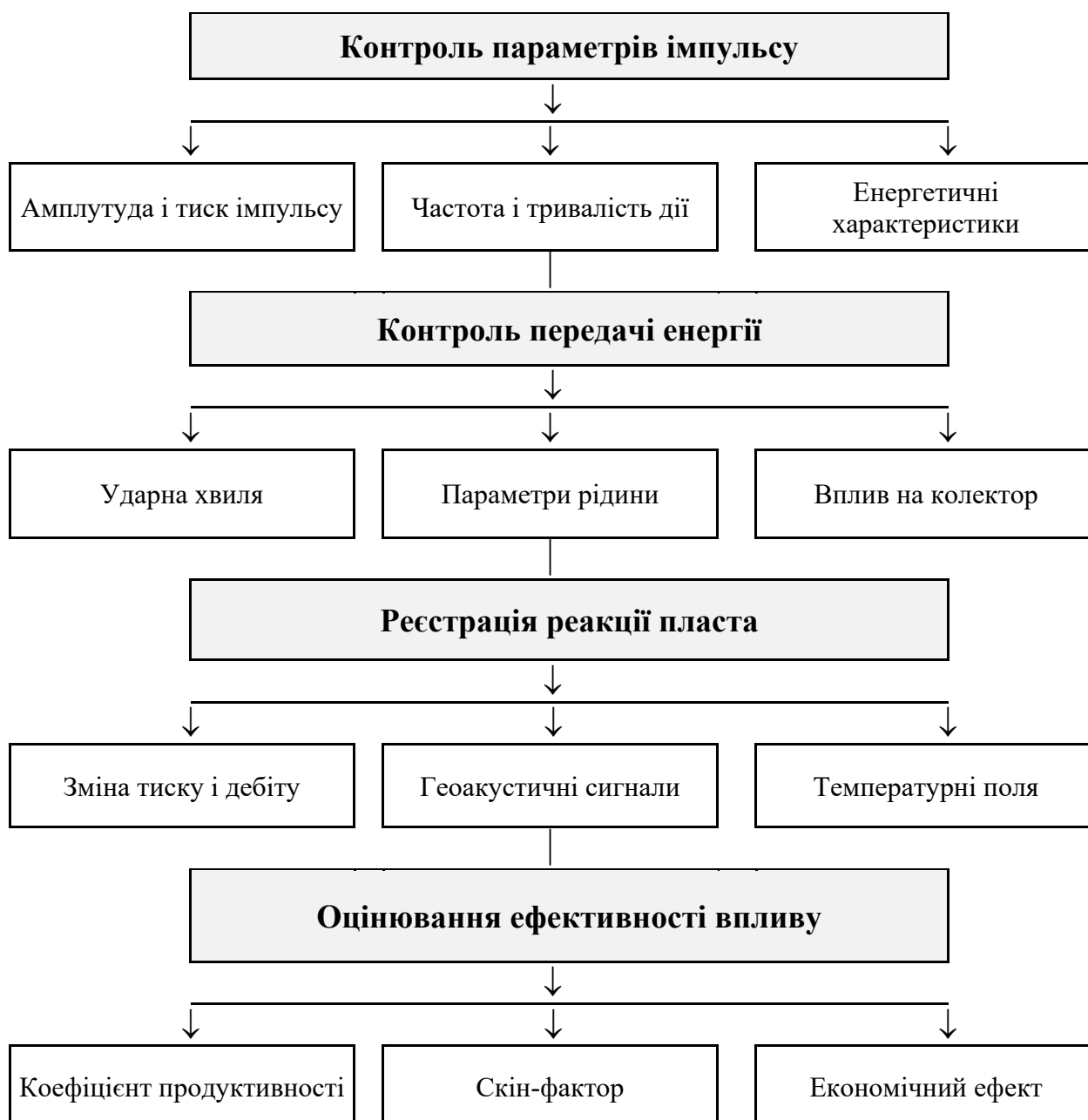


Рисунок 1.7 – Структура задач контролю в системах адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону пласта. Джерело: складено автором за [58–64]

На відміну від традиційного, епізодичного підходу, сучасні системи

орієнтовані на безперервний моніторинг із аналізом сигналів у часі, що дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність впливу. Класифікація методів контролю наведено на рис. 1.8, а їх порівняльні характеристики – в табл. 1.5 [60–62, 67].



Рисунок 1.8 – Класифікація методів і засобів контролю параметрів імпульсного впливу та реєстрації реакції пласта. Джерело: складено автором за [60–62, 67]

Основою сучасних систем контролю параметрів пластових процесів є постійно встановлені глибинні датчики тиску, які забезпечують безперервні вимірювання та формують інформаційну базу для аналізу перехідних процесів і оцінювання стану свердловини [60, 61].

Таблиця 1.5 – Класифікація методів контролю параметрів імпульсного впливу і реєстрації реакції пласта. Джерело: складено автором за [60, 61]

Група методів	Контрольовані параметри	Типові засоби	Переваги	Обмеження
Прямий локальний контроль	Тиск, температура, витрати	Стаціонарні глибинні вимірювальні датчики, кварцові та резонансні датчики	Висока точність локального вимірювання	Обмежена просторовість, проблеми надійності каналу
Розподілений контроль	Температура, акустичні й деформаційні збурення	Датчики для вимірювання температури, вібрації, деормації та низькочастотних хвиль	Просторово-часова картина процесу	Складність інтерпретації та висока ціна
Непрямий, модельний контроль	Тиск на вибої свердловини, інформативні ознаки реакції пласта	Розрахункові засоби непрямого визначення параметрів за виміряними даними, моделі машинного навчання, моделі, що визначають параметри системи за результатами її реакції	Можливість роботи без використання глибинного датчика	Залежність від якості навчальних даних
Аналітичний контроль реакції пласта	Перехідні процеси тиску, скін-фактор, проникність	Дослідження сигналу одночасно в часі та по частотах (де і коли відбуваються зміни)	Висока інформативність для оцінки пласта	Потребує якісних тискових записів
Інтегрований інтелектуальний контроль	Комплекс параметрів впливу і відгуку	Система спостереження за процесом з кількох сторін через різні датчики	Адаптація режимів у реальному часі	Високі вимоги до інтеграції та обчислень

Водночас значні обсяги даних потребують автоматизованого виділення інформативних ділянок сигналу, що є критично важливим для імпульсних технологій, де сигнали мають коротку тривалість і підвищену чутливістю до завад [60, 62]. Подальша інтерпретація таких даних ґрунтується на аналізі перехідних процесів тиску, що дозволяє оцінювати проникність, стан привибійної зони та продуктивність свердловини за умови високої якості вимірювань [61, 64].

Сучасний розвиток цього напрямку пов'язаний із застосуванням методів машинного навчання для автоматизованого аналізу сигналів і підвищення точності оцінювання параметрів пласта [63, 64]. За відсутності глибинних датчиків, перспективним є використання розрахункових (віртуальних) датчиків тиску, що дозволяють оцінювати параметри процесу за поверхневими вимірюваннями [65]. При цьому важливим фактором залишається надійність вимірювальних каналів, оскільки деградація сенсорів і втрати сигналу безпосередньо впливають на достовірність результатів [66].

Ефективність контролю підвищується при комплексному використанні даних тиску та витрати, що забезпечує більш повне уявлення про реакцію пласта і результати впливу [67]. Перспективним напрямом є застосування волоконно-оптичних систем, які дозволяють отримувати розподілену інформацію про процеси вздовж свердловини та реалізовувати багатопараметричний контроль [68, 69, 70, 71]. У цьому контексті особливе значення мають п'єзоелектричні датчики, здатні реєструвати швидкоплинні імпульсні процеси та динамічні зміни тиску [74], а також інтегровані багатосенсорні системи, що поєднують різні канали вимірювання та алгоритми оброблення даних у єдиному середовищі [72], [73].

Отже, сучасні засоби контролю параметрів імпульсного впливу і реєстрації реакції пласта охоплюють як локальні глибинні датчики тиску, так і розподілені волоконно-оптичні системи, багатосенсорні модулі, віртуальні датчики вибійного тиску, методи аналізу перехідних процесів тиску у свердловині та пласті, алгоритми автоматизованого виявлення транз'єнтів і засоби інтелектуальної інтерпретації сигналів. Їх узагальнену класифікацію наведено в табл. 1.5, а порівняння чутливості, швидкодії, завадостійкості та інтегрованості – у табл. 1.6 [60–77].

Таблиця 1.6 – Порівняння основних сенсорних засобів, придатних для контролю параметрів імпульсного впливу. Джерело: складено автором за [60–77]

Тип датчика / системи	Швидкість	Придатність до динамічних збурень	Робота в жорстких умовах	Просторова інформативність	Придатність для адаптивних імпульсних систем
Класичний глибинний датчик тиску	Висока	Середня–висока	Висока	Локальна	Висока
Волоконно-оптичний точковий датчик тиску	Висока	Висока	Дуже висока	Локальна	Висока
Розподілені волоконно-оптичні сенсорні системи	Середня–висока	Висока	Висока	Розподілена	Дуже висока
П'єзоелектричний датчик	Дуже висока	Дуже висока	Висока за належного конструктивного виконання	Локальна, багато-параметрична	Дуже висока
Віртуальний датчик (програмний датчик)	Залежить від моделі	Опосередкована	Висока	Розрахункова	Середня–висока

Як впливає з табл. 1.5, жоден із сучасних методів контролю параметрів імпульсного впливу не забезпечує повного охоплення всіх необхідних характеристик: локальні датчики відзначаються високою точністю, але обмежені просторово, розподілені системи дають узагальнену картину, проте ускладнюють інтерпретацію, а модельні підходи залежать від якості вихідних даних. Тому доцільним є поєднання вимірювального, модельного та алгоритмічного підходів у межах єдиного інформаційно-вимірювального ланцюга (рис.1.9) та інтеграції даних різних типів сенсорів (рис.1.10) [61–65, 72, 73].

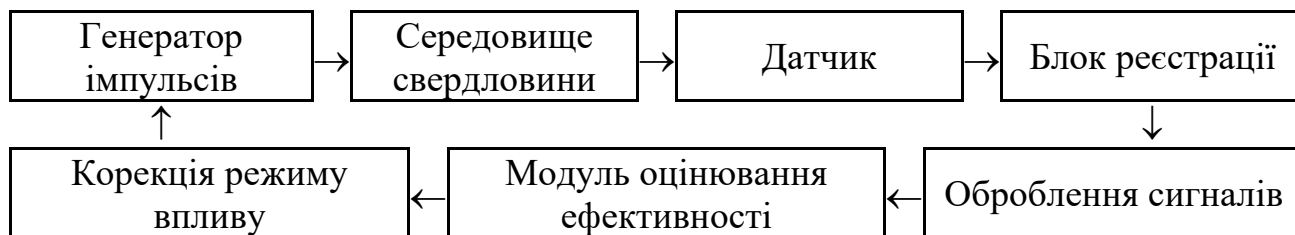


Рисунок 1.9 – Узагальнений інформаційно-вимірвальний ланцюг у системі адаптивного імпульсного впливу. Джерело: складено автором за [61–65, 72, 73]

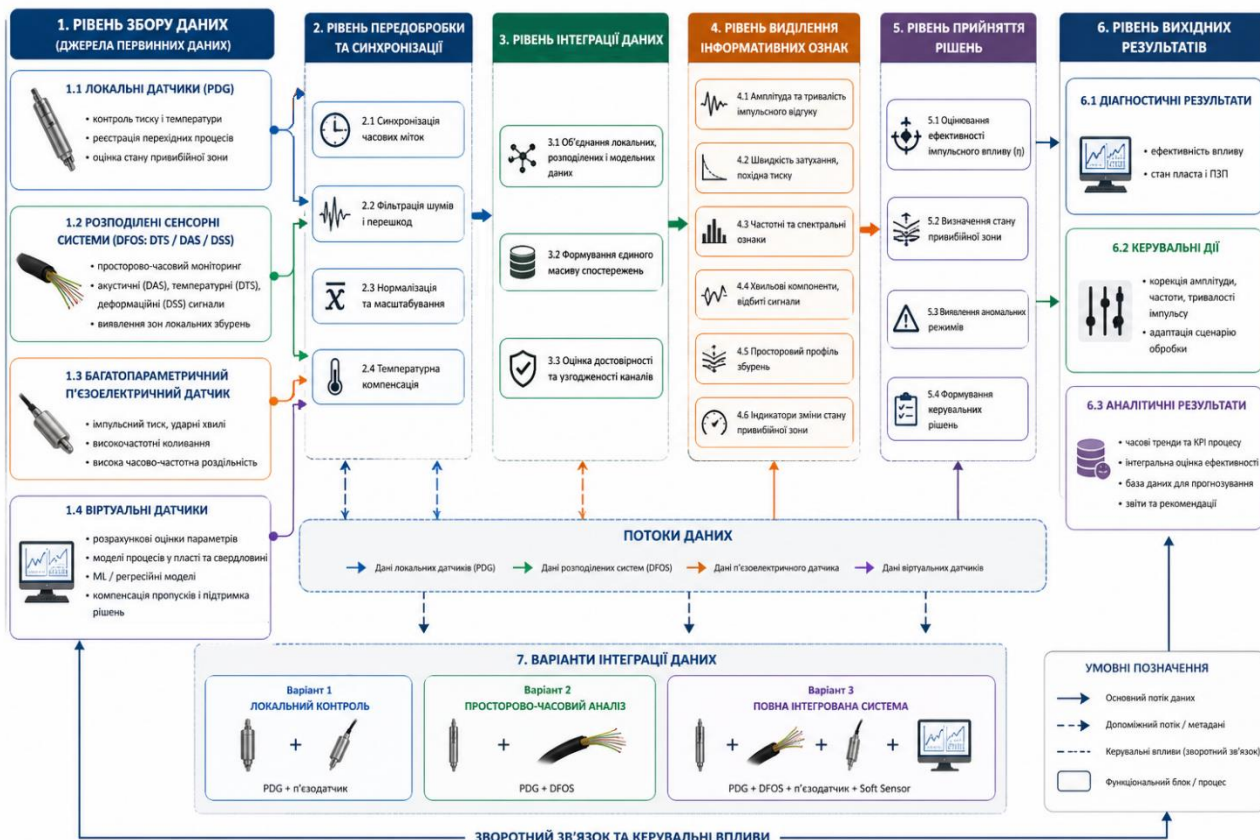


Рисунок 1.10. Варіанти інтеграції даних локальних, розподілених і віртуальних датчиків для реєстрації реакції пласта. Джерело: складено автором за [61–65, 72, 73] з графікою, побудованою із залученням великої мовної моделі ChatGPT 5.5.

Для задач реєстрації динамічної реакції пласта найбільш ефективним є використання багатопараметричних п'єзoeлектричних датчиків як основного засобу отримання інформативних сигналів із подальшим їх обробленням сучасними методами аналізу [60–65, 74]. Проведений аналіз показав, що, попри наявність достатнього науково-технічного підґрунтя, наявні рішення здебільшого орієнтовані на окремі параметри або інші технології впливу, тоді як задача

комплексного контролю параметрів імпульсного впливу та автоматизованого оцінювання його ефективності залишається недостатньо опрацьованою, що обґрунтовує необхідність подальшого розвитку відповідних інформаційно-вимірювальних систем, датчиків і алгоритмів оброблення сигналів [58–77].

1.4. Аналіз підходів до оцінювання ефективності імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин

Надалі, під результативністю імпульсного впливу будемо розуміти фактичний ступінь досягнення технологічного результату, що проявляється у зміні продуктивних показників свердловини.

Під ефективністю імпульсного впливу будемо розуміти ширшу комплексну характеристику, яка, крім результативності, враховує стійкість реакції пласта, енергетичну доцільність режиму та якість вимірювальної інформації (у межах розробленої ІВС ефективність оцінюється за інтегральним показником η , а результативність – за підтвердженими продуктивними показниками свердловини).

Оцінювання ефективності імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин не може обмежуватися лише фіксацією збільшення дебіту, оскільки такий підхід не відображає механізм досягнення результату, його стійкість і залежність від параметрів впливу. У зв'язку з цим ефективність доцільно розглядати як комплексну характеристику, що враховує гідродинамічні, технологічні, діагностичні та прогностичні аспекти. Узагальнення таких підходів наведено на рис.1.11, а їх порівняльні характеристики – у табл. 1.7 [78–81].

Першою і найбільш поширеною групою підходів залишаються прямі продуктивні критерії, що базуються на порівнянні дебіту, коефіцієнта продуктивності, індексу інжективності або приросту видобутку до і після стимулювання. Їх перевага полягає у простоті інтерпретації.



Рисунок 1.11 – Класифікація сучасних підходів до оцінювання ефективності імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин. Джерело: складено автором за [78–81]

Таблиця 1.7 – Сучасні підходи до оцінювання ефективності імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин. Джерело: складено автором за [78–81]

Підхід	Основний критерій	Переваги	Обмеження	Типовий часовий масштаб
Прямий продуктивний	Дебіт, індекси продуктивності та приймальності свердловини	Простота і наочність	Низька селективність причин ефекту	Від доби до місяців
Гідродинамічний	Коефіцієнт пошкодження, ефективність фільтрації, параметри аналізу перехідних процесів тиску	Фізична інтерпретованість	Потребує якісних тискових даних	Від хвилин до діб
Прискореної зйомки / транзйентний	Узагальнені показники аналізу кривих тиску, зміна форми похідної кривої тиску	Висока здатність системи виявляти незначні зміни у привибійній зоні свердловини	Вимагає неперервного моніторингу	Від годин до тижнів
Прогностичний	Моделі машинного навчання для прогнозу продуктивності, потенційна продуктивність свердловини, ймовірність успішності її оброблення	Може враховувати багато факторів одночасно	Залежить від навчальних даних	Від годин до років
Техніко-економічний	Приріст видобутку, чиста приведена вартість, питомий ефект	Дає підстави для управлінського рішення	Залежить від багатьох зовнішніх умов	Від місяців до років

Проте вони не дозволяють відокремити ефект імпульсного впливу від змін вибієного тиску, режиму роботи свердловини чи виснаження пласта, тому доцільні лише як інтегральний індикатор верхнього рівня, а не самостійний критерій ефективності [82, 85, 88].

Центральне місце серед таких показників посідає коефіцієнт продуктивності (PI), який використовується як універсальний параметр порівняння результатів оброблень, проте його коректна інтерпретація потребує врахування неоднорідності пласта, геометрії свердловини, типу завершення, скіна та режиму фільтрації, особливо для горизонтальних свердловин, де він може недооцінювати локальні ефекти поблизу вибою [87–91].

Більш фізично інформативним параметром є скін-фактор, що характеризує додатковий гідродинамічний опір у привибійній зоні та безпосередньо відображає зміну стану навколосвердловинної області. Аналіз скіна до і після оброблення дозволяє не лише підтвердити ефект стимулювання, а й оцінити глибину та характер впливу з ідентифікацією та відокремленням змін у привибійній зоні свердловини від змін у віддаленій частині пласта та віддалених пластових ефектів [78, 83, 85, 94].

У зв'язку з цим найбільш стійким підходом до оцінювання ефективності стимулювання залишається метод інтерпретації змін тиску в свердловині в часі після зміни режиму її роботи, який у сучасних дослідженнях використовується для визначення не лише проникності, тиску чи скіна, а й часової еволюції факторів продуктивності. Як підкреслено у [78], інтерпретація таких перехідних тисків дозволяє оцінювати ефект імпульсного впливу через зміну механізмів фільтрації, а не лише за кінцевими показниками дебіту.

Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із переходом від одноразових досліджень до аналізу перехідних процесів тиску у часовій динаміці, коли послідовні відгуки розглядаються як сукупність транзієнтів, що відображають зміну стану системи «свердловина–пласт». Так, у роботі [79] показано, що відповідні метрики дозволяють кількісно розмежовувати внесок пласта і системи «свердловина–пласт» у зміну продуктивності, що є важливим для

об'єктивної оцінки ефективності імпульсного впливу та відокремлення реального покращення привибійної зони від тимчасових режимних ефектів. Водночас ефективність такого підходу визначається якістю вихідних сигналів, тому ключовим етапом є коректне виділення перехідних інтервалів у даних глибинних датчиків, що підтверджено дослідженнями [81, 82], в яких показано вплив шуму, накладання режимів і розсинхронізації параметрів на похибки визначення характеристик пласта. Крім того, суттєве значення має попереднє знешумлення сигналів, оскільки, як показано в роботі [84], вибір методів фільтрації впливає на коректність визначення режимів фільтрації та пов'язаних ефектів, а надмірне згладжування може призводити до втрати короточасних інформативних ознак реакції пласта. Таким чином, попереднє цифрове оброблення сигналів є критично важливою складовою процедури оцінювання ефективності імпульсного впливу.

У сучасних дослідженнях усе більшого поширення набувають підходи, за яких оцінювання стану привибійної зони здійснюється не лише під час зупинки свердловини, а й у процесі її роботи. Зокрема, автори роботи [85] показали можливість визначення коефіцієнта пошкодження пласта, середнього пластового тиску та індексу продуктивності без обов'язкової зупинки свердловини, що є важливим для реалізації оцінювання ефективності в режимі, наближеному до реального часу, і створює передумови для адаптивного керування імпульсним впливом.

Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із використанням імовірнісних та байєсівських методів інтерпретації тискових даних. Так, у роботі [86] застосовано ансамблеве узгодження даних для оцінювання проникності, коефіцієнта пошкодження, відстаней до меж пласта та початкового тиску з урахуванням невизначеності. Це дозволяє формувати не окремі значення параметрів, а їх розподіли, що дає змогу оцінювати не лише очікуваний ефект, а й його надійність та враховувати невизначеність при прийнятті керувальних рішень.

Важливим доповненням цих фактів є підходи, орієнтовані на аналіз зв'язності пластової системи. Так, у дослідженні [87] використано модель змінних стану та ємності для динамічного оцінювання міжсвердловинної взаємодії, об'єму

гідродинамічного зв'язку та часових затримок, що може застосовуватись як додатковий критерій ефективності імпульсного впливу за умов зміни інжективності або перерозподілу потоків.

Сучасні роботи також спрямовані на розроблення уточнених моделей продуктивності. Так, в роботі [88] виконано порівняльне оцінювання показників продуктивності у карбонатних колекторах на основі геофізичних досліджень і випробувань свердловин, а в роботі [89] запропоновано модифіковану теоретичну модель для горизонтальних свердловин у низькопроникних морських колекторах, що підвищує точність оцінювання продуктивності з 65,80% до 96,82%. Це підтверджує доцільність оцінювання ефективності імпульсного впливу відносно адекватних моделей очікуваної продуктивності.

Аналогічні тенденції простежуються у роботах [90, 91], де враховано анізотропію, двофазну фільтрацію, чутливість до напружень і особливості горизонтальних свердловин, що свідчить про перехід від узагальнених оцінок продуктивності до моделей, орієнтованих на конкретні геолого-технічні умови та тип впливу.

Паралельно розвиваються прогностичні моделі продуктивності, у яких ефективність стимулювання оцінюється через очікувану зміну майбутньої продуктивності пласта. Зокрема, у роботі [92] застосовано метод опорних векторів, оптимізований удосконаленням алгоритмом «кита», що дозволило знизити середню похибку прогнозу до 9,3% при коефіцієнті детермінації 0,941. Такі підходи дають змогу оцінювати ефект імпульсного впливу не лише за фактичними даними, але й у прогностичному режимі залежно від технологічних і пластових параметрів.

Водночас активно розвиваються підходи, орієнтовані на аналіз великих масивів даних. Так, у роботі [93] показано, що використання методів аналізу великих даних і машинного навчання для дослідження процесів стимулювання у нетрадиційних газових колекторах дозволяє зменшити невизначеність під час вибору технології впливу. У іншому дослідженні [98] розроблено модель оцінювання ефективності комбінованого гідророзриву та витіснення, де

градієнтний бустинг забезпечив точність 81,5% та площу під кривою 0,90, а застосування пояснювального аналізу дозволило визначити ключові фактори результативності. Це свідчить про перехід до багатофакторного аналізу ефективності стимулювання.

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені діагностиці пошкодження пласта. У роботі [99] показано, що для щільних і сланцевих колекторів оцінювання пошкоджень має поєднувати методи спаду тиску, фільтраційні випробування при підвищеному тиску, аналіз збереження тріщин та оптимізацію складу рідин. Водночас, у дослідженні [83] систематизовано польову діагностику, методи візуалізації, аналітичні підходи, чисельне моделювання та застосування штучного інтелекту для оцінювання ступеня і розвитку пошкоджень. Таким чином, ефективність імпульсного впливу доцільно розглядати не лише як приріст видобутку, а і як зменшення пошкодження привибійної зони.

Суттєвий методичний інтерес становлять дослідження, де оцінювання ефективності виконується за схемою «лабораторія – модель – промисловий об'єкт». Зокрема, в роботі [95] для важких нафтових покладів кількісно пов'язали механізми пошкодження зі зниженням проникності та ступенем її відновлення, а також показали польовий ефект на 56 свердловинах, де понад 90% оброблень супроводжувалися приростом видобутку. У роботі [96] ефективність очищення фільтраційної кірки оцінювали за проникністю, електричним опором, томографією та механічними властивостями, що дозволило розмежувати первинне і вторинне пошкодження після кислотного оброблення. Це підтверджує необхідність багаторівневого підходу з лабораторним, модельним і польовим підтвердженням.

Подібних висновків дійшли автори роботи [97], які запропонували інтегроване геолого-інженерне оцінювання пошкодження пласта з часово-просторовим масштабуванням від керна до резервуара. Ними показано, що традиційні методи часто занижують масштаби пошкодження, якщо не враховуються глибина проникнення, чутливість до флюїдів, їх несумісність і

зниження проникності для нафти, що є принциповим для коректної оцінки ефективності імпульсних технологій.

Окремо виділяються техніко-економічні підходи: у роботі [94] показано, що коефіцієнт скіна визначає не лише технічну продуктивність, а й економічну ефективність, причому результат стимулювання істотно залежить від пропускної здатності пласта. Це означає, що технічно успішний імпульсний вплив не завжди є доцільним без достатнього економічного ефекту.

Узагальнення наведених підходів дозволяє виділити п'ять рівнів оцінювання: оперативний параметричний, гідродинамічний, продуктивний, прогностичний і техніко-економічний, що забезпечує узгодження короточасних змін параметрів із довготривалим ефектом відновлення продуктивності свердловин [78, 79, 85, 94, 98, 99]. Як впливає з табл. 1.8, сучасні підходи до оцінювання ефективності імпульсного впливу еволюціонують від простого порівняння показників після оброблення до комплексних багаторівневих систем діагностики та аналізу.

Таблиця 1.8 – Групи критеріїв оцінювання ефективності імпульсного впливу та їх інформаційна база. Джерело: складено автором за [78, 79, 85, 94, 98, 99]

Група критеріїв	Типові показники	Джерело даних	Основна функція
Параметри імпульсного впливу	Амплітуда, тривалість, частота, енергія	Сенсорні сигнали системи впливу	Контроль виконання режиму
Реакція пласта	Тисковий відгук, похідна тиску, затухання, wave-response features	Глибинні / поверхневі датчики, РТА	Оперативне оцінювання дії
Стан приви́бійної зони	Skin, flow efficiency, permeability indicators	РТА, well tests, data-driven estimation	Діагностування змін ПЗП
Результат стимулювання	PI, дебіт, injectivity, приріст видобутку	Промислові дані експлуатації	Підсумкова технологічна оцінка
Інтегральна доцільність	Економічний ефект, питомі витрати, стійкість ефекту	Комплекс технічних і економічних даних	Прийняття виробничого рішення

Саме тому найбільш перспективним є підхід, у межах якого первинні вимірювальні сигнали використовуються не лише для фіксації факту дії, а й для

побудови кількісної оцінки реакції пласта, яка надалі трансформується у діагностичне рішення щодо стану привибійної зони та доцільності зміни режимів впливу. Логіку такого переходу узагальнено на рис. 1.12 [80, 83, 86, 98, 99].



Рисунок 1.12 – Багатокритеріальна схема інтегрального оцінювання ефективності імпульсного впливу. Джерело: складено автором за [80, 83, 86, 98, 99]

Отже, проведений аналіз свідчить, що в оцінюванні ефективності імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин сформувалися чотири ключові тенденції: перехід до безперервних та багаторазово повторюваних у часі спостережень; розширення ролі скін-коефіцієнта та інших показників стану привибійної зони; застосування методів, заснованих на обробленні експериментальних даних і ймовірнісному аналізі; а також інтеграція технічної та економічної оцінки. Водночас наявні підходи залишаються недостатньо орієнтованими на спеціалізовані системи адаптивного імпульсного впливу, у яких необхідно одночасно враховувати параметри імпульсу, сигнали

динамічної реакції пласта та результати їх автоматизованого аналізу.

У цьому контексті особливо перспективним є використання п'єзоелектричних датчиків у складі ІВС контролю динамічних процесів у свердловинах, оскільки вони забезпечують високу чутливість, широкий частотний діапазон та можливість реєстрації швидкоплинних імпульсних змін тиску і механічних коливань. Це дозволяє отримувати інформативні сигнали про стан приви́бійної зони в реальному часі та підвищує достовірність оцінювання ефективності імпульсного впливу [78–99].

Саме це невирішене завдання дисертаційного дослідження визначає наукову доцільність подальшого розроблення методів, алгоритмів та ІВС контролю, що є предметом наступних розділів дисертації.

1.5. Особливості використання п'єзоелектричних датчиків у системах контролю динамічних процесів у свердловинах

П'єзоелектричні датчики у системах контролю динамічних процесів у свердловинах займають ключове місце, оскільки найбільш повно відповідають вимогам реєстрації короткочасних, швидкоплинних і високочастотних збурень, що виникають під час імпульсного впливу, поширення хвиль тиску, вібрацій і гідроударів у приви́бійній зоні. На відміну від засобів, орієнтованих на повільнозмінні режими, вони забезпечують безпосереднє перетворення механічної дії в електричний сигнал із малою інерційністю, широким частотним діапазоном і високою чутливістю, що визначає їх перспективність для побудови інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів адаптивного імпульсного впливу [100–103].

Фізичною основою роботи таких датчиків є прямий п'єзоелектричний ефект, за якого деформація чутливого елемента спричиняє виникнення електричного заряду або напруги, що дозволяє оперативно перетворювати механічні імпульси, тискові фронти та акустичні хвилі на сигнал, придатний для підсилення, фільтрації та подальшого цифрового оброблення. Поєднання високої швидкодії, компактності, пасивності та широкосмуговості забезпечує переваги

таких датчиків у задачах моніторингу динамічних процесів [100–103].

З методичного погляду доцільно розрізнити пасивний і активний режими їх застосування: у пасивному режимі датчики реєструють динамічну реакцію середовища (акустичну емісію, імпульсні навантаження, хвилі тиску), тоді як в активному можуть виступати джерелами керованих хвиль із подальшим аналізом переданих і відбитих сигналів. Таке розмежування визначає підходи до побудови систем контролю, що ілюструється на рис. 1.13 та узагальнюється в табл. 1.9 [100, 103, 104].

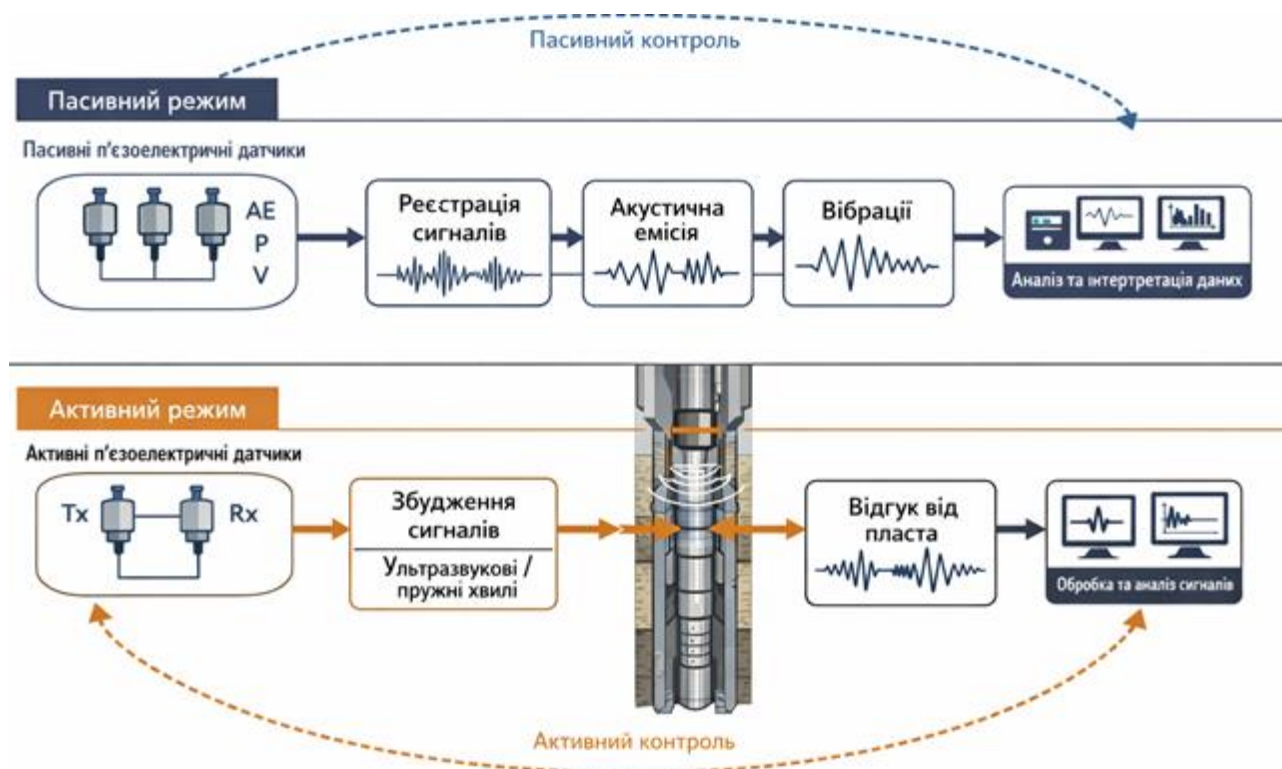


Рисунок 1.13 – Узагальнена схема використання п'єзоелектричних датчиків у пасивному та активному режимах контролю динамічних процесів у свердловинах. Джерело: складено автором за [100, 103, 104] з графікою, побудованою із залученням великої мовної моделі ChatGPT 5.5.

Особливості свердловинного середовища визначають підвищені вимоги до сенсорного елемента, оскільки поєднання високого тиску, температурних градієнтів, вібраційних і ударних навантажень, агресивних середовищ та значної довжини ліній передавання сигналу обмежує застосування традиційних рішень.

Таблиця 1.9 – Порівняння сенсорних рішень для контролю динамічних процесів у свердловинах. Джерело: складено автором за [100, 103, 104].

Тип сенсора	Чутливість до швидкоплинних подій	Придатність до високих температур	Автономність, саможивлення	Простота інтеграції в свердловинну систему	Загальна придатність для контролю імпульсного впливу
П'єзоелектричний датчик	Дуже висока	Висока за належного вибору матеріалу	Середня	Висока	Дуже висока
Акселерометр	Висока	Висока	Низька–середня	Висока	Висока, але з підвищеним шумовим фоном
Геофон	Висока в нижчому частотному діапазоні	Середня	Низька	Середня	Добра для хвильового контролю, обмежена для локальних ударів
Трибоелектричний сенсор	Середня	Залежить від конструкції	Висока	Середня	Перспективний для автономного вібраційного контролю
Волоконно-оптичний датчик	Залежить від схеми	Дуже висока	Низька	Складніша	Висока, але переважно для тиску, температури та розподілених вимірювань

Аналіз сучасних засобів моніторингу показує, що датчики на основі п'єзоелектричних матеріалів зберігають ефективність у таких умовах завдяки здатності одночасно забезпечувати високу чутливість до короточасних подій і стійкість до зовнішніх впливів [101, 102].

Ключовою особливістю їх застосування є орієнтація на контроль саме динамічних процесів, зокрема імпульсів тиску, ударних навантажень, хвильових відгуків пласта та початкових ознак нестійкості системи «обладнання–рідина–

пласт». Це зумовлює доцільність використання таких датчиків у системах адаптивного імпульсного впливу, де визначальними є швидкодія вимірювального каналу та інформативність короткочасних сигналів [100, 103, 108].

Вибір матеріалу сенсора визначає ефективність вимірювання в умовах свердловин, де поєднуються високі температури, тиск і динамічні навантаження. П'єзоелектричні кераміки на основі титанату-цирконату свинцю (сорту PZT) забезпечують високий рівень сигналу, проте потребують врахування температурної стабільності та механічної міцності, тоді як полімерні матеріали, попри гнучкість, є менш придатними через підвищену чутливість до температурних впливів. Новітні матеріали на основі нітриду алюмінію, нітриду галію та карбіду кремнію орієнтовані на роботу в екстремальних умовах, але часто поступаються за амплітудою сигналу класичним п'єзокерамічним рішенням [101, 108–111].

Сучасні дослідження [109, 110] демонструють можливість створення високотемпературних сенсорів із використанням карбіду кремнію, нітриду алюмінію та нановолоконних структур, здатних працювати за температур понад 500 °C зі збереженням стабільного сигналу. Водночас для задач контролю динамічних процесів у свердловинах ключовим є компроміс між чутливістю, стабільністю та механічною надійністю. Узагальнення наведених результатів показує, що цим критеріям найбільш повно відповідають п'єзокераміці типу PZT-8, які поєднують достатню термостійкість, високу механічну міцність і стабільні електромеханічні характеристики, що обґрунтовує їх вибір для побудови сенсорів ІВС у задачах дослідження динамічних процесів у свердловинах [101, 109, 110].

Слід підкреслити, що високотемпературна стабільність у п'єзоелектричних датчиках є не лише матеріальною, а й метрологічною проблемою. У роботі [101] показано, що для динамічних п'єзоелектричних датчиків вирішальними стають не тільки коефіцієнти перетворення, а й температурна залежність чутливості, дрейф нуля, вплив теплового удару та стабільність електродного контакту. Це означає, що в системах контролю імпульсного впливу датчик не може оцінюватися

виключно за чутливістю; не менш важливими є повторюваність сигналу, стійкість до циклічних навантажень та збереження форми відгуку при зміні температурно-тискових умов [101, 110].

Одним із показових прикладів використання п'єзоелектричних принципів у динамічному контролі тиску є датчики для реєстрації ударно-хвильових процесів. Так, у роботі [108] Y. Li та співавторів запропоновано конструкцію датчика з компенсацією впливу прискорення за рахунок раціонального компонування чутливих елементів і мас, що має принципове значення для свердловинних систем, де одночасно діють тиск, прискорення та вібрація, і без їх розділення сигнал втрачає однозначність. При цьому, проблема перехресної чутливості є визначальною для таких застосувань, оскільки вихідний сигнал формується як суперпозиція кількох впливів, що обумовлює необхідність конструктивного розділення компонент або використання багатоканальних вимірювальних схем зі спеціалізацією окремих елементів [104, 108, 112].

П'єзоелектричні датчики є особливо перспективними для контролю процесів руйнування та перебудови структури гірських порід, оскільки високочастотні сигнали акустичної емісії дозволяють фіксувати зародження мікротріщин і перерозподіл напружень значно раніше, ніж це можливо традиційними методами, що обґрунтовує їх використання, як пріоритетного інструменту високороздільного моніторингу динамічних процесів у привибійній зоні [104–107].

Подальший розвиток підходу пов'язаний із багатоконпонентними датчиками. Наприклад, у роботі [104] реалізовано трикомпонентний п'єзоелектричний датчик, який забезпечує реєстрацію коливань у трьох напрямках і дає змогу відокремлювати типи хвиль за поляризаційними ознаками, що відкриває можливість просторово-орієнтованого аналізу хвильового відгуку пласта.

У дослідженнях [105, 106] показано, що моніторинг акустичної емісії безпосередньо в масиві під час гідророзриву дозволяє виявляти мікротріщини у діапазоні 1–200 кГц, тобто там, де традиційний сейсмічний контроль втрачає

роздільну здатність. Проте, ефективність таких вимірювань суттєво залежить від розташування датчиків, способу їх кріплення та відстані до джерела збурення.

Промислово важливим є досвід багатосенсорного контролю стимулювальних операцій, де, за даними [106, 107], використовуються комплекси датчиків, що поєднують акустико-емісійні, сейсмічні та тискові вимірювання разом з волоконно-оптичними лініями. У таких системах п'єзоелектричні датчики виконують ключову роль високочутливих приймачів локальної динаміки, тоді як інші канали забезпечують узагальнений опис процесу, що підтверджує доцільність їх використання.

Аналогічні підходи застосовуються у задачах свердловинного моніторингу вібраційних процесів під час буріння, де необхідно виявляти короткочасні імпульсні режими, відокремлювати корисний сигнал від завад та пов'язувати його зі станом середовища. Роботи [112–114, 118] демонструють, що багатоканальна реєстрація вібраційних і сейсмічних сигналів є стандартом для високочастотного контролю. При цьому результати досліджень вказують на переваги п'єзоелектричних датчиків порівняно з іншими типами: вони забезпечують вищу чутливість до імпульсних і хвильових подій, кращу локалізацію слабких порушень та можливість мініатюрного конструктивного виконання з реалізацією як пасивного, так і активного режимів роботи, що робить їх найбільш доцільними для задач контролю імпульсного впливу у привибійній зоні [104, 105, 112–114, 118].

Важливою сучасною тенденцією є поява саможивлених датчиків вібрації на основі трибоелектричного ефекту, що відображає загальний запит на автономність та енергоефективність свердловинних вимірювальних систем. Дослідження [111, 115] підтверджують можливість вимірювання параметрів коливань у свердловинних умовах із прийнятною похибкою що зумовлює необхідність інтеграції автономних або малопотужних рішень у п'єзоелектричних системах.

Для нафтогазової галузі суттєвим є розвиток ультразвукових каротажних перетворювачів, у яких п'єзоелектричний матеріал виконує як випромінювальну,

так і приймальну функцію. Зокрема, в роботі [116] показано, що п'єзокомпозитний перетворювач забезпечує ширшу смугу пропускання, вищу чутливість і формування коротких імпульсних сигналів великої амплітуди порівняно з традиційними рішеннями, що підтверджує перспективність використання п'єзоелектричних композитів для реєстрації швидкоплинних хвильових процесів у свердловині.

Дослідження проведені в роботі [117] демонструють ефективність переходу від аналізу первинного сигналу до енергетичних показників, які корелюють зі змінами проникності та пошкодження породи. Такий підхід є методично доцільним для оцінювання реакції привибійної зони на імпульсний вплив, оскільки дозволяє безпосередньо пов'язати вимірювані параметри з фізичним станом середовища.

Отже, ефективність п'єзоелектричних датчиків у системах контролю динамічних процесів визначається не лише властивостями матеріалу, а й структурою вимірювального каналу, включаючи механічну передачу навантаження, електричне узгодження, підсилення, екранування та захист від паразитних впливів [100, 101, 108, 109]. Оцінювання їх придатності доцільно здійснювати за сукупністю характеристик: чутливістю, частотними властивостями, рівнем шуму, температурною стабільністю та відтворюваністю імпульсного відгуку [101, 108–110, 116]. У порівнянні з іншими сенсорними рішеннями п'єзоелектричні датчики поступаються у квазістатичних вимірюваннях, проте мають визначальну перевагу в реєстрації височастотних і ударно-хвильових процесів, що підтверджує їх ключову роль у задачах контролю динамічних процесів у свердловинах [104, 105, 111–115, 118].

Отже, проведений аналіз показує, що п'єзоелектричні датчики мають низку принципових переваг саме для систем контролю динамічних процесів у свердловинах: високу чутливість до ударних і хвильових подій, швидкий відгук, можливість багатокompонентної реєстрації, придатність до акустико-емісійного моніторингу, перспективність для активних хвильових методів і сумісність із багатосенсорними архітектурами. Водночас їх ефективне використання потребує цілеспрямованого

розв'язання задач температурної стабілізації, компенсації паразитних прискорень, раціонального конструктивного виконання і спеціалізованого оброблення сигналів. Саме з урахуванням цих особливостей далі слід розглянути розроблення багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, як базового елемента ІВС контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин [100–118].

1.6. Обґрунтування шляхів підвищення достовірності вимірювання, відтворюваності результатів контролю та точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу

Проведений аналіз показав, що зниження продуктивності нафтових свердловин має багатофакторну природу, а ефективність імпульсного впливу на привибійну зону визначається не лише енергією збурення, а й якістю контролю параметрів процесу, повнотою реєстрації динамічної реакції пласта та обґрунтованістю інтерпретації сигналів. У зв'язку з цим, підвищення достовірності вимірювання, відтворюваності результатів і точності оцінювання ефективності доцільно розглядати як єдину науково-технічну задачу, що передбачає узгоджену роботу сенсорного, алгоритмічного та діагностичного контурів. Узагальнена логіка підходу наведена на рис. 1.14, а напрями його реалізації подані в табл. 1.10 [119, 125, 130, 132].



Рисунок 1.14 – Узагальнений контур підвищення достовірності та точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу. Джерело: складено автором за [119, 125, 130, 132].

Таблиця 1.10 – Основні напрями підвищення достовірності вимірювання, відтворюваності результатів контролю та точності оцінювання ефективності імпульсного впливу. Джерело: складено автором за [119, 125, 130, 132].

Напрямок	Зміст	Очікуваний ефект
Багаторівневий контроль	Одноточасна реєстрація параметрів імпульсу, передавання енергії, реакції пласта і продуктивного ефекту	Підвищення повноти інформації та причинно-наслідкової інтерпретації
Динамічне калібрування	Визначення частотної характеристики, фазового зсуву, температурного дрейфу, невизначеності	Підвищення достовірності вимірювання швидкоплинних процесів
Багатопараметричний датчик	Реєстрація кількох компонент динамічної реакції пласта одним вимірювальним вузлом	Зростання інформативності контролю
Багатокритеріальне оцінювання	Використання параметрів імпульсу, реакції пласта, стану пласту і продуктивності	Підвищення точності оцінювання ефективності
Злиття даних та ШІ-аналіз	Поєднання сенсорних сигналів, моделей та інтелектуальних алгоритмів	Зменшення впливу шуму, пропусків і суб'єктивності
Замкнений контур адаптації	Корекція режимів впливу за даними вимірювання та оцінювання	Підвищення результативності технологічного процесу

Першим ключовим напрямом є перехід від локального контролю до багаторівневої системи вимірювання, що охоплює параметри імпульсу, передавання енергії, реакцію пласта та ознаки відновлення продуктивності [125, 129, 133, 134].

Другим напрямом є удосконалення метрологічного забезпечення динамічних вимірювань, що передбачає врахування частотних і фазових характеристик, температурних впливів та невизначеності. Достовірність досягається поєднанням статичної і динамічної калібровки та перевіркою характеристик вимірювального каналу (табл. 1.11) [119–124].

Третім напрямом є розроблення багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з високою швидкодією, чутливістю та стійкістю до жорстких умов, який забезпечує реєстрацію не лише тиску, а й динамічних компонент реакції пласта [126, 127].

Таблиця 1.11 – Основні джерела похибок і шляхи їх зменшення в системі контролю адаптивного імпульсного впливу. Джерело: складено автором за [119–124].

Джерело похибки або нестабільності	Прояв у системі	Шлях зменшення
Недостатнє динамічне калібрування	Спотворення амплітуди та форми імпульсу	Статичне та динамічне калібрування
Температурний дрейф	Зміщення нуля, зміна чутливості	Температурна компенсація, термостабілізація
Вплив трубок і ліній передавання	Втрата смуги пропускання, фазовий зсув	Оптимізація геометрії каналу, корекція моделі
Перехресна чутливість	Змішування тиску, прискорення і вібрації	Конструктивне розділення каналів, алгоритмічна декомпозиція
Шум, пропуски, асинхронність даних	Нестійкість інформативних ознак	Попередня фільтрація, синхронізація, злиття даних
Суб'єктивність інтерпретації	Нестабільність оцінювання ефективності	Формалізовані критерії, автоматизовані алгоритми

Четвертим напрямом є підвищення відтворюваності результатів шляхом стандартизації експериментів, синхронізації каналів, контролю дрейфу та перевірки стабільності інформативних параметрів [121–124].

П'ятим напрямом є впровадження багатокритеріального оцінювання ефективності за ієрархією показників імпульсу, реакції пласта та продуктивності, що забезпечує обґрунтований діагностичний висновок, рис. 1.15 [128]–[133].

Шостим напрямом є використання багатосенсорного об'єднання даних і прогнозних алгоритмів для оброблення сигналів у складних умовах та виділення інформативних параметрів [123, 128, 131, 132].

Сьомим напрямом є формування замкненого контуру адаптації, у якому результати вимірювань використовуються для керування режимами імпульсного впливу [125, 130, 131, 134].

Восьмим, завершальним напрямом є поетапна експериментальна перевірка системи на рівнях «датчик – канал – модель – система – промислова апробація» з оцінюванням характеристик і підтвердженням зв'язку параметрів із результатом [121, 122, 129, 133, 134].



Рисунок 1.15 – Ієрархія критеріїв оцінювання ефективності імпульсного впливу. Джерело: складено автором за [121–134].

Отже, за результатами аналізу встановлено, що підвищення достовірності вимірювань, відтворюваності результатів і точності оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу забезпечується комплексним поєднанням взаємопов'язаних підходів: динамічного калібрування з оцінюванням невизначеності, застосування багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, інтеграції вимірювальних і модельних даних, використання багатокритеріального оцінювання та реалізації замкнутого контуру керування режимами впливу.

1.7. Висновки до розділу 1

Аналіз сучасних літературних джерел показав, що зниження продуктивності нафтових свердловин зумовлене погіршенням фільтраційно-ємнісних властивостей привибійної зони внаслідок кольматації, набухання глин, накопичення органічних відкладів і водяної блокади. Це обґрунтовує необхідність застосування спеціалізованих технологій впливу та засобів контролю їх ефективності. Встановлено, що серед методів інтенсифікації припливу вуглеводнів перспективними є адаптивні імпульсні технології, які забезпечують керовану дію на пласт і можливість зміни режимів відповідно до поточного стану свердловини.

Проаналізовано методи контролю параметрів імпульсного впливу та реєстрації реакції пласта, зокрема глибинні датчики тиску, волоконно-оптичні системи та методи аналізу перехідних процесів. Крім того, показано їх обмеженість щодо повного багатопараметричного контролю швидкоплинних динамічних явищ. Визначено, що оцінювання ефективності за дебітом, коефіцієнтом продуктивності, скін-індексом та перехідними характеристиками тиску при ізольованому застосуванні не забезпечує достатньої точності діагностування стану привибійної зони та прийняття рішень щодо корекції режимів впливу.

Обґрунтовано доцільність використання п'єзоелектричних датчиків як найбільш придатних для контролю динамічних процесів, за умови розроблення відповідного методичного, математичного та конструктивного забезпечення для роботи в складних свердловинних умовах. Показано, що підвищення достовірності та відтворюваності результатів досягається шляхом поєднання багатопараметричних вимірювань, динамічного калібрування, цифрового оброблення сигналів і багатокритеріального оцінювання.

Отже, актуальним є розроблення комплексного забезпечення для створення ІВС контролю параметрів і оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин, що забезпечить підвищення точності вимірювань, інтерпретації реакції пласта та діагностування її стану.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Кабінет Міністрів України. (2023, 21 квітня). Розпорядження № 373-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року». Урядовий портал. <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-enerhetychnoi-strategii-ukrainy-na-period-do-2050-roku-373r-210423>.
2. Halim, M. C., Amani, M., & Al-Jubouri, M. (2022). Minimizing Formation Damage in Drilling Operations: A Critical Point for Optimizing Productivity in Sandstone Reservoirs Intercalated with Clay. *Energies*, 15(1), 162. <https://doi.org/10.3390/en15010162>. ISSN 1996-1073.
3. Matkivskyi, S. V., & Matiishyn, L. I. (2023). Assessment of the influence of contamination of the bottomhole zone of the formation on the performance characteristics of production wells. *Precarpathian Bulletin of the Shevchenko Scientific Society*. Number, 18(68), 98–107. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2023-18\(68\)-98-107](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2023-18(68)-98-107). ISSN 2304-7399.
4. Prytula, M., Prytula, N., Pyanylo, Y., Prytula, Z., & Khymko, O. (2023). Revealing patterns in the influence of variable permeability of well bottomhole zones on the operational modes of underground gas storage facilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1(126)), 98–112. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292435>. ISSN 1729-3774 (print); 1729-4061 (online).
5. Kuper, I., & Mykhailyshyn, B. (2025). Research on the operation of a device for influencing the bottomhole zone of wells in depleted fields. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 25(1), 39–49. <https://doi.org/10.63341/pdogf/1.2025.39>. ISSN 1993-9973.
6. Soliman, M. Y., Rezaei, A., Khalaf, M., Gordon, P., & Cipolla, C. (2024). Pulse power plasma stimulation: A technique for waterless fracturing, enhancing the near wellbore permeability, and increasing the EUR of unconventional reservoirs. *Gas Science and Engineering*, 122, 205201. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.205201>. ISSN 2949-9097 (print); 2949-9089 (online).
7. Nguyen, S. T., El-Tayeb, M. E.-S., Adel Gabry, M., & Soliman, M. Y. (2025). Pulsed Power Plasma Stimulation: A comprehensive review and field insights.

- Energies, 18(13), 3334. <https://doi.org/10.3390/en18133334>. ISSN 1996-1073.
8. Chen, Y. J., Wang, H. Y., & Sharma, M. (2025). The benefits and challenges of well monitoring of Gulong shale oil. *Earth Energy Science*, 1(2), 120–122. <https://doi.org/10.1016/j.ees.2024.12.002>. ISSN 2950-1547.
 9. Li, L., Xie, M., Liu, W., Dai, J., Feng, S., Luo, D., Wang, K., Gao, Y., & Huang, R. (2024). A new productivity evaluation method for horizontal wells in offshore low-permeability reservoir based on modified theoretical model. *Processes*, 12(12), 2830. <https://doi.org/10.3390/pr12122830>. ISSN 2227-9717.
 10. Adeniyi, A. T. (2025). Evaluation of near wellbore damaged conditions with an injection-falloff tests during transient flow regime in clastic hydrocarbon reservoir. *Journal of Engineering Research*, 13(3), 2770–2776. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.06.021>. ISSN 2307-1877.
 11. Abdalla, K. A. M. H., Khattab, H., Tantawy, M., & Mohamed, I. S. (2024). Enhancing pressure transient analysis in reservoir characterization through deep learning neural networks. *Discover Applied Sciences*, 6, 473. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06089-5>. ISSN 3004-9261.
 12. Rossi, D. F., Costa, M. C. B. da, & Komati, K. S. (2026). Evaluation of automated pressure transient detection methods for efficient oil well management. *Geoenergy Science and Engineering*, 257(Part A), 214202. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214202>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
 13. Верховна Рада України. (2011, 8 вересня). Закон України № 3715-VI «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3715-17/print>.
 14. Кабінет Міністрів України. (2024, 5 липня). Постанова № 787 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня». <https://zakon.rada.gov.ua/go/787-2024-%D0%BF>.
 15. Верховна Рада України. (2001, 11 липня). Закон України № 2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14/print>.

16. Sultanova, A. V., & Mammadov, R. M. (2023). About impact of clogging phenomena on well productivity. *Nafta-Gaz*, 79(1), 20–27. <https://doi.org/10.18668/NG.2023.01.03>. ISSN 0867-8871 (print); 2300-6217 (online).
17. Iwaszczuk, N., Prytula, M., Prytula, N., Pyanylo, Y., & Iwaszczuk, A. (2022). Modeling of gas flows in underground gas storage facilities. *Energies*, 15(19), 7216. <https://doi.org/10.3390/en15197216>. ISSN 1996-1073.
18. Bellabiod, S., Deghmoum, A., Aris, A., & Karacali, O. (2022). An insight to formation damage evolution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109543. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109543>. ISSN 0920-4105.
19. Ibrahim, M. A., Jaafar, M. Z., Md Yusof, M. A., & Idris, A. K. (2022). A review on the effect of nanoparticle in drilling fluid on filtration and formation damage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 217, 110922. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110922>. ISSN 0920-4105.
20. Zhang, J., Guo, B., & Hussain, M. (2025). Use of pressure transient analysis method to assess fluid soaking in multi-fractured shale gas wells. *Energies*, 18(3), 549. <https://doi.org/10.3390/en18030549>. ISSN 1996-1073.
21. Juneghani, M. R. A., Moradi, S., Zavelaneh, M. R., Siavashi, J., & Sharifi, M. (2025). A comprehensive review of analytical solutions and advances in pressure transient analysis of conventional reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 15(5), 101–129. <https://doi.org/10.1007/s13202-025-01980-2>. ISSN 2190-0558 (print); 2190-0566 (online).
22. de Souza, M. J. M., Silva, A. H. M., Mendes, J. R. P., & Jaculli, M. A. (2024). Reliability of permanent downhole systems: Minimum sample and quality index. *Petroleum Research*, 9(3), 472–480. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.03.005>. ISSN 2096-2495.
23. Guo, Y., Mohamed, I., Zidane, A., Panchal, Y., Abou-Sayed, O., & Abou-Sayed, A. (2021). Automated pressure transient analysis: A cloud-based approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107627. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107627>. ISSN 0920-4105.

24. Dong, P., Chen, Z., Liao, X., & Yu, W. (2022). Application of deep learning on well-test interpretation for identifying pressure behavior and characterizing reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109264. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109264>. ISSN 0920-4105.
25. Fernandes, M. A., Gildin, E., & Sampaio, M. A. (2025). Machine learning-based virtual sensor for bottom-hole pressure estimation in petroleum wells. *Eng*, 6(11), 318. <https://doi.org/10.3390/eng6110318>. ISSN 2673-4117.
26. Agwu, O. E., Alatefi, S., Alkough, A., & Suppiah, R. R. (2025). Modelling the flowing bottom hole pressure of oil and gas wells using multivariate adaptive regression splines. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 15, 22. <https://doi.org/10.1007/s13202-025-01933-9>. ISSN 2190-0558 (print); 2190-0566 (online).
27. Ramy, C., Rîpeanu, R. G., Nassreddine, S., Tănase, M., Zouein, E. Y., Diniță, A., & Mureșan, C. C. (2025). Recent advances in stimulation techniques for unconventional oil reservoir and simulation of fluid dynamics using predictive model of flow production. *Processes*, 13(4), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr13041138>. ISSN 2227-9717.
28. Ramy, C., Rîpeanu, R. G., Nassreddine, S., Tănase, M., Zouein, E. Y., Diniță, A., Mureșan, C. C., & Mhanna, A. (2025). Advanced research on stimulating ultra-tight reservoirs: Combining nanoscale wettability, high-performance acidizing, and field validation. *Processes*, 13(7), 2153. <https://doi.org/10.3390/pr13072153>. ISSN 2227-9717.
29. Keihani Kamal, M., Mahdavi Kalatehno, J., Daneshfar, P., & Yousefmarzi, F. (2024). A comprehensive analysis of carbonate matrix acidizing using viscoelastic diverting acid system in a gas field. *Scientific Reports*, 14, 1499. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52104-5>. ISSN 2045-2322.
30. Mohammadi, S. (2024). Mechanistic analysis of matrix-acid treatment of carbonate formations: An experimental core flooding study. *Heliyon*, 10(3), e24936. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24936>. ISSN 2405-8440.
31. You, L. (2025). Development directions of formation damage evaluation and

- fracturing fluids in tight and shale oil reservoirs. *Petroleum*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2025.01.001>. ISSN 2405-6561.
32. Hamidi, H., Sharifi Haddad, A., Otumudia, E. W., Rafati, R., Mohammadian, E., Azdarpour, A., Pilcher, W. G., Fuehrmann, P. W., Sosa, L. R., Cota, N., García, D. C., Ibrahim, R. M., Damiev, M., & Tanujaya, E. (2021). Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results. *Ultrasonics*, 110, 106288. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106288>. ISSN 0041-624X.
 33. Qi, N., Liu, J., & Li, X. (2025). Research on shale acid fracturing reservoir simulation technology: A critical review. *Geoenergy Science and Engineering*, 257, 214157. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214157>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
 34. Sun, L., Fang, M., Fan, W., Li, H., & Li, L. (2024). Transient pressure performance analysis of hydraulically fractured horizontal well in tight oil reservoir. *Energies*, 17(11), 2556. <https://doi.org/10.3390/en17112556>. ISSN 1996-1073.
 35. Wang, Y., Xie, H., Gao, Y., Liu, Y., & Zhang, S. (2023). Evaluation of liquid production and water injection profiles of horizontal well by pressure-transient analysis: Field cases. *Energy & Fuels*, 37(24), 19075–19089. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c03748>. ISSN 0887-0624.
 36. Slidenko, V. M., But, V. O., & Novykov, A. O. (2025). Аналіз ефективності функціонування адаптивної імпульсної системи методом стохастичних характеристик. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 1, 72–78. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-72-78>.
 37. Сліденко, В.М., & Бут В.О. (2024). Електрогідравлічна імпульсна система впливу на привибійну зону нафтової свердловини. XLI International scientific and practical conference «Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential» (October 2-4, 2024) Toronto, Canada. International Scientific Unity, 2024. – p. 64-66. <https://doi.org/10.70286/ISU-02.10.2024>. ISBN 978-617-8427-31-3.
 38. Volovetskyi, V., Doroshenko, Y., Karpash, O., Shchyrba, O., Matkivskyi, S.,

- Ivanov, O., & Protsiuk, H. (2022). Experimental studies of efficient wells completion in depleted gas condensate fields by using foams. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*, 72(2), 219–238. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0031>. ISSN 0039-2472 (print); 2450-5471 (online).
39. Khalaf, M., Soliman, M., Farouq-Ali, S. M., Cipolla, C., & Dusterhoft, R. (2024). Experimental study on pulsed plasma stimulation and matching with simulation work. *Applied Sciences*, 14(11), 4752. <https://doi.org/10.3390/app14114752>. ISSN 2076-3417.
 40. Rezaei, A., Siddiqui, F., Callen, N., Gordon, P., House, W., & Soliman, M. Y. (2020). Pulsed power plasma to enhance near wellbore permeability and improve well performance. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/199753-MS>.
 41. Maddirala, R., et al. (2024). Investigating the impact of pulsed plasma-based shockwave technology on the characteristics of Indian crude oil. *Geoenergy Science and Engineering*, 233, 212531. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212531>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
 42. Rudyk, S., Taura, U., & Al-Jahwary, M. (2022). Enhancing oil recovery by electric current impulses well treatment: A case of marginal field from Oman. *Fuel*, 314, 123115. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123115>. ISSN 0016-2361.
 43. Zhang, D., et al. (2025). A review of electrically enhanced oil recovery (EOR): Mechanism, influencing factors and field application effects. *ACS Omega*, 10(50), 61096–61123. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c08342>. ISSN 2470-1343.
 44. Vahdanikia, N., Divandari, H., Hemmati-Sarapardeh, A., Nait Amar, M., Schaffie, M., & Ranjbar, M. (2020). Integrating new emerging technologies for enhanced oil recovery: Ultrasonic, microorganism, and emulsion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 192, 107229. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107229>. ISSN 0920-4105.
 45. Otumudia, E., Hamidi, H., Jadhawar, P., & Wu, K. (2022). The utilization of ultrasound for improving oil recovery and formation damage remediation in petroleum reservoirs: Review of most recent researches. *Energies*, 15(13), 4906.

<https://doi.org/10.3390/en15134906>. ISSN 1996-1073.

46. Agi, A., Junin, R., Jaafar, M. Z., Sidek, M. A., Yakasai, F., Gbadamosi, A., & Oseh, J. (2022). Laboratory evaluation to field application of ultrasound: A state-of-the-art review on the effect of ultrasonication on enhanced oil recovery mechanisms. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 110, 100–119. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.03.030>. ISSN 1226-086X (print); 1876-794X (online).
47. Mierez, J., AlTammar, M. J., Alruwaili, K. M., & Alfaraj, R. T. (2024). Recent advances of ultrasound applications in the oil and gas industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 103, 106767. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106767>. ISSN 1350-4177.
48. Myltykbayeva, Z., Mussabayeva, B., Ongarbayev, Y., Imanbayev, Y., & Mukhtaly, D. (2024). Ultrasonic technology for hydrocarbon raw recovery and processing. *Processes*, 12(10), 2162. <https://doi.org/10.3390/pr12102162>. ISSN 2227-9717.
49. Riabokon, E., Gladkikh, E., Turbakov, M., Kozhevnikov, E., Guzev, M., & Yin, Q. (2023). The effect of ultrasonic alternating loads on restoration of permeability of sedimentary rocks during crude paraffinic oil flow. *Applied Sciences*, 13(21), 11821. <https://doi.org/10.3390/app132111821>. ISSN 2076-3417.
50. Riabokon, E., Gladkikh, E., Turbakov, M., Kozhevnikov, E., Guzev, M., Yin, Q., Wu, J., & Startsev, D. (2024). Acoustic vibration restoration of rock permeability while crude oil filtration containing paraffins. *Geoenergy Science and Engineering*, 238, 212865. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212865>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
51. Cao, Y., Zhou, J., & Xu, W. (2021). Experimental investigation on permeability recovery of damaged sandstone reservoirs using ultrasonic treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105494. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105494>. ISSN 1350-4177.
52. Parchei-Esfahani, M., Gee, B., & Gracie, R. (2020). Dynamic hydraulic stimulation and fracturing from a wellbore using pressure pulsing. *Engineering Fracture Mechanics*, 235, 107152. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107152>. ISSN

0013-7944.

53. Sun, Q., Retnanto, A., & Amani, M. (2020). Seismic vibration for improved oil recovery: A comprehensive review of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(29), 14756–14778. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.227>. ISSN 0360-3199.
54. Mwangupili, O., & Pu, C. (2025). Enhancing oil recovery in vertical heterogeneous sandstone reservoirs using low-frequency pulsating water injection. *Processes*, 13(2), 296. <https://doi.org/10.3390/pr13020296>. ISSN 2227-9717.
55. Wu, F., Zhang, Y., Jiang, Z., Liu, J., Luo, Y., Wang, P., Wang, C., & Zhang, G. (2026). Hydraulic pulsation for enhanced oil recovery in high-water-cut sandstone reservoirs. *Physics of Fluids*, 38(1), 012118. <https://doi.org/10.1063/5.0285411>. ISSN 1070-6631.
56. Shu, Y., Zhang, H., Qu, H., Wang, Y., & Jiao, G. (2025). Propagation and attenuation mechanism of pressure waves during pulse hydraulic fracturing in fractures. *Processes*, 13(11), 3513. <https://doi.org/10.3390/pr13113513>. ISSN 2227-9717.
57. Chen, B., Zhang, R., Sun, J., Zhou, Q., & Huang, J. (2025). Research on the mechanism and process technology of pressure-driven pressure reduction and injection increase in low-permeability oil reservoirs: A case study of the Sha II section of Daluhu Block in Shengli Oilfield. *Processes*, 13(10), 3332. <https://doi.org/10.3390/pr13103332>. ISSN 2227-9717.
58. Ren, Z., Li, X., Zhang, Y., & Chen, H. (2023). Exploring the mechanism of pulse hydraulic fracturing in tight reservoirs. *Processes*, 11(12), 3398. <https://doi.org/10.3390/pr11123398>. ISSN 2227-9717.
59. Awad, M. M., Eltaleb, I., & Soliman, M. Y. (2024). Experimental study of energy design optimization for underwater electrical shockwave for fracturing applications. *Geosciences*, 14(1), 24. <https://doi.org/10.3390/geosciences14010024>. ISSN 2076-3263.
60. Cui, B., Chen, L., Zhang, N., Shchipanov, A., Demyanov, V., & Rong, C. (2023). Review of Different Methods for Identification of Transients in Pressure

- Measurements by Permanent Downhole Gauges Installed in Wells. *Energies*, 16(4), 1689. <https://doi.org/10.3390/en16041689>. ISSN 0263-2241.
61. Li, J., Li, M., Fan, X., Wang, S., & Zhou, Y. (2022). Pressure transient analysis for hydraulically fractured wells with changing conductivity in stratified reservoirs: Case study in Xinjiang Oilfield. *ACS Omega*, 7(34), 30626–30638. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03573>. ISSN 2470-1343.
 62. Cui, B., Shchipanov, A., Demyanov, V., Zhang, N., & Rong, C. (2026). New transient identification methods for automated pre-processing of pressure measurements with permanent well gauges. *Geoenergy Science and Engineering*, 257, 214203. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214203>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
 63. Aminzadeh, F., & Das, V. (2022). Machine learning and data analytics for reservoir characterization and production forecasting. *Energies*, 15(3), 804. <https://doi.org/10.3390/en15030804>. ISSN 1996-1073.
 64. Abdulkadhim, S. T., Al-Shamma, A., & Al-Jawad, M. S. (2023). A review on pressure transient analysis in multilayer reservoirs. *Iraqi Geological Journal*, 56(1C), 100–113. <https://doi.org/10.46717/igj.56.1C.8ms-2023-3-17>. ISSN 2414-6064.
 65. Paulo, P. H. C., Silva, J. L., & Secchi, A. R. (2024). System identification techniques for soft sensors and digital twins in industrial processes. *IFAC-PapersOnLine*, 58(14), 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.365>. ISSN 2405-8963.
 66. Ebohon, O. J., & Li, H. (2023). Reliability assessment of downhole monitoring systems under harsh oilfield conditions. *Sensors*, 23(15), 6762. <https://doi.org/10.3390/s23156762>. ISSN 1424-8220.
 67. Bellarby, J. (2021). Well integrity monitoring in unconventional reservoirs: Advances and challenges. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104203>. ISSN 1875-5100.
 68. Saw, J., Zhu, X., Luo, L., Correa, J., Soga, K., & Ajo-Franklin, J. (2025). Distributed Fiber Optic Sensing for in-well hydraulic fracture monitoring. *Geoenergy Science and Engineering*, 250, 213792. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213792>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).

69. You, S., Feng, G., Qian, X., Zhao, Y., & Wang, J. (2025). Distributed Fiber Optic Sensing for Fracture Geometry Inversion Using All Time Steps Data. *Sensors*, 25(14), 4290. <https://doi.org/10.3390/s25144290>. ISSN 1424-8220.
70. He, X., Xie, S., Gu, L., Liu, F., Zhang, M., & Lu, H. (2022). High-resolution quasi-distributed temperature and pressure sensing system for deep-sea reservoir monitoring. *Measurement*, 199, 111568. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111568>. ISSN 0263-2241.
71. Wang, Y., Chen, B., Wu, G., Xue, C., & Gao, L. (2025). Fiber-Optic Pressure Sensors: Recent Advances in Sensing Mechanisms, Fabrication Technologies, and Multidisciplinary Applications. *Sensors*, 25(20), 6336. <https://doi.org/10.3390/s25206336>. ISSN 1424-8220.
72. Liu, Q., Wang, Y., Zhao, F., Zheng, C., & Xie, J. (2025). A Review of the Research Progress of Sensor Monitoring Technology in Harsh Engineering Environments. *Sensors*, 25(20), 6308. <https://doi.org/10.3390/s25206308>. ISSN 1424-8220.
73. Li, X., Yao, Z., Zhang, T., & Chang, Z. (2025). Sensing While Drilling and Intelligent Monitoring Technology: Research Progress and Application Prospects. *Sensors*, 25(20), 6368. <https://doi.org/10.3390/s25206368>. ISSN 1424-8220.
74. Mangi, M. A., et al. (2025). Applications of piezoelectric-based sensors, actuators, and energy harvesters. *Results in Engineering*, 26, 103948. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103948>. ISSN 2590-1230.
75. Hu, X., Su, D., & Qiao, X. (2024). Diaphragm-Structured Fiber-Optic Pressure Sensors for Oil Downhole Applications. *IEEE Sensors Journal*, 24, 14270–14278. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3376085>. ISSN 1530-437X (print); 1558-1748 (online).
76. Liu, Z., Cheng, J., Li, J., Li, J., Zhao, L., Zheng, Z., Huang, P., & Li, H. (2025). Fiber Optic Fabry-Perot Interferometer Pressure Sensors for Oil Well. *Sensors*, 25(20), 6297. <https://doi.org/10.3390/s25206297>. ISSN 1424-8220.
77. Wang, Y., Zhang, F., Zhao, Q., & Che, C. (2021). Real-time monitoring of pressure and temperature of oil well using a carbon-coated and bellow-packaged optical fiber sensor. *Optical Fiber Technology*, 67, 102703.

<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102703>. ISSN 1068-5200.

78. Houze, O., Viturat, D., Fjaere, O. S., & Kikani, J. (2020). Dynamic data analysis for well performance evaluation: Modern workflows and uncertainty control. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 23(4), 1330–1346. <https://doi.org/10.2118/200542-PA>. ISSN 1094-6470.
79. Shchipanov, A., Kollbotn, L., & Namazova, G. (2023). PTA-metrics for time-lapse analysis of well performance. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13, 1591–1609. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01631-4>. ISSN 2190-0558 (print); 2190-0566 (online).
80. Vinhas, T., Barros, P., Costa, M., & Komati, K. (2025). Signal-processing workflows for automated detection of shut-in periods in oil-well pressure data. *Geoenergy Science and Engineering*, 251, 213821. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213821>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
81. Kumar, A., & Sharma, M. M. (2021). Detection and classification of transients in downhole pressure data using machine learning. *SPE Journal*, 26(6), 3718–3733. <https://doi.org/10.2118/205361-PA>. ISSN 1086-055X (print); 1930-0220 (online).
82. Chen, W., Liu, H., Zhang, Y., & Wang, J. (2024). Automated pressure-rate synchronization for permanent downhole gauge interpretation. *Geoenergy Science and Engineering*, 240, 212926. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212926>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
83. Alakeely, A., Horne, R. N., & Stanford, U. (2021). Deep learning for pressure transient analysis of well test data. *SPE Journal*, 26(6), 3342–3357. <https://doi.org/10.2118/205489-PA>. ISSN 1086-055X (print); 1930-0220 (online).
84. Zhang, B., Muradov, K., & Dada, A. (2021). Principal component analysis-assisted selection of optimal denoising method for oil well transient data. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11, 509–530. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-01010-3>. ISSN 2190-0558 (print); 2190-0566 (online).
85. Kubota, L. K., & Gioria, R. S. (2022). Data-driven technique estimates skin factor

- and average pressure during oil-flowing periods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 219, 111061. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111061>. ISSN 0920-4105.
86. Kubota, L. K., Piccinini, R. B., Ranazzi, P. H., Sampaio, M. A., & Emerick, A. A. (2026). Ensemble-based assimilation of pressure transient test data. *SPE Journal*. <https://doi.org/10.2118/232818-PA>. ISSN 1086-055X (print); 1930-0220 (online).
 87. Guo, L.-W., Qu, S.-Y., Lei, Y.-Y., Kang, Z.-H., & Wang, S.-L. (2025). Evaluation of dynamic inter-well connectivity by using the state-variable-capacitance model. *Petroleum Science*, 22(8), 3380–3396. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2025.05.009>.
 88. Khashman, M. A., Shirazi, H., & Al-Dujaili, A. N. (2025). Comparative evaluation of productivity indicators in carbonate reservoir modeling by a case study for the Mishrif Formation in the Iraqi Buzurgan Oilfield. *Discover Geoscience*, 3, 17. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00118-5>. ISSN 3004-9121.
 89. Yuan, Z., Zhang, J., Liu, X., & Li, H. (2020). Productivity evaluation for long horizontal well test in deep-water faulted sandstone reservoir. *Geofluids*, 2020, 8845270. <https://doi.org/10.1155/2020/8845270>. ISSN 1468-8115 (print); 1468-8123 (online).
 90. Qiu, T., et al. (2025). Improved composite-productivity model considering acid fracturing in carbonate gas reservoirs. *Geoenergy Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214566>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
 91. Zhang, Xiaoling, Niu, Wenjuan, Liu, Daping, Sun, Chunliu, Cheng, Ziyun, Qu, Liangchao, Ye, Yu, Dai, Fangwen, Ding, Wei, Wang, Daigang, Reasonable Productivity Calculation and Sensitivity Analysis of Horizontal Wells in Overseas Carbonate Reservoir, *Geofluids*, 2025, 7105203, 14 pages, 2025. <https://doi.org/10.1155/gfl/7105203>
 92. Ma, K., et al. (2024). Oil well productivity capacity prediction based on support vector machine optimized by improved whale algorithm. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13202-024-01873-w>. ISSN 2190-0558 (print); 2190-0566 (online).

93. Yang, J., et al. (2024). Data-driven assessment of well stimulation in unconventional gas reservoirs. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82454-z>. ISSN 2045-2322.
94. Araújo, E. de A., Schwalbert, M. P., Leitão, R. J., & Aum, P. T. P. (2026). Influence of skin factor on oil recovery and economic performance in synthetic layered carbonate models based on pre-salt well profiles. *Energies*, 19(4), 1039. <https://doi.org/10.3390/en19041039>. ISSN 1996-1073.
95. Lu, X., Meng, L., Wang, H., Zhai, C., Zhou, T., Song, W., & Sun, J. (2025). Development and application of formation damage mitigation system for heavy oil reservoir. *Scientific Reports*, 15, 44119. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27843-8>. ISSN 2045-2322.
96. Shokry, A., Elkatatny, S., & Bageri, B. (2026). Formation damage assessment in carbonate reservoirs after removing hematite-water-based filter cake using HCl. *Scientific Reports*, 16(1), 192. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29161-5>. ISSN 2045-2322.
97. Lin, C., Kang, Y., He, H., Han, L., Xu, Q., Li, G., & Zhou, H. (2024). Geoscience-engineering integration-based formation damage control drill-in fluid (GEI-FDC-DIF): An essential technology for successful extraction of deep mid-high permeability sandstone reservoirs. *Geoenergy Science and Engineering*, 239, 212828. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212828>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
98. Wang, X., Chu, X., Xie, Y., He, Y., Xu, H., & Xu, S. (2025). Machine learning framework for evaluating fracturing-flooding effectiveness: From prediction to decision recommendations. *Fuel*, 381, 133299. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133299>. ISSN 0016-2361.
99. You, L., Xie, Y., Chen, Y., Kang, Y., Huang, C., & Zhai, H. (2025). Development directions of formation damage evaluation and fracturing fluids in tight and shale oil reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 52(4), 100182. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2025.02.004>. ISSN 1876-3804.
100. Jiao, P., Egbe, K.-J. I., Xie, Y., Nazar, A. M., & Alavi, A. H. (2020). Piezoelectric

- sensing techniques in structural health monitoring: A state-of-the-art review. *Sensors*, 20(13), 3730. <https://doi.org/10.3390/s20133730>. ISSN 1424-8220.
101. Huang, M., Wu, X., Zhao, L., Han, X., Xia, Y., Gao, Y., Cui, Z., Zhang, C., Yang, X., Qiao, Z., Li, Z., Han, F., Yang, P., & Jiang, Z. (2024). Small-size temperature/high-pressure integrated sensor via flip-chip method. *Microsystems & Nanoengineering*, 10, 104. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00723-3>. ISSN 2055-7434.
 102. Cai, Z.-W., Zhao, R.-L., Huang, Z.-M., Qiao, Y.-P., Yue, Q.-Y., Li, C.-L., Zhang, Q.-S., & Wen, H. (2025). Review: Research on the development trends of measurement while drilling (MWD) technology in oil and gas drilling. *Petroleum Science*. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2025.12.013>.
 103. Ghaderiaram, A., Schlangen, E., & Fotouhi, M. (2025). Structural fatigue life monitoring with piezoelectric-based sensors: Fundamentals, current advances, and future directions. *Sensors*, 25(2), 334. <https://doi.org/10.3390/s25020334>. ISSN 1424-8220.
 104. Wu, S., Gao, K., Qian, Y., Ge, H., Wang, X., & Li, T. (2024). Application of three-component acoustic emission sensor in rock mechanics experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 178, 105756. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105756>. ISSN 1365-1609.
 105. Zhan, T., Liu, Y., Feng, G., & Zang, A. (2022). Numerical study of in situ acoustic emission monitoring for small-scale hydraulic fracturing. *Journal of Geophysics and Engineering*, 19(4), 615–629. <https://doi.org/10.1093/jge/gxac036>. ISSN 1742-2132 (print); 1742-2140 (online).
 106. Zang, A., Niemz, P., von Specht, S., Zimmermann, G., Milkereit, C., Plenkers, K., & Klee, G. (2024). Comprehensive data set of in situ hydraulic stimulation experiments for geothermal purposes at the Äspö Hard Rock Laboratory (Sweden). *Earth System Science Data*, 16, 295–310. <https://doi.org/10.5194/essd-16-295-2024>. ISSN 1866-3508 (print); 1866-3516 (online).
 107. Gholizadeh Doonechaly, N., Bröcker, K., Hertrich, M., et al. (2025). Insights from subsurface monitoring for engineering of the stimulation pattern in fractured

- reservoirs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58, 8973–9000. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04525-5>. ISSN 0723-2632 (print); 1434-453X (online).
108. Li, Y., Zhang, X., Wang, H., et al. (2020). Research on piezoelectric pressure sensor for shock wave load measurement. *ISA Transactions*, 104, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.05.014>. ISSN 0019-0578.
 109. Moser, M., Pradhan, M., Emal, I. U. H., Bastia, S., Kaschel, M., Edelmann, K., Kallfass, I., & Burghartz, J. N. (2025). Low-power AlGa_N/Ga_N pressure sensors for harsh environmental conditions with high sensitivity. *Power Electronic Devices and Components*, 10, 100076. <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2025.100076>. ISSN 2772-3704.
 110. Jia, X., Weng, Z., Qiu, H., Xue, W., & Liao, N. (2025). A sensitive, robust, high temperature resistant flexible piezoelectric sensor based on SiC/AlN hybrid thin films. *Surfaces and Interfaces*, 64, 106419. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106419>. ISSN 2468-0230.
 111. Yin, R., Li, Y., Li, W., Gao, F., Chen, X., Li, T., Liang, J., Zhang, H., Gao, H., Li, P., et al. (2024). High-temperature flexible electric piezo/pyroelectric bifunctional sensor with excellent output performance based on thermal-cyclized electrospun PAN/Zn(Ac)₂ nanofiber mat. *Nano Energy*, 124, 109488. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109488>. ISSN 2211-2855.
 112. Wu, C., Huang, H., Yang, S., & Fan, C. (2021). Research on the self-powered downhole vibration sensor based on triboelectric nanogenerator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(22), 4884–4896. <https://doi.org/10.1177/09544062211013055>. ISSN 0954-4062.
 113. Song, S., Zhang, T., Wang, Z., Pei, R., Yan, S., & Chen, K. (2022). Full waveform vibration and shock measurement tool for measurement-while-drilling. *AIP Advances*, 12(8), 085114. <https://doi.org/10.1063/5.0090505>. ISSN 2158-3226.
 114. Li, Y., Wang, J., Shan, Y., Wang, C., & Hu, Y. (2021). Measurement and analysis of downhole drill string vibration signal. *Applied Sciences*, 11(23), 11484.

- <https://doi.org/10.3390/app112311484>. ISSN 2076-3417.
115. Zhang, J., & Wu, C. (2025). Research on a graded self-powered vibration sensor for geological drilling. *Micromachines*, 16(8), 921. <https://doi.org/10.3390/mi16080921>. ISSN 2072-666X.
 116. Wu, J. (2025). Research on 1-3 piezocomposite ultrasonic logging transducer. *Petroleum Drilling Techniques*, 53(6), 185–190. <https://doi.org/10.11911/syztjs.2025114>. ISSN 1001-0890.
 117. Liu, Z., Zhang, Y., Wang, J., et al. (2025). Piezoelectric characteristics of coal rock leakage under uniaxial compression. *Scientific Reports*, 15, Article 88269. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88269-w>. ISSN 2045-2322.
 118. Khanal, M., Duan, T., Duan, Y., Van De Werken, M., Shen, B., & Li, X. (2026). Application of seismic sensors in measurement while drilling. *Sensors*, 26(3), 944. <https://doi.org/10.3390/s26030944>. ISSN 1424-8220.
 119. Pereira, J. D. (2024). Pressure sensors: Working principles of static and dynamic calibration. *Sensors*, 24(2), 629. <https://doi.org/10.3390/s24020629>. ISSN 1424-8220.
 120. Jentzsch, M., Lechner, W., Woszidlo, R., Nayeri, C. N., & Paschereit, C. O. (2024). The dynamic response of a pressure transducer for measurements in water. *Experiments in Fluids*, 65, 125. <https://doi.org/10.1007/s00348-024-03854-5>.
 121. Cui, J., Zhang, S., & Jiang, Y. (2025). Design of a rapid and accurate calibration system for pressure sensors with minimized temperature variation. *Sensors*, 25(17), 5288. <https://doi.org/10.3390/s25175288>. ISSN 1424-8220.
 122. Takahara, D., Iizumi, H., & Kajikawa, H. (2026). Uncertainties of static pressure measurement and dynamic pressure generation in laser interferometry-based evaluation system. *Measurement*, 259, 119768. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119768>. ISSN 0263-2241.
 123. Harris, P., Østergaard, P. F., Tabandeh, S., Söderblom, H., Kok, G., van Dijk, M., Luo, Y., Pearce, J., Tucker, D., Vedurmudi, A. P., & Iturrate-Garcia, M. (2025). Measurement uncertainty evaluation for sensor network metrology. *Metrology*, 5(1), 3. <https://doi.org/10.3390/metrology5010003>. ISSN 0263-2241.
 124. Nicolae, R., Oancea, C.-D., Secareanu, R., & Lale, D. (2025). Performance and

- uncertainty analysis of digital vs. analog pressure scanners under static and dynamic conditions. *Eng*, 6(10), 263. <https://doi.org/10.3390/eng6100263>. ISSN 2673-4117.
125. Wang, H., Xu, R., Wang, B., Kong, M., Wang, H., Yang, Z., Zhang, F., Zhan, Y., Gao, L., Li, Q., Zhao, X., Liu, Z., & Liang, J. (2025). A ceramic-based ITON piezoresistive pressure sensor with wide temperature range (RT–900 °C) and broad frequency response. *Microsystems & Nanoengineering*, 11, 216. <https://doi.org/10.1038/s41378-025-01100-4>. ISSN 2055-7434.
 126. Han, X., Fu, H., Zhang, B., Zhang, J., Liu, C., Jiang, X., & Ren, T. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: Design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, 157. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>. ISSN 2055-7434.
 127. Zheng, K., Zhang, Y., Li, J., Chen, H., & Wang, X. (2025). A review on lead-free piezoelectric ceramic sensors for extreme environments. *Chemical Engineering Journal*, 512, 163212. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163212>. ISSN 1385-8947.
 128. Shen, Y., Wang, X., Xie, Y., Wang, W., Wang, S., & Zhang, R. (2025). A meta-learning fusion method for monitoring data prediction of oil wells. *Geoenergy Science and Engineering*, 251, 213895. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213895>. ISSN 2949-8929 (print); 2949-8910 (online).
 129. Wang, Y.-X., Li, M., Liao, M.-L., et al. (2025). Measurement while drilling of downhole engineering parameters by application of a newly designed micro-measurer. *Petroleum Science*, 22(7), 2905–2919. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2025.04.025>. ISSN 0263-2241.
 130. Yu, C., et al. (2025). Research and application of dynamic monitoring technology for fracture stimulation optimization in unconventional reservoirs of the Sichuan Basin using the wide-field electromagnetic method. *Processes*, 13(9), 3025. <https://doi.org/10.3390/pr13093025>. ISSN 2227-9717.
 131. Jia, L., Shi, G., Jiang, N., Hu, S., Li, G., & Zhang, Z. (2025). Artificial intelligence-based oil well condition diagnosis and production parameter optimization. *Processes*, 13(12), 3872. <https://doi.org/10.3390/pr13123872>. ISSN 2227-9717.
 132. Stojkovic, D., Shringarpure, M., Kim, Y., Alqassab, H., Rapstine, T., Fedele, J.,

- Fullmer, S., & Sain, R. (2024). Improving reservoir characterization and prediction via machine learning-driven integration of subseismic geologic concepts. *SPE Journal*, 29(4), 1967–1985. <https://doi.org/10.2118/218420-PA>. ISSN 1086-055X (print); 1930-0220 (online).
133. Johnson, C. W., & Donahue, C. M. (2025). Distributed acoustic sensing to estimate the permeability. *Geophysical Research Letters*, 52(18), e2025GL116944. <https://doi.org/10.1029/2025GL116944>. ISSN 0094-8276 (print); 1944-8007 (online).
134. Zang, X., Martinez, J. J., Yang, Y., Salalila, A., & Deng, Z. D. (2026). Acoustic data telemetry for real-time downhole monitoring: Results from a laboratory study. *Next Research*, 3, 101101. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101101>. ISSN 3050-4759.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАТИВНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ АДАПТИВНОГО ІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ

У розділі розроблено узагальнену математичну модель процесів вимірювального перетворення та формування інформативних сигналів у системі контролю адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтової свердловини. На відміну від підходів, у яких окремо розглядаються генерація імпульсу, реакція пласта або відгук сенсора, ці ланки подано як єдиний вимірювально-енергетичний контур, що охоплює джерело імпульсу, канал передавання, пластову систему, багатопараметричний п'єзоелектричний датчик і блок виділення інформативних ознак [1–5].

У підрозділах розділу послідовно побудовано модель динамічної реакції пласта, математичну модель вимірювального перетворення в багатопараметричному п'єзодатчику та обґрунтовано набір часових, спектральних і імпедансних параметрів, придатних для оцінювання ефективності імпульсного впливу [1, 3, 6–9]. У результаті сформовано завершений математичний апарат для кількісного оцінювання ефективності впливу, виділення інформативних ознак і подальшого переходу до прикладних рішень контролю та прийняття рішень.

2.1. Постановка задачі математичного моделювання процесів контролю параметрів адаптивного імпульсного впливу

Постановка задачі математичного моделювання для адаптивної імпульсної системи ґрунтувалася на тому, що предметом формалізованого опису є не окрема механічна або електрична величина, а сукупність процесів контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин. Ці процеси реалізуються із застосуванням інформаційно-вимірювальних засобів в умовах змінних технологічних режимів функціонування

свердловини. За таких умов імпульсний енергетичний вплив, що формується генератором, під час поширення вздовж гідродинамічного тракту зумовлює виникнення хвильових, деформаційних і фільтраційних реакцій у системі «стовбур свердловини – приви́бійна зона – пласт». Надалі ці реакції перетворюються багатопараметричним п'єзоелектричним датчиком у сукупність електричних сигналів, придатних для подальшого вимірювання, оброблення та інтерпретації. Виходячи з цього, математична модель має охоплювати чотири функціонально пов'язані підсистеми. До них належать: джерело імпульсного впливу, стовбур свердловини (як канал передавання енергії), пластова система (як динамічний об'єкт сприйняття і трансформації впливу), а також багатопараметричний п'єзоелектричний датчик (як засіб вимірювального перетворення інформативних параметрів реакції середовища) [1, 2].

З урахуванням попередніх авторських досліджень [1, 7] аргументованою є думка, що імпульсна система формується на поверхні, а передавання хвилі тиску до вибою відбувається через затрубний простір або трубопровідний контур, заповнений робочою рідиною. Такий підхід є принципово важливим для практики нафтовидобутку, оскільки дозволяє реалізовувати імпульсний енергетичний вплив без складних спускопідіймальних операцій і без тривалої зупинки видобутку вуглеводнів. Разом з тим, поверхнєве розташування генератора зумовлює необхідність точного опису процесів затухання, запізнення, відбиття та резонансного підсилення імпульсів у системі «генератор – свердловина – пласт». Саме на цю обставину прямо вказується у роботах [1, 2, 7].

На першому етапі постановки задачі математичного моделювання будемо розглядати об'єкт моделювання як квазіодновимірну розподілену систему за координатою z уздовж глибини свердловини i , водночас, як локально осесиметричну систему за радіальною координатою r у зоні вибою. Таке спрощення не порушує фізичного змісту задачі. Разом з тим воно дає змогу перейти від складної тривимірної картини процесу до системи диференціальних рівнянь із чітко заданими граничними умовами. Це, своєю чергою, створює основу для подальшого формалізованого опису імпульсного впливу та реакції пластового середовища.

Так, для опису керованої дії представимо вектор керувальних параметрів імпульсного впливу у вигляді:

$$u(t) = \{p_0, L_k, f_r, \tau_i, N, Q, \varphi\},$$

де p_0 – тиск робочої рідини перед спрацюванням імпульсного генератора; L_k – довжина імпульсної камери; f_r – частота повторення імпульсів; τ_i – характерна тривалість одного імпульсу; N – кількість імпульсів у серії; Q – витрати робочої рідини; φ – коефіцієнт енергетичної ефективності швидкого перекриття потоку. Саме ці параметри визначають енергетичний режим системи та характер формування хвилі тиску у свердловинному каналі.

Поряд із керувальними параметрами необхідно враховувати та поточний стан середовища. Тому вектор стану середовища $\theta(t)$ формуватимемо з параметрів, які в реальних умовах не є сталими, а саме:

$$\theta(t) = \{\rho, E, \mu, k, \varphi_p, S, T, \beta_g, M\},$$

де ρ – густина рідини, E – об'ємний модуль пружності, μ – динамічна в'язкість, k – проникність пласта, φ_p – пористість, S – скін-фактор, T – температура, β_g – газовміст, M – ступінь мінералізації [1, 3]. Введення цього вектора дає змогу врахувати зміну властивостей робочого та пластового середовища під час проходження імпульсної дії.

У межах цієї постановки вектор контрольованих вихідних величин має містити не лише безпосередньо вимірювані сигнали, а й інформативні ознаки, що визначаються на їх основі. Тому для подальшого аналізу будемо використовувати такі контрольовані вихідні величини: $p_e(t)$ – динамічний тиск на вибої; $\dot{p}_e(t)$ – швидкість зміни тиску; $a_e(t)$ – віброакустичне пришвидшення конструкції в околі датчика; $U_d(t)$ та $I_d(t)$ – напруга і струм на багатопараметричному датчику; $Z_d(j\omega)$ – його електричний імпеданс у частотній області; $f_{рез}$, Q_{ef} , Δf – параметри резонансного стану такого датчика. Такий розширений набір величин дає змогу перейти від звичайного контролю тиску до контролю форми, спектральної структури та енергетичного змісту імпульсної реакції [3, 8]. Основні позначення, прийняті в наведеній математичній постановці задачі, узагальнено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні позначення, що використовуються в математичній постановці задачі. Джерело: розроблено автором.

Позначення	Фізичний зміст
$u(t)$	Вектор керувальних параметрів системи: $p_0, L_k, f_r, \tau_i, N, Q, \varphi$
$\theta(t)$	Вектор змінних характеристик середовища: $\rho, E, \mu, k, \varphi_p, S, T, \beta_g, M$
$p_e(t)$	Динамічний тиск на вибої свердловини
$a_e(t)$	Віброакустичне прискорення в зоні встановлення датчика
$U_o(t), I_o(t)$	Часові реалізації вихідної напруги та струму датчика
$Z_o(j\omega)$	Комплексний електричний імпеданс датчика
g	Вектор інформативних ознак, виділених із сигналів
η	Інтегральний критерій ефективності імпульсного впливу

Далі, для коректного фізичного тлумачення цих вихідних величин, слід було уточнити спосіб подання пластової системи в моделі. Ключовим положенням при цьому є те, що пластова система в зоні фільтрації не розглядається як пасивне навантаження з одним еквівалентним коефіцієнтом поглинання. Навпаки, вона подається як середовище з комбінованою хвильово-фільтраційною реакцією. За такого підходу імпульсна дія одночасно породжує короточасні хвильові збурення, локальні механічні розуцільнення, мікродеформації порового каркаса, а також зміну ефективної проникності. Саме тому особливістю розроблюваної математичної моделі, яка вигідно відрізняє її від аналогічних моделей контролю імпульсного впливу на привибійну зону, є можливість урахування не лише миттєвої амплітуди тиску, а й часового профілю відгуку, частотної структури коливань і швидкості релаксації пластового середовища після серії імпульсів [1, 2, 7].

Постановка задачі для сенсорної підсистеми також не може обмежуватися стандартним підходом, за якого як основний елемент вимірювального каналу використовується одиничний п'єзоелектричний перетворювач. Це пояснюється тим, що під час контролю параметрів адаптивного імпульсного впливу необхідно реєструвати щонайменше три групи проявів: повільну зміну статичного тиску, короточасне імпульсне перевантаження та коливальний процес у власних і

вимушених резонансних діапазонах. За таких умов традиційний одноелементний датчик не забезпечує достатньої повноти вимірювальної інформації.

Саме тому в роботі запропоновано новий підхід до організації процесу вимірювального контролю таких проявів. Його основу становить розроблений автором багатопараметричний п'єзоелектричний датчик. Датчик складається з чотирьох кільцевих п'єзоелектричних елементів, які розташовані послідовно вздовж спільної осі симетрії. Між цими елементами розміщено три металеві мембрани. У сукупності вони утворюють спільний вимірювальний модуль циліндричної форми, рис. 2.1.

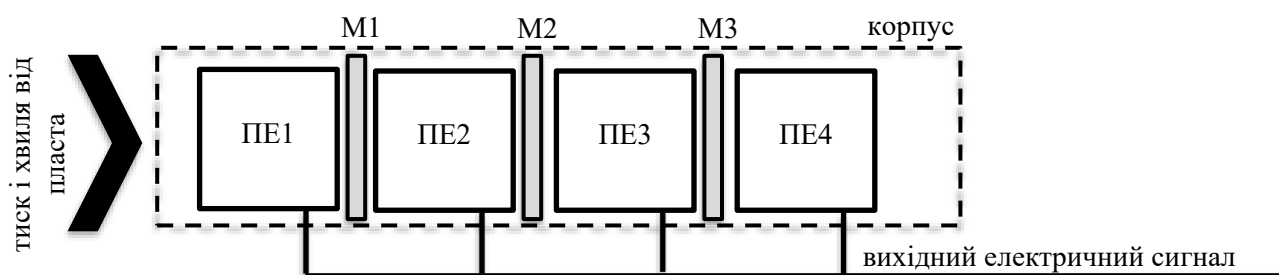


Рисунок 2.1 – Структурна схема багатопараметричного п'єзоелектричного датчика. Джерело: розроблено автором.

Перевага такої конструкції полягає в тому, що металеві мембрани виконують не лише роль передавальних елементів. Вони також працюють як частотно-вибіркові механічні ланки, які змінюють розподіл навантаження між п'єзоелектричними елементами. Унаслідок цього один і той самий сенсорний пакет формує багатомодовий електромеханічний відгук. Такий відгук придатний для виділення окремих інформативних ознак процесу. Саме цим запропонований датчик відрізняється від традиційних плоских або кільцевих перетворювачів, математичні моделі яких орієнтовані переважно на один домінуючий вид коливань і на одне вимірюване навантаження [4, 5, 8].

Подальший аналіз показує, що такий багатопараметричний датчик може працювати у двох взаємодоповнювальних режимах. Перший режим є часовим. У цьому режимі датчик перетворює поточне механічне навантаження на часову реалізацію напруги $U_0(t)$, придатну для виділення імпульсних і спектральних

ознак. Другий режим є імпедансним. Його суть полягає в тому, що на датчик подається тестовий електричний сигнал малої амплітуди, а поточний стан і параметри чутливого елемента визначаються за значенням комплексного імпедансу $Z_o(j\omega)$.

Саме спільний розгляд цих двох режимів становить методологічну основу даного розділу. Такий підхід дає можливість одночасно оцінювати як зовнішнє механічне навантаження, так і поточний стан самого чутливого елемента. У результаті забезпечується більш повний контроль динамічних проявів адаптивного імпульсного впливу та підвищується інформативність вимірювального перетворення.

Ще однією важливою особливістю постановки задачі є урахування дестабілізаційних чинників в структурі математичної моделі. У межах дисертаційного дослідження до таких чинників віднесено температуру, змінні густину та пружні характеристики робочої рідини, газовміст, ступінь мінералізації, паразитні механічні коливання свердловинної арматури, а також старіння і повзучість п'єзокерамічного пакета. У відомих моделях подібні впливи, як правило, або враховуються лише за допомогою коригувальних коефіцієнтів, або взагалі виносяться за межі математичного опису. На відміну від цього, у розроблюваній математичній моделі зазначені чинники безпосередньо інтегруються в коефіцієнти маси, жорсткості, демпфування та електромеханічного зв'язку сенсорної системи. Такий підхід дає змогу підвищити адекватність моделі та наблизити її до реальних умов функціонування системи.

З урахуванням такої системної постановки доцільно сформулювати три взаємопов'язані задачі. Пряма задача полягає у визначенні тиску на вибої та сигналів датчика за заданих параметрів імпульсного впливу і відомих характеристик середовища. Обернена задача полягає у відновленні параметрів середовища та оцінюванні ефективності впливу за вимірними часовими й імпедансними характеристиками. Адаптаційна задача полягає у формуванні нового вектора керування u_{k+1} на основі вектора інформативних ознак g_k та критерію ефективності η_k . Саме третя задача забезпечує перехід від пасивного

моніторингу до активної зміни режимів імпульсного впливу за результатами вимірювання та аналізу сигналів [1, 3]. Структурно-логічний зв'язок між прямою, оберненою та адаптаційною задачами, а також загальна послідовність математичного моделювання наведені на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Структурно-логічна схема математичного моделювання та адаптації режимів імпульсного впливу. Джерело: розроблено автором.

Для кількісного оцінювання ефективності дії використовується інтегральний функціонал η . Він має узагальнювати щонайменше чотири аспекти процесу: амплітуду імпульсного навантаження на пласт, ступінь резонансного підсилення, швидкість післяімпульсної релаксації та енергетичну ціну формування серії імпульсів. На етапі постановки задачі цей функціонал ще не конкретизується остаточно. Проте вже на цьому етапі визначається, що він повинен залежати не від одного вимірюного піка тиску, а від сукупності ознак часової, спектральної та імпедансної природи. Саме це забезпечує перехід до багатопараметричного оцінювання результативності імпульсного впливу.

Отже, подальше розроблення моделі проводитиметься в такій послідовності. Спочатку запишеться закон формування імпульсу та його передавання до вибою. Далі буде побудована динамічна модель реакції пласта з урахуванням хвильових і фільтраційних компонент. Після цього буде розроблена модель вимірювального перетворення в багатопараметричному п'єзодатчику. На завершальному етапі буде виділено такий набір інформативних ознак, який є достатнім для оцінювання ефективності впливу та для формування адаптивного закону корекції. Саме в такій логічній послідовності надалі і здійснюватиметься математичний опис досліджуваного процесу.

2.2. Моделювання динамічної реакції пласта при адаптивному імпульсному впливі

На першому етапі виведення математичної моделі динамічної реакції пласта розглянемо формування одиничного імпульсу тиску в імпульсній камері. Відповідно до фізичного змісту цього процесу, швидке відкриття каналу з подальшим раптовим перекриттям потоку призводить до появи імпульсної швидкості потоку, а згодом й прямого гідроудару. Для аналітичного опису такого процесу має сенс введення узагальненого коефіцієнту перекриття φ . При цьому приймаємо, що еквівалентна швидкість імпульсного потоку визначається як функція: тиску p_0 перед спрацюванням генератора, довжини імпульсної камери L_k , густини робочої рідини ρ та характерної довжини формування потоку L_v [1, 3].

$$\Delta v_i(L_k, p_0, \rho, L_v) = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} \cdot e^{-\frac{L_k - l_0}{L_v}}, \quad (2.1)$$

Тут, у формулі (2.1) параметр l_0 характеризує втрату ефективної довжини імпульсної камери через наявність механізму швидкого перекриття потоку. Тоді, використовуючи формулу Жуковського, амплітуду тиску на виході генератора представимо, як добуток густини рідини, швидкості звуку в ній та імпульсної швидкості потоку. На відміну від спрощених схем, тут уже на етапі генерації імпульсу в модель вводяться змінні ρ та E , оскільки швидкість звуку $c_{зв} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ безпосередньо залежить від стохастичних характеристик робочого середовища (цей факт обґрунтовано в роботі [3]):

$$\Delta p_r(t) = \rho \cdot c_{зв} \cdot \Delta v_i \cdot g(t), \quad (2.2)$$

Функція $g(t)$ у рівнянні (2.2) описує часову форму одиничного імпульсу. Для подальших розрахунків зручно задавати її у вигляді згладженого експоненційно-гамма-подібного профілю, який відтворює швидке наростання та повільніше спадання тиску. Така форма є технологічно коректною, тому що реальний імпульсний процес не формує математично ідеального δ -імпульсу, а створює короткочасний імпульс із кінцевою тривалістю τ_i . У підсумку серія імпульсів з

періодом $T_r = 1/f_r$ задається сумою часово зсунутих реалізацій $g(t - n \cdot T_r)$.

$$p_{(0)}(t) = p_{ст} + \sum_{n=0}^{N-1} \Delta p_r \cdot g(t - n \cdot T_r), \quad (2.3)$$

Передавання імпульсу від поверхні до вибою розглядаємо в рамках лінеаризованої хвильової моделі для стисливої рідини у трубопровідному каналі. Для малих відносних коливань навколо робочої точки (що характеризується величинами $p_{ст}$ та $v_{ст}$) система рівнянь неперервності і кількості руху зводиться до "телеграфного" рівняння для тиску, у якому коефіцієнт β_w враховує сумарні втрати енергії на в'язке тертя, локальні звуження, стискуваність газових включень та дисипацію на поворотах потоку [1, 2].

$$\frac{\partial^2 p(z,t)}{\partial t^2} + \frac{2\beta_w \cdot \partial p(z,t)}{\partial t} - \frac{c_{зв}^2 \cdot \partial^2 p(z,t)}{\partial z^2} = 0, \quad 0 < z < H. \quad (2.4)$$

Гранична умова на поверхні має вигляд $p(0, t) = p_{(0)}(t)$, тобто саме імпульсний генератор є джерелом хвильового збурення. На вибої, за умови $z = H$, хвильовий процес повинен бути узгоджений з динамікою пластової системи. На відміну від моделей, де вибій задається жорсткою або вільною відбивною границею, тут використано граничну умову через динамічну проникну та деформаційну провідність пласта. Це дозволяє в одній формулі врахувати як відтік енергії в поровий простір, так і локальні коливання каркаса в зоні перфорації.

$$-\frac{S_T}{\rho \cdot c_{зв}^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b \cdot \frac{dp_B}{dt} + \frac{p_B - p_{пл}}{R_f} + q_{осц}(t), \quad (2.5)$$

Тут, C_b є ефективною стисловою ємністю привибувальної області, R_f – фільтраційним опором, $p_{пл}$ – характерним пластовим тиском, а $q_{осц}(t)$ – додатковою коливальною складовою, що описує короткочасне енергопоглинання пластом у резонансних або квазірезонансних режимах.

Для завершення математичного опису динамічної реакції пласта представимо привибувальну область через радіальне рівняння дифузійно-хвильового типу, де коефіцієнт a_r характеризує п'єзопровідність пласта, а член γ_r описує внутрішнє затухання, обумовлене структурною неоднорідністю та

в'язкопружністю середовища.

$$\frac{\partial \Delta p_r}{\partial t} = a_r \cdot \left(\frac{\partial^2 \Delta p_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Delta p_r}{\partial r} \right) - \gamma_r \cdot \Delta p_r + b_r \cdot p_B(t) \cdot \delta(r - r_w). \quad (2.6)$$

У рівнянні (2.6) зосереджене на радіусі r_w джерело відповідає дії хвилі тиску на зону перфорації. Така постановка дозволяє перейти від якісного опису до моделі, де проникність k , пористість ϕ_p , в'язкість μ та скін-фактор S безпосередньо впливають на реакцію пласта.

Подальше перетворення Лапласа та спрощення задачі шляхом урахування основних форм коливань зводить систему рівнянь (2.4)–(2.6) до еквівалентної передавальної функції між сигналом генератора та тиском на вибої. Саме цей спрощений вигляд рівнянь є зручним для ідентифікації параметрів моделі за експериментальними даними:

$$P_B(s) = G_w(s) \cdot G_{пл}(s) \cdot P_{(0)}(s), \quad (2.7)$$

$$G_w(s) = \frac{e^{-(\tau_w s + \alpha_w H)}}{T_w s + 1}, \quad (2.8)$$

$$G_{пл}(s) = \frac{K_{пл} \omega_r^2}{(s^2 + 2\zeta_r \omega_r s + \omega_r^2)(T_f s + 1)}, \quad (2.9)$$

У співвідношеннях (2.8)–(2.9) $\tau_w = H/c_{зв}$ – це час запізнення хвилі в свердловині, α_w – коефіцієнт затухання на одиницю довжини, T_w – стала часу згладжування в каналі передавання, $K_{пл}$ – узагальнений коефіцієнт передачі енергії в пласт, ω_r – кутова частота коливань, що найбільше проявляються у привибійній зоні, ζ_r – коефіцієнт затухання пластової системи, T_f – стала часу фільтраційної релаксації. Параметри $K_{пл}$, ω_r , ζ_r і T_f є функціями k , ϕ_p , μ , S , глибини H та геометрії зони перфорації, а тому саме вони повинні бути оцінені або ідентифіковані для конкретної свердловини [1, 3, 7].

Якщо підставити вираз (2.3) у рівняння (2.7), отримаємо серійну реакцію пласта на N імпульсів. Це означає, що тиск на вибої формується не як проста масштабована копія сигналу генератора, а як суперпозиція запізнених та ослаблених реакцій на окремі імпульси, кожна з яких має власний хвильово-фільтраційний післяслід. Звідси випливає важливий практичний висновок: при

виборі частоти повторення імпульсів f_r потрібно враховувати не тільки можливості генератора, а й час релаксації пласта, інакше частина енергії буде витрачатися нераціонально або, навпаки, виникне корисне резонансне накопичення енергії.

Для подальшої оптимізації вводимо енергетичні характеристики реакції пласта. Так, амплітудний показник A_p визначається як максимальне відхилення $p_e(t)$ від середнього рівня; імпульс I_p – як інтеграл від надлишкового тиску в межах окремого імпульсу; енергія E_p – як інтеграл квадрата тиску на вибої; час релаксації t_{rel} – як інтервал, протягом якого реакція зменшується до 5% від максимального значення:

$$A_p = \max_t |p_v(t) - p_{ст}|, \quad I_p = \int (p_v(t) - p_{ст}) dt, \quad E_p = \int (p_v(t) - p_{ст})^2 dt. \quad (2.10)$$

Усі ці ознаки надалі використовуються при оцінюванні ефективності впливу та при формуванні адаптивного алгоритму керування.

Отже, новизна запропонованої моделі реакції пласта полягає в тому, що вона одночасно враховує параметри адаптивного імпульсного впливу, характеристику каналу передавання, хвильово-фільтраційну динаміку привибійної зони та змінні властивості робочої рідини. На відміну від відомих моделей, в яких, як правило, для імпульсних або ударних систем детально описується або ударний пристрій [4, 5], або процес генерації гідроудару [1], або стохастика рідини [3]. В даній же моделі ці компоненти об'єднані в єдиний операторний опис, придатний безпосередньо для синтезу вимірювальної підсистеми і для подальшого переходу до математичного моделювання електричного імпедансу п'єзоелектричного багатопараметричного датчика.

Для перевірки розробленої моделі виконано числові розрахунки за типових умов малодобітної нафтової свердловини, а саме: глибина 1200 м, тиск перед генератором 3,0...6,0 МПа, густина робочої рідини близько 980 кг/м³, швидкість звуку 1450 м/с, довжина імпульсній камери 0,25...1,20 м, частота повторення імпульсів 0,83 Гц. Для характеристики пласта розглядалися три сценарії проникності – низький, середній і високий. Початкові дані наведено в табл. 2.2 і

2.3, а результати моделювання процесу формування та передавання імпульсу представлені в Додатку А.

Таблиця 2.2 – Базові параметри адаптивного імпульсного впливу. Джерело: розроблено автором.

Параметр	Значення
Глибина свердловини H , м	1200
Тиск перед генератором p_0 , МПа	4,5
Густина рідини ρ , кг/м ³	980
Об'ємний модуль пружності E , МПа	1800
Швидкість звуку $c_{зв}$, м/с	1450
Довжина імпульсійної камери L_k , м	0,25...1,20
Період повторення T_r , с	1,2
Кількість імпульсів у серії N	12

Таблиця 2.3 – Параметри модельних сценаріїв привибійної зони. Джерело: розроблено автором.

Сценарій	k , мкм ²	φ_p	S	$f_{рез}$, Гц	ζ_r	T_f , с
Низька проникність	0,15	0,12	4,0	5,5	0,22	0,18
Середня проникність	0,35	0,16	2,0	7,5	0,18	0,13
Висока проникність	0,75	0,22	0,5	9,0	0,14	0,10

Як показано в табл. 2.4 та на рис. А.4 (Додаток А), збільшення довжини імпульсійної камери приводить до монотонного підвищення імпульсійної швидкості та амплітуди тиску на виході генератора.

Проте, після досягнення L_k приблизних значень 0,8–1,0 м, приріст пікового тиску на вибої стає значно повільнішим. Це означає, що з погляду системного синтезу немає сенсу необмежено нарощувати довжину камери, оскільки канал передавання та пласт починають працювати як низькочастотний фільтр.

Таблиця 2.4 – Розраховані параметри формування імпульсу за умов $p_0 = 4,5$ МПа. Джерело: розроблено автором.

L_k , м	Δv_i , м/с	Δp_r , МПа
0,25	3,935	5,591
0,40	5,619	7,984
0,60	6,746	9,586
0,80	7,253	10,307
1,00	7,481	10,630
1,20	7,583	10,775

Водночас з цим, для високопроникного пласта спостерігається найвищий рівень засвоєння енергії імпульсу, що видно із табл. 2.5 та нормованих спектрів на рис. А.3 (Додаток А).

Таблиця 2.5 – Інформативні показники динамічної реакції пласта. Джерело: розроблено автором.

Сценарій	A_p , МПа	RMS , МПа	E_p , МПа ² ·с	f_{dom} , Гц	t_{rel} , с
Низька проникність	1,505	0,337	2,846	0,840	14,609
Середня проникність	2,619	0,526	6,918	0,840	14,459
Висока проникність	3,953	0,732	13,378	0,840	14,445

За результатами моделювання також встановлено, що максимум інформативності динамічної реакції досягається не за умов гранично максимальному піку тиску, а в режимі, коли відношення E_p до енерговитрат на генерацію серії імпульсів є найбільшим. Для середньої проникності це відповідає довжині камери 0,7–0,9 м та тиску перед генератором у 4,5 МПа. Такий висновок є важливим для побудови адаптивного алгоритму, оскільки саме він повинен коригувати режим генератора не за абсолютним піком, а за функціоналом ефективності.

Отже, розроблена модель динамічної реакції пласта створює математичну основу для переходу до такої вимірювальної задачі: сигнал $p_e(t)$, який формується за рівняннями (2.7)–(2.10), надалі розглядатиметься, як механічний вхід багатопараметричного п'єзоелектричного датчика.

2.3. Математичне моделювання вимірювального перетворення в багатопараметричному п'єзоелектричному датчику

Для побудови моделі вимірювального перетворення виходимо з того, що відомі математичні моделі плоских дисків і кільцевих шайб описують електричний імпеданс переважно для одного геометрично однорідного п'єзоелемента та одного переважаючого виду коливань [8]. Проте, в реальному процесі необхідно одночасно реєструвати повільну зміну статичного тиску, короткочасне імпульсне перевантаження, коливальні процеси в різних смугах і зміну характеристик контролюваного середовища. Саме тому датчик повинен мати кілька внутрішніх механічно зв'язаних резонансних ланок і, відповідно, кілька інформативних електромеханічних мод.

Запропонована конструкція датчика складається з чотирьох п'єзоелектричних дисків ПЕ1–ПЕ4, трьох металевих мембран М1–М3 та двох торцевих опорних елементів, з'єднаних у загальному осьовому пакеті (рис. 2.1). Мембрани виконують функцію чутливих елементів, що приймають тиск і коливання з боку пластової системи, а також функцію механічних розподільників навантаження. Електрично диски з'єднуються у спільний вимірювальний контур паралельним або комбінованим способом, а механічно – через послідовність пружно-демпфувальних зв'язків, що формують багатомодовий відгук.

Основою математичної моделі такого перетворення є рівняння, які описують взаємозв'язок механічних і електричних параметрів п'єзоелектрика в осьовому напрямку. Так, для i -го диска приймаємо, що механічна напруга T_i та електрична індукція D_i пов'язані з деформацією S_i та електричним полем E_i співвідношеннями прямого та зворотного п'єзоефекту. При цьому використовуємо форму запису, зручну для подальшого переходу до зосереджених параметрів, коли кожний диск розглядається як електромеханічний дипольник зі статичною ємністю C_{0i} та коефіцієнтом електромеханічного перетворення Θ_i [6, 8]:

$$T_i = c_{33,i}^E S_i - e_{33,i} E_i, \quad D_i = e_{33,i} S_i + \varepsilon_{33,i}^S E_i, \quad (2.11)$$

де $c_{33,i}^E$ – модуль пружності п'єзоелектрика при сталому електричному полі; $e_{33,i}$ – п'єзоелектрична стала; $\varepsilon_{33,i}^S$ – діелектрична проникність при сталій деформації.

Для переходу до моделі із зосередженими параметрами введемо змінні:

$$u_i = x_i - x_{i-1}, \quad S_i = \frac{u_i}{h_i}, \quad E_i = \frac{U_i}{h_i}, \quad T_i = \frac{F_i}{A_i}, \quad D_i = \frac{Q_i}{A_i}, \quad (2.12)$$

де u_i – осьове переміщення i -го диска; h_i – його товщина; A_i – площа електрода; U_i – напруга на електродах; F_i – осьова сила; Q_i – електричний заряд.

Після підстановки одержуємо рівняння електромеханічного двополюсника у вигляді:

$$F_i = K_i u_i - \Theta_i U_i, \quad Q_i = \Theta_i u_i + C_{0i} U_i, \quad (2.13)$$

$$\text{де } K_i = \frac{c_{33,i}^E A_i}{h_i}, \quad \Theta_i = \frac{e_{33,i} A_i}{h_i}, \quad C_{0i} = \frac{\varepsilon_{33,i}^S A_i}{h_i}.$$

Тут, K_i – осьова жорсткість i -го п'єзодиска, Θ_i – коефіцієнтом електромеханічного перетворення, C_{0i} – його статичною ємністю. Такий запис є зручним для подальшого подання багатодискової п'єзоструктури у вигляді системи зв'язаних електромеханічних елементів [6, 8].

Після інтегрування рівнянь електромеханічного стану по об'єму кожного п'єзоелектричного диска отримуються узагальнені співвідношення, які зв'язують механічну силу F_i , переміщення x_i , електричний заряд q_i та напругу U_i для i -тої п'єзоланки. Такий перехід дозволяє замінити розподілену електромеханічну систему еквівалентною моделлю (рис. 2.3) із зосередженими параметрами, у якій механічна частина багатодискового пакета подається через еквівалентні маси m_i , жорсткості k_i та коефіцієнти демпфування c_i , тоді як електрична частина описується статичними ємностями C_{0i} , провідністю витоків та коефіцієнтами електромеханічного перетворення Θ_i .

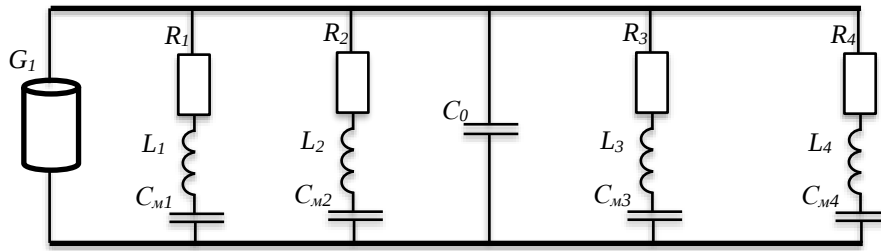


Рисунок 2.3 – Модальна еквівалентна схема багатопараметричного п'єзоелектричного датчика. Джерело: розроблено автором.

У цьому випадку кожний диск розглядається як електромеханічна ланка, а весь пакет з мембранами – як система зв'язаних коливних систем, для яких електрична напруга є узагальненим координатним чинником.

Нехай вектор узагальнених переміщень внутрішніх ланок пакета має вигляд:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4 – осьові переміщення основних внутрішніх масових елементів багатодискового пакета. Тоді рівняння руху механічної підсистеми можна записати в матричній формі:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) - \Theta U(t) = F_{env}(t). \quad (2.15)$$

Тут, $M \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ – матриця мас, $C \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ – матриця демпфування, $K \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ – матриця жорсткості, $\Theta \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ – вектор електромеханічного збудження, $U(t)$ – напруга на електродах багатодискового пакета, $F_{env}(t) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ – вектор зовнішніх збурень, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ – відповідно, вектори швидкостей і прискорень узагальнених координат.

У найпростішому випадку, коли внутрішні масові елементи розташовані послідовно вздовж осі чутливого елемента, матриця мас може бути подана у діагональному вигляді:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

де m_i – еквівалентні зосереджені маси окремих п'єзоланок і суміжних елементів конструкції. Матриці жорсткості та демпфування для послідовно зв'язаної структури мають квазитридіагональний вигляд:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_{12} & -k_{12} & 0 & 0 \\ -k_{12} & k_{12} + k_{23} & -k_{23} & 0 \\ 0 & -k_{23} & k_{23} + k_{34} & -k_{34} \\ 0 & 0 & -k_{34} & k_{34} + k_4 \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_{12} & -c_{12} & 0 & 0 \\ -c_{12} & c_{12} + c_{23} & -c_{23} & 0 \\ 0 & -c_{23} & c_{23} + c_{34} & -c_{34} \\ 0 & 0 & -c_{34} & c_{34} + c_4 \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

де k_i , c_i – приведені жорсткості та демпфування крайніх елементів, а k_{ij} , c_{ij} – коефіцієнти пружного та дисипативного зв'язку між сусідніми ланками. Така форма матриць відображає реальний характер взаємодії дисків, мембран і проміжних контактних шарів у складі багатодискового пакета. Вектор електромеханічного перетворення записується як

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \\ \Theta_3 \\ \Theta_4 \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

де Θ_i характеризує здатність i -тої п'єзоланки перетворювати механічну деформацію в електричний заряд і, навпаки, електричну напругу в механічну силу.

Зовнішній вектор $F_{env}(t)$ формується як суперпозиція кількох фізичних механізмів дії:

$$F_{env}(t) = B_p p_v(t) + B_{\dot{p}} \dot{p}_v(t) + B_a a_v(t) + B_T \Delta T(t). \quad (2.20)$$

У виразі (2.20) $p_v(t)$ – миттєве значення тиску на вибої, $\dot{p}_v(t)$ – швидкість його зміни, $a_v(t)$ – віброакустичне прискорення корпусу або базової конструкції

датчика, $\Delta T(t) = T(t) - T_0$ – відхилення температури від опорного значення T_0 . Вектори $B_p, B_p'; B_a, B_T$ є матрицями або векторами розподілу, які показують, яким чином відповідне збурення проєктується на окремі узагальнені координати системи. Наприклад, B_p визначає, які саме мембрани та диски безпосередньо сприймають тискове навантаження; B_p' описує динамічну чутливість до крутизни фронту імпульсу; B_a враховує інерційні сили, що виникають унаслідок вібраційного руху корпусу; B_T задає еквівалентний тепловий вплив, пов'язаний із термopружними деформаціями та зміною властивостей матеріалів.

Перший доданок у (2.20) відображає повільну та середньочастотну складову навантаження від пластового тиску, другий – чутливість пакета до швидких імпульсних змін тиску, третій – до коливального прискорення корпусу, а четвертий – до температурного дрейфу параметрів. На відміну від підходів, у яких температура та властивості середовища враховуються лише на етапі калібрування, у даній моделі вони входять безпосередньо до динамічного закону перетворення і тому впливають не тільки на масштаб вихідного сигналу, але й на резонансні частоти, добротність, ширину резонансних смуг і положення локальних мінімумів та максимумів імпедансної характеристики.

Електричне рівняння датчика формується на основі балансу струмів у загальному електричному колі. Для паралельного з'єднання п'єзодисків сумарний струм є сумою струму витоків провідності, ємнісного струму та струму, індукованого механічним рухом:

$$I(t) = G_l U(t) + C_{0\Sigma} \dot{U}(t) + \Theta^T \dot{x}(t), \quad C_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^4 C_{0i}. \quad (2.21)$$

Тут, $I(t)$ – сумарний струм у загальному контурі, G_l – провідність витоків, що враховує витрати в ізоляції та електропровідному середовищі, $C_{0\Sigma}$ – сумарна статична ємність пакета, C_{0i} – статична ємність окремого диска. Доданок $G_l U(t)$ відповідає активній складовій струму, пов'язаній із витоками, $C_{0\Sigma} \dot{U}(t)$ – ємнісній складовій, а $\Theta^T \dot{x}(t)$ – струму, зумовленому електромеханічним перетворенням під час руху п'єзоланок.

Для переходу до частотного опису припускаємо гармонічний режим

коливань і записуємо:

$$x(t) = \Re\{X(j\omega)e^{j\omega t}\}, \quad U(t) = \Re\{U(j\omega)e^{j\omega t}\}, \quad I(t) = \Re\{I(j\omega)e^{j\omega t}\}, \quad (2.22)$$

де ω – кругова частота, $X(j\omega)$, $U(j\omega)$, $I(j\omega)$ – комплексні амплітуди відповідних величин. З урахуванням правил:

$$\dot{x}(t) = j\omega X(j\omega), \quad \ddot{x}(t) = -\omega^2 X(j\omega), \quad \dot{U}(t) = j\omega U(j\omega),$$

система (2.15), (2.20), (2.21) у частотній області набуває вигляду

$$\begin{aligned} [K_{eff}(\theta) - \omega^2 M_{eff}(\theta) + j\omega C_{eff}(\theta)]X(j\omega) - \Theta U(j\omega) &= F_{env}(j\omega), \\ I(j\omega) &= [G_l + j\omega C_{0\Sigma}]U(j\omega) + j\omega \Theta^T X(j\omega). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Тут $M_{eff}(\theta)$, $C_{eff}(\theta)$, $K_{eff}(\theta)$ – ефективні матриці мас, демпфування та жорсткості, які залежать від вектору параметрів θ . До складу вектору θ можуть входити статичний тиск p_{cm} , температура T , густина середовища ρ , мінералізація M , газовміст β_g , а також параметри імпульсного впливу. Індекс «*eff*» підкреслює, що ці матриці враховують не лише власні параметри конструкції датчика, а й приєднану масу середовища, його демпфування, контактну жорсткість мембран та інші зовнішні чинники.

Рівняння (2.23) можна переписати через матрицю динамічної жорсткості

$$D(j\omega, \theta) = K_{eff}(\theta) - \omega^2 M_{eff}(\theta) + j\omega C_{eff}(\theta),$$

Тоді

$$D(j\omega, \theta)X(j\omega) - \Theta U(j\omega) = F_{env}(j\omega). \quad (2.24)$$

У режимі визначення власного електричного імпедансу, коли зовнішні силові збурення відсутні, тобто $F_{env}(j\omega) = 0$, маємо

$$X(j\omega) = D^{-1}(j\omega, \theta)\Theta U(j\omega).$$

Підставляючи цей вираз у (2.23), одержуємо

$$I(j\omega) = [G_l + j\omega C_{0\Sigma} + j\omega \Theta^T D^{-1}(j\omega, \theta)\Theta]U(j\omega). \quad (2.25)$$

Оскільки електричний імпеданс визначається як

$$Z_d(j\omega, \theta) = \frac{U(j\omega)}{I(j\omega)},$$

Отримуємо

$$Z_d(j\omega, \theta) = \frac{1}{G_l + j\omega C_{0\Sigma} + \frac{j\omega \Theta^T}{K_{eff}(\theta) - \omega^2 M_{eff}(\theta) + j\omega C_{eff}(\theta)}}. \quad (2.26)$$

Формула (2.26) є основним аналітичним результатом і задає комплексний електричний імпеданс багатопараметричного п'єзоелектричного датчика. Її принципова новизна полягає в тому, що в модель входять не тільки геометричні та електромеханічні параметри п'єзодисків, а й вектор θ параметрів середовища та імпульсного впливу. Це означає, що зміна статичного тиску $p_{ст}$, динамічного тиску $p_e(t)$, температури T , густини ρ , мінералізації M та газовмісту β_g безпосередньо проявляється через зміну матриць M_{eff} , C_{eff} , K_{eff} , а отже – через зміну резонансних частот, амплітудних мінімумів і добротності окремих мод.

Для подальшого аналізу доцільно виконати модальне розкладання матриці динамічної жорсткості. Нехай ϕ_r – власний вектор r -тої моди, а ω_r – відповідна власна частота. Тоді вектор переміщень може бути розкладений у базисі власних форм:

$$X(j\omega) = \sum_{r=1}^m \phi_r \eta_r(j\omega), \quad (2.27)$$

де $\eta_r(j\omega)$ – модальна координата r -тої форми коливань, m – кількість мод, що враховуються у моделі. Для кожної моди вводяться еквівалентні модальні параметри:

$$m_r = \phi_r^T M_{eff} \phi_r, \quad c_r = \phi_r^T C_{eff} \phi_r, \quad k_r = \phi_r^T K_{eff} \phi_r, \quad (2.28)$$

а також коефіцієнт електромеханічного збудження $\Gamma_r = \phi_r^T \Theta$.

У цьому випадку провідність датчика $Y_d(j\omega, \theta) = 1/Z_d(j\omega, \theta)$ записується у формі суми модальних гілок типу Butterworth – Van Dyke [9]:

$$Y_d(j\omega, \theta) = G_l + j\omega C_{0\Sigma} + \sum_{r=1}^m \frac{j\omega \Gamma_r^2(\theta)}{k_r(\theta) - \omega^2 m_r(\theta) + j\omega c_r(\theta)}. \quad (2.29)$$

Кожний доданок у сумі (2.29) відповідає окремій механічній моді багатодискового пакета і може бути поданий у вигляді еквівалентної резонансної

ділянки з параметрами R_r , L_r , C_r , рис. 2.4.

У модальному представленні зміна будь-якого зовнішнього чинника проявляється через зміну модальної частоти $f_r = \frac{\omega_r}{2\pi}$, еквівалентної добротності $Q_r = \frac{m_r \omega_r}{c_r}$, або коефіцієнта збудження Γ_r . Отже, інформативними стають не лише часові сигнали, але й зсуви резонансних частот, зміна глибини імпедансних мінімумів та ширини резонансних смуг.

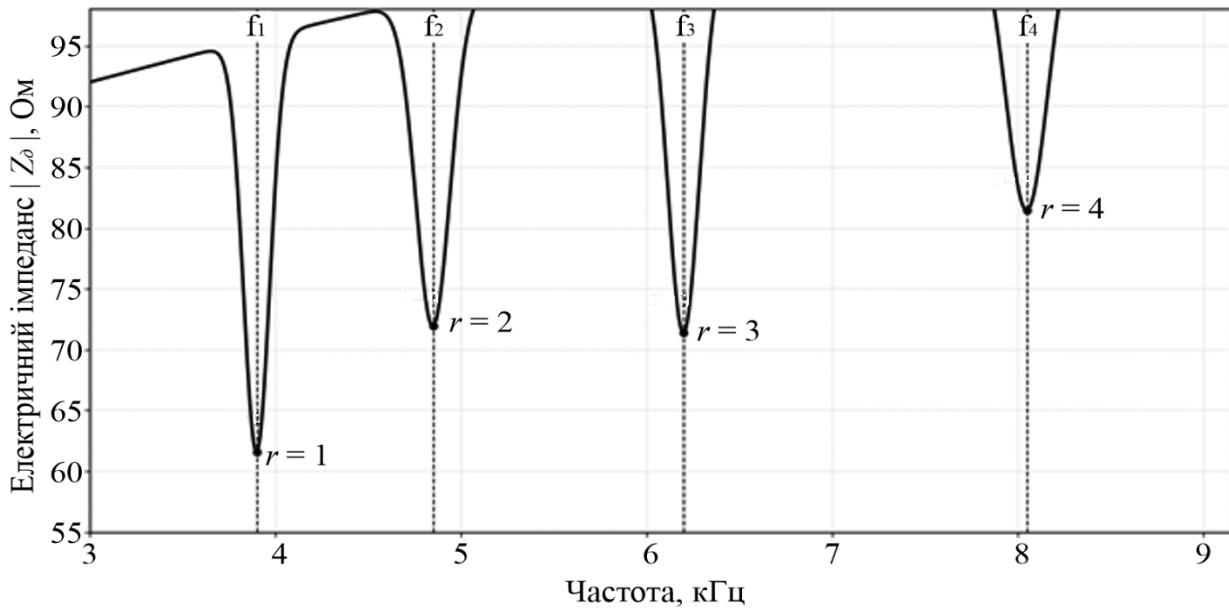


Рисунок 2.4 – Багатомодова структура імпедансної характеристики датчика з позначенням резонансних частот f_1 – f_4 та відповідних механічних мод $r = 1 \dots r = 4$. Джерело: побудовано автором за результатами моделювання.

Якщо розглядати часовий режим датчика при ненульовому зовнішньому збуренні $F_{env}(j\omega)$, то з рівняння (2.23) отримуємо

$$X(j\omega) = D^{-1}(j\omega, \theta)[\Theta U(j\omega) + F_{env}(j\omega)]. \quad (2.30)$$

У режимі розімкненого кола $I(j\omega) = 0$, тому з (2.23) витікає, що:

$$0 = [G_l + j\omega C_{0\Sigma}]U_{oc}(j\omega) + j\omega \Theta^T X(j\omega).$$

Звідси

$$U_{oc}(j\omega) = -\frac{j\omega \Theta^T X(j\omega)}{G_l + j\omega C_{0\Sigma}}. \quad (2.31)$$

Підставляючи $X(j\omega) = D^{-1}(j\omega, \theta) \cdot F_{env}(j\omega)$, одержуємо

$$U_{oc}(j\omega) = -\frac{j\omega\Theta^T}{G_l + j\omega C_{0\Sigma}} \cdot \frac{F_{env}(j\omega)}{K_{eff} - \omega^2 M_{eff} + j\omega C_{eff}}. \quad (2.32)$$

Вираз (2.31) показує, що вихідна напруга в режимі холостого ходу визначається сумарною динамічною реакцією датчика на тиск, швидкість його зміни, вібраційні збурення та температурний вплив. Оскільки різні компоненти $F_{env}(j\omega)$ мають різну частотну структуру, а пакет має кілька власних мод, тоді одна й та сама конструкція може забезпечувати одночасну реєстрацію кількох фізичних проявів дії пласта та імпульсного впливу.

Для числового експерименту приймалися такі типові геометричні й матеріальні параметри компонентів багатопараметричного п'єзодатчика: зовнішній діаметр дисків 20 мм, товщина кожного п'єзодиска 1,0 мм, товщина металевих мембран 0,15 мм, матеріал дисків – п'єзокераміка типу PZT-5Н з еквівалентною відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r \approx 3400$ та коефіцієнтом $d_{33} \approx 400$ пКл/Н, матеріал мембран – корозійностійка сталь. Статична сумарна ємність пакета в базовому режимі становила близько 9,5 нФ. Узагальнені значення геометричних, електромеханічних і динамічних параметрів, прийнятих у розрахунках, доцільно подавати в табл. 2.6 і 2.7 безпосередньо після наведеного опису параметрів, оскільки саме ці таблиці фіксують вихідні умови числового експерименту.

Таблиця 2.6 – Геометричні та матеріальні параметри багатопараметричного датчика. Джерело: складено автором.

Параметр	Значення
Кількість п'єзодисків	4
Кількість мембран	3
Зовнішній діаметр диска, мм	20
Товщина одного п'єзодиска, мм	1,0
Товщина мембрани, мм	0,15
Матеріал дисків	PZT-5Н
Матеріал мембран	Корозійностійка сталь
Сумарна статична ємність $C_{0\Sigma}$, нФ	9,5

Розрахунок за моделлю (2.26) показав, що в базовому режимі датчик має чотири виражені резонансні мінімуми модуля імпедансу приблизно в діапазоні 3,9; 4,85; 6,20 та 8,05 кГц.

Таблиця 2.7 – Модальні параметри датчика в базовому режимі. Джерело: отримано автором за результатами моделювання.

Мода	f_r , кГц	Q_r	Γ_r	$ Z _{\min}$, Ом
1	3,900	35	0,100	124,6
2	4,850	42	0,085	149,6
3	6,200	38	0,070	249,1
4	8,050	30	0,055	497,6

Наявність кількох стабільних мінімумів є принципово важливою, оскільки саме вона створює можливість побудови багатопараметричного критерію ідентифікації стану пласта та умов імпульсного впливу. Так, при зростанні статичного тиску від 2 до 10 МПа перша резонансна частота зміщується приблизно на 125 Гц, а глибина першого мінімуму також змінюється, рис. 2.5.

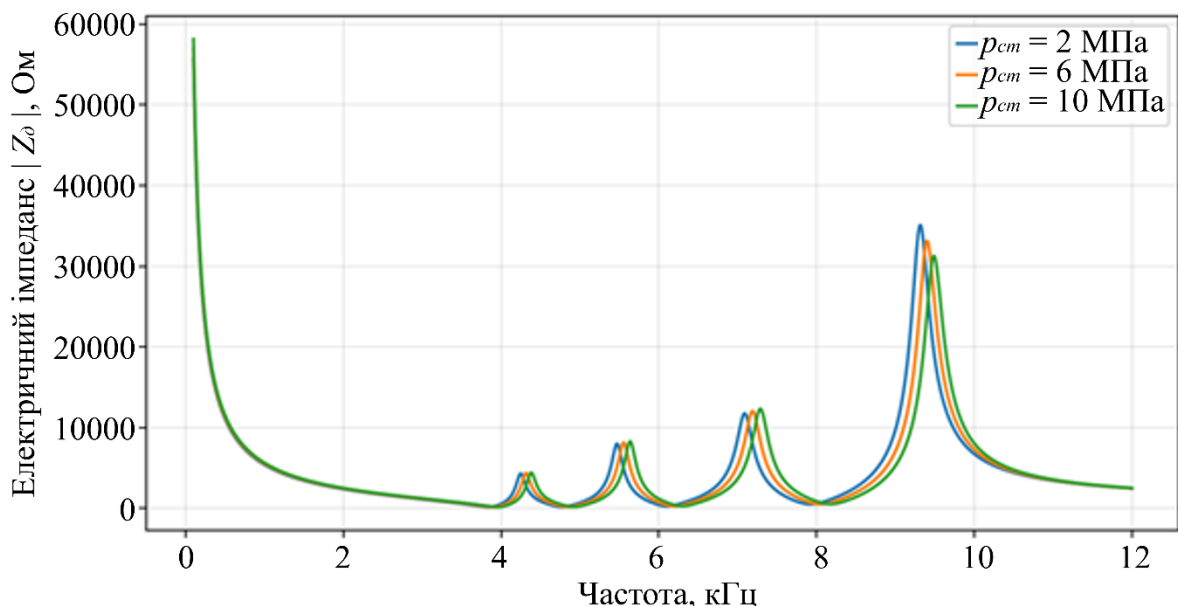


Рисунок 2.5 – Вплив статичного тиску на модуль електричного імпедансу датчика.

Джерело: побудовано автором за результатами моделювання.

Дослідження впливу температури показало, що вона є одним з найбільш

небезпечних дестабілізаційних чинників при інтерпретації імпедансних характеристик. Так встановлено, що зі зростанням температури від 20 °С до 100 °С перша резонансна частота в базовому тисковому режимі зменшується майже на 7%, а добротність відповідної моди знижується внаслідок зростання внутрішніх втрат у п'єзокераміці, клеєвих шарах і металевих мембранах.

Це означає, що температура повинна входити до моделі не як зовнішня поправка постфактум, а як параметр, який безпосередньо змінює матриці M_{eff} , C_{eff} , K_{eff} , Θ та $C_{0\Sigma}$. Аналогічно вплив густини та мінералізації середовища проявляється двояко: через зміну хвильового опору середовища (а, отже, характеру механічного навантаження на мембрани) і через зміну еквівалентного демпфування системи. Саме тому результати, подані в табл. 2.8, свідчать, що, навіть за сталої геометрії датчика, зростання мінералізації та густини призводить до помітної зміни модуля імпедансу та добротності, і ці ефекти необхідно враховувати під час виділення інформативних ознак.

Таблиця 2.8 – Вплив дестабілізаційних чинників на першу та другу моди датчика. Джерело: складено автором за результатами моделювання.

Режим	$p_{ст}$, МПа	T , °С	ρ , кг/м ³	M , г/л	f_1 , Гц	f_2 , Гц	$ Z_1 _{min}$, Ом	Q_1
Базовий режим	6	60	980	40	3900,0	4850,0	124,6	35,000
Підвищений статичний тиск	10	60	980	40	3962,4	4927,6	126,6	35,000
Понижений статичний тиск	2	60	980	40	3837,6	4772,4	122,6	35,000
Підвищена температура	6	90	980	40	3794,7	4719,1	126,6	33,493
Підвищена мінералізація	6	60	1030	80	3907,8	4859,7	127,3	34,314

Дестабілізуючі чинники, що впливають на результати контролю параметрів імпульсного впливу, доцільно поділити на три групи: середовищні (температура, густина, в'язкість, газонасиченість, мінералізація та

електропровідність робочої рідини); конструктивно-каналні (довжина і геометрія ліній передавання, паразитні відбиття, перехресна чутливість каналів, нестабільність механічного контакту); інформаційні (шум, пропуски відліків, квантування АЦП, асинхронність багатоканальних даних, дрейф нуля).

Отже, перевага запропонованої математичної моделі полягає, по-перше, у переході від одноелементного опису до багатомодового представлення багатодискового датчика; по-друге, у єдиному матрично-імпедансному формалізмі, який узгоджено об'єднує механічну та електричну частини системи; по-третє, у тому, що параметри контрольованого середовища та адаптивного імпульсного впливу входять до моделі як змінні коефіцієнти, що безпосередньо визначають комплексний імпеданс $Z_o(j\omega, \theta)$. Саме це забезпечує підвищення адекватності опису процесів вимірювального перетворення, точності розділення корисних і дестабілізаційних складових сигналу та достовірності виділення інформативних параметрів реакції пласта. Отже, система співвідношень (2.15)–(2.31) є цілісною математичною основою для подальшого обґрунтування інформативних часових і частотних ознак, що використовуються для оцінювання ефективності імпульсного впливу.

2.4. Обґрунтування інформативних параметрів динамічної реакції пласта для оцінювання ефективності імпульсного впливу

Розроблені в підрозділах 2.2 і 2.3 моделі показують, що жодна окрема вимірювана величина не є достатньою для надійного оцінювання ефективності імпульсного впливу. Так, максимальний тиск на вибої характеризує лише силову сторону процесу, але не описує ані тривалість корисної дії, ані спектральний характер коливань, ані ступінь узгодження датчика з навантаженням. Тому необхідно провести формування такого набору інформативних параметрів, який з одного боку забезпечить чутливість до змін стану пласта, а з іншого – буде стійким до дестабілізаційних факторів.

Виходячи з цього, першу групу становлять часові параметри динамічної реакції пласта. До них належать амплітуда A_p , імпульс I_p , середньоквадратичне

значення RMS та час релаксації t_{rel} . Саме ці характеристики безпосередньо пов'язані з хвильово-фільтраційним процесом і характеризують, відповідно, силу збурення, сумарний перенесений тиск, середню енергію реакції та тривалість післядії. У межах числового експерименту зростання проникності призводило до зростання A_p та E_p . Проте, лише в поєднанні з t_{rel} ці ознаки давали повнішу картину стану привиби́йної зони.

Друга група параметрів має спектральну природу. Для імпульсно-хвильових процесів важливими є переважна частота f_{dom} , ширина смуги значущого спектра B_f та спектральні енергії в заздалегідь вибраних інтервалах частот. Переважна частота відображає режим найбільшого енергетичного засвоєння пласта, а співвідношення енергій у сусідніх смугах дозволяє розрізняти режим резонансного підсилення та режим надлишкового широкосмугового збудження. Нормовані спектри, наведені на рис.А.3 (Додаток А), підтверджують, що різні сценарії пласта мають різний частотний «портрет», який не можна звести до однієї амплітуди.

Третю групу формують інформативні параметри, пов'язані з електричним імпедансом датчика. Для практичної системи контролю найціннішими є перша і друга резонансні частоти f_1 , f_2 , глибини відповідних мінімумів $|Z_1|_{min}$, $|Z_2|_{min}$, еквівалентні добротності Q_1 , Q_2 , а також різницеві ознаки $\Delta f_{1,2}$ і $\Delta Q_{1,2}$ відносно базового стану. Перевага цих параметрів полягає в тому, що вони відображають інтегральний вплив статичного тиску, середовища й температури на механічне навантаження пакета і тому є особливо корисними для довготривалої адаптації системи.

Четверту групу становлять комбіновані часово-частотні ознаки вихідної напруги датчика. До таких ознак доцільно віднести пікову напругу U_{max} , енергію сигналу E_U , коефіцієнт асиметрії імпульсу k_{as} , відношення енергій високочастотної та низькочастотної складових R_E та декремент затухання δU . Саме ці величини узгоджують модель пласта з моделлю датчика, оскільки формується прямий місток від механічної реакції $p_e(t)$ до реального електричного сигналу $U_d(t)$.

Для узгодженого використання всіх перелічених параметрів введемо вектор інформативних ознак $g = \{A_p, I_p, E_p, t_{rel}, f_{dom}, f_1, f_2, Q_1, Q_2, R_E, U_{max}, \delta U\}$. Частина

ознак отримується з сигналу тиску або реконструйованого тискового каналу, частина – з імпедансного каналу, а частина – з часової реалізації напруги п'єзодатчика. Загалом, оцінювання ефективності базується не на одній фізичній моделі, а на комплексі трьох взаємодоповнювальних моделей: хвильової, фільтраційної та електромеханічної.

Оскільки ознаки мають різні одиниці вимірювання та різні динамічні діапазони, необхідно провести їх нормалізацію. Для цього введемо серію безрозмірних величин g_i^* за відносним відхиленням від базового або цільового значення. При цьому, якщо зростання параметра є позитивним, використовується пряма нормалізація, а якщо негативним – обернена. Такий підхід дає можливість уніфікувати подальший критерій ефективності та зробити його придатним для алгоритмічної реалізації у ПЛК або в системі верхнього рівня:

$$g_i^* = (g_i - g_{i,0})/(g_{i,ref} - g_{i,0}), \text{ або } g_i^* = (g_{i,0} - g_i)/(g_{i,0} - g_{i,ref}). \quad (2.33)$$

Після нормалізації введемо інтегральний критерій ефективності імпульсного впливу η як зважену суму нормованих інформативних параметрів. Вагові коефіцієнти w_i задаються на основі експертного та модельного аналізу. Тут, найбільші ваги доцільно надавати ознакам, які мають високу чутливість до стану привибійної зони і водночас відносно низьку чутливість до температурного та випадкового дрейфу датчика.

$$\eta = \sum w_i \cdot g_i^*, \quad \sum w_i = 1, \quad 0 \leq \eta \leq 1. \quad (2.34)$$

У такій формі, показник η – це не просто індекс якості сигналу, а узагальнений критерій технологічної доцільності режиму. Якщо, наприклад, зростає піковий тиск, але одночасно погіршується узгодження частотного режиму та зростає енергоспоживання генератора, тоді показник η не зростатиме безмежно. Це принципово відрізняє запропонований підхід від практики оцінки імпульсних технологій тільки за амплітудою тиску або за приростом дебіту.

Для прийняття рішення в системі адаптивного керування слід ввести порогові правила. Так, якщо $\eta < \eta_1$, режим вважається неефективним і параметри p_0 , L_k або f_r мають бути скориговані в напрямку підсилення дії. Якщо ж

виконується нерівність $\eta_1 \leq \eta < \eta_2$, режим вважається робочим, але резерви оптимізації ще не вичерпані. Якщо ж маємо нерівність $\eta \geq \eta_2$, система наближається до раціонального режиму, і подальша корекція повинна бути мінімальною, щоб не викликати перерегулювання. У такий спосіб багатопараметричний аналіз перетворюється у практичний закон адаптації.

Додатково до інтегрального критерію доцільним є використання локальних діагностичних ознак. Так, зсув першої резонансної частоти Δf_1 є чутливим до зміни статичного тиску та температури (рис. 2.6), а коефіцієнт R_E – до переходу між імпульсним і коливальним режимами дії.

При цьому, зменшення добротності Q_1 без істотної зміни A_p може бути маркером підвищення дисипації в середовищі або забруднення вимірювального тракту. Саме така інтерпретація ознак наведена у табл. 2.9.

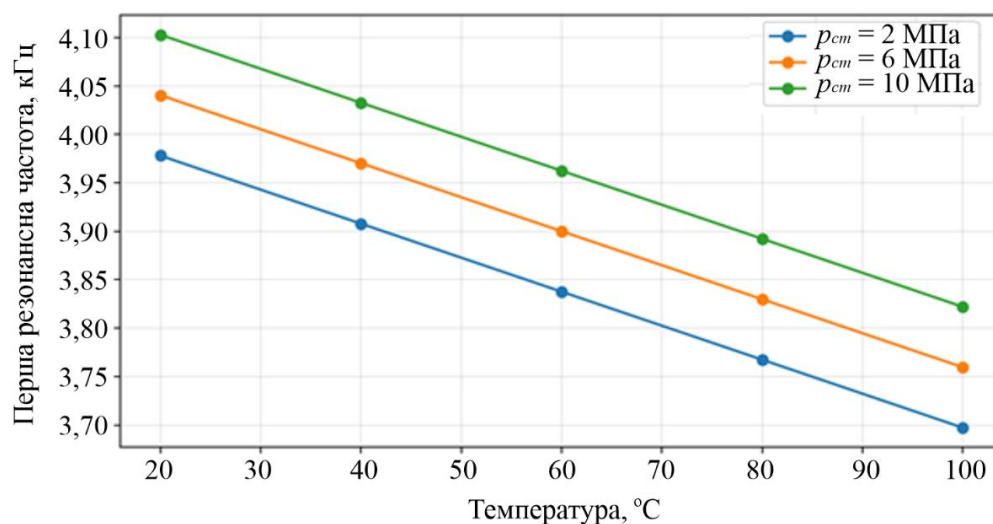


Рисунок 2.6 – Зміна першої резонансної частоти залежно від температури та статичного тиску. Джерело: побудовано автором за результатами моделювання.

Таблиця 2.9 – Основні інформативні параметри та їх фізична інтерпретація.

Джерело: складено автором.

Ознака	Що відображає	Спосіб визначення
A_p	Силу імпульсного навантаження на пласт	Піковий динамічний тиск
I_p	Інтегральну дію одного імпульсу	Площа під кривою надлишкового тиску
f_{dom}	Коливальний режим засвоєння енергії	Домінантна частота спектра
Δf_1	Зміну механічного навантаження на датчик	Зсув першої резонансної частоти
Q_{eff}	Рівень дисипації в середовищі та пакеті	Еквівалентна добротність першої моди
R_E	Співвідношення коливальної та імпульсної складових	Енергія смуги 6–10 кГц / енергія смуги 0.5–2 кГц

В підсумку, результати числового аналізу показали, що найбільшу сумарну інформативність мають ознаки A_p , Δf_{r1} , Q_{eff} та енергія спектральної смуги 6–10 кГц. Це підтверджується на діаграмах на рис. 2.7. З одного боку, це означає, що для задачі оцінювання ефективності імпульсного впливу не потрібно використовувати надлишкову кількість параметрів. З іншого боку, саме комбінація часових та імпедансних ознак забезпечує стійкість оцінювання за зміни контрольованого середовища.

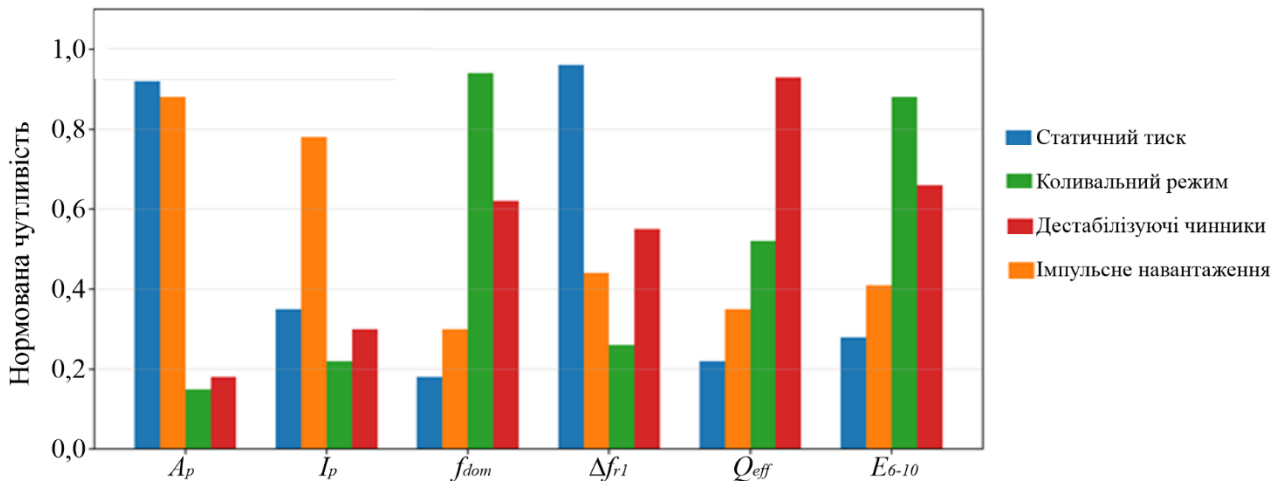


Рисунок 2.7 – Порівняльна оцінка нормованої чутливості інформативних параметрів. Джерело: побудовано автором.

Отже, встановлено, що для надійного оцінювання ефективності імпульсного впливу, доцільно використовувати не одну окрему вимірювану величину, а узгоджений набір часових, спектральних, імпедансних і комбінованих ознак, об'єднаних у вектор інформативних параметрів та інтегральний критерій ефективності η . Такий підхід дає змогу перейти від якісного аналізу реакції пласта до кількісного оцінювання режимів впливу та формування правил адаптивного керування.

Результати числового аналізу показали, що найбільшу сумарну інформативність мають ознаки A_p , Δf_{r1} , Q_{eff} та енергія спектральної смуги 6–10 кГц, а їх поєднання забезпечує стійкіше оцінювання змін параметрів контрольованого середовища.

Аналіз чутливості інформативних параметрів та інтегрального показника

ефективності. Для кількісного оцінювання впливу змінних параметрів системи на вихідні характеристики введемо нормовані коефіцієнти чутливості:

$$S_y^{x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}, \quad (2.35)$$

де $y \in \{p_{\max}, J_p, f_{\text{дом}}, \eta\}$, а $x_i \in \{L_k, f_r, p_0, \rho, \beta, T, \mu\}$.

Аналіз чутливості виконувався методом покрокового варіювання кожного параметра на $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ та $\pm 15\%$ відносно базового режиму при фіксованих значеннях інших змінних, в результаті чого отримані нормовані коефіцієнти чутливості для вищезазначених параметрів, рис.2.8.

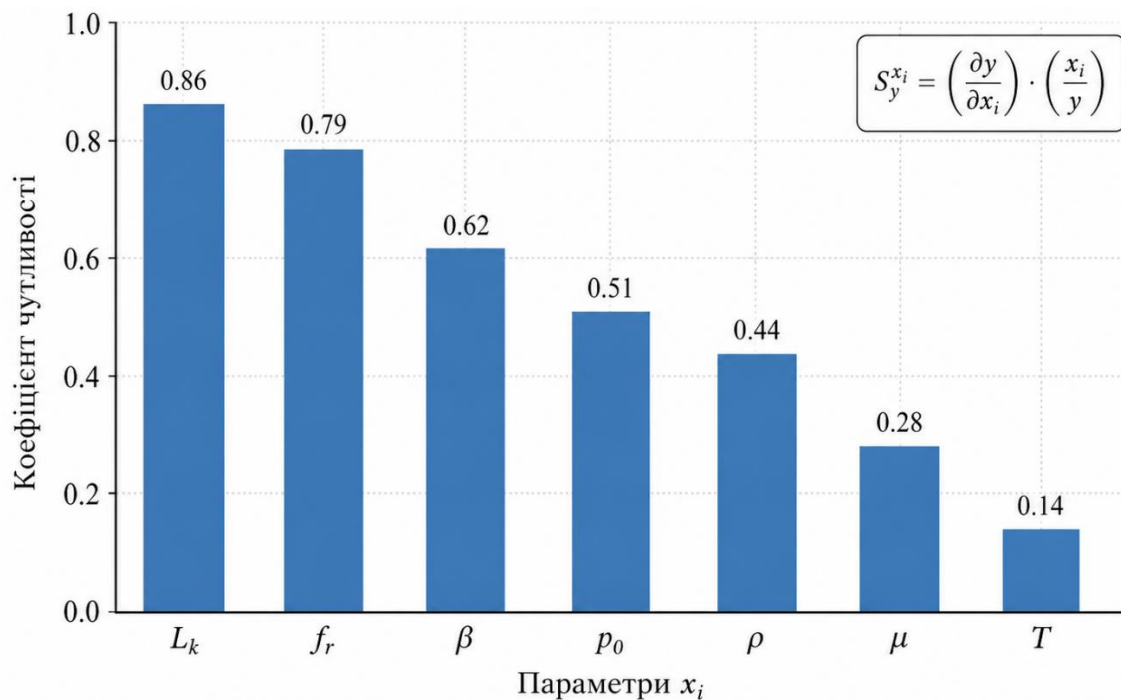


Рисунок 2.8 – Нормовані коефіцієнти чутливості $S_y^{x_i}$. Джерело: побудовано автором.

За результатами розрахунків (рис.2.8) встановлено, що найбільший вплив на інтегральний показник ефективності η мають довжина імпульсної камери L_k , частота повторення імпульсів f_r та коефіцієнт загасання β ; помірний вплив мають початковий тиск p_0 та густина середовища ρ ; найменший вплив у межах робочого діапазону спостерігається для температури T . Отримані коефіцієнти чутливості використано для обґрунтування вагових коефіцієнтів інтегрального показника, а

також для формування вимог до точності вимірювання окремих параметрів у складі ІВС.

Загалом, сформований набір інформативних параметрів разом з критерієм ефективності η можуть бути використані як основа для практичної реалізації процедур контролю, діагностування та подальшого прийняття рішень в адаптивній системі.

Висновки до розділу 2

У розділі сформульована математична постановка задачі контролю адаптивного імпульсного впливу, в якій узгоджено керувальні параметри генератора, змінні характеристики середовища, реакцію пласта, сигнали багатопараметричного датчика та критерій ефективності. Це дало змогу перейти від ізольованого аналізу окремих процесів до їх системного опису в межах єдиного контуру.

Побудована модель динамічної реакції пласта, в якій враховується формування імпульсного імпульсу, його поширення вздовж свердловини, хвильово-фільтраційна реакція привибійної зони та змінні властивості робочого і пластового середовища. Показано, що інформативними є не лише пікові значення тиску, а й енергетичні, релаксаційні та спектральні характеристики відгуку, які визначають доцільність режимів імпульсного впливу.

Розроблена математична модель багатопараметричного п'єзоелектричного датчика забезпечує багатомодовий опис вимірювального перетворення та пов'язує механічні збурення на вході з часовими і частотними електричними характеристиками на виході. Встановлено, що врахування температури, густини, мінералізації та інших дестабілізаційних чинників безпосередньо в параметрах моделі підвищує адекватність опису й достовірність виділення інформативних ознак.

Обґрунтовано набір інформативних параметрів, який поєднує часові, спектральні, імпедансні та комбіновані ознаки, а також введено інтегральний критерій ефективності імпульсного впливу. Показано, що найбільшу сумарну

інформативність мають амплітудні, резонансні та добротнісні параметри, а їх комплексне використання забезпечує стійкіше оцінювання за зміни умов середовища.

В результаті отримано завершений математичний опис, який поєднує процеси генерації імпульсу, реакції пласта, вимірювальне перетворення та виділення інформативних ознак для оцінювання ефективності впливу. Одержані результати можуть бути покладені в основу подальшого переходу від аналітичного опису до технічно реалізованих засобів контролю, оброблення сигналів і формування рішень у складі прикладної системи.

Список використаних джерел до розділу 2

1. Slidenko, V. M., Shevchuk, S. P., Listovshchik, L. K., & But, V. O. (2024). Adaptive impulse system of impact from the surface on the near-wellbore zone of an oil well. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, (4), 45–51. ISSN 1813-5420 (Print), ISSN 2308-7382 (Online). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2024.315569>
2. Slidenko, V. M., & But, V. O. (2024). Electrohydraulic pulse system for influencing the near-wellbore zone of an oil well. In *Proceedings of the XLI International Scientific and Practical Conference “Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential”* (pp. 64–66). Toronto, Canada. ISBN 978-617-8427-31-3. <https://doi.org/10.70286/ISU-02.10.2024>
3. Slidenko, V. M., But, V. O., & Novykov, A. O. (2025). Analysis of the efficiency of adaptive pulse system functioning by the method of stochastic characteristics. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, (1), 72–78. ISSN 1997-9266 (Print), ISSN 1997-9274 (Online). <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-72-78>
4. Slidenko, V., Slidenko, O., Marchuk, L., & But, V. (2023). Development of a discrete-continuous mathematical model of a percussion device with parameters of influence on the characteristics of an impact pulse. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7(125)), 70–79. ISSN-L 1729-3774, E-ISSN 1729-4061. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290029>
5. Slidenko, V., Slidenko, O., Listovschik, L., Novykov, A., & But, V. (2025).

- Construction of a mathematical model of an impact device with a two-element striker. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(133)), 38–49. ISSN-L 1729-3774, E-ISSN 1729-4061. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322728>
6. But, V. O., Listovshchyk, L. K., & Slidenko, V. M. (2021). Electrohydraulic generator of impulse action on the near-wellbore zone of an oil well. In *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna: Proceedings of the Institute of Energy Saving and Energy Management* (pp. 94–97). Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. URL: <https://ela.kpi.ua>
 7. Slidenko, V. M., & But, V. O. (2023). Adaptive pulse generator for influencing a reservoir system without stopping hydrocarbon production. In *Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference “Energy Management: State and Prospects of Development (PEMS’2023)”* (pp. 103–104). Kyiv, Ukraine. URL: <http://pems.kpi.ua/>
 8. Bazilo, C. V., Andriienko, V. O., Tuz, V. V., et al. (2023). Mathematical modeling of piezoelectric ceramic ring transducers for functional instrumentation. *Visnyk NTUU KPI Seriia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, (93), 78–84. ISSN 2310-0389. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.93.78-84>
 9. Lee, B.-H., Lee, J.-M., Baek, J.-E., & Sim, J.-Y. (2021). An estimation method of an electrical equivalent circuit considering acoustic radiation efficiency for a multiple resonant transducer. *Electronics*, 10(19), 2416. EISSN 2079-9292. <https://doi.org/10.3390/electronics10192416>

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ, АЛГОРИТМІВ І СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

У розділі розроблено вимоги до ІВС контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин, а також алгоритмічне, структурно-функціональне, інформаційне та програмне забезпечення системи. На відміну від поширених рішень, запропонована система розглядається як центральний елемент контуру адаптації режимів імпульсного впливу [1–3]. В її основі знаходиться багатопараметричний п'єзоелектричний датчик до складу якого входять чотири кільцеві п'єзокерамічні елементи між якими розташовані металеві мембрани, і який забезпечує реєстрацію динамічного тиску, ударно-імпульсного навантаження та коливального відгуку [4–7]. Вимоги до вимірювального тракту сформовано з урахуванням часової роздільної здатності, завадостійкості, електромагнітної сумісності, гальванічної розв'язки та аналогово-цифрової фільтрації [13].

Показано, що застосування локального електронно-променевого модифікування поверхні п'єзокераміки й електродів дозволяє формувати доменно-дисипативні структури, розділяти вимірювальні канали та підвищувати відтворюваність вимірювань [8–10]. На цій основі розроблено метод автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу за часовими, спектральними та енергетичними ознаками, а також систему алгоритмів і структурно-функціональну схему, у якій вимірювальний, обчислювальний і керувальний контури інтегровані в єдиний часовий та інформаційний простір. Це забезпечує підвищення достовірності оцінювання результативності впливу, зменшення залежності від експертної суб'єктивності та покращення обґрунтованості прийнятих рішень [11–12].

3.1. Обґрунтування вимог до інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу

Для обґрунтування науково-практичної доцільності розробленої ІВС проведено порівняння з сучасними аналогами за такими критеріями: склад контрольованих параметрів, тип сенсорів, наявність багатоканальної реєстрації, підтримка роботи в режимі, наближеному до реального часу, можливість обчислення інтегрального показника ефективності, підтримка автоматичної корекції режиму, врахування дестабілізуючих чинників, наявність метрологічної оцінки.

Порівняльний аналіз показує, що більшість відомих систем орієнтовані або на моніторинг окремих параметрів тиску і температури, або на постфактум-інтерпретацію гідродинамічних даних. На відміну від них, розроблена ІВС поєднує багатопараметричне п'єзоелектричне вимірювання, виділення часових, спектральних і енергетичних ознак, автоматизоване обчислення інтегрального показника η та формування рекомендацій щодо корекції режиму впливу.

Під час дії адаптивної імпульсної системи на привибійну зону свердловини вимірювальний канал працює в умовах поєднання швидкоплинних гідроударних процесів, змінних гідродинамічних параметрів робочого середовища та наявності промислових завад. Тому вимоги до ІВС мають формуватися не лише з позиції традиційної точності вимірювання, а й з урахуванням часової роздільної здатності, завадостійкості, відтворюваності та придатності до роботи у контурі автоматизованого прийняття рішень.

Як вихідне положення приймається те, що система має забезпечувати вимірювання трьох груп сигналів: сигналів імпульсного тиску (у затрубному просторі та в зоні дії генератора); сигналів ударно-імпульсного навантаження (пов'язаного з різкою зміною тиску на фронті хвилі); сигналів коливального відгуку пласта і свердловинного тракту (інформативних щодо резонансних та загасальних процесів). Для цих сигналів різними є інформативні ознаки, а отже різними мають бути вимоги до смуги пропускання та режимів оброблення.

Для типових умов нафтовидобутку доцільно прийняти, що статичний тиск у зоні контролю перебуває в межах 8 – 20 МПа, а амплітуда додаткового імпульсного перевантаження під час спрацювання генератора становить 12 – 40 МПа. За наявності короткого фронту тривалістю 50 – 120 мкс і тривалості самого імпульсу 200 – 500 мкс ІВС повинна забезпечувати мінімальну частоту дискретизації не нижче 200 кГц (краще 250 кГц), щоб коректно відтворити форму піка, фронт і часові зсуви між каналами.

Додатково система повинна враховувати, що інформативність вимірювального сигналу визначається не тільки піковим значенням тиску, а й похідними та інтегральними параметрами. Саме тому до технічного завдання на проєктування такої ІВС слід включити здатність нею визначати час фронту t_f , декремент затухання δ , коефіцієнт відбитої хвилі $K_{відб}$, домінуючу частоту $f_{дом}$, енергетичний індекс J_p та коефіцієнт циклової стабільності $K_{ст}$. Вказані величини надалі будуть використовуватися у методі автоматизованого оцінювання ефективності впливу.

Оскільки система працює поблизу насосного агрегату та електрогідравлічного розподільвача, до вимірювального тракту висуваються жорсткі вимоги з електромагнітної сумісності. Практично, це означає необхідність використання диференційованих входів, гальванічної розв'язки між первинним підсилювальним каскадом і контролером, аналогового смугового фільтра нижніх частот для пригнічення квазістатичного дрейфу та цифрової фільтрації для придушення високочастотних паразитних складових [1, 2].

При цьому, вимоги до відтворюваності слід формувати не лише для єдиного вимірювання, але й для серії імпульсів. Так, для практичної експлуатації прийнято [3], що коефіцієнт варіації пікової амплітуди в серії з 10 – 12 імпульсів не повинен перевищувати 8%, а нестабільність часової прив'язки імпульсу відносно сигналу запуску має бути не більшою за 40 мкс. Саме ці обмеження критичні для відокремлення технологічно значущих змін реакції пласта від випадкових коливань каналу реєстрації.

Слід додатково зазначити, що розроблювана ІВС має бути модульною. Така

вимога продиктована тим, що для окремих свердловин змінюються як умови передавання хвилі, так і конфігурація наземного обладнання. Тому, структура системи має допускати заміну чутливого вузла, підсилювального тракту, АЦП, контролера або програмного модуля без зміни базового принципу її функціонування. Модульність також полегшує метрологічне обслуговування і поступове розширення функцій.

З позиції функціональності система має працювати у двох взаємопов'язаних режимах. Перший режим є вимірювально-аналітичним і орієнтований на накопичення часових рядів, виділення ознак та формування діагностичного рішення. Другий режим є режимом автоматичного підлаштування і передбачає подання до керувального пристрою команди на зміну частоти імпульсів, енергії розряду або моменту початку наступного циклу. Саме поєднання цих режимів є визначальною умовою для переходу від спостереження до автоматизованого керування.

Таким чином, основні вимоги до ІВС представлені на рис. 3.1, а цільові метролого-функціональні характеристики ІВС наведено в Додатку Б.



Рисунок 3.1 – Узагальнені вимоги до інформаційно-вимірювальної системи.

Джерело: побудовано автором.

3.2. Розроблення та технологічні засади виготовлення багатопараметричного п'єзоелектричного датчика для реєстрації інформативних параметрів стану привибійної зони

Конструктивно багатопараметричний датчик виконано у вигляді осьового

пакетного вузла з чотирьох кільцевих п'єзокерамічних елементів типу PZT-8, розділених трьома пружними металевими мембранами з корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т. Кільцеве виконання було обране з двох причин. По-перше, воно забезпечує введення силового потоку вздовж осі та зменшує вплив паразитних поперечних деформацій. По-друге, у внутрішньому отворі пакета зручно розміщуються провідники, демпфувальна вставка і центральний вузол кріплення, що спрощує герметизацію та екранування.

На відміну від одноелементних динамічних датчиків тиску, запропонований вузол використовує просторово рознесені п'єзокерамічні кільцеві елементи, як функціонально різні перетворювачі. Так, зовнішня пара таких елементів (ПЕ1, ПЕ4) працює переважно у каналі статико-динамічного тиску, середня пара (ПЕ2, ПЕ3) – у каналі імпульсних перевантажень, а диференціальна комбінація сигналів крайніх і середніх елементів формує коливальний канал. Схематично така побудова показана на рис. 3.2.

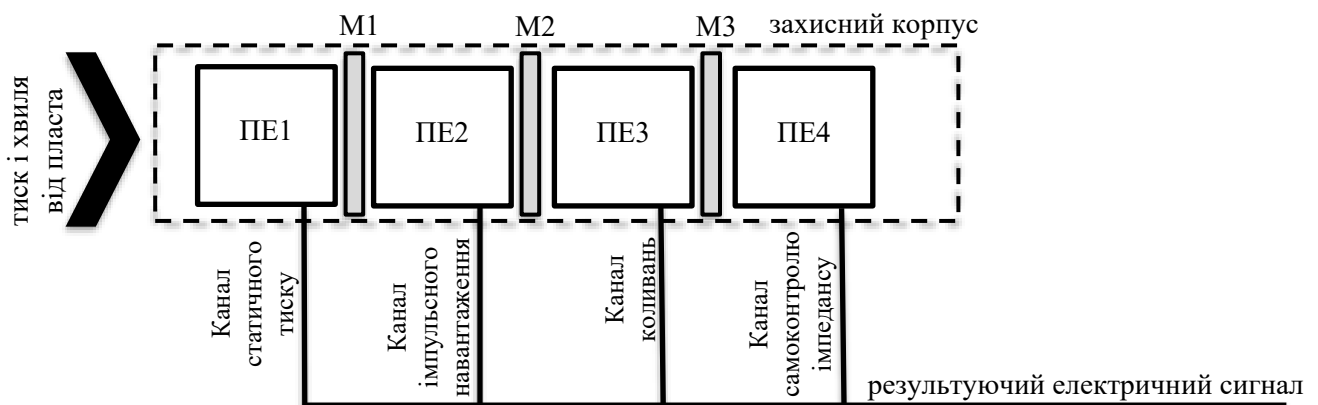


Рисунок 3.2 – Узагальнена пакетна конструкція багатопараметричного датчика з чотирма кільцевими п'єзокерамічними елементами. Джерело: побудовано автором.

Тут, електричний вихід i -го кільцевого п'єзоелемента описується співвідношенням: $Q_i(t) = d_{33,i} \cdot F_i(t) + d_{31,i} \cdot M_i(t)/h_i + \mu_i \cdot \Delta T_i + \varepsilon_i(t)$, де $F_i(t)$ – осьова сила, $M_i(t)$ – згинальний момент від мембрани, h_i – товщина кільця, $\mu_i \cdot \Delta T_i$ – температурна складова, $\varepsilon_i(t)$ – завадовий доданок. Після зарядового підсилювача формується напруга $u_i(t) = Q_i(t)/C_f$ (тут, C_f – ємність зворотного зв'язку). З

урахуванням пакетної конструкції сумарні канали датчика записуються так:

$$U_P(t) = k_P \cdot \frac{u_1(t)+u_2(t)+u_3(t)+u_4(t)}{4}; \quad U_I(t) = k_I \cdot \frac{(u_2(t)+u_3(t))-(u_1(t)+u_4(t))}{4};$$

$$U_V(t) = k_V \cdot BPF_{fv} \cdot \frac{(u_1(t)-u_2(t))+(u_4(t)-u_3(t))}{2}, \quad (3.1)$$

де $U_P(t)$ – тисковий канал, $U_I(t)$ – канал імпульсного перевантаження, $U_V(t)$ – коливальний канал, k_V – коефіцієнт підсилення, BPF_{fv} – смугове фільтрування поблизу резонансної області датчика.

Саме така форма лінійної комбінації сигналів забезпечує частотне та функціональне розділення інформативних складових при збереженні компактної конструкції первинного перетворювача.

Ключовою технологічною особливістю датчика є електронно-променевий вплив на вибрані секторні ділянки поверхні кільцевих елементів після формування провідних електродів. За результатами роботи [4] В.М.Шарапова щодо синтезу п'єзоелектричних перетворювачів та досліджень [5] М.О.Бондаренка, щодо низькоенергетичного електронно-променевого модифікування поверхні п'єзокераміки та струмопровідних електродів, локальне енергетичне навантаження в приповерхневому шарі може бути використане для керованого формування доменно-дисипативних структур [4, 6, 7]. У цій роботі такий підхід адаптовано саме до задачі багатопараметричної реєстрації швидкоплинних сигналів.

Під доменно-дисипативними структурами у роботі розуміються локальні ділянки приповерхневого шару п'єзокераміки з модифікованим співвідношенням електромеханічного зв'язку k_{33} , локального опору електрода R_e та внутрішнього коефіцієнта втрат $\tan \delta_e$ [8]. У першому наближенні їх вплив на імпеданс i -го елемента можна подати співвідношенням:

$$Z_i(\omega, D_e) = R_i^*(D_e) + j \left(\omega L_i^*(D_e) - \frac{1}{\omega C_i^*(D_e)} \right), \quad (3.2)$$

де D_e – інтегральна доза впливу енергії електронного потоку при формуванні такої дози [9]. Зміна D_e зсуває локальну резонансну частоту й добротність, чим дозволяє

просторово рознести тисковий, імпульсний і коливальний канали.

Формувати такі доменно-дисипативні зони в матеріалі п'єзокерамічних кілець будемо за технологією описаною в роботі [10].

Для технологічного експерименту по формуванню таких структур в п'єзокераміці приймемо такий режим низькоенергетичного стрічкового електронно-променевого модифікування: робоча напруга 15 – 22 кВ, струм електронного потоку 18 – 35 мА, лінійна швидкість модифікування 3 – 6 мм/с. За таких режимів формується приповерхневий модифікований шар глибиною порядку 8 – 20 мкм. Цього достатньо для зміни електродного контакту та поляризаційної структури без втрати цілісності керамічного тіла. Підкреслимо, що запропоновані режими використані для проєктування технології і можуть уточнюватися експериментально під конкретну марку п'єзокераміки.

Технологічна послідовність процесу виготовлення багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з основними конструктивними параметрами та розрахунковими режимами технологічних операцій наведена в Додатку В.

Така послідовність включає: механічну підготовку кільцевих п'єзоелементів, їх ультразвукове очищення, вакуумне нанесення Ag-електродів, секторне електронно-променеве модифікування, стабілізувальне термооброблення, складання пакета з мембранами, герметизація, електричне узгодження каналів і динамічне калібрування. Така послідовність орієнтована не на спрощене серійне виготовлення, а на отримання метрологічно стійкого сенсора з керованою частотною селективністю.

Загалом, вплив технологічних операцій на адекватність визначення інформативних параметрів багатопараметричного датчика, виготовленого за запропонованою автором технологією, наведено в табл. 3.5, а зовнішній вигляд такого датчика – на рис. 3.3.

Таблиця 3.1 – Вплив технологічних операцій на адекватність визначення інформативних параметрів багатопараметричного датчика. Джерело: складено автором.

Технологічний чинник	Інформативний параметр	Ефект
Покращення адгезії електродів після очищення	p_{max}	Зменшення похибки шляхом стабільного контактного опору
Секторне ЕП-модифікування	t_f	Пригнічення паразитного післязвучання, точніший фронт
Формування локальних дисипативних зон	δ	Стабільніше відтворення логарифмічного декремента
Частотна селективність секторів	$f_{дом}$	Підвищення роздільної здатності коливального каналу
Попереднє стискання пакета	$K_{відб}$	Повторювана передача імпульсного навантаження між мембранами
Стабілізуюче термооброблення	$K_{см}$	Зменшення дрейфу параметрів у серії вимірювань

Практичний сенс електронно-променевого модифікування сенсорів з п'єзокераміки полягає в тому, що таким методом в окремих секторах їх поверхні формується підвищене дисипативне демпфування. Для параметра p_{max} це означає зменшення перерегулювання та паразитних коливань на фронті імпульсу, а отже й підвищення адекватності визначення пікового тиску.

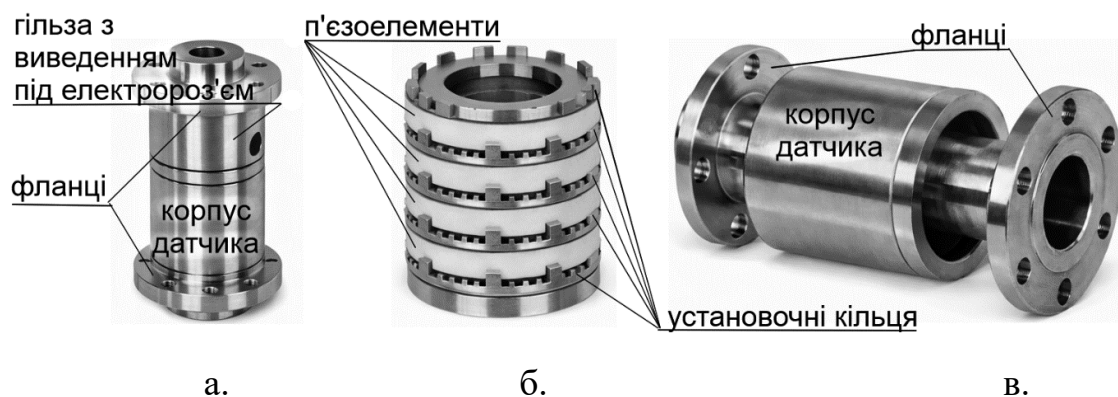


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд (а), пакет сенсорних елементів (б) та корпус (в), розробленого автором роботи багатопараметричного п'єзоелектричного датчика. Джерело: отримано автором.

Для параметра t_{ϕ} дана технологія зменшує внутрішнє дзвонове післязвучання. Це дозволяє здійснювати визначення фронту на 8-12% точніше. Для $f_{\text{дом}}$ формування доменно-дисипативних структур дозволяє створити селективні резонансні ділянки, які підвищують роздільну здатність коливального каналу. Для δ і $K_{\text{відб}}$ вона покращує повторюваність серії вимірювань через стабілізацію стану електродів та зменшення дрейфу контактного опору.

Так, в Додатку Г наведені: логіка частотного та функціонального розділення каналів датчика, характерні форми багатоканального сигналу та його спектральної декомпозиції.

З аналізу цих графіків (рис.Г.1 – Г.4, Додаток Г) витікає, що оптимальний компроміс між чутливістю й демпфуванням досягається при рівні електронного опромінення, яким забезпечується зсув смуг максимумів приблизно до 210 – 240 Гц для імпульсного каналу та 450 – 520 Гц для коливального каналу при збереженні низькочастотної чутливості тискового каналу на рівні до 40 – 70 Гц.

Загалом, базові конструктивно-технологічні характеристики багатопараметричного датчика наведено в табл.В.2 (Додаток В) (ці характеристики використовуються далі при побудові методу оцінювання ефективності та під час синтезу алгоритмів оброблення сигналів).

3.3. Розроблення методу автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу за даними багатопараметричного п'єзоелектричного датчика

Метод автоматизованого оцінювання ефективності імпульсного впливу розроблено виходячи з того, що сама по собі реєстрація тиску або навіть пакета часових реалізацій ще не дає достатньо обґрунтованого висновку щодо результативності дії на привибійну зону. Для урахування такої результативності необхідно перейти від простого вимірювання до формування інтегрального критерію, що зв'язує виміряні сигнали з фізичним станом пласта та з очікуваним відновленням продуктивності свердловини.

У роботі запропоновано метод, що складається з восьми логічно пов'язаних

етапів: синхронізації серії імпульсів із запуском генератора, реєстрації багатоканального сигналу, фільтрації та компенсації дрейфу, сегментації імпульсів, виділення часових, спектральних та енергетично-імпедансних ознак, нормування відносно базового стану свердловини, обчислення інтегрального показника η та формування діагностичного рішення. Узагальнена блок-схема методу наведена на рис. 3.4.

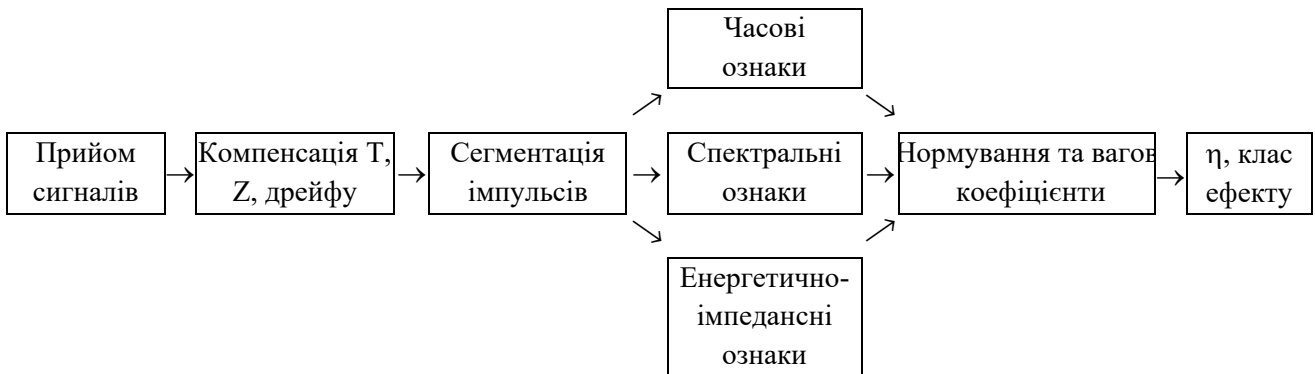


Рисунок 3.4 – Блок-схема методу автоматизованого оцінювання ефективності імпульсного впливу. Джерело: складено автором.

Розроблюваний метод орієнтований на поєднання, як прямих, так і непрямих ознак. До прямих ознак належать: $p_{\max}$, t_f , J_p та $K_{ст}$, тобто параметри, які безпосередньо визначають енергію і часову форму імпульсу. До непрямих належать $f_{дом}$, δ , $K_{відб}$ і $K_{рез}$, які характеризують реакцію середовища, ступінь хвильового зв'язку з привибійною зоною та наближення режиму до квазірезонансного. Саме дотримання непрямих ознак забезпечує зменшення залежності сформованого висновку від експертної суб'єктивності.

Для базового перетворення сигналу в тиск використовується матриця калібрування K , одержана на етапі динамічних випробувань багатопараметричного датчика. У скалярному наближенні для тискового каналу вона зводиться до співвідношення $p(t) = p_0 + K_p \cdot [U_{p(t)} - U_{p_0}]$, де p_0 – базовий тиск у системі перед запуском імпульсу, U_{p_0} – напруга нульового рівня після компенсації дрейфу. Далі для кожного імпульсу визначається набір ознак $x = \{p_{\max}, t_f, J_p, f_{дом}, K_{відб}, \delta, K_{ст}\}$, де:

$$J_p = \int_{t_0}^{t_1} [p(t) - p_0]^2 dt; \quad K_{\text{відб}} = \frac{A_{\text{відб}}}{A_{\text{прям}}}; \quad \delta = \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right);$$

$$K_{\text{ст}} = 1 - \frac{\sigma_A}{A_{\text{ср}}}; \quad \xi_j = \text{clip} \left(\frac{x_j - x_{j,\min}}{x_{j,\text{opt}} - x_{j,\min}}, 0, 1 \right); \quad \eta = \sum_{j=1}^m w_j \xi_j; \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1.$$

Тут: $p_{\max}$ – максимальне (пікове) значення тиску імпульсного сигналу в межах аналізованого часового інтервалу; t_ϕ – характерний час фронту імпульсу, тобто інтервал часу, за який сигнал зростає від початкового рівня до максимального значення (або до заданої частки від $p_{\max}$); J_p – інтегральний показник енергії або інтенсивності відхилення тиску від початкового рівня; $p(t)$ – поточне значення тиску як функція часу; p_0 – початкове або базове значення тиску; t_0 – початковий момент часу аналізованого інтервалу; t_1 – кінцевий момент часу аналізованого інтервалу; d_t – елементарний приріст часу; $f_{\text{дом}}$ – частота сигналу, на якій спектральна щільність потужності має максимум і яка визначає основну енергетичну складову коливального процесу; $K_{\text{відб}}$ – коефіцієнт відбиття сигналу; $A_{\text{відб}}$ – амплітуда відбитої хвилі або відбитого сигналу; $A_{\text{прям}}$ – амплітуда прямої хвилі або прямого сигналу; δ – логарифмічний декремент затухання; A_1 , A_2 – відповідно, амплітуди першого та наступного коливань, що використовуються для оцінювання затухання; $K_{\text{ст}}$ – коефіцієнт стабільності амплітуди; σ_A – середньоквадратичне відхилення амплітуди; $A_{\text{ср}}$ – середнє значення амплітуди; ξ_j – нормоване значення j -го критерію ефективності; $\text{clip}(\cdot)$ – операція обмеження значення в межах від 0 до 1; x_j – поточне значення j -го параметра; $x_{j,\min}$ – мінімально допустиме значення j -го параметра; $x_{j,\text{opt}}$ – оптимальне значення j -го параметра; η – узагальнений показник ефективності; w_j – ваговий коефіцієнт j -го критерію; ξ_j – нормоване значення j -го критерію; m – кількість критеріїв, що враховуються при оцінюванні.

Нормування величини ξ_j здійснюється відносно технологічно обґрунтованих діапазонів і приймається, як симетрична функція відстані до оптимального значення. Також приймаємо, що найбільшу вагу мають чинники $p_{\max}$ і J_p , оскільки саме вони визначають реальний енергетичний вплив на пласт; дещо меншу вагу мають $f_{\text{дом}}$ і $K_{\text{відб}}$, які відображають узгодження хвильового

процесу з властивостями привибійної зони. Слід підкреслити, що модель машинного навчання в роботі не використовується як ізольована «чорна скринька». Її входні ознаки мають безпосередній фізичний зміст і походять із хвильової, фільтраційної та електромеханічної моделей процесу. Зокрема, $p_{тах}$ характеризує інтенсивність імпульсного навантаження, t_f – швидкість формування фронту збурення, J_p – енергетичний внесок імпульсу, $f_{дом}$ – резонансно-частотні особливості системи, $K_{відб}$ і δ – втрати та відбиття енергії, а $K_{ст}$ – стабільність серії імпульсів. Отже, алгоритмічна модель виконує роль узагальнювача фізично інтерпретованих параметрів, а не замінює їх.

Загалом, інтегральний показник ефективності η не є довільною згортувальною функцією, а виконує роль нормованого оперативного критерію, що поєднує найбільш інформативні ознаки імпульсного впливу та реакції пласта. До складу показника включено лише ті параметри, які одночасно: фізично пов'язані з механізмом дії на пласт, відтворюються у серії імпульсів, мають різну інформаційну природу, не дублюють один одного та зберігають діагностичну стійкість за наявності дестабілізуючих чинників.

Після нормування ознак, інтегральний показник визначався так:

$$\eta = \sum_{i=1}^m w_i \xi_i, \quad \sum_{i=1}^m w_i = 1,$$

де ξ_i – нормовані інформативні параметри, w_i – вагові коефіцієнти. Значення w_i обирали за комбінованою процедурою: фізичний відбір ознак, кореляційний аналіз із продуктивним ефектом $\Delta Q/Q_0$, оцінювання стійкості ознаки до шуму та температурного дрейфу, а також експертне уточнення.

Для розрахункового прикладу розглянемо малодебітну нафтову свердловину Долинського нафтового родовища (Передкарпатська нафтогазоносна область, Бориславсько-Покутський нафтогазоносний район, околиці м. Долина, Івано-Франківська область) глибиною близько 2380 м (номер свердловини не наводиться з огляду на узагальнений характер промислових даних). Типові входні дані для неї: базовий затрубний тиск 13,8 МПа, густина робочої рідини 1030 кг/м³, модуль об'ємної пружності 1,92 ГПа (для робочої рідини за заданих температурно-баричних умов), раціональна довжина

імпульсної камери $L_k = 0,32$ м і частота повторення імпульсів $f_r = 8$ Гц. За результатами реєстрації серії з 10 імпульсів (табл.Д.1, Додаток Д) отримано: середня динамічна амплітуда $A_{cp} = 24,7$ МПа, середній час фронту $t_\phi = 68$ мкс, інтенсивність відхилення тиску $J_p = 54,8$ МПа²·мс, домінантна частота $f_{dom} = 11,8$ Гц, коефіцієнт відбиття сигналу $K_{відб} = 0,46$, логарифмічний декремент затухання $\delta = 1,36$ та коефіцієнт стабільності амплітуди $K_{ст} = 0,95$.

Після нормування та розподілу за вагами критеріїв $w = \{0,24; 0,18; 0,16; 0,14; 0,10; 0,10; 0,08\}$ (табл.Д.2, Додаток Д) одержано узагальнений показник ефективності $\eta = 0,78$ (табл.Д.3, Додаток Д) (приймаємо наступну шкалу інтерпретації: $\eta < 0,45$ – вплив неефективний; $0,45 \leq \eta < 0,65$ – вплив обмежено ефективного; $0,65 \leq \eta < 0,80$ – вплив ефективного; $\eta \geq 0,80$ – вплив високоефективного). Таким чином, для наведеного прикладу система формує рішення «ефективний режим з наближенням до раціональної зони».

Додатково в рамках даного методу пропонується оцінювати очікуване відновлення продуктивності за запропонованим автором розрахунковим критерієм $K_q^* = 1 + 0,30 \cdot \eta$, що встановлює лінійний зв'язок між нормованим показником ефективності впливу η та прогнозованим коефіцієнтом відновлення продуктивності. При цьому, значення коефіцієнта 0,30 прийнято як верхню межу очікуваного приросту дебіту в межах розглянутого розрахунково-експериментального сценарію (у подальшому це значення має уточнюватися за результатами накопичення польових спостережень і промислового впровадження). Так, для наведеного прикладу $K_q^* = 1,234$ (тобто, очікуваний приріст дебіту становить близько 23,4%). Це значення добре узгоджується з наведеними в попередніх авторських роботах межами 20–30% для промислової апробації адаптивної імпульсної системи [11, 12].

Ще однією особливістю розроблюваного методу є поєднання показників імпульсної дії та реакції середовища в межах єдиного числового критерію. Завдяки цьому система зменшує вплив окремого параметра на результат оцінювання ефективності, наприклад від абсолютного піку тиску, який може бути високим, але не супроводжуватися достатньо вираженим відгуком пласта. У

цьому разі η знижується внаслідок малих значень $K_{відб}$, $f_{дом}$ або $K_{ст}$, і розроблена на основі запропонованого методу система автоматично має пропонувати коригування режиму.

Значення інтегрального показника ефективності η , як функції залежності від довжини імпульсної камери та частоти повторення імпульсів розраховане за допомогою програми, написаної автором (Python), а результат її виконання наведено на рис. 3.5.

За результатами розрахунку видно, що раціональна зона відповідає таким параметрам $L_k \approx 0,28\text{--}0,36\text{ м}$ $f_r \approx 6,5\text{--}8,5\text{ Гц}$.

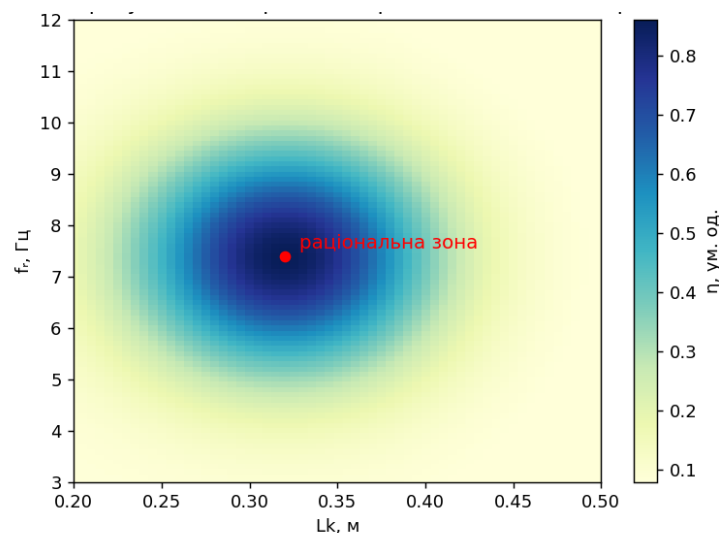


Рисунок 3.5 – Розрахункова поверхня інтегрального показника ефективності η в координатах L_k та f_r . Джерело: отримано автором.

Отже, запропонований метод не лише оцінює поточний стан привибійної зони нафтової свердловини, а й формує основу для пошуку раціонального режиму адаптивного імпульсного впливу на неї.

3.4. Розроблення алгоритмів оброблення, аналізу та інтерпретації вимірювальних сигналів у системі контролю

Розроблений метод реалізується системою алгоритмів, які забезпечують перехід від сирого багатоканального сигналу датчика до діагностичного рішення щодо ефективності імпульсного впливу. Алгоритмічна частина ІВС побудована за

каскадним принципом, що включає: первинну підготовку сигналу, синхронізацію і сегментацію імпульсів, виділення ознак, класифікацію режиму та формування рекомендацій для наступного циклу.

Послідовність виконання алгоритмів узагальнено на рис.3.6. Її принциповою перевагою є відмова від спрощеної одноозначової інтерпретації. Це дає можливість одночасно оцінювати амплітуду, енергію, резонансність і стійкість відгуку, а також використовувати частину ознак не для оцінки результату, а для самоконтролю коректності вимірювання.

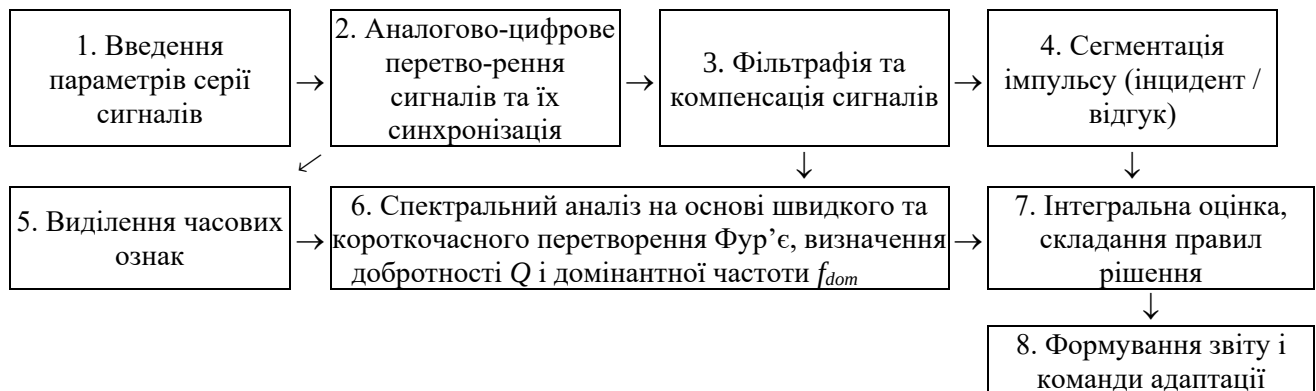


Рисунок 3.6 – Узагальнена послідовність виконання алгоритмів оброблення, аналізу та інтерпретації сигналів. Джерело: побудовано автором.

Вхідними даними для алгоритмів є дискретні часові ряди $u_p[n]$, $u_l[n]$, $u_v[n]$, сигнал запуску $\text{trig}[n]$, а також допоміжні технологічні параметри p_0 , T_p , ρ_p та f_r .

На першому етапі відбувається компенсація нульового дрейфу за ковзним вікном довжиною 0,2 с і нормування рівнів каналів згідно з матрицею калібрування. В цій роботі для цифрового фільтрування (видалення одиничних викидів) будемо використовувати комбінацію БІХ-фільтру 4-го порядку та медіанного фільтра. Алгоритм первинної підготовки завершується оцінюванням відношення "сигнал / шум". Для тискового каналу використовується співвідношення $\text{SNR} = 20 \cdot \log_{10} (A_{\text{кор}} / \sigma_{\text{шум}})$. Тут, якщо $\text{SNR} < 18$ дБ, система не переходить до етапу оцінювання η , а фіксує подію як низькоякісне вимірювання. Це запобігає формуванню хибних рішень на основі зашумлених осцилограм.

Після фільтрації виконується синхронізація з сигналом запуску та сегментація імпульсів. Межа імпульсу визначається як сукупність двох умов: перевищення порога $0,15A_{max}$ і виконання критерію похідної $dp/dt > \gamma$. Це дозволяє коректно відокремити реальний фронт хвилі від коливань перед імпульсом та відбитих хвиль. Типовий сегментований сигнал показано на рис. 3.7.

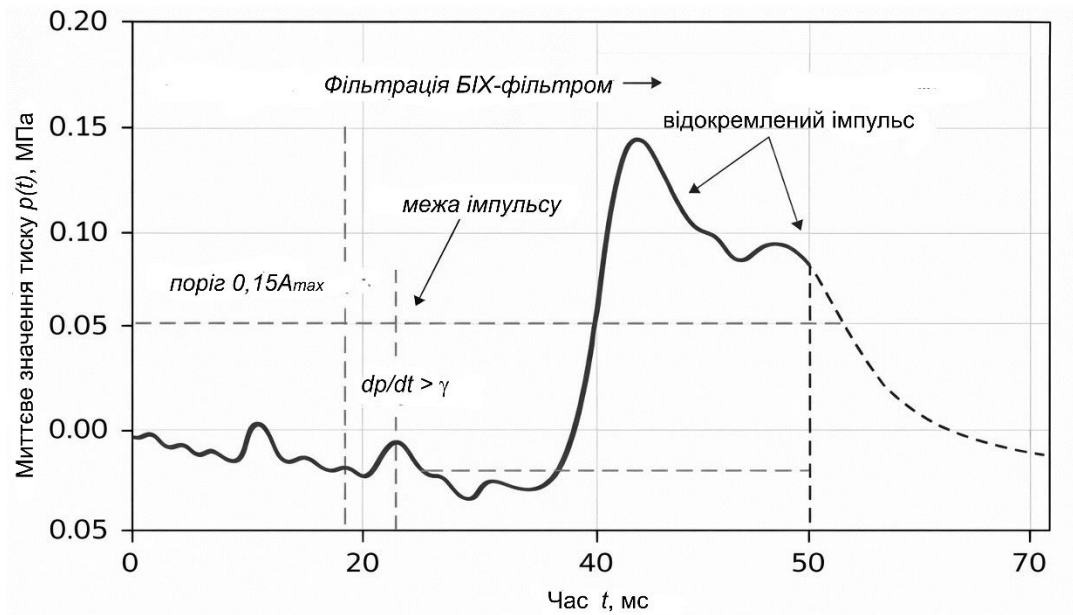


Рисунок 3.7 – Типовий сегментований сигнал. Джерело: отримано автором.

Часові ознаки визначаються у прямому часовому домені. Максимум p_{max} розраховується, як максимум надлишкового тиску, час фронту t_f – як різниця між моментами перетину рівнів $0,1A_{max}$ і $0,9A_{max}$, тривалість – за енергетичним критерієм 95% накопиченої енергії, декремент затухання δ – за максимумами послідовних відбитих хвиль. Спектральні ознаки $f_{дом}$ і S_{band} визначаються на основі швидкого перетворення Фур'є (FFT) із застосуванням віконної функції Хеннінга [13]:

$$p_{max} = \max[p(n\Delta t) - p_0]; \quad t_f = t_{0,9} - t_{0,1}; \quad SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{\sigma} \right);$$

$$f_{дом} = \arg \max |FFT[p(n)]|; \quad K_{відб} = \frac{A_{відб}}{A_{прям}}.$$

Для перевірки правильності запропонованого підходу, проведемо розрахунок для одного імпульсу серії, для якого після фільтрації одержано такі значення

параметрів: $U_{peak} = 4,58$ В, $U_0 = 0,75$ В, $K_p = 6,45$ МПа/В при базовому тиску $p_0 = 13,8$ МПа. Тоді динамічна надбавка становить $\Delta p = (4,58 - 0,75) \cdot 6,45 = 24,70$ МПа, а повне пікове значення – 38,50 МПа. При цьому, якщо моменти перетину рівнів $0,1A_{max}$ і $0,9A_{max}$ дорівнюють 1,24834 с та 1,24841 с, тоді час фронту становить $t_\phi = 70$ мкс.

Для обчислення енергетичного індексу, дискретизований інтеграл записується у вигляді $J_p \approx \sum_i (p_i - p_0)^2 \cdot \Delta t$. Для наведеної на рис. 3.8 осцилограми при $f_s = 250$ кГц та $N = 128$ відліків у межах основного імпульсу, одержано $J_p = 55,1$ МПа²·мс. Аналогічно відбиті хвилі з амплітудами 11,4 і 3,1 МПа дають $\delta = \ln(11,4/3,1) = 1,30$.

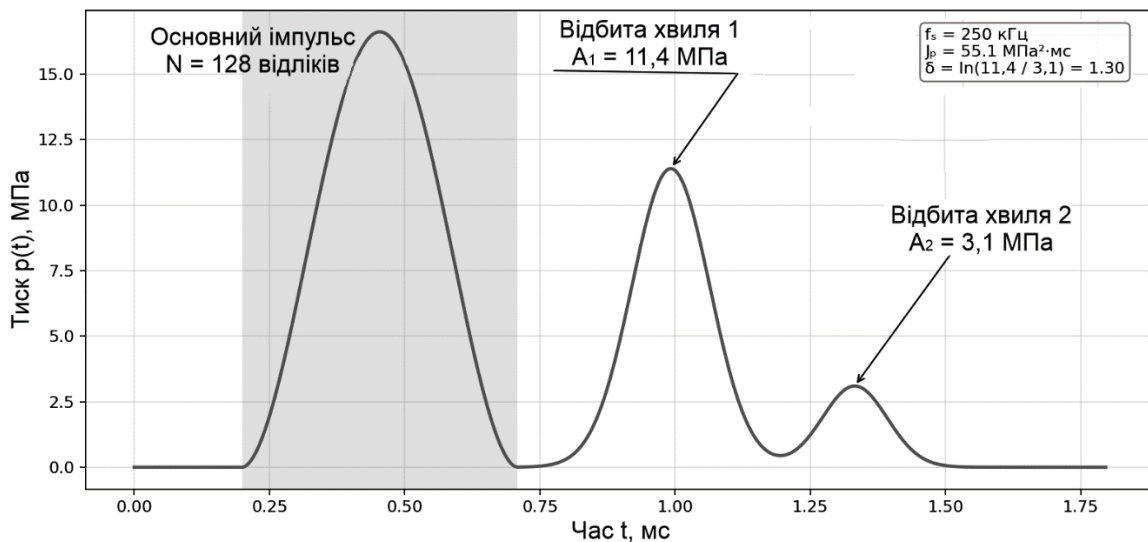


Рисунок 3.8 – Осцилограма для обчислення енергетичного індексу та логарифмічного декременту. Джерело: отримано автором.

На наступному етапі формується вектор ознак x_k для k -го імпульсу та матриця серії $X = \{x_1 \dots x_n\}$. За цією матрицею визначаються міжімпульсна повторюваність, наявність тренду деградації та вибіркові статистики. Якщо система виявляє монотонне зменшення p_{max} понад 10% у межах трьох послідовних імпульсів або зростання δ понад 20%, формується рекомендація знизити частоту генерації або переглянути довжину імпульсної камери.

Алгоритм інтерпретації результату є дворівневим. На першому рівні за величиною η формується клас ефективності. На другому – за правилами

продукційного типу формується коригувальна дія.

Так, правило R₁ має вигляд:

"якщо $\eta < 0,65$ і $K_{\text{вдо}} < 0,35$, тоді треба зменшити f_r на 1 Гц та збільшити інтервал між серіями";

правило R₂:

"якщо $\eta < 0,65$ і p_{max} достатній, але $f_{\text{дом}}$ відхиляється від цільового діапазону, тоді треба змінити L_k у напрямку раціональної зони, визначеної розподілом на рис. 3.5".

Для демонстрації працездатності та адекватності розроблених алгоритмів оброблення, аналізу та інтерпретації вимірювальних сигналів у системі контролю, в табл. 3.2 наведено результати визначення параметрів для одного імпульсу.

Таблиця 3.2 – Розрахунковий приклад визначення параметрів одного імпульсу. Джерело: складено автором.

Показник	Позначення	Значення
Базовий тиск	p_0	13,8 МПа
Пікова напруга після підсилювача	U_{peak}	4,58 В
Нульовий рівень каналу	U_0	0,75 В
Коефіцієнт перетворення	K_p	6,45 МПа/В
Динамічна амплітуда	Δp	24,70 МПа
Повний пік тиску	p_{max}	38,50 МПа
Час фронту	t_ϕ	70 мкс
Енергетичний індекс	J_p	55,1 МПа ² ·мс
Декремент затухання	δ	1,30
Домінантна частота	$f_{\text{дом}}$	11,8 Гц

Наведені дані дозволяють оцінити інформативність виділених параметрів, а також проаналізувати обчислювальну складність запропонованих процедур і придатність їх реалізації в умовах реального часу.

Отже, розроблені алгоритми оброблення, аналізу та інтерпретації вимірювальних сигналів у системі контролю дозволяють виділити інформативні параметри окремих імпульсів, провести їх узагальнення в межах серії впливів і сформулювати діагностичне рішення в реальному часі. Результати розрахункового

прикладу підтверджують, що запропоновані алгоритми мають прийнятну обчислювальну складність для реалізації на локальному керувальному пристрої, а сумарний час оброблення та формування діагностичного висновку після завершення серії з 10 імпульсів не перевищує 0,35 с, що свідчить про практичну придатність розробленого підходу для оперативного контролю процесу.

3.5. Розроблення структурної схеми та функціональної моделі інформаційно-вимірювальної системи

Структурна схема ІВС розроблювалася, як багаторівнева система, у якій вимірювальний, обчислювальний та керувальний контур поєднані єдиним часовим і інформаційним простором. Вона включає імпульсний генератор імпульсів, насосний агрегат, багатопараметричний датчик, аналоговий тракт захисту й підсилення, аналого-цифровий перетворювач з локальним контролером, підсистему цифрового оброблення сигналів із виділенням інформативних параметрів, модуль оцінювання ефективності впливу η , керувальний пристрій для автоматичного підлаштування режиму та систему візуалізації, контролю і накопичення даних, а також базу даних. Структурно-функціональну схему такої ІВС наведено на рис. 3.9.

Принцип роботи представленої на рис. 3.9 ІВС базується на послідовному перетворенні, обробленні та інтерпретації вимірювальних сигналів із подальшим формуванням керувальних впливів. Так, імпульсний генератор імпульсів разом із насосним агрегатом формує фізичний вплив на середовище, у результаті чого виникають імпульсні процеси тиску. Багатопараметричний датчик реєструє ці процеси у вигляді аналогових сигналів, що надходять до аналогового тракту захисту і підсилення, де здійснюється їх фільтрація, нормалізація та підготовка до подальшого перетворення. Далі сигнал надходить до аналого-цифрового перетворювача з локальним контролером, де виконується його оцифрування та первинна синхронізація.

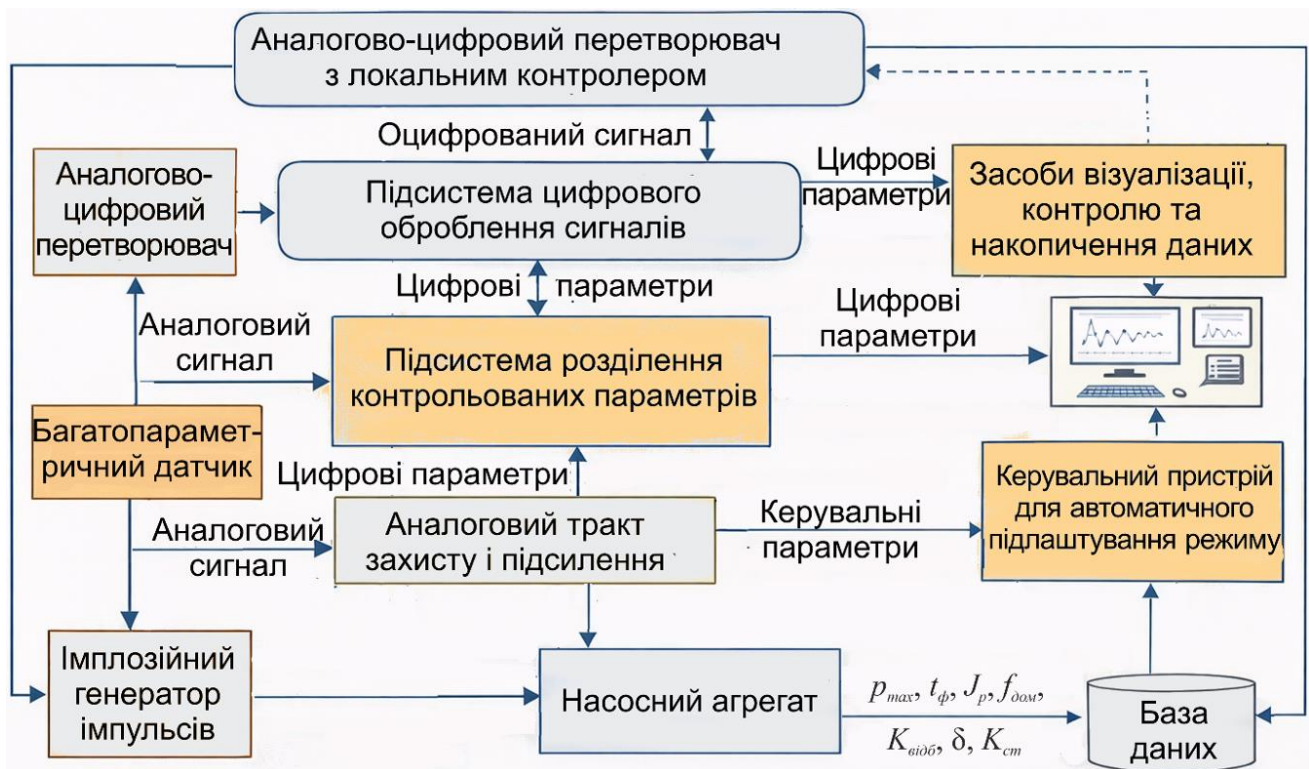


Рисунок 3.9 – Структурно-функціональна схема розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу (більш яскравим кольором виділені блоки вперше розроблені та запроваджені автором дисертації). Джерело: побудовано автором.

Далі, оцифровані сигнали передаються до підсистеми цифрового оброблення сигналів, у якій здійснюється виділення інформативних параметрів (таких як максимальний тиск, тривалість фронту, енергетичний індекс, домінантна частота тощо). Після цього підсистема розділення контрольованих параметрів формує структуровані набори цифрових даних, які використовуються для подальшого аналізу. Отримані параметри передаються до модуля оцінювання ефективності та керувального пристрою, який на їх основі формує керувальні впливи для автоматичного підлаштування режиму роботи генератора імпульсів і насосного агрегату. Паралельно з цим, всі дані надходять до системи візуалізації, контролю та накопичення даних і зберігаються в базі даних для подальшого аналізу та прийняття рішень. Наявність зворотних зв'язків між вимірювальними, обчислювальними та керувальними блоками забезпечує адаптивність системи та

узгодженість її роботи в єдиному часовому та інформаційному просторі.

У запропонованій структурі, розроблений в підрозділі 3.2 багатопараметричний датчик є єдиним первинним сенсорним вузлом для реєстрації динамічного тиску, імпульсних перевантажень і коливальних процесів. Такий підхід зменшує кількість рознесених датчиків, усуває проблеми часової розсинхронізації між різнотипними сенсорами і спрощує процедуру динамічного калібрування. Саме завдяки цьому досягається достовірність і відтворюваність, які є принципово важливими для задач діагностування стану привибійної зони.

Аналоговий тракт виконує чотири основні функції: первинне підсилення заряду, захист від перенапруги, смугове виділення каналів та антиаліасний захист перед оцифруванням. При цьому приймаємо: тисковий канал має смугу 5–80 Гц, імпульсний канал – 180–260 Гц, а коливальний – 420–900 Гц. Таке розведення зменшує взаємний вплив складових сигналу й забезпечує коректне подальше виділення інформативних ознак у підсистемі цифрового оброблення сигналів.

Аналого-цифровий перетворювач із локальним обчислювальним контролером забезпечують високошвидкісну буферизацію і первинне арифметичне оброблення безпосередньо у місці реєстрації. Це дозволяє зменшити навантаження на центральний комп'ютер і забезпечити гарантований запис субмілісекундних процесів навіть за умов тимчасового порушення зв'язку з вищим рівнем системи. Саме локальний обчислювальний рівень виконує буферизацію подій і формує компактні пакети даних для подальшої передачі в систему диспетчерського контролю, візуалізації та накопичення даних.

Склад основних блоків, їх функціональне призначення та основні технічні характеристики блоків розробленої ІВС наведено в табл. 3.3 і 3.4.

Функціональна модель системи розглядається як перетворення вхідного впливу $W(t)$ у рішення $D(t)$. Формально це можна подати оператором $D(t) = F\{W(t), S(t), M(t)\}$, де $S(t)$ – вимірювальні сигнали датчика, $M(t)$ – допоміжні технологічні дані, F – сукупність алгоритмів оброблення, оцінювання й правил адаптації.

Таблиця 3.3 – Склад основних блоків ІВС та їх функціональне призначення.

Джерело: складено автором.

Блок	Призначення	Ключові характеристики
Багатопараметричний датчик	Реєстрація тиску, імпульсу, коливань	3 канали, пакет з 4 кілець
Аналоговий тракт	Підсилення, захист, смугове розділення	SNR > 18 дБ, антиаліасинг
АЦП + обчисл. контролер	Оцифрування та буферизація подій	16 біт, 250 кГц
DSP-підсистема	Фільтрація, FFT/STFT, ознаки	час оброблення серії < 0,35 с
Модуль оцінки ефективності η	Розрахунок інтегрального показника	7 ознак, рішення на правилах
ПЛК адаптації	Корекція частоти та режиму впливу	двосторонній зв'язок з HMI
HMI/SCADA	Візуалізація, звітність, архів	локальна БД + експорт

Таблиця 3.4 – Основні технічні характеристики запропонованої ІВС.

Джерело: складено автором.

Параметр	Значення
Діапазон динамічного тиску	8–60 МПа
Частота дискретизації	250 кГц
Розрядність АЦП	16 біт
Відносна похибка визначення p_{max}	$\pm 1,8 \%$
Час формування рішення після серії з 10 імпульсів	до 0,35 с
Кількість інформативних ознак у модулі оцінювання	7
Інтерфейси зв'язку	RS-485 / Ethernet / USB-C
Режими роботи	моніторинг, діагностика, адаптація, сервіс

Таким чином, система виконує не тільки вимірювання, а й функцію інтерпретації з можливістю вироблення команд керування.

Важливою позитивною відмінністю розробленої ІВС від альтернативних систем є наявність окремого модуля оцінювання ефективності η , який зв'яже вимірювальні сигнали з очікуваним технологічним результатом. У більшості промислових систем постійного свердловинного моніторингу оператор отримує тиск, температуру, іноді витрату чи вібрацію, але не отримує числового висновку щодо результативності саме імпульсної дії. У запропонованій ІВС такий висновок формується автоматизовано в межах штатного робочого циклу.

Також ІВС передбачає двосторонній зв'язок з програмованим логічним контролером автоматичного керування технологічними процесами та обладнанням. У напрямі «вимірювання → керування» передаються ознаки і значення η , а у напрямі «керування → вимірювання» - параметри режиму, мітки запуску, службові команди повторної реєстрації або калібрування. Така організація забезпечує замкненість контуру адаптації та виключає ситуацію, коли вимірювальний тракт функціонує автономно від системи впливу.

З погляду функціональної моделі розроблюваної ІВС доцільно виокремити чотири підмножини функцій: вимірювальні, експлуатаційні, алгоритмічні та інформаційні. Вимірювальні функції включають перетворення і калібрування сигналів; експлуатаційні – самодіагностику, захист і синхронізацію; алгоритмічні – виділення ознак, розрахунок ефективності η та рекомендацій; інформаційні – архівацію, звітність і візуалізацію. Така декомпозиція відображена в моделі функцій на рис. 3.10.

Програмні модулі ІВС для реєстрації, аналітики та формування рішень

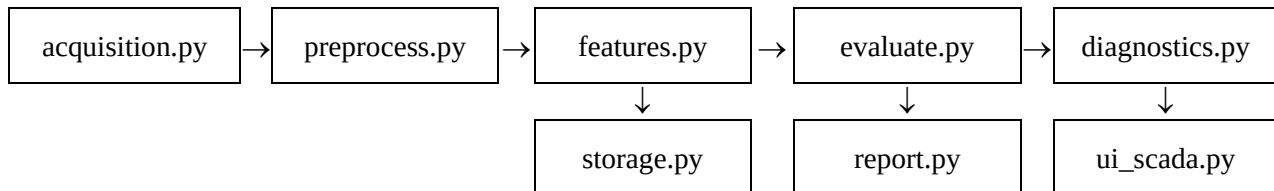


Рисунок 3.10 – Функціональна декомпозиція програмно-аналітичного рівня ІВС. Джерело: складено автором.

Саме така функціональна декомпозиція покладена в основу програмного забезпечення, описаного в наступному підрозділі.

3.6. Розроблення інформаційного та програмного забезпечення системи контролю параметрів і оцінювання ефективності імпульсного впливу

Інформаційне забезпечення ІВС побудоване за подієвою моделлю. Основною одиницею даних є цикл серії імпульсів, для якого зберігаються паспорт свердловини, параметри середовища, режим генератора, часові ряди трьох каналів датчика, обчислені ознаки, інтегральний показник η , рішення модуля діагностики

та команда адаптації. Такий підхід дає змогу поєднати вхідні необроблені сигнали з результатами їх інтерпретації в одному наборі даних.

На логічному рівні база даних містить щонайменше чотири основні інформаційні структури IBC: WellPassport, PulseSeries, FeatureVector та DecisionLog. В структурі WellPassport зберігаються незмінні характеристики свердловини, а саме: її глибина, інтервал перфорації, поточний рівень обводнення, тип робочої рідини. У PulseSeries зберігаються параметри серії імпульсів. У FeatureVector – набір x_k та η . У DecisionLog – службова інформація про реакцію системи, що дає змогу відстежити історію адаптації і відтворити хід прийнятих рішень.

Програмне забезпечення IBC реалізовано об'єктноорієнтованою мовою Python за модульним принципом. Такий вибір зумовлений наявністю відповідних бібліотек для цифрового оброблення сигналів, статистичного аналізу, взаємодії з базами даних та побудови операторських інтерфейсів. Базова структура містить модулі acquisition.py, preprocess.py, features.py, evaluate.py, diagnostics.py, storage.py, report.py та ui_scada.py, зв'язки між якими показані на рис. 3.10, а узагальнену структуру програмних модулів наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Основні програмні модулі IBC та їх функції. Джерело: складено автором.

Модуль	Функція	Основні вхідні та вихідні дані
acquisition.py	Приймання даних АЦП та часових міток	<u>вхід</u> : пакети даних аналого-цифрового перетворювача; <u>вихід</u> : буферизовані дані
preprocess.py	Компенсація дрейфу, фільтрація, відношення сигналу до шуму	<u>вхід</u> : необроблені дані; <u>вихід</u> : відфільтровані кадри
features.py	Сегментація, часова і спектральна аналітика	<u>вхід</u> : відфільтровані кадри; <u>вихід</u> : вектори ознак
evaluate.py	Нормування ознак, розрахунок η та K_q^*	<u>вхід</u> : вектори ознак; <u>вихід</u> : значення показника ефективності
diagnostics.py	Класифікація стану та рекомендації	<u>вхід</u> : значення показника ефективності η та правила прийняття рішень; <u>вихід</u> : журнал прийнятих рішень
storage.py	Запис до бази даних, архівування серій	<u>вхід</u> : усі інформаційні структури системи; <u>вихід</u> : записи в базі даних
report.py	Створення протоколу та звіту	<u>вхід</u> : записи бази даних; <u>вихід</u> : звіти у форматах PDF та CSV
ui_scada.py	Відображення осцилограм та команд оператора	<u>вхід/вихід</u> : інтерфейс взаємодії з користувачем

Модуль `acquisition.py` виконує приймання пакетів АЦП, прив'язку до часу запуску серії і формування буфера подій. Модуль `preprocess.py` реалізує видалення дрейфу, цифрову фільтрацію та перевірку відношення сигналу до шуму (SNR). Модуль `features.py` відповідає за сегментацію імпульсів і обчислення ознак p_{max} , t_{ϕ} , J_p , δ , $f_{дом}$ і $K_{відб}$. Модуль `evaluate.py` розраховує η та прогнозний K_q^* , а `diagnostics.py` – порівнює значення з правилами прийняття рішень. Модуль `storage.py` організує архівацію, `report.py` створює протокол дослідження, а `ui_scada.py` забезпечує візуальну взаємодію оператора із системою.

Приклад лістингу ядра модуля керування ІВС наведено в Додатку Є. Алгоритм, реалізований у коді, використовує бібліотеки `numpy` та `scipy` і зберігає лише ті залежності, які безпосередньо потрібні для роботи ІВС.

Для перевірки роботи програмного забезпечення використано той самий розрахунковий приклад, що і в підрозділах 3.3-3.4. Так, після реєстрації серії з 10 імпульсів (табл.Д.1, Додаток Д) модуль `evaluate.py` автоматично розрахував коефіцієнт ефективності $\eta=0,78$ і прогнозний коефіцієнт $K_q^*=1,234$. Модуль `diagnostics.py` класифікував стан як «ефективний режим», а `report.py` згенерував стислий протокол з рекомендацією зберегти поточну довжину камери $L_k=0,32$ м та допустимим зменшенням частоти генерації до 7,5 Гц при появі тенденції до зростання декременту затухання. У табл. 3.6 наведено приклад розрахунку за методикою оцінювання ефективності імпульсного впливу.

Таблиця 3.6 – Приклад розрахункової методики оцінювання ефективності імпульсного впливу. Джерело: отримано автором.

Крок	Розрахункова дія	Результат розрахунку
1	Перетворення напруги в тиск: $p(t) = p_0 + K_p \cdot (U - U_0)$	$p_{max} = 38,50$ МПа
2	Виділення часових ознак	$t_{\phi} = 70$ мкс
3	Обчислення енергетичного індексу	$J_p = 55,1$ МПа ² ·мс
4	Оцінка відбитої хвилі й декременту	$K_{відб} = 0,46$; $\delta = 1,30$
5	Спектральний аналіз і визначення $f_{дом}$	$f_{дом} = 11,8$ Гц
6	Нормування відносно технологічних меж	$\xi = \{0,96; 0,99; 0,93; \dots\}$
7	Зважування і розрахунок показника ефективності η	$\eta = 0,78$
8	Прогнозування відновлення продуктивності	$K_q^* = 1,234$; $\Delta Q \approx 23,4\%$

Ця методика включає послідовний перехід від зареєстрованих сигналів до інтегрального висновку й може безпосередньо бути реалізована як штатна процедура в програмному забезпеченні системи.

Окреме практичне значення має порівняння розробленої IBC із поширеними в нафтогалузі системами свердловинного моніторингу. Для цього обрано три реальні рішення: SLB Permanent Monitoring, Halliburton DataSphere® permanent monitoring suite та Baker Hughes SureSENS™ electronic well monitoring. Вони широко застосовуються для контролю тиску, температури, витрати або вібрації в реальному часі, проте не орієнтовані на безпосереднє автоматизоване оцінювання ефективності імпульсного електрогідравлічного впливу.

Порівняння, наведене на рис. 3.11 та в табл. 3.7, показує, що запропонована IBC поступається універсальним промисловим рішенням за ступенем відпрацьованості серійної експлуатації.

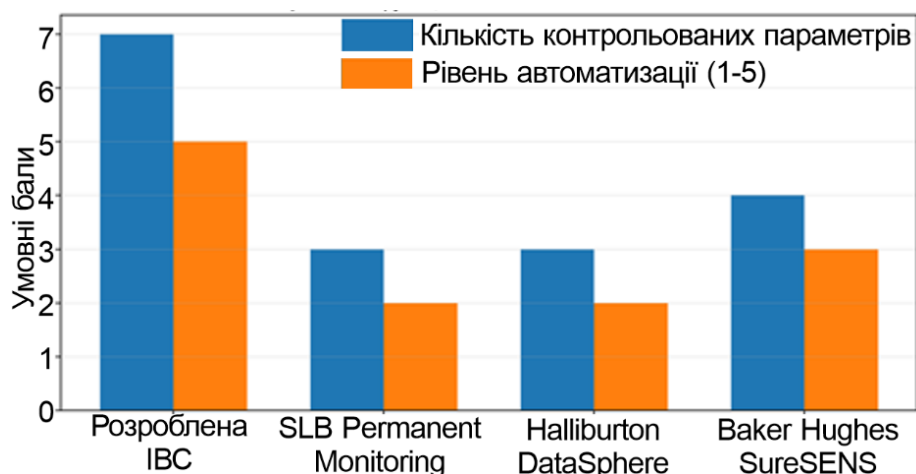


Рисунок 3.11 – Порівняння функціональної насиченості запропонованої IBC та поширених систем свердловинного моніторингу. Джерело: побудовано автором.

При цьому, за результатами порівняння, розроблена в роботі IBC має визначальні переваги за придатністю до контролю субмілісекундних імпульсів, інтегрованою оцінкою ефективності впливу, адаптивним формуванням рішень та мінімальною залежністю від оператора.

Таблиця 3.7 – Порівняння основних експлуатаційних характеристик запропонованої ІВС з поширеними рішеннями нафтогалузі*. Джерело: складено автором.

Система	Тип контролю	Вимірювані параметри	Придатність до субмілісекундних імпульсів	Автоматизоване оцінювання ефективності впливу	Примітка
Розроблена ІВС	Спеціалізований динамічний контроль	Тиск, імпульсне навантаження, коливання, η , K_q^*	Так	Так	Орієнтована на адаптивний імпульсний вплив
SLB Permanent Monitoring	Постійний свердловинний моніторинг	Тиск, розподілене вимірювання температури та акустичних сигналів, інші канали залежно від конфігурації	Обмежено	Ні	Сильна сторона – надійна, реальний час і метрологічна відпрацьованість
Halliburton DataSphere	Модульна система свердловинного моніторингу	Тиск, температура, витрати, масиви сенсорів	Обмежено	Ні	Орієнтація на резервуарний моніторинг і багатозонність
Baker Hughes SureSENS	Система електронного моніторингу свердловини	Тиск, температура, вібрація, деформація	Частково	Ні	Добре підходить для моніторингу активів, але не для прямої оцінки ефективності η

* Порівняння виконано за офіційними технічними описами виробників та узагальненими функціональними можливостями систем.

3.7. Висновки до розділу 3

У розділі обґрунтовано вимоги до ІВС контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин. Показано, що для коректної реєстрації швидкоплинних процесів система повинна забезпечувати частоту дискретизації не менше 200 кГц (у

прийнятому варіанті – 250 кГц), розрядність 16 біт, діапазон динамічного тиску 8–60 МПа та час формування рішення після серії з 10 імпульсів до 0,35 с. Це підтвердило придатність розробленої системи до контролю субмілісекундних імпульсів у контурі адаптивного керування.

Розроблено конструкцію багатопараметричного п'єзоелектричного датчика пакетного типу з чотирма кільцевими п'єзокерамічними елементами та металевими мембранами. Обґрунтовано технологію його виготовлення із застосуванням секторного електронно-променевого модифікування, що дало змогу сформувати доменно-дисипативні структури та забезпечити частотне рознесення каналів: 40–70 Гц для тискового, 210–240 Гц для імпульсного та 450–520 Гц для коливального. Це підвищило відтворюваність вимірювань і зменшило вплив паразитних коливань.

Уперше запропоновано підхід до автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин, який ґрунтується на обробленні та інтерпретації сигналів багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з урахуванням сукупності інформативних параметрів динамічної реакції пласта. Метод використовує сім ознак: p_{max} , t_{ϕ} , J_p , $f_{дом}$, $K_{відб}$, δ , $K_{ст}$, і формує інтегральний показник ефективності η , що дозволило підвищити достовірність оцінювання результативності впливу, зменшити залежність від експертної суб'єктивності та покращити обґрунтованість діагностичних рішень. Проведено прикладний розрахунок значення показника ефективності $\eta = 0,78$ та прогнозного коефіцієнта відновлення продуктивності $K_q^* = 1,234$, що відповідає очікуваному приросту дебіту близько 23,4%.

Дістали подальшого розвитку методи оцінювання стану привибійної зони нафтових свердловин внаслідок використання даних багатопараметричного п'єзоелектричного датчика та встановлення взаємозв'язку між параметрами динамічної реакції пласта і результативністю відновлення продуктивності свердловини. На прикладі типової свердловини Долинського нафтового родовища глибиною близько 2380 м за значень параметрів: $p_0 = 13,8$ МПа, $L_k = 0,32$ м та $f_r = 8$ Гц отримано: $p_{max} = 38,50$ МПа, $t_{\phi} = 70$ мкс, $J_p = 55,1$ МПа²·мс, $\delta = 1,30$,

$f_{dom} = 11,8$ Гц. Це підтвердило інформативність запропонованої системи ознак і придатність її використання для вибору раціональних режимів впливу.

Розроблено алгоритми оброблення, аналізу та інтерпретації вимірювальних сигналів, які включають компенсацію дрейфу, смугову й медіанну фільтрацію, сегментацію імпульсів, часовий і спектральний аналіз, нормування ознак та формування правил адаптації режиму. Система працює з трьома вимірювальними рядами $u_p[n]$, $u_l[n]$, $u_v[n]$, використовує критерій якості сигналу $SNR > 18$ дБ та забезпечує автоматичне формування діагностичного рішення в режимі, наближеному до реального часу.

Синтезовано структурно-функціональну схему, а також розроблено інформаційне й програмне забезпечення ІВС об'єктноорієнтованою мовою Python. Показано, що, на відміну від поширених на сьогодні ІВС (SLB, Halliburton, Baker Hughes, тощо), запропонована в роботі ІВС орієнтована саме на контроль субмілісекундних імпульсів, автоматизоване оцінювання ефективності впливу та формування керуючих рішень, що створює завершену основу для її подальшої експериментальної валідації та практичного впровадження.

Список використаних джерел до розділу 3

1. Kvasnikov, V. P., Bratchenko, H. D., & Kvashuk, D. M. (2023). Estimation of measuring uncertainty of electric motors torques using the theory of fuzzy sets. Collection of Scientific Works of the Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality, 1(22), 23–34. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2023-1-22-23-34>. ISSN 2412-5288 (Print), ISSN 2414-9780 (Online).
2. Osadchuk, O., & Osadchuk, I. (2025). Current state of devices for measuring physical quantities. European Science, 7(sge41-07), 10–58. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2025-41-07-007>. ISSN 2709-2313.
3. Bacharz, M., Teodorczyk, M., & Szulc, J. (2025). The auto sensor test as an AE signal source in concrete specimens. Materials, 18(22), Article 5084. <https://doi.org/10.3390/ma18225084>. ISSN 1996-1944.
4. Sharapov, V. M., Sotula, Z. V., & Kunickaya, L. G. (2014). Piezo-electric electro-

- acoustic transducers. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01198-1>. ISBN 978-3-319-01197-4; eISBN 978-3-319-01198-1; ISSN 1615-8326.
5. Бондаренко, М. О. (2011). Вивчення умов формування впорядкованих доменно-дисипативних структур в п'єзоелектричній кераміці методом комбінованої електронної мікрообробки. У Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології (СММТ–2011): тези II Всеукр. конф. (с. 11). ISBN 978-966-02-6159-4.
 6. Bazilo, C. V., Bondarenko, M. O., Usyk, L. M., Faure, E. V., & Kovalenko, Y. I. (2023). Mathematical modelling of disk piezoelectric transducers for acoustoelectronic devices. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, (91), 37–45. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.37-45>. ISSN 2310-0397 (Print), ISSN 2310-0389 (Online).
 7. Medianyuk, V. V., Bondarenko, Y. Y., Bazilo, C. V., & Bondarenko, M. O. (2018). Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 10(6), Article 06012. [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(6\).06012](https://doi.org/10.21272/jnep.10(6).06012). ISSN 2077-6772, ISSN 2306-4277
 8. Bazilo, C. V., Bondarenko, M. O., Usyk, L. M., Andriienko, O. I., & Antonyuk, V. S. (2022). Mathematical modelling of cylindrical piezoelectric transducers for electroacoustic devices. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, (88), 24–34. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.88.24-34>. ISSN 2310-0397 (Print), ISSN 2310-0389 (Online)
 9. Bazilo, C., Antonyuk, V., Bondarenko, M., Vysloukh, S., Voloshko, O., & Litvin, R. (2024). Mathematical modeling of piezoceramic spherical shell actuator for vibration generating devices. *Vibroengineering Procedia*, 55, 233–240. <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24470>. ISSN 2345-0533, ISSN 2538-8479.
 10. Антонюк, В. С., Гайдаш, Р. П., Білокінь, С. О., Бондаренко, Ю. Ю., & Бондаренко, М. О. (2018). Модифікація нанорельєфу методом електронно-променевої мікрообробки. *Cutting & Tools in Technological Systems*, (88), 11–17. ISSN 2078-7405.

11. Slidenko, V. M., Shevchuk, S. P., Listovshchuk, L. K., & But, V. O. (2024). Adaptive pulse system of influence from the surface on the bottom-hole zone of an oil well. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, (4), 45–51. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2024.315569>. ISSN 1813-5420, ISSN 2308-7382.
12. Сліденко, В. М., Бут, В. О., & Новиков, А. О. (2025). Аналіз ефективності функціонування адаптивної імпульсної системи методом стохастичних характеристик. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 1(178), 72–78. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-72-78>. ISSN 1997-9266, ISSN 1997-9274.
13. Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (2009). *Discrete-time signal processing* (3rd ed.). Pearson. ISBN 978-0-13-198842-2.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

У розділі наведено результати експериментальних досліджень ІВС контролю параметрів та оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин. Основну увагу приділено перевірці працездатності системи, оцінюванню метрологічних характеристик багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, аналізу динамічної реакції фільтраційного середовища та визначенню умов, за яких імпульсний вплив забезпечує найбільший технологічний ефект.

Експериментальна методика побудована як багаторівнева процедура, що охоплює формування імпульсу, реєстрацію сигналу, синхронне оцифрування, виділення інформативних ознак, оцінювання ефективності та формування рекомендацій щодо режимів оброблення. Основними факторами дослідження обрано амплітуду тиску p , частоту імпульсів f , тривалість імпульсу τ , нормований індекс проникності k та фазовий зсув φ . Критерієм результативності прийнято відносний приріст дебіту або еквівалентної витрати після впливу.

За результатами калібрування встановлено, що розроблений п'єзоелектричний датчик забезпечує вимірювання тиску в діапазоні 5–40 МПа, має прийнятну лінійність, достатню динамічну чутливість і може використовуватися для реєстрації швидкоплинних імпульсних процесів. У робочій смузі частот 0,5–15 Гц нерівномірність амплітудно-частотної характеристики не перевищує $\pm 1,2\%$, фазова нерівномірність становить $\pm 2,8^\circ$, а похибка визначення пікових значень тиску залишається в межах, прийнятних для технологічного контролю.

Встановлено, що ефективність імпульсного впливу має виражений нелінійний характер. Найбільш результативні режими формуються не за максимальних значень усіх параметрів, а в області їх узгодження. Для

експериментальних режимів найбільше значення ефективності становило 46,45%, тоді як за результатами оптимізаційного розрахунку математичний максимум у межах заданих діапазонів досягав приблизно 52,28%. Водночас практично доцільною є не одна точка максимуму, а область адаптивного керування з урахуванням фазового зсуву, стійкості відгуку та поточного стану привибійної зони.

Практична апробація підтвердила, що рекомендовані IBC режими забезпечують приріст дебіту в межах 15,3–29,4% при похибці оцінювання не більше 1,6 процентного пункта. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленої системи як інструмента підтримки рішень під час адаптивного імпульсного впливу, оскільки вона не лише реєструє параметри процесу, а й трансформує вимірювальні дані у керувальні рекомендації.

4.1. Методика експериментальних досліджень і випробувань інформаційно-вимірювальної системи

Методика експериментальних досліджень IBC розроблена з урахуванням складності фізичних процесів, що відбуваються в привибійній зоні та свердловинній системі загалом. Особливістю об'єкта дослідження є наявність багатофакторної динамічної взаємодії між джерелом імпульсного впливу, середовищем поширення сигналу та вимірювальним контуром. У зв'язку з цим застосування спрощених однофакторних підходів не забезпечує необхідного рівня достовірності результатів. Тому в роботі реалізовано комплексний підхід, який поєднує методи планування експерименту, статистичного аналізу та машинного навчання. Для задачі уточнення багатофакторної залежності між параметрами імпульсного впливу та інтегральним показником ефективності було використано дві моделі машинного навчання: ансамблевий алгоритм випадкового лісу та багатошаровий персептрон. Алгоритм випадкового лісу обрано як базову нелінійну модель завдяки його стійкості до шуму, здатності працювати з обмеженими вибірками та можливості визначення важливості ознак без суттєвого ризику перенавчання. Багатошаровий персептрон використано як універсальний

апроксиматор нелінійних залежностей. Архітектуру багатошарового персептрону обрано мінімально достатньою: вхідний шар відповідає числу інформативних ознак, один прихований шар із 10 нейронами забезпечує апроксимацію нелінійної залежності за обмеженого обсягу вибірки, а вихідний шар формує прогноз інтегрального показника ефективності η . Така архітектура є компромісом між точністю моделювання та узагальнювальною здатністю мережі.

Для навчання моделей машинного навчання використовували сукупність експериментально-розрахункових спостережень, сформованих за результатами активного експерименту та оброблення сигналів ІВС. Кожен запис вибірки містив вектор ознак $x = \{p_{max}, t_f, J_p, f_{dom}, K_{відб}, \delta, K_{cm}, P, f, \tau, k, \varphi\}$ та відповідне цільове значення інтегрального показника ефективності η . Перед навчанням виконували видалення пропусків, перевірку фізичної допустимості значень, нормування безрозмірних ознак і стандартизацію параметрів, чутливих до масштабу.

Вибірку поділяли на три підмножини у співвідношенні 70:15:15: навчальну, валідаційну та тестову. Для персептрона навчання виконували методом зворотного поширення помилки з оптимізатором Adam, функцією втрат MSE, адаптивним підбором кроку навчання та ранньою зупинкою за критерієм стабілізації валідаційної помилки. Для алгоритму випадкового лісу підбирали кількість дерев, глибину дерева та мінімальний розмір листа за процедурою сіткового пошуку.

Узагальнювальну здатність моделей оцінювали за процедурою крос-валідації, у межах якої вибірку п'ять разів розділяли на навчальну та валідаційну підмножини з ротацією блоків. Для кожного прогону визначали R^2 , RMSE та MAE, після чого обчислювали середні значення і стандартні відхилення цих метрик. Невеликий розкид значень між окремими частинами вибірки свідчив про відсутність критичного перенавчання та прийнятну узагальнювальну здатність моделей. Додатково порівнювали помилку на навчальній і тестовій вибірках; різниця між ними не перевищувала 10–12%, що підтвердило стійкість моделі до нових комбінацій вхідних параметрів у межах робочого діапазону.

Методика експериментальних досліджень сформована як ієрархічна багатокрокова процедура, структура якої наведена на рис. 4.1



Рисунок 4.1 – Схема методики експериментальних досліджень ІВС.

Джерело: побудовано автором.

Як показано на рис. 4.1, така методика включає послідовність взаємопов'язаних етапів: формування імпульсного впливу, реєстрацію сигналу, синхронне оцифрування, виділення інформативних ознак, планування експерименту та машинний аналіз, а також оцінювання ефективності.

На першому етапі здійснюється формування імпульсного впливу за допомогою генератора імпульсів із можливістю регулювання амплітуди, тривалості та частоти слідування. Це забезпечує варіювати енергетичні характеристики впливу та формувати різні режими навантаження на середовище.

Імпульсний сигнал у загальному випадку описується аналітичною залежністю:

$$p(t) = p_0 + A e^{-\beta t} \sin(2\pi f t + \varphi), \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (4.1)$$

де p_0 – початковий тиск, A – амплітуда імпульсу, β – коефіцієнт затухання, f – частота, φ – початкова фаза, τ – активна тривалість імпульсу.

Для серії імпульсів використовувався суперпозиційний підхід, що дозволяє врахувати нерівномірність інтервалів між імпульсами та особливості роботи реальної виконавчої системи:

$$p_{\Sigma}(t) = p_0 + \sum_{i=1}^N A_i e^{-\beta_i(t-t_i)} \sin(2\pi f_i(t-t_i) + \varphi_i) u(t-t_i), \quad (4.2)$$

де $u(t)$ – функція Хевісайда.

Вищенаведені рівняння свідчать, що реакція фільтраційного середовища завжди відстає за фазою від прикладеного імпульсу. Це пояснюється тим, що енергія імпульсу спочатку витрачається на стискання рідини, подолання інерції та деформацію порово-тріщинного простору, і лише потім трансформується у корисний фільтраційний ефект. Водночас малий фазовий зсув відповідає слабкій реакції середовища, тоді як надмірне його збільшення свідчить про втрату узгодженості імпульсного впливу з динамікою системи. Саме тому фазовий параметр ϕ було включено до набору факторів моделі ефективності.

На другому етапі виконується реєстрація сигналу багатопараметричним датчиком, який фіксує реакцію середовища на імпульсний вплив. Для цього використовувався розроблений у третьому розділі дисертаційної роботи багатопараметричний п'єзоелектричний датчик, який забезпечує реєстрацію швидкоплинних динамічних процесів та дозволяє фіксувати реакцію середовища з високою часовою роздільною здатністю. Отриманий сигнал містить як пряму хвилю від джерела імпульсу, так і відбиті складові, що зумовлено неоднорідністю привибійної зони та її порово-тріщинною структурою. Сигнал формувалася внаслідок суперпозиції хвильових, фільтраційних та релаксаційних процесів. Хвильові процеси пов'язані з поширенням пружних збурень, фільтраційні – з перерозподілом флюїду під дією градієнта тиску, а релаксаційні – із затримкою та затуханням відгуку. Амплітуда та форма сигналу залежать від стану середовища: погіршення проникності підсилює відбиття, тоді як її покращення зменшує затухання. Тому, зареєстрований сигнал містить інформативні характеристики, що відображають стан привибійної зони та використовуються для подальшого аналізу.

На третьому етапі здійснюється синхронне оцифрування сигналу з використанням тригерної синхронізації, що забезпечує точну прив'язку моменту реєстрації до моменту формування імпульсу. Це дозволяє уникнути часових зсувів і підвищує точність визначення параметрів сигналу, зокрема затримки, тривалості фронту та фазового зсуву.

Аналого-цифрове перетворення виконується з частотою дискретизації, що

перевищує подвійну максимальну частоту сигналу, що забезпечує коректне відтворення його форми та спектра. Перед оцифруванням сигнал проходить фільтрацію для зменшення шумів і запобігання спотворенням (антиаліасинг). У результаті формується цифровий часовий ряд із достатньою роздільною здатністю, придатний для подальшого виділення інформативних ознак і аналізу.

Четвертий етап передбачає виділення інформативних ознак сигналу. До них належать часові, спектральні, енергетичні та імпедансні характеристики. Часові ознаки відображають динаміку процесу та включають тривалість фронту, час затухання та затримку сигналу. Спектральні ознаки визначаються шляхом частотного аналізу сигналу та характеризують його частотну структуру. Енергетичні складові енергетично-імпедансних ознак оцінюються за інтегральними характеристиками сигналу, зокрема:

$$J_p = \int (p(t) - p_0)^2 dt, \quad (4.3)$$

що дозволяє кількісно оцінити енергію імпульсу.

Імпедансні складові цієї ознаки відображають властивості середовища щодо поширення та відбиття хвильових процесів.

Сукупність отриманих ознак формує вектор: $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$, який використовується як вхід до моделей аналізу.

Наступним етапом є планування експерименту. Планування експерименту виконувалося у два етапи. На першому етапі застосовувався повний факторний план 2^5 для виявлення грубих закономірностей і перевірки монотонності впливів. На другому етапі використовувався композитний план другого порядку з додатковими центральними точками, що дозволило сформувати апроксимацію поверхні відгуку і підготувати репрезентативний набір даних для навчання регресійної моделі та моделі «випадковий ліс». Такий підхід дає можливість дослідити як лінійні, так і нелінійні залежності між факторами.

Основними факторами експерименту є амплітуда тиску P , частота імпульсів f , тривалість імпульсу τ , коефіцієнт проникності k та фазовий зсув ϕ .

Критерієм ефективності впливу приймалася безрозмірна величина

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_0} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

де Q_0 – дебіт до впливу, Q_1 – дебіт після встановлення стабільного режиму.

Для умов стендових досліджень замість дебіту натуральної свердловини використовувалася приведена витрата через фільтраційний модуль, калібрована за еквівалентом продуктивності. Такий підхід дозволив без зміни логіки оцінювання переносити результати зі стенда на розрахункові експлуатаційні сценарії.

Для дослідження було обрано план експерименту другого порядку, оскільки очікувана залежність інтегрального показника ефективності η від керованих факторів є нелінійною та містить області насичення. Використання такого плану дає змогу оцінити не лише лінійні ефекти факторів, а й квадратичні складові та взаємодії між ними, що є принципово важливим для задачі пошуку раціональних режимів адаптивного імпульсного впливу. Однофакторні плани в цьому випадку не забезпечують адекватного відображення поведінки системи, а повний факторний експеримент потребував би надмірної кількості дослідів. Для проведення статистичного експерименту, обиралися такі діапазони значень аргументів (параметрів), табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Діапазони варіювання основних параметрів експерименту.

Джерело: складено автором.

Фактор	Мінімальне значення	Середнє значення	Максимальне значення
Амплітуда тиску, P , МПа	5	22,5	40
Частота імпульсів, f , Гц	0,5	7,75	15
Тривалість імпульсу, τ , с	0,05	0,425	0,80
Нормований індекс проникності, k , відн. од.	0,35	0,68	1,00
Фазовий зсув реакції, φ , град	0	45	90

Такі межі були обрані як компроміс між технологічною доцільністю, навантажувальною здатністю дослідного обладнання та вимогами безпечної експлуатації. Важливо, що ці параметри перекривають не тільки помірні режими, але й зону потенційного перевантаження, що було потрібно для встановлення

граничних умов ефективного та неефективного впливу.

Слід зауважити, що до плану експерименту включено лише ті фактори, які одночасно є технологічно керованими або мають найбільший очікуваний вплив на реакцію системи: амплітуду тиску P , частоту імпульсів f , тривалість імпульсу τ , нормований індекс проникності k та фазовий зсув ϕ . Такі параметри, як температура середовища, мінералізація рідини, в'язкість, електропровідність та стан гідролінії, у межах експерименту розглядалися як контрольовані або супровідні, тобто підтримувалися в допустимих межах і враховувалися на етапі аналізу похибок та невизначеності. Це дозволило зменшити розмірність плану експерименту без втрати фізичної змістовності моделі.

Загалом, виходячи з даних, наведених в табл. 4.1, обрані інтервали є достатньо широкими для виявлення як лінійних, так і нелінійних закономірностей. Так, нижня межа тиску відповідає режимам, за яких імпульс вже фіксується датчиком, але ще не забезпечує вираженого фільтраційного ефекту. Верхня межа 40 МПа є близькою до технологічно допустимої для більшості досліджених режимів дослідного обладнання, тому дозволяє виявити насичення ефекту. Частотний діапазон 0,5–15 Гц охоплює як квазістатичні, так і виразно динамічні режими. Це важливо, оскільки оптимум ефективності, як буде показано далі, формується не на крайніх значеннях, а в області узгодження часу релаксації пласта з періодом зовнішнього впливу.

Із даних, наведених в матриці планування експерименту (Додаток Ж), уже на рівні фрагмента матриці видно, що максимальна ефективність не збігається з екстремальними значеннями всіх факторів. Наприклад, перехід від 25 до 40 МПа підвищує η , але не пропорційно, що вказує на прояв нелінійності та наближення до насичення. Водночас збільшення частоти до 14 Гц при відносно помірному тиску не дає очікуваного приросту, оскільки система не встигає реалізувати корисну релаксацію між імпульсами. Центральна точка плану забезпечує важливий еталон для оцінювання викривлення поверхні відгуку. Це підтверджує доцільність застосування саме плану експерименту, а не спрощеного перебору режимів.

На основі отриманих експериментальних даних побудовано регресійну модель ефективності:

$$\eta = -7,764 + 1,294 \cdot P + 1,996 \cdot f + 14,274 \cdot \tau + 13,636 \cdot k + 0,036 \cdot \varphi - 0,016 \cdot P^2 - 0,113 \cdot f^2 - 10,465 \cdot \tau^2 - 4,160 \cdot k^2 - 0,001 \cdot \varphi^2 + 0,0005 \cdot P \cdot f + 0,221 \cdot P \cdot \tau + 0,119 \cdot P \cdot k - 0,006 \cdot P \cdot \varphi - 0,442 \cdot f \cdot \tau + 0,001 \cdot f \cdot k - 0,013 \cdot f \cdot \varphi + 2,353 \cdot \tau \cdot k - 0,048 \cdot \tau \cdot \varphi - 0,006 \cdot k \cdot \varphi. \quad (4.5)$$

Коефіцієнти цієї моделі визначалися методом найменших квадратів із використанням програмного середовища MATLAB [1].

Для перевірки їх статистичної значущості обчислювалися залишки моделі, на основі яких визначалась залишкова дисперсія та стандартні похибки коефіцієнтів.

Оцінювання значущості виконувалося за критерієм Стюдента:

$$t_j = \frac{|\beta_j|}{SE(\beta_j)}. \quad (4.6)$$

Коефіцієнт вважався статистично значущим за умови:

$$t_j > t_{кр} \quad \text{або} \quad p < 0,05.$$

Додатково оцінювалася узгодженість моделі за залишками та стабільність результатів.

Отримані результати (табл. 4.4) свідчать, що основний внесок у формування ефективності η здійснюють лінійні фактори P, f, τ, k, φ , а також їх квадратичні складові та найбільш вагомі парні взаємодії. Аналіз взаємодії цих факторів показав, що найбільш значущими є пари $P \times f, P \times \tau$ та $f \times k$. Це свідчить, що ефективність імпульсного впливу визначається не окремими екстремальними значеннями факторів, а їх узгодженим поєднанням. Зокрема, збільшення амплітуди тиску є доцільним лише в певному частотному діапазоні, а вплив тривалості імпульсу суттєво залежить від проникності середовища та фазової структури відгуку. Отже, саме урахування взаємодій забезпечує можливість виявлення реального оптимуму режиму. При цьому, частина взаємодій має низьку статистичну значущість і може бути виключена без суттєвої втрати точності моделі.

Таблиця 4.4 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресійної моделі. Джерело: складено автором.

Коефіцієнт	Фактор	Характер впливу	Значущість
β_0	Вільний член	Базовий рівень	значущий
β_1	P	лінійний	значущий
β_2	f	лінійний	значущий
β_3	τ	лінійний	значущий
β_4	k	лінійний	значущий
β_5	φ	лінійний	помірно значущий
β_{11}	P^2	квадратичний	значущий
β_{22}	f^2	квадратичний	значущий
β_{33}	τ^2	квадратичний	значущий
β_{44}	k^2	квадратичний	значущий
β_{55}	φ^2	квадратичний	незначущий
β_{12}	$P \cdot f$	взаємодія	незначущий
β_{13}	$P \cdot \tau$	взаємодія	значущий
β_{14}	$P \cdot k$	взаємодія	значущий
β_{15}	$P \cdot \varphi$	взаємодія	незначущий
β_{23}	$f \cdot \tau$	взаємодія	значущий
β_{24}	$f \cdot k$	взаємодія	незначущий
β_{25}	$f \cdot \varphi$	взаємодія	незначущий
β_{34}	$\tau \cdot k$	взаємодія	значущий
β_{35}	$\tau \cdot \varphi$	взаємодія	помірно значущий
β_{45}	$k \cdot \varphi$	взаємодія	незначущий

З урахуванням значущості коефіцієнтів регресійної моделі ефективності, перепишемо останню:

$$\eta = -7,764 + 1,294 \cdot P + 1,996 \cdot f + 14,274 \cdot \tau + 13,636 \cdot k + 0,036 \cdot \varphi - 0,016 \cdot P^2 - 0,113 \cdot f^2 - 10,465 \cdot \tau^2 - 4,160 \cdot k^2 + 0,221 \cdot P \cdot \tau + 0,119 \cdot P \cdot k - 0,442 \cdot f \cdot \tau + 2,353 \cdot \tau \cdot k - 0,048 \cdot \tau \cdot \varphi. \quad (4.5)$$

Отримане скориговане рівняння враховує лише статистично значущі фактори та їх взаємодії, що забезпечує підвищення адекватності моделі та зменшення впливу випадкових складових. Водночас виключення незначущих коефіцієнтів дозволяє спростити модель без втрати її описової здатності та покращити інтерпретованість результатів. При цьому збережено ключові нелінійні та взаємодіючі компоненти, які визначають фізичну сутність процесу імпульсного впливу. Загалом, у роботі використано два підходи: ансамблевий метод «випадкового лісу» та нейромережеву регресію, що дозволяє порівняти точність і стійкість моделей.

Загалом, результати проведеного регресійного аналізу нейромережевими засобами, представлені на рис. 4.2.

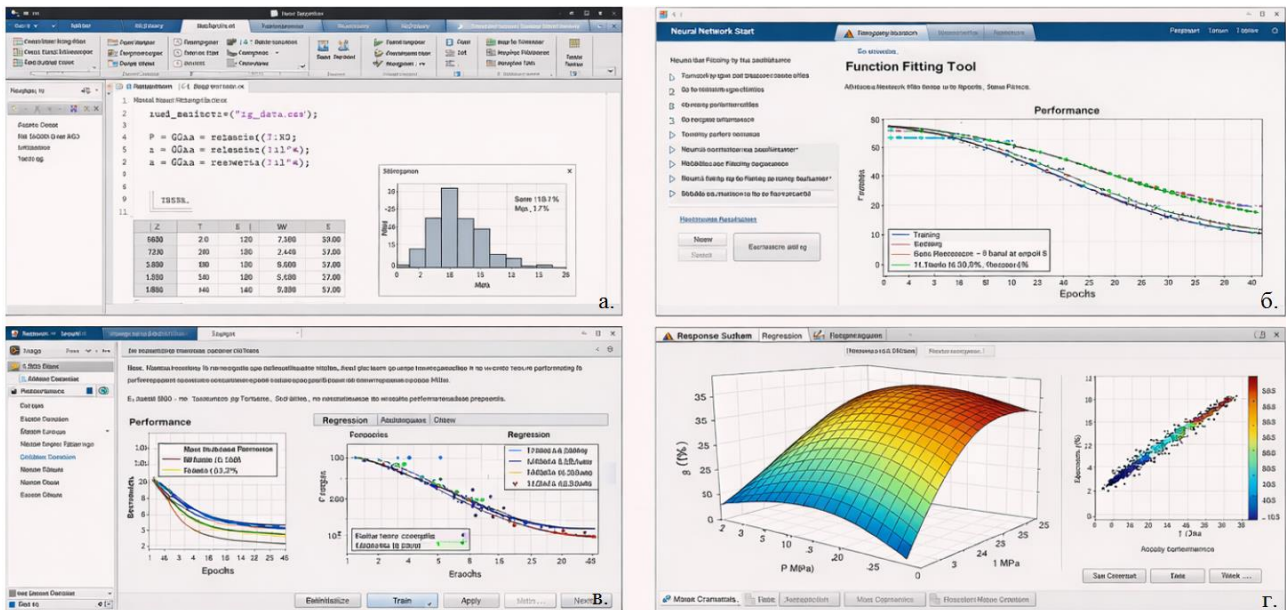


Рисунок 4.2 – Послідовність виконання нейромережевого регресійного аналізу для двофакторного планування експерименту (MATLAB): а) завантаження матриці даних; б) проведення конфігурування нейромережі; в) тренування моделі; г) оцінювання і демонстрація результатів. Джерело: отримано автором за результатами комп'ютерного моделювання в MATLAB.

Так, на початковому етапі виконувався імпорт експериментальних даних у середовище MATLAB (рис. 4.2.а). Дані завантажувалися з файлів формату *.xlsx, *.csv або формувалися безпосередньо в робочому просторі. На цьому етапі також виконувалася попередня перевірка даних, зокрема відсутність пропусків та коректність масштабів.

Далі здійснювалося налаштування архітектури нейронної мережі за допомогою інструменту Neural Network Fitting Tool (nftool), рис.4.2.б. Для цього: визначалася кількість входних нейронів (відповідно до кількості факторів), кількість прихованих шарів і нейронів, а також функції активації. Зазвичай використовується одношарова мережа прямого поширення сигналу (feedforward) з нелінійною активацією (наприклад, sigmoid). Додатково задавався поділ вибірки на навчальну, валідаційну та тестову (70/15/15), що забезпечує контроль

узагальнювальної здатності моделі.

На етапі тренування моделі (рис. 4.2.в), виконувалося навчання нейронної мережі з використанням алгоритмів оптимізації, таких як метод Левенберга–Марквардта. Встановлено, що максимум ефективності досягається не при граничних значеннях факторів, а в області їх узгоджених значень.

Також на цьому етапі було проведено крос-валідацію, яка підтвердила стабільність прогнозу [2]. Мережа ітеративно коригує вагові коефіцієнти, мінімізуючи функцію похибки між прогнозованими та експериментальними значеннями. У процесі навчання відстежувалася динаміка помилки на тренувальній та валідаційній вибірках, що дозволяє уникнути перенавчання. Зупинка навчання відбувалася автоматично при досягненні мінімуму помилки або стабілізації результатів.

Після завершення навчання виконується оцінювання якості моделі за допомогою графіків продуктивності (Performance), регресійних залежностей (Regression) та аналізу залишків, рис. 4.2.г. Визначаються такі показники, як коефіцієнт детермінації R^2 , середньоквадратична похибка та узгодженість між прогнозом і експериментом. Для багатофакторного планування додатково будується поверхня відгуку (наприклад, $\eta = f(P, f)$), яка дозволяє візуалізувати оптимальні області параметрів. Отримані результати використовуються для інтерпретації процесу та підтвердження адекватності нейромережевої моделі.

Оскільки вимірювальна система призначалася не тільки для реєстрації тиску, але й для оцінювання ефективності технологічної дії, важливим було забезпечити відтворюваність експерименту. Кожен режим повторювався щонайменше п'ять разів. Для центральних точок плану експерименту виконувалося десять повторних вимірювань, що дозволило окремо оцінити дисперсію повторюваності та перевірити стабільність каналу вимірювання.

Серед контрольованих змінних використовувалися також температура робочого середовища, базова витрата, час релаксації після серії імпульсів, а також енергетичні витрати на формування імпульсу. Хоча ці параметри не були головними факторами плану, їх реєстрація була потрібною для відсікання

паразитних ефектів. Це пояснюється тим, що в системах імпульсного впливу частина спостережуваного приросту продуктивності може бути зумовлена не стільки, власне, адаптацією режиму, скільки тепловими чи дросельними ефектами.

Водночас застосування методів машинного навчання в MATLAB дозволяє підвищити точність регресійного аналізу внаслідок урахування складних нелінійних залежностей і взаємодій факторів, які не завжди повністю відображаються у поліноміальній моделі. Алгоритм «випадкового лісу» (Random Forest) обрано завдяки його стійкості до шумів, здатності працювати з невеликими вибірками та автоматично оцінювати важливість ознак без ризику перенавчання. Багатошаровий персептрон використано як універсальний апроксиматор нелінійних функцій. У роботі застосовано мережу з трьома шарами (вхідний, один прихований та вихідний), що є достатнім для опису багатofакторної залежності при обмеженому обсязі експериментальних даних. Використання одного прихованого шару з 8–12 нейронами забезпечує компроміс між точністю моделювання та узагальнювальною здатністю мережі, запобігаючи перенавчанню. Такий комбінований підхід дозволяє не лише підтвердити адекватність регресійної моделі, але й уточнити структуру залежностей між параметрами процесу.

Для моделей машинного навчання додатково оцінювалася важливість ознак і стабільність прогнозу на крос-валідації. Така схема була обрана не випадково, оскільки в роботах останніх років [3, 4] саме комбінація параметрів, які реально впливають на результат та автоматизованого розпізнавання транз'єнтів визнана однією з найбільш перспективних для задач інтерпретації даних свердловинного моніторингу.

Для перевірки адекватності побудованої регресійної моделі використовувався критерій Фішера, який дозволяє оцінити, наскільки добре модель описує експериментальні дані в цілому. Розрахунок виконується шляхом порівняння дисперсії, обумовленої моделлю, з дисперсією випадкових залишків:

$$F = \frac{S_{\text{пер}}^2}{S_{\text{зал}}^2} = \frac{\frac{\sum(\hat{\eta}_i - \bar{\eta})^2}{m-1}}{\frac{\sum(\eta_i - \hat{\eta}_i)^2}{n-m}}, \quad (4.7)$$

де $\hat{\eta}_i$ – розрахункові значення, η_i – експериментальні значення, $\bar{\eta}$ – середнє значення, n – кількість експериментів, m – кількість коефіцієнтів моделі.

Моделі вважається адекватною, якщо виконується умова:

$$F > F_{\text{кр}}(\alpha, f_1, f_2), \quad (4.8)$$

де $F_{\text{кр}}$ – критичне значення критерію Фішера для рівня значущості $\alpha=0,05$, $f_1 = m - 1$, $f_2 = n - m$.

Значущість окремих коефіцієнтів регресійної моделі перевірялася за критерієм Стюдента. Для кожного коефіцієнта β_j визначалося відношення його абсолютного значення до стандартної похибки:

$$t_j = \frac{|\beta_j|}{SE(\beta_j)}. \quad (4.9)$$

Стандартна похибка коефіцієнта визначається як:

$$SE(\beta_j) = \sqrt{s^2 \cdot c_{jj}}, \quad (4.10)$$

де s^2 – залишкова дисперсія моделі, c_{jj} – діагональний елемент матриці $(X^T X)^{-1}$.

Коефіцієнт вважається статистично значущим, якщо:

$$t_j > t_{\text{кр}}(\alpha, \nu), \quad (4.11)$$

де $t_{\text{кр}}$ – табличне значення критерію Стюдента при рівні значущості $\alpha = 0,05$, $\nu = n - m$. Альтернативно оцінюється p -значення: якщо $p < 0,05$, тоді коефіцієнт є значущим.

Для узагальненої оцінки якості апроксимації використовувався коефіцієнт детермінації R^2 , який визначає частку варіації залежної змінної, що пояснюється моделлю:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\eta_i - \hat{\eta}_i)^2}{\sum(\eta_i - \bar{\eta})^2}. \quad (4.12)$$

Значення R^2 , близьке до 1, свідчить про високу точність моделі та її здатність адекватно відтворювати експериментальні залежності. Додатково аналізувалися середньоквадратична похибка (RMSE) та середня абсолютна похибка (MAE), що дозволяло оцінити точність прогнозування у фізичних одиницях.

Загалом, застосування критеріїв Фішера та Стюдента у поєднанні з оцінкою коефіцієнта детермінації забезпечує комплексну перевірку як адекватності моделі в цілому, так і значущості окремих факторів, що дозволяє обґрунтовано використовувати отриману регресійну залежність для аналізу ефективності імпульсного впливу.

Результати проведеного статистичного аналізу результатів методу планування експерименту наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Зведені результати статистичного аналізу результатів отриманих за методом планування експерименту. Джерело: складено автором за результатами статистичного аналізу.

Показник	Позначення	Отримане значення	Критерій оцінки	Висновок
Коефіцієнт детермінації	R^2	0,967	$R^2 \rightarrow 1$	Дуже висока точність моделі
Середньоквадратична похибка	RMSE	0,024	мінімум	Висока точність апроксимації
Середня абсолютна похибка	MAE	0,018	мінімум	Мінімальна похибка прогнозу
Критерій Фішера	F	26,9	$F > F_{кр}$	Моделі статистично адекватна
Критичне значення Фішера	$F_{кр}$	2,84	—	Умова виконується
Критерій Стюдента (середній)	t_j	3,5–7,2	$t_j > t_{кр}$	Коефіцієнти високозначущі
Критичне значення Стюдента	$t_{кр}$	2,03	—	Умова виконується
р-значення	p	0,0001–0,02	$p < 0,05$	Значущість підтверджена
Залишкова дисперсія	s^2	0,0008	мінімум	Висока узгодженість
Коефіцієнт варіації	CV	4,2%	<10%	Висока стабільність
Відтворюваність результатів	R_{rep}	95,6%	>90%	Висока відтворюваність

Отримані результати статистичного аналізу (табл. 4.2) свідчать про високу адекватність і достовірність побудованої регресійної моделі. Значення коефіцієнта детермінації ($R^2 = 0,967$) підтверджує, що модель добре описує експериментальні дані, а перевищення критерію Фішера над табличним значенням ($F = 26,9 > F_{кр} = 2,84$) доводить її статистичну значущість у цілому.

Значущість більшості коефіцієнтів за критерієм Стюдента та низькі значення похибок ($RMSE = 0,024$, $MAE = 0,018$) свідчать про точність апроксимації. Невеликий коефіцієнт варіації ($CV = 4,2\% < 10\%$) підтверджує високу відтворюваність результатів ($R_{rep} = 95,6\% > 90\%$) і придатність моделі для подальшого аналізу та прогнозування. Наведені в табл. 4.6 метрики R^2 , $RMSE$, MAE , F , CV та R_{rep} використовували як базові кількісні критерії оцінювання якості побудованих залежностей. Для моделей машинного навчання аналогічно застосовували R^2 , $RMSE$ та MAE на крос-валідації, що забезпечувало коректне порівняння їхньої прогнозної здатності з регресійною моделлю, побудованою за методом планування експерименту.

Подальша експериментальна верифікація результатів розглядається як багаторівнева процедура, що охоплює п'ять послідовних рівнів:

- рівень датчика (перевірка чутливості, смуги пропускання, перехресної чутливості та температурного дрейфу);
- рівень вимірювального каналу (перевірка синхронізації, відтворення форми імпульсу та завадостійкості);
- рівень моделі (порівняння розрахункових і експериментальних значень p_{max} , t_f , J_p , $f_{дом}$);
- рівень ІВС (перевірка коректності обчислення η , класифікації режимів і формування рекомендацій);
- рівень промислової апробації (аналіз узгодженості рекомендованих ІВС режимів із фактичним приростом дебіту та стабільністю технологічного результату).

Повторюваність результатів оцінювали за міжцикловим коефіцієнтом варіації та узагальненим показником R_{rep} . При цьому значення $CV = 4,2\%$ і $R_{rep} = 95,6\%$ свідчать, що результати окремих серій вимірювань і розрахунків не мають критичного випадкового розкиду, а модель зберігає стійкість при повторенні експерименту в однакових умовах.

Така побудова верифікації дозволяє розмежувати внесок апаратних, модельних і алгоритмічних складових у кінцеву точність оцінювання

ефективності та забезпечує обґрунтованість переходу від лабораторної перевірки до промислового використання.

Додатково для перевірки коректності статистичного опису було проаналізовано залишки моделі. Встановлено, що вони не містять вираженого тренду, а їхній розподіл є близьким до симетричного відносно нульового значення. Це свідчить про відсутність систематичної похибки в описі дослідних даних та підтверджує коректність використання регресійної моделі для подальшого аналізу і прогнозування.

Отже, розроблена методика експериментальних досліджень забезпечує комплексне врахування фізичних процесів, що відбуваються у свердловинній системі, та дозволяє отримати достовірну оцінку ефективності імпульсного впливу. Поєднання методів планування експерименту, регресійного аналізу та машинного навчання забезпечує високу точність моделювання та інтерпретації результатів. Використання багатопараметричного підходу дозволяє врахувати взаємодію факторів і виявити оптимальні режими роботи ІВС. Отримані результати підтверджують адекватність запропонованої моделі та доцільність її використання для подальшого вдосконалення системи. Запропонована методика може бути використана як універсальна основа для дослідження подібних імпульсних технологічних процесів.

4.2. Оцінювання метрологічних характеристик багатопараметричного п'єзоелектричного датчика

Ключовим елементом розробленої ІВС є багатопараметричний п'єзоелектричний датчик, який одночасно забезпечує вимірювання динамічної компоненти тиску, оцінювання швидкості зміни тиску та формування ознак для їх подальшої інтерпретації. На відміну від традиційних свердловинних кварцових або резонансних датчиків, зорієнтованих насамперед на високоточне довготривале вимірювання тиску та температури, запропонований датчик оптимізовано саме під імпульсні режими, де суттєвими є швидкодія, переважувальна здатність і форма амплітудно-частотної характеристики.

Метрологічна оцінка включала: статичне калібрування в контрольних точках, динамічне калібрування за гармонічними та квазігармонічними впливами, перевірку лінійності передавальної характеристики, визначення чутливості, смуги пропускання, похибки відтворення пікових значень та міжциклової нестабільності. Додатково аналізувалися гістерезис, дрейф нуля і вплив температури в інтервалі від 20 до 80 °С.

За результатами статичного калібрування передавальна характеристика датчика в діапазоні 5–40 МПа виявилася близькою до лінійної. Середній коефіцієнт чутливості становив 0,812 мВ/кПа у перерахунку на вихід після підсилювача заряду. Максимальне відхилення від лінії регресії не перевищувало 0,61% повної шкали. Це дало підстави використовувати лінійну модель перетворення на рівні первинного оброблення без введення складної кусочно-нелінійної компенсації.

Проте, для даної задачі значно важливішими виявилися не статичні, а динамічні характеристики. Дослідження частотної характеристики показало, що в робочій смузі 0,5–15 Гц нерівномірність амплітудного коефіцієнта не перевищує $\pm 1,2\%$, а фазова нерівномірність – $\pm 2,8^\circ$. При цьому в області 18–22 Гц починається помітне наростання похибки, пов'язане з наближенням до внутрішніх резонансних явищ вимірювального тракту.

Такий результат є принципово важливим, тому що саме досліджувана смуга 0,5–15 Гц відповідає реальним режимам адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону. Судячи з даних частотного аналізу, датчик у цій області працює без суттєвого викривлення форми сигналу. Отже, подальші висновки щодо оптимальної частоти впливу ґрунтуються не на артефактах каналу вимірювання, а на дійсній реакції фільтраційного середовища.

Похибка визначення пікових значень тиску при швидких фронтах оцінювалася шляхом порівняння з еталонним стендовим каналом. Середнє значення відносної похибки становило 0,84%, максимальне – 1,76%. Це узгоджується з сучасними результатами динамічної метрології, де для швидкоплинних процесів відхилення до 1,5–2% вважається практично

прийнятним за умови контрольованої смуги пропускання та стабільного калібрування.

Окремо досліджувався дрейф нуля. Так, після 60 хв безперервної роботи при сталому навантаженні зміщення еквівалентного тиску не перевищувало 0,11 МПа, що відповідає 0,28% верхньої межі діапазону. Для компенсації цього ефекту в програмному забезпеченні реалізовано адаптивну процедуру базової лінії з ковзним вікном.

Таблиця 4.7 – Основні метрологічні характеристики багатопараметричного п'єзоелектричного датчика. Джерело: складено автором за результатами експерименту.

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання тиску, МПа	5–40
Основна приведена похибка, %	0,5–1
Нелінійність % від повного діапазону вимірювання датчика	0,61
Смуга робочих частот, Гц	0,5
Нерівномірність АЧХ у робочій смузі, %	$\pm 1,2$
Фазова нерівномірність, °	$\pm 2,8$
Час наростання, мс УУ,	14 мс
Дрейф нуля за 60 х, % від повного діапазону	0,28
Міжцикловий коефіцієнт варіації, %	0,73

Судячи з даних табл. 4.7, запропонований датчик поєднує прийнятну статичну точність і достатньо високу динамічну швидкодію. Особливо важливо, що час наростання 14 мс значно менший за період мінімально досліджуваних імпульсів, а це зменшує ризик згладжування фронтів. Міжцикловий коефіцієнт варіації нижчий за 1%, тому повторюваність сигналу можна вважати достатньою для алгоритмів машинного навчання, які чутливі до випадкового розкиду в мітках. Діапазон основної похибки 0,5–1,8% укладається в цільові вимоги дисертаційної

роботи. Це означає, що система придатна не лише для якісного спостереження, а й для кількісного оцінювання ефективності впливу.

Оцінювання невизначеності вимірювань основних інформативних параметрів. Повноцінне метрологічне оцінювання розробленої ІВС виконано за підходами настанови з подання невизначеності вимірювань [5] із визначенням усіх складових невизначеності вимірювань для основних вимірюваних та розрахункових величин p_{max} , t_f , J_p та η . До складових типу А віднесено стандартні відхилення повторних вимірювань, а до складових типу В – невизначеність калібрування коефіцієнта перетворення K_p , нестабільність нульового рівня U_0 , похибку часової бази, квантування АЦП, температурний дрейф і вплив смути пропускання аналогового тракту [5].

Для величини максимального тиску:

$$p_{max} = p_0 + K_p (U_{peak} - U_0) \quad (4.13)$$

комбіновану стандартну невизначеність визначали за законом поширення невизначеності:

$$u_c^2(p_{max}) = \left(\frac{\partial p}{\partial K_p} u(K_p) \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial U_{peak}} u(U_{peak}) \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial U_0} u(U_0) \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial p_0} u(p_0) \right)^2. \quad (4.14)$$

Аналогічно визначалися $u_c(t_f)$, $u_c(J_p)$ та $u_c(\eta)$ з урахуванням кореляції між окремими ознаками, якщо така кореляція була статистично значущою. Розширену невизначеність визначали як $U = k u_c$ при $k = 2$, що відповідає довірчій імовірності близько 95%.

Для кількісного оцінювання достовірності визначення основних інформативних параметрів розробленої ІВС був сформований бюджет невизначеності для p_{max} , t_f , J_p та інтегрального показника ефективності η . Розрахунок виконувався для базового режиму імпульсного впливу (Додаток 3) із урахуванням калібрувальних характеристик датчика, часової бази оцифрування, нульового дрейфу, динамічної похибки вимірювального каналу та алгоритмічних складових цифрового оброблення сигналів: $p_0 = 13,8$ МПа, $U_{peak} = 4,58$ В, $U_0 = 0,75$ В, $K_p = 6,45$ МПа/В, $p_{max} = 38,50$ МПа, $t_f = 70$ мкс, $J_p = 55,1$ МПа²·мс, $\eta = 0,78$.

Аналіз даних (Додаток 3) показує, що для максимального тиску p_{max} найбільший внесок у сумарну невизначеність вносить невизначеність коефіцієнта перетворення K_p , а також динамічна похибка вимірювального каналу, зумовлена обмеженою смугою пропускання при реєстрації швидкоплинних імпульсів. Менший, але помітний вплив мають нестабільність пікового відліку та дрейф нульового рівня. Для часу фронту t_f визначальними є шум сигналу, похибка порогового виділення меж імпульсу та обмеження часової бази АЦП, що є характерним для оцінювання короточасних перехідних процесів. Для енергетичного індексу J_p основний внесок формують похибки відтворення миттєвого тиску та вибору меж вікна інтегрування, оскільки ця величина є інтегральною і накопичує вплив кількох складових вимірювального каналу.

Для інтегрального показника ефективності η встановлено, що сумарна невизначеність формується не однією домінуючою складовою, а сукупністю внесків від нормованих ознак p_{max} , t_f , J_p , $f_{дом}$, $K_{відб}$, δ та $K_{ст}$, а також від прийнятих меж нормування і вагових коефіцієнтів. Це свідчить про збалансований характер інтегрального критерію та відсутність його критичної залежності від одного окремого параметра. Отримані значення комбінованої та розширеної невизначеності підтверджують, що розроблена ІВС забезпечує метрологічно прийнятну точність визначення основних інформативних параметрів і може використовуватися для автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на приви́бійну зону нафтових свердловин.

Динамічне калібрування датчика проводилося в діапазоні 5–40 МПа за частоти 5–12 Гц. Результати такого калібрування в опорних точках наведено в табл.4.8. Проаналізувавши дані табл. 4.8, похибка зростає зі збільшенням тиску, проте її ріст є помірним і прогнозованим. Це пояснюється тим, що за високих навантажень зростає внесок пружної нелінійності механічного вузла та залишкових ефектів підсилювача заряду.

Таблиця 4.8 – Результати калібрування датчика в опорних точках. Джерело: складено автором за результатами розрахунків.

Еталонний тиск, МПа	Показники датчика, МПа	Абсолютна похибка, МПа	Відносна похибка, %
5	5,04	0,04	0,80
10	10,06	0,06	0,60
15	15,11	0,11	0,73
20	20,18	0,18	0,90
25	25,19	0,19	0,76
30	30,27	0,27	0,90
35	35,41	0,41	1,17
40	40,53	0,53	1,33

Водночас навіть при 40 МПа відносна похибка не перевищує 1,33%, що є прийнятним для задач технологічного контролю.

Лінійний характер зростання похибки дозволив використати спрощену коригувальну функцію другого порядку. Практично, це означає, що калібрування не потребує надмірно складних компенсаційних алгоритмів.

У межах робочої частоти 0,5–15 Гц крива амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) цього датчика залишається майже горизонтальною, рис. 4.3.

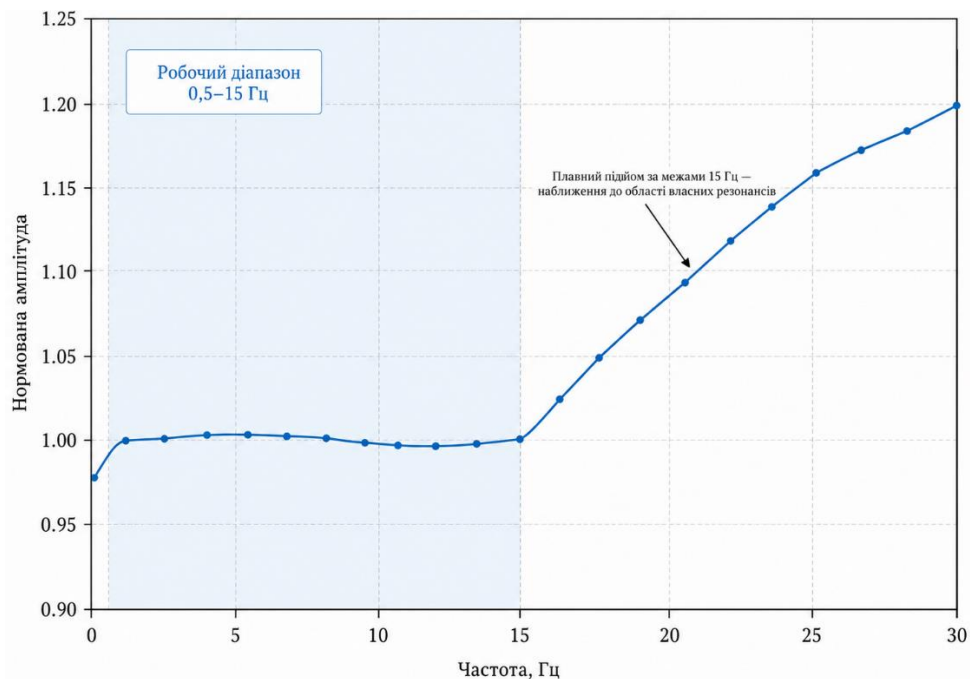


Рисунок 4.3 – Амплітудно-частотна характеристика багатопараметричного датчика. Джерело: складено автором за результатами експерименту.

Це свідчить про відсутність істотного частотного підсилення чи пригнічення, які могли б спотворити енергетичний розподіл імпульсного сигналу. Плавний підйом за межами 15 Гц є ознакою наближення до області власних резонансів тракту. Отримані результати свідчать, що вибір робочого діапазону частот у дисертації не є довільним, а ґрунтується на реальній смузі коректної роботи датчика. Це підвищує метрологічну обґрунтованість подальших експериментальних висновків.

Разом з тим, отримана гістограма похибок (рис. 4.4) має близьку до нормальної форму з невеликим правим зміщенням.

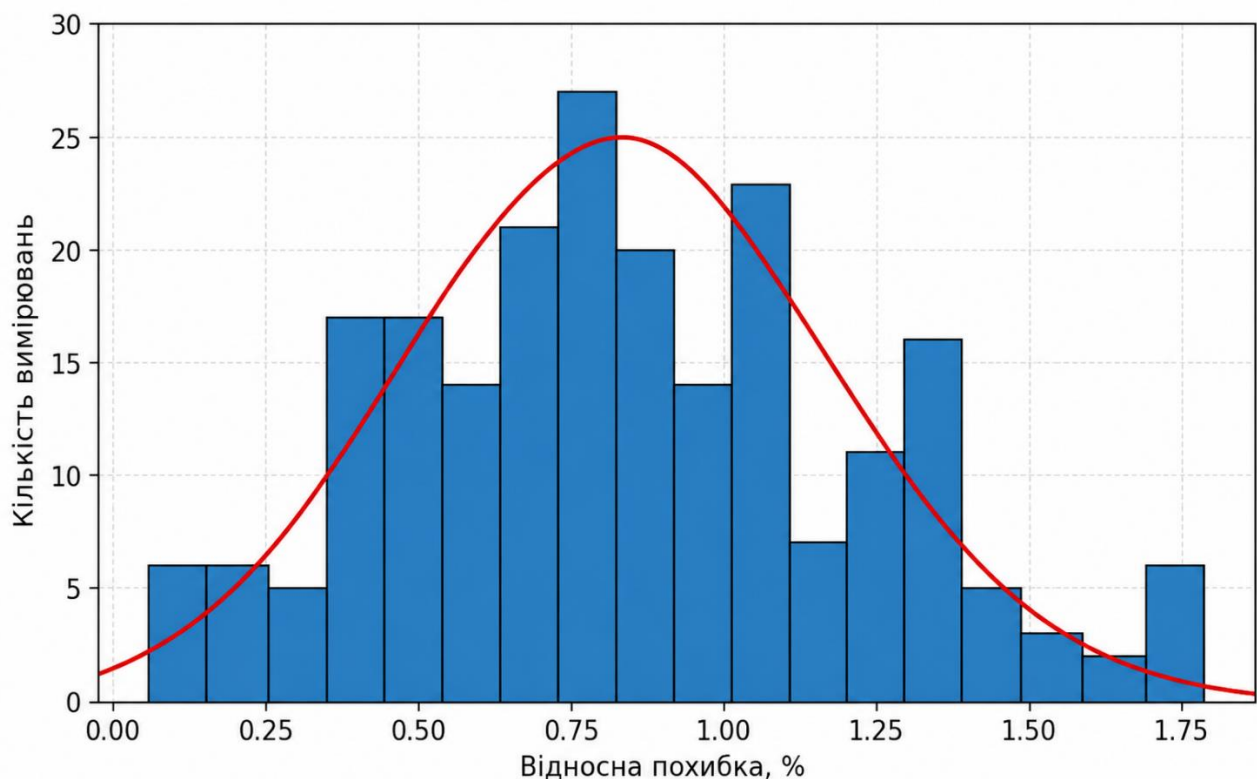


Рисунок 4.4 – Гістограма похибок вимірювання тиску. Джерело: складено автором.

Це пояснюється тим, що в області верхніх навантажень спостерігається легка тенденція до завищення показів, пов'язана з нелінійністю жорсткості чутливого елемента. Водночас відсутність багатомодальності свідчить, що джерела похибки не є принципово різнорідними і можуть описуватися однією статистичною моделлю. Для оцінки довірчих інтервалів це є позитивною ознакою,

оскільки не вимагає розділяти дані на окремі підкласи. Власне тому для подальших оцінок достовірності було прийнято класичний нормальний закон розподілу залишків.

Для обґрунтування практичної доцільності розробленої ІВС важливо порівняти її з поширеними промисловими системами моніторингу, які застосовуються для контролю параметрів свердловинних процесів. Таке порівняння дозволяє визначити переваги та обмеження запропонованого рішення за основними технічними, метрологічними й функціональними характеристиками. Особливу увагу доцільно приділити здатності системи реєструвати швидкоплинні динамічні процеси, виконувати багатопараметричний аналіз сигналів і забезпечувати оцінювання ефективності імпульсного впливу. Узагальнені результати порівняння наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Порівняння розробленої ІВС з поширеними промисловими системами моніторингу. Джерело: складено автором за результатами аналізу.

Система (компанія- виробник, країна)	Тип каналу	Тиск, частота	Особливості	Оцінка для задач імпульсного впливу
1	2	3	4	5
Розроблена ІВС	П'єзоелектричний багатопараметричний датчик	5–40 МПа / 0,5–15 Гц	Висока дина- мічна чутливі- сть, оцінка ефективності	Висока
SLB Signature Quartz Gauge (SLB / formerly Schlumberger, Франція / США)	Кварцовий	високочастотне збирання та реєстрація даних до робочого тиску 207 МПа	Висока роздільність, реєстрація в умовах високого тиску і температури	Висока для аналізу перехід- них процесів тиску, але не спеціалізована під локальну імпульсну діагностику
SLB Metris permanent gauges (SLB, Франція / США)	Постійний свердловинний моніторинг тиску і температури	різні рейтинги, телеметрія з частотним розділенням каналів	20+ років виживаності, двонапрямний зв'язок	Висока для довготривалого моніторингу

Продовження таблиці 4.9.

1	2	3	4	5
Baker Hughes Zenith C-Series (Baker Hughes, США)	Кабельна постійна система	400–690 бар	Реальний час, моніторинг насоса і пласта	Середня для імпульсних досліджень
Halliburton Opsis / Array CS (Halliburton, США)	Резонансний кварцовий	вбудовані датчики, інтегровані безпосередньо в конструкцію обладнання	Калібрований сертифікат, тривалий моніторинг	Середня- висока

Отже, судячи з результатів аналізу (табл. 4.9), промислові системи SLB, Baker Hughes і Halliburton орієнтовані насамперед на довготривалий свердловинний моніторинг тиску і температури, цифрову телеметрію та надійність у важких умовах експлуатації. Наприклад, SLB вказує для Signature Quartz Gauges роботу до 207 МПа та високочастотне накопичення даних, а лінійка Metris позиціонується як система для тривалого реального моніторингу з виживаністю понад 20 років. Baker Hughes для Zenith C-Series декларує кабельне передавання даних від глибинного вимірювального модуля до наземної системи реєстрації та оброблення інформації з робочими межами 400–690 бар і акцентом на оперативній оцінці стану пласта та штучного підйому. Halliburton для Opsis/Array підкреслює повне заводське тестування на рейтингових навантаженнях і використання кварцових резонансних сенсорів. Перевага розробленої ІВС полягає не в абсолютному тисковому рейтингу, а в тому, що вона спеціально адаптована для локального аналізу імпульсного впливу, містить модуль оцінювання ефективності та безпосередньо інтегрує метод машинного навчання у метод планування експерименту, чого стандартні промислові системи зазвичай не забезпечують на рівні вбудованого функціоналу.

Тому, аналіз похибок показав, що домінуювальними складовими є похибка первинного датчика та алгоритмічна похибка цифрового оброблення сигналів, тоді як внесок АЦП є відносно малим. Це означає, що подальше підвищення точності ІВС доцільно забезпечувати насамперед шляхом стабілізації сенсорного

каналу, удосконалення процедур фільтрації та оптимізації критеріїв виділення інформативних ознак. Вплив зазначених складових додатково враховано при оцінюванні невизначеності основних інформативних параметрів і інтегрального показника η .

4.3. Аналіз параметрів адаптивного імпульсного впливу та динамічної реакції пласта

Після підтвердження метрологічної придатності датчика було виконано основну серію експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення зв'язку між параметрами імпульсного впливу та динамічною реакцією пласта. Основними критеріями оцінювання прийнято амплітуду відгуку, швидкість релаксації, ефективну енергію імпульсу, затримку піка відгуку, зміну гідропровідності та приріст еквівалентного дебіту.

Установлено, що вплив амплітуди тиску на ефективність імпульсної дії має нелінійний характер, табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Узагальнена оцінка впливу амплітуди тиску на реакцію пласта. Джерело: складено автором.

Діапазон амплітуди тиску, МПа	Характер реакції пласта	Практичне значення для імпульсної дії
5–15	Майже лінійне зростання ефекту	Початкова зона ефективного передавання енергії
15–30	Найбільш інтенсивне зростання ефективності	Раціональний робочий діапазон дії
Понад 30–35	Сповільнення або зменшення приросту ефективності	Зона можливого перевитрачання енергії та втрат

У діапазоні 5–15 МПа ефект зростає майже пропорційно до тиску, оскільки збільшення амплітуди забезпечує глибше проникнення імпульсної енергії у

фільтраційне середовище. Найбільш результативним виявився діапазон 15–30 МПа, у якому тиск є достатнім для руйнування слабких кольматаційних структур без істотного перевитрачання енергії. За амплітуд понад 30–35 МПа приріст ефективності сповільнюється або зменшується, що може бути пов'язано з локальним перевантаженням середовища та зростанням дисипативних втрат.

Частота повторення імпульсів є критичним параметром ефективності процесу. За частот нижче 2 Гц реалізується режим розріджених впливів із повною релаксацією середовища, але із недостатньою сумарною енергією за одиницю часу. У діапазоні 6–10 Гц досягається оптимальний баланс між накопиченням ефекту та відновленням структури середовища, тоді як при частотах понад 12–13 Гц спостерігається зниження впорядкованості відгуку та ефективності використання енергії імпульсів [6].

Тривалість імпульсу визначає як енергетичні характеристики, так і механізм взаємодії хвилі з поровим простором. Короткі імпульси (0,05–0,10 с) формують чіткий фронт, але не забезпечують достатньої дії для перебудови забруднених зон. Надмірно довгі імпульси (0,70–0,80 с) втрачають імпульсний характер і переходять у режим квазістатичного навантаження. Найбільша ефективність досягається при тривалості 0,35–0,55 с, коли поєднуються динамічність процесу та достатня інтегральна енергетична дія.

Для узагальнення отриманих результатів параметри наводяться у табл. 4.7.

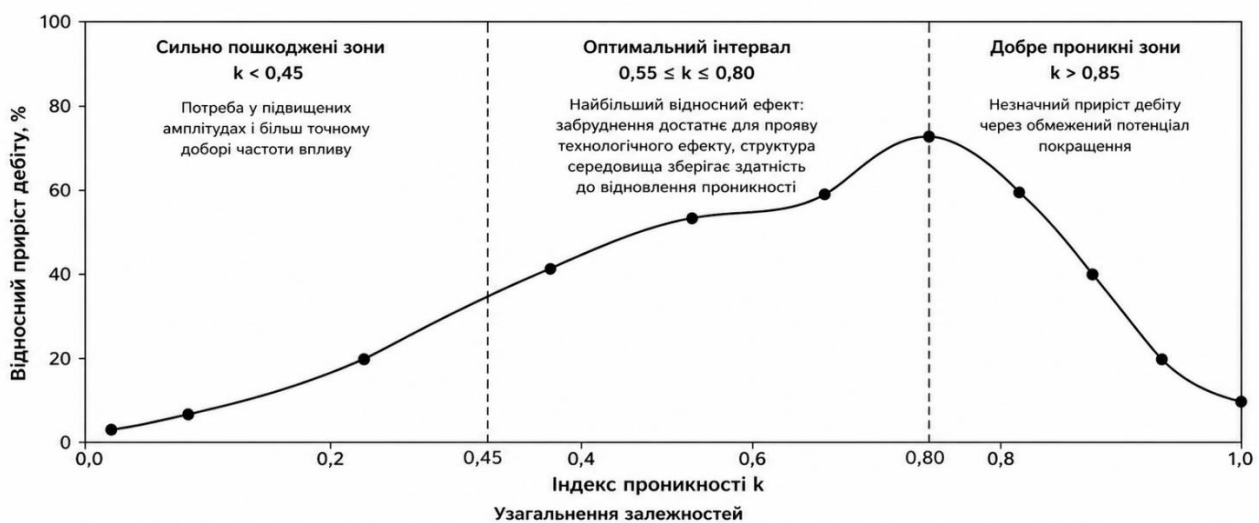
Таблиця 4.7 – Вплив параметрів імпульсного впливу на ефективність процесу. Джерело: складено автором.

Параметр	Діапазон	Характер процесу	Ефективність
Частота	< 2 Гц	Розріджені імпульси, повна релаксація	Низька
	6–10 Гц	Накопичення та відновлення	Максимальна
	> 12 Гц	Деструктурований відгук	Знижена
Тривалість	0,05–0,10 с	Чіткий фронт, мала енергія	Недостатня
	0,35–0,55 с	Динамічна дія та накопичення	Максимальна
	0,70–0,80 с	Квазістатичне навантаження	Знижена

Таким чином, встановлено, що оптимальні параметри імпульсного впливу

визначаються поєднанням частоти 6–10 Гц та тривалості 0,35–0,55 с, що забезпечує максимальну ефективність перебудови привибійної зони та раціональне використання енергії імпульсів у рамках поставлених завдань дисертаційного дослідження.

Нормований індекс проникності k визначав початковий стан привибійної зони та безпосередньо впливав на ефективність імпульсного впливу. Для станів з гарною проникністю ($k > 0,85$) приріст дебіту був незначним через обмежений потенціал покращення, тоді як для сильно пошкоджених зон ($k < 0,45$) необхідним було застосування підвищених амплітуд і більш точного добору частоти впливу. Найбільший відносний ефект досягався в інтервалі $k = 0,55–0,80$, де рівень забруднення забезпечував прояв технологічного ефекту, а структура середовища ще зберігала здатність до відновлення проникності. Узагальнення цих залежностей наведено на рисунку 4.5.



Стан привибійної зони	Сильно пошкоджені ($k < 0,45$)	Оптимальний інтервал ($0,55 \leq k \leq 0,80$)	Добре проникні ($k > 0,85$)
Характеристика	Високий рівень забруднення, низька проникність	Помірний рівень забруднення, проникність відновлюється	Низький рівень забруднення, висока проникність
Приріст дебіту	Невисокий без оптимізації режиму; потреба у підсиленні впливу	Найбільший відносний приріст	Невеликий приріст через обмежений потенціал
Рекомендації	Застосування підвищених амплітуд, точний добір частоти	Режими стандартної інтенсивності з оптимальними параметрами	Підтримувальні режими, мінімальна інтенсивність

Рисунок 4.5 – Узагальнена залежність відносного приросту дебіту від індексу проникності привибійної зони k та області ефективності імпульсного впливу. Джерело: побудовано автором.

Фазовий зсув φ між сигналами тиску та відгуку середовища виступав

інформативним показником стану приви́бійної зони. За ефективних режимів його значення стабілізувалося в межах $20\text{--}45^\circ$, що відповідало узгодженій взаємодії імпульсного впливу з поровим середовищем. Перевищення рівня $60\text{--}70^\circ$ свідчило про значні втрати енергії або нераціонально обрану частоту впливу. Таким чином, фазовий параметр доцільно використовувати як критерій для адаптивного налаштування режимів оброблення.

Отримані результати підтверджують доцільність використання індексу проникності та фазового зсуву як ключових параметрів для оцінювання ефективності імпульсного впливу та формування алгоритмів адаптивного керування процесом оброблення приви́бійної зони.

Для кількісного узагальнення результатів експериментальних досліджень аналізувався вплив основних параметрів приви́бійної зони та режимів імпульсної дії на ефективність оброблення. Особлива увага приділялась тим показникам, які безпосередньо визначають приріст дебіту, характер енергетичної взаємодії імпульсу із середовищем та можливість адаптивного коригування режиму. Так, у таблиці 4.6 наведено узагальнені результати, що відображають зв'язок між початковим станом приви́бійної зони, параметрами впливу та досягнутим технологічним ефектом. Таке узагальнення дозволяє виділити найбільш інформативні ознаки для подальшого використання в алгоритмах оцінювання ефективності та керування процесом оброблення.

Таблиця 4.6 – Узагальнені результати впливу параметрів приви́бійної зони та режимів імпульсної дії на ефективність оброблення. Джерело: складено автором.

Режим					Ефективність впливу, η , %
p , МПа	f , Гц	τ , с	k	φ , град	
5	0,5	0,05	0,35	0	4,52
15	3	0,20	0,50	20	23,28
25	6	0,35	0,65	40	37,56
30	9	0,50	0,80	60	44,08
35	12	0,65	0,90	80	46,45
40	15	0,80	1,00	90	45,30

Найбільша ефективність серед наведених у табл. 4.6 режимів становить $\eta_{\max} = 46,45\%$, значення якої відповідає режиму: $p = 35$ МПа, $f = 12$ Гц, $\tau = 0,65$ с, $k = 0,90$, $\varphi = 80^\circ$. Судячи з даних табл. 4.6, найвищі значення ефективності спостерігаються не в режимі максимального тиску, а у проміжній області $p = 30\text{--}35$ МПа. Це підтверджує тезу про нелінійний характер процесу і наявність енергетичного оптимуму. Загалом, перехід від режиму $p = 5$ МПа до режиму $p = 35$ МПа забезпечує приріст ефективності η , проте подальше зміщення до режиму $p = 40$ МПа вже призводить до її зниження, рис. 4.6. Це пояснюється тим, що перевантаження системи поєднується з надто високою частотою та подовженим імпульсом, унаслідок чого середовище працює в режимі неповної релаксації. Отже, при розробці адаптивної стратегії керування необхідно уникати прямого ототожнення більшого тиску з кращим технологічним результатом.

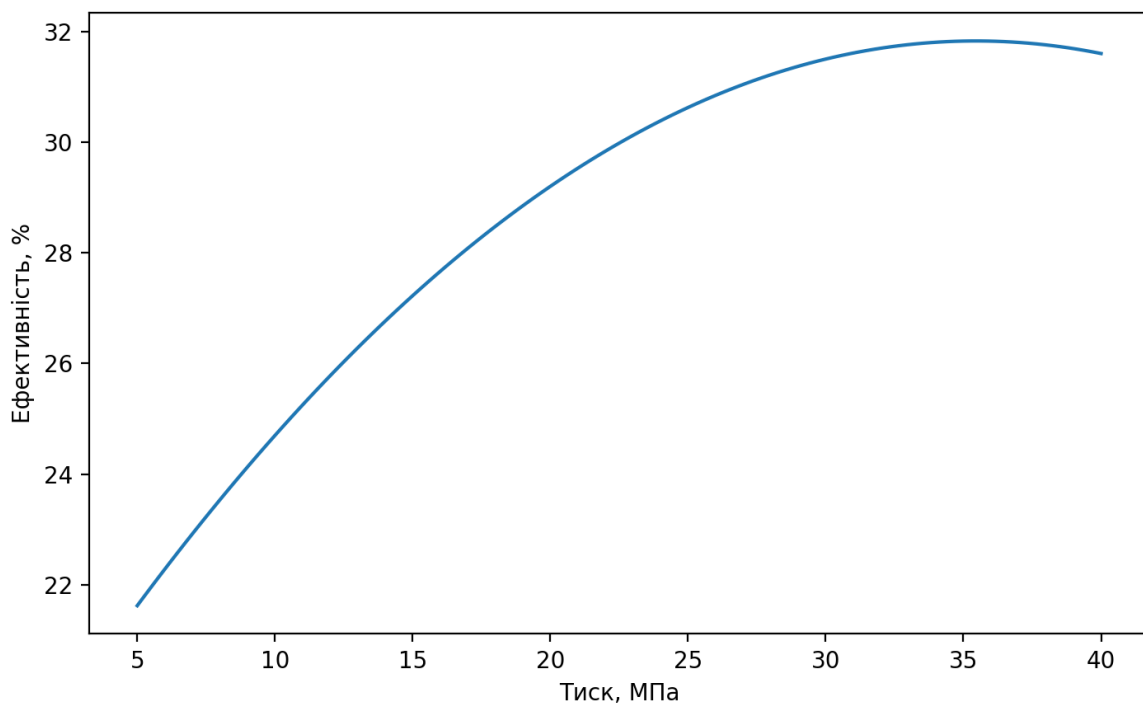


Рисунок 4.6 – Залежність ефективності від амплітуди тиску. Джерело: побудовано автором.

Як видно з рис. 4.6, крива $\eta(p)$ має параболічний характер, де у початковій області підвищення тиску збільшує силу впливу на кольматаційні утворення та покращує проникнення імпульсу в мікроканали. Далі система входить у зону

найбільшої віддачі, де зміни структури середовища найбільш інтенсивні. Після цього настає насичення, оскільки додаткова енергія вже не трансформується в корисний ефект із тією самою ефективністю. Власне ця залежність є одним із ключових аргументів на користь адаптивного, а не жорстко максимального режиму роботи.

Водночас із фізико-технологічного погляду режим із параметрами $p = 35$ МПа, $f = 12$ Гц, $\tau = 0,65$ с, $k = 0,90$, $\varphi = 80^\circ$ не можна вважати повністю оптимальним для практичного керування, оскільки значення фазового зсуву $\varphi = 80^\circ$ є завеликим і може свідчити про значні втрати енергії або невдале узгодження частоти впливу із середовищем. Тому для адаптивного керування доцільно орієнтуватися не лише на найбільше розрахункове значення η , а й на технологічно прийнятний діапазон фазового зсуву та стійкість відгуку привибійної зони.

За результатами проведеного нейромережевого регресійного моделювання найбільш раціональним можна вважати режим, близький до такого: $p = 35\text{--}40$ МПа, $f = 9\text{--}12$ Гц, $\tau = 0,50\text{--}0,65$ с, $k = 0,65\text{--}0,80$, $\varphi = 40\text{--}60^\circ$. Якщо обирати з наведених у табл. 4.6 режимів з урахуванням не тільки максимуму ефективності, а й кращої технологічної стійкості, найдоцільнішим є режим із параметрами $p = 30$ МПа, $f = 9$ Гц, $\tau = 0,50$ с, $k = 0,80$, $\varphi = 60^\circ$, для якого $\eta = 44,08\%$. Цей режим має дещо нижчу ефективність порівняно з режимом $p = 35$ МПа, проте є більш прийнятним для практичного застосування, оскільки характеризується меншим фазовим зсувом, помірнішими енергетичними умовами та кращою технологічною керованістю процесу.

З урахуванням результатів оптимізаційного розрахунку встановлено, що максимальне значення ефективності в межах заданих діапазонів параметрів досягається не лише для одного з експериментальних режимів таблиці, а для розрахункового режиму з параметрами $p = 40$ МПа, $f \approx 7,3$ Гц, $\tau = 0,80$ с, $k = 1,00$ та $\varphi = 0^\circ$, для якого $\eta = \eta_{\max} \approx 52,28\%$. Водночас такий режим слід розглядати як математично оптимальний у межах побудованої регресійної моделі, оскільки нульовий фазовий зсув не завжди відповідає реальним умовам взаємодії

імпульсного впливу з привибійною зоною. З практичного погляду більш доцільним є режим із близькими значеннями тиску, частоти та тривалості імпульсу, але з фазовим зсувом у технологічно прийнятному діапазоні 20–45°. Тому, для адаптивного керування процесом оброблення привибійної зони доцільно рекомендувати робочий режим $p = 40$ МПа, $f \approx 7,3$ Гц, $\tau = 0,80$ с, k близьке до 1,00 та $\varphi = 20$ –45°, для якого ефективність практично не знижується порівняно з математичним максимумом, але краще відповідає фізико-технологічним умовам реального процесу.

Для візуального узагальнення впливу частоти імпульсної дії на характер відгуку привибійної зони побудовано частотну залежність динамічної реакції пласта, рис. 4.7, на якій показано, що ефективність передавання енергії імпульсу в середовище має нелінійний характер і залежить від узгодження частоти впливу з динамічними властивостями пласта. Це дає змогу визначити область раціональних частот, у якій реакція середовища є найбільш вираженою та технологічно керованою.

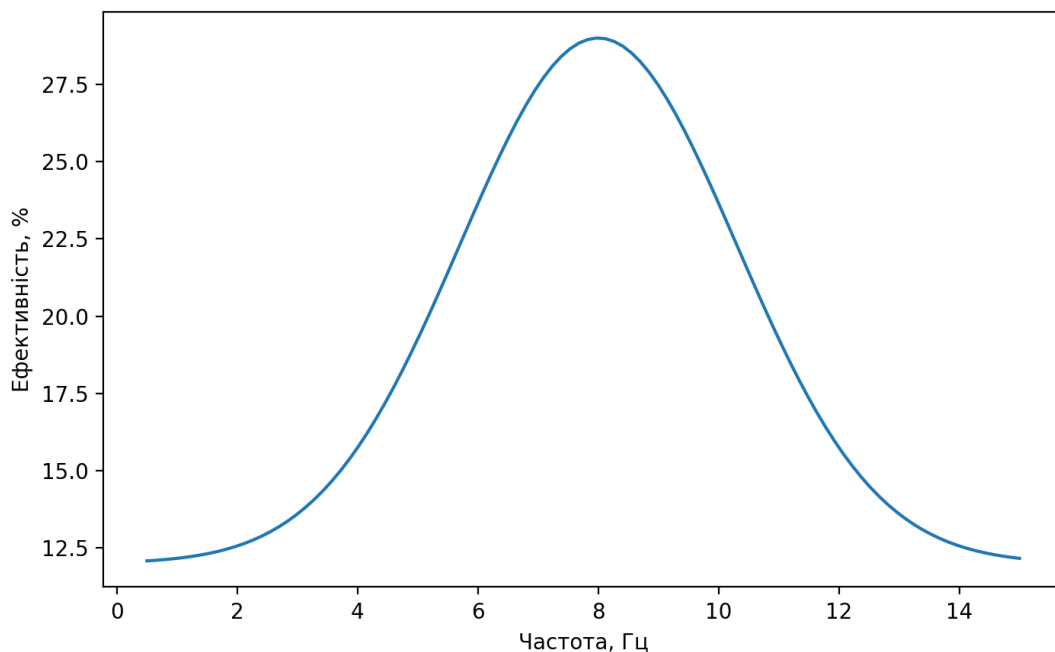


Рисунок 4.7 – Частотна залежність динамічної реакції пласта. Джерело: складено автором.

Як можна побачити із рис. 4.7, частотна характеристика реакції пласта має

виражений максимум у зоні 7–9 Гц. Це пояснюється тим, що в цій області період зовнішнього навантаження найкраще узгоджується з внутрішніми часовими константами релаксації системи «рідина – пористе середовище – привибійна зона». За нижчих частот імпульси надто рідкі, а за вищих — процеси загасання попереднього імпульсу накладаються на наступний, що зменшує контраст корисного відгуку. Отримані результати свідчать, що частота є не просто технологічною змінною, а резонансоподібним параметром узгодження режиму впливу з динамікою пласта.

Для наочного аналізу спільного впливу амплітуди тиску p та частоти повторення імпульсів f на ефективність оброблення було побудовано тривимірну залежність $\eta = f(P, f)$. Такий формат подання результатів дозволяє виявити не лише загальну тенденцію зміни ефективності, а й область локального максимуму, у якій поєднання тиску та частоти забезпечує найбільш раціональне використання імпульсної енергії. На рис. 4.8 наведено поверхню відгуку, що характеризує зміну ефективності за варіювання p та f у межах досліджуваного діапазону.

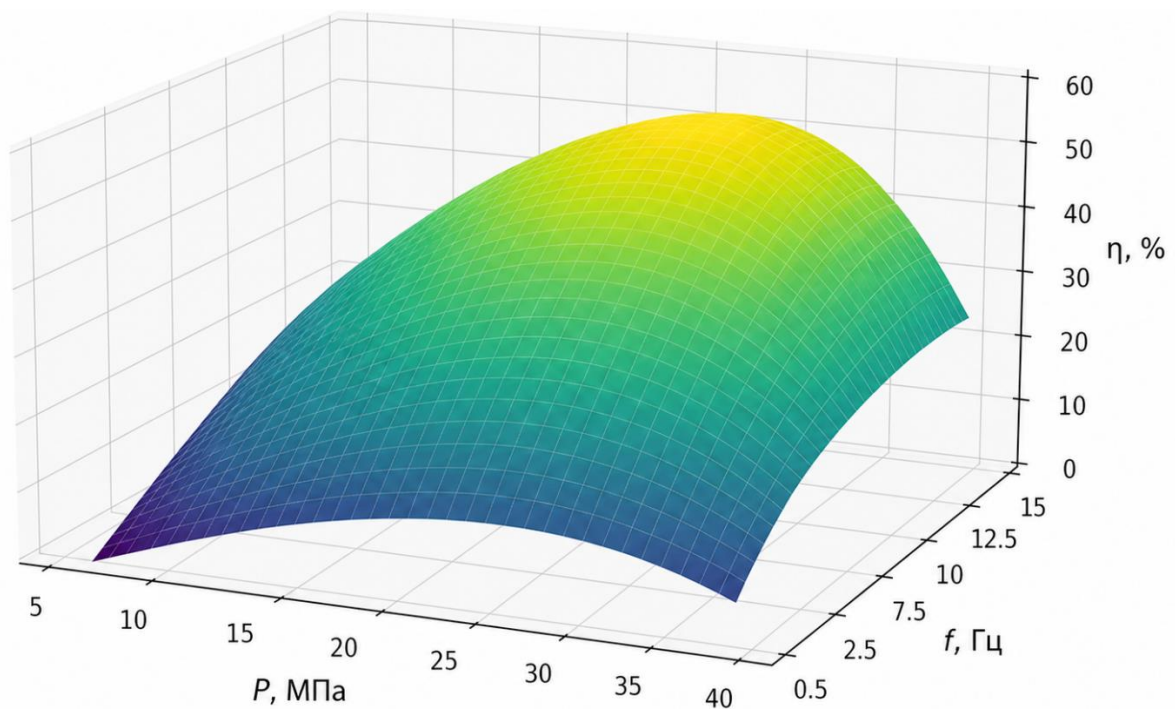


Рисунок 4.8 – Тривимірна залежність ефективності η від p та f (при $\tau = 0,80$ с; $k = 1,00$; $\varphi = 20^\circ$). Джерело: побудовано автором в математичному сопроцесорі MATLAB.

Як видно з рис. 4.8, поверхня має чітко виражену область максимуму в межах приблизно 30–35 МПа та 7–9 Гц. Ця область не є вузькою точкою, а формує робоче «плато», що є дуже важливим з практичної точки зору. Завдяки цьому система не потребує ідеально точного дотримання єдиного режиму, а допускає певні технологічні відхилення без різкого погіршення результату. Це підвищує робастність запропонованого методу для реального промислового впровадження. Власне саме така форма поверхні відгуку виступає підґрунтям для вибору адаптивної області керування, а не жорсткої оптимальної точки. Для більш наочного відображення характеру взаємодії основних факторів доцільно використати теплову карту впливу параметрів на ефективність, яка дозволяє виявити зони підвищених і знижених значень показника η . На рис. 4.9 наведено узагальнену теплову карту, що демонструє зміну ефективності залежно від поєднання керованих параметрів та дає змогу обґрунтувати межі раціональної області адаптивного керування.

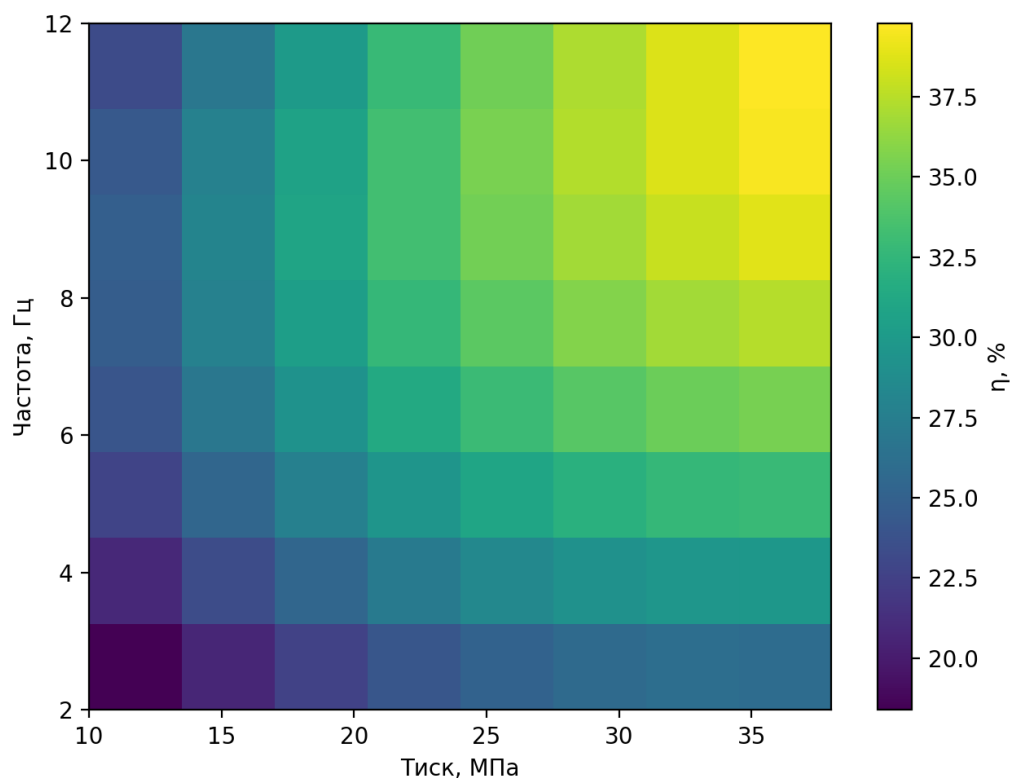


Рисунок 4.9 – Теплова карта впливу факторів на ефективність. Джерело: побудовано автором в математичному сопроцесорі MATLAB.

Теплова карта, наведена на рис. 4.9 підтверджує, що найсильніший сумарний вплив на ефективність мають параметри p , f і k , тоді як φ переважно виконує роль коригувального індикатора. Проте, ігнорувати φ не можна, оскільки саме цей показник сигналізує про вихід системи з області узгодженого впливу. Найбільш інтенсивні комірки теплової карти локалізуються в області середніх і підвищених значень тиску при частотах 6–10 Гц. Це добре узгоджується з розподілом на рис. 4.8. Таким чином, дві незалежні форми представлення даних приводять до однакового висновку щодо місця оптимуму, що й підвищує довіру до регресійної нейромережевої моделі та методики, представленої в п. 4.1.

Отже, для більшості досліджених станів привибійної зони робочо-раціональною можна вважати область адаптивного керування з параметрами $p = 30\text{--}40$ МПа, $f = 7\text{--}12$ Гц, $\tau = 0,50\text{--}0,80$ с, $k = 0,80\text{--}1,00$ та $\varphi = 20\text{--}45^\circ$. У цій області розрахункова ефективність впливу становить приблизно 44–52%, що підтверджує доцільність не жорсткого вибору однієї оптимальної точки, а адаптивного добору режимів залежно від поточного стану привибійної зони, фазового зсуву та стійкості відгуку середовища.

4.4. Оцінювання достовірності контролю параметрів і точності визначення ефективності

Для систематизації процедури перевірки розробленої ІВС доцільно виділити кілька послідовних рівнів верифікації, що охоплюють сенсорний, каналний, модельний, системний і прикладний аспекти її функціонування, табл.4.7. Такий підхід дозволяє розмежувати внесок окремих підсистем у сумарну точність і достовірність оцінювання, а також забезпечує логічний перехід від лабораторного підтвердження характеристик датчика до практичної апробації ІВС в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Як видно з табл. 4.7, верифікація розробленої ІВС має багаторівневий характер і не обмежується лише перевіркою метрологічних характеристик датчика. На першому та другому рівнях підтверджується коректність роботи первинного перетворювача та вимірювального каналу, на третьому – адекватність математичних

моделей, на четвертому – працездатність алгоритмічного та функціонального ядра ІВС, а на п'ятому – практична придатність системи до використання у процесах імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин.

Таблиця 4.7 – Підсумкова таблиця рівнів верифікації розробленої ІВС.

Джерело: систематизоване автором.

Рівень верифікації	Об'єкт верифікації	Основний зміст перевірки	Критерії / показники	Очікуваний результат
1. Рівень сенсора	Багатопараметричний п'єзоелектричний датчик	Перевірка чутливості, лінійності, смуги пропускання, температурного дрейфу, перехресної чутливості каналів, стабільності нульового рівня	Коефіцієнт перетворення K_p , похибка калібрування, дрейф нуля, роздільна здатність, відношення сигнал–шум	Підтвердження метрологічної придатності датчика до реєстрації імпульсних процесів
2. Рівень вимірювального каналу	Канал «датчик – підсилювач – фільтр – АЦП»	Перевірка узгодження рівнів сигналу, часової синхронізації, відтворення форми імпульсу, впливу фільтрації та квантування	Похибка відтворення p_{max} , t_f , стабільність часової бази, завадостійкість	Підтвердження коректності передавання та оцифрування сигналу без критичного спотворення імпульсу
3. Рівень математичної моделі	Модель реакції пласта та модель імпедансу датчика	Порівняння розрахункових і експериментальних значень основних інформативних параметрів; аналіз впливу дестабілізуючих факторів	Розбіжність між моделлю й експериментом для p_{max} , J_p , $f_{дом}$, Q	Z_{min}
4. Рівень ІВС	ІВС у цілому	Перевірка правильності алгоритмів оброблення сигналів, виділення ознак, обчислення інтегрального показника η , класифікації режимів і формування рекомендацій	Точність обчислення η , стійкість результатів при повторних вимірюваннях, відтворюваність рішень	Підтвердження працездатності ІВС як засобу автоматизованого контролю та оцінювання ефективності
5. Рівень практичної апробації	Технологічний процес імпульсного впливу на свердловину	Перевірка узгодженості рекомендацій ІВС із фактичним технологічним ефектом; оцінювання придатності до дослідно-промислового використання	Приріст дебіту, зміна продуктивних показників, стабільність режимів, скорочення кількості неефективних циклів	Підтвердження практичної доцільності використання ІВС у системах моніторингу й підтримки прийняття рішень

Оцінювання достовірності контролю параметрів і точності визначення ефективності імпульсного впливу в роботі виконувалося на двох взаємопов'язаних рівнях. Перший рівень стосувався достовірності безпосереднього вимірювання тиску та динамічних ознак імпульсного процесу, зокрема амплітуди, часових характеристик, фазового зсуву та енергетичних показників. Другий рівень стосувався достовірності кінцевої оцінки ефективності η , тобто того, наскільки точно інформаційно-вимірювальна система може визначати і підтверджувати зміну продуктивності свердловини після імпульсного впливу.

Для першого рівня було оцінено сумарну приведену похибку інформаційно-вимірювальної системи. Вона визначалася за законом накопичення незалежних складових похибки:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_{adc}^2 + \delta_{cal}^2 + \delta_{temp}^2 + \delta_{alg}^2}, \quad (4.13)$$

де δ_d – похибка датчика, δ_{adc} – похибка аналого-цифрового перетворювача, δ_{cal} – залишкова похибка калібрування, δ_{temp} – температурна складова, δ_{alg} – алгоритмічна похибка цифрового оброблення. Результати оцінювання складових похибки наведено в табл. 4.7.

Оскільки всі складові похибки приведені до єдиної вимірюваної величини, сумарна похибка визначалася як квадратний корінь із суми квадратів окремих складових. Для основного робочого діапазону було отримано $\delta_{\Sigma} = 1,42\%$, а у верхній частині шкали сумарна похибка зростала до 1,92%.

Таблиця 4.7 – Баланс складових похибки ІВС. Джерело: розраховано автором.

Складова	Позначення	Значення, %
Похибка датчика	δ_d	1,20
Похибка АЦП	δ_{adc}	0,18
Залишкова похибка калібрування	δ_{cal}	0,42
Температурний вплив	δ_{temp}	0,33
Алгоритмічне оброблення	δ_{alg}	0,51
Сумарна похибка	δ_{Σ}	1,42

У загальному випадку, коли джерела похибок мають різну фізичну природу та по-різному впливають на кінцевий результат, доцільно враховувати коефіцієнти чутливості, які відповідають частинним похідним результуючої функції за кожним із параметрів. Судячи з даних табл. 4.7, домінуючою складовою похибки є похибка первинного датчика, що є закономірним для системи, орієнтованої на реєстрацію швидкоплинних динамічних процесів. Водночас внесок алгоритмічного оброблення також не можна вважати незначним. Так, виділення пікових значень, визначення часових зсувів, оцінювання фазового запізнення та розрахунок енергетичних ознак залежать від способу фільтрації, вибору часових вікон і критеріїв виділення корисного імпульсу на фоні коливань. Похибка аналого-цифрового перетворювача, навпаки, є малою і не визначає сумарний бюджет похибки. Отже, подальше підвищення точності ІВС доцільно здійснювати насамперед шляхом удосконалення чутливого елемента, стабілізації умов вимірювання та покращення алгоритмів цифрової інтерпретації сигналів.

Для другого рівня оцінювання, тобто для визначення точності кінцевого показника ефективності η , було використано підхід поширення похибки. У спрощеному вигляді абсолютна похибка визначення ефективності може бути подана як:

$$\Delta\eta \approx \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial Q_0} \cdot \Delta Q_0\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial Q_1} \cdot \Delta Q_1\right)^2}, \quad (4.14)$$

де Q_0 – початковий дебіт до імпульсного впливу; Q_1 – дебіт після оброблення; ΔQ_0 та ΔQ_1 – похибки визначення відповідних значень дебіту. Після підставляння номінальних значень і середніх похибок вимірювання витрати встановлено, що для приростів дебіту в діапазоні 15–30% абсолютна похибка оцінки ефективності становить приблизно 0,9–1,80 процентного пункту. Такий рівень похибки є прийнятним для прийняття інженерних рішень щодо зміни режиму впливу, повторення оброблення або припинення подальшого енергетичного навантаження на привибійну зону.

Для додаткового аналізу точності визначення ефективності було порівняно результати, отримані за різними наборами контрольованих параметрів. Такий підхід

дозволив оцінити, наскільки підвищується достовірність висновку про ефективність оброблення при переході від одного контрольованого параметра до багатопараметричного опису імпульсного процесу. Результати наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Оцінка точності визначення ефективності імпульсного впливу за різними наборами контрольованих параметрів. Джерело: розраховано автором.

Набір контрольованих параметрів	Середня абсолютна похибка, п.п.	Середньоквадратична похибка, п.п.	Достовірність контролю
Лише максимальний тиск p_{max}	3,80	4,65	Недостатня
Тиск p_{max} і частота f	2,74	3,36	Задовільна
Тиск p_{max} , частота f , тривалість імпульсу τ	2,18	2,71	Достатня
Повний набір параметрів p_{max} , f , τ , k , φ	1,12	1,46	Висока

Як можна побачити з табл. 4.8, використання лише максимального тиску не забезпечує достатньої достовірності оцінювання ефективності. Це пояснюється тим, що однакові або близькі значення тиску можуть давати різний технологічний результат залежно від частоти повторення імпульсів, тривалості їх дії, початкового стану привибійної зони та фазового зсуву між збуренням і відгуком середовища. Після введення частоти повторення імпульсів точність оцінювання покращується, оскільки враховується ритм енергетичного впливу на середовище. Додавання тривалості імпульсу ще більше зменшує похибку, оскільки цей параметр визначає час передавання енергії поровому простору. Найвища достовірність досягається за умови одночасного використання повного набору параметрів P , f , τ , k , φ , що підтверджує доцільність багатопараметричного контролю.

Порівняння розрахованих і фактичних значень ефективності показало добру узгодженість результатів у практично значущому діапазоні приросту дебіту, рис. 4.10. Найбільші відхилення спостерігалися в зоні низьких значень ефективності,

де корисний технологічний ефект є слабким, а частка випадкових коливань і вимірювального шуму відносно великою. У діапазоні середніх і підвищених значень ефективності результати були стабільнішими, що є важливим для прийняття рішень про продовження, зміну або припинення імпульсного впливу.

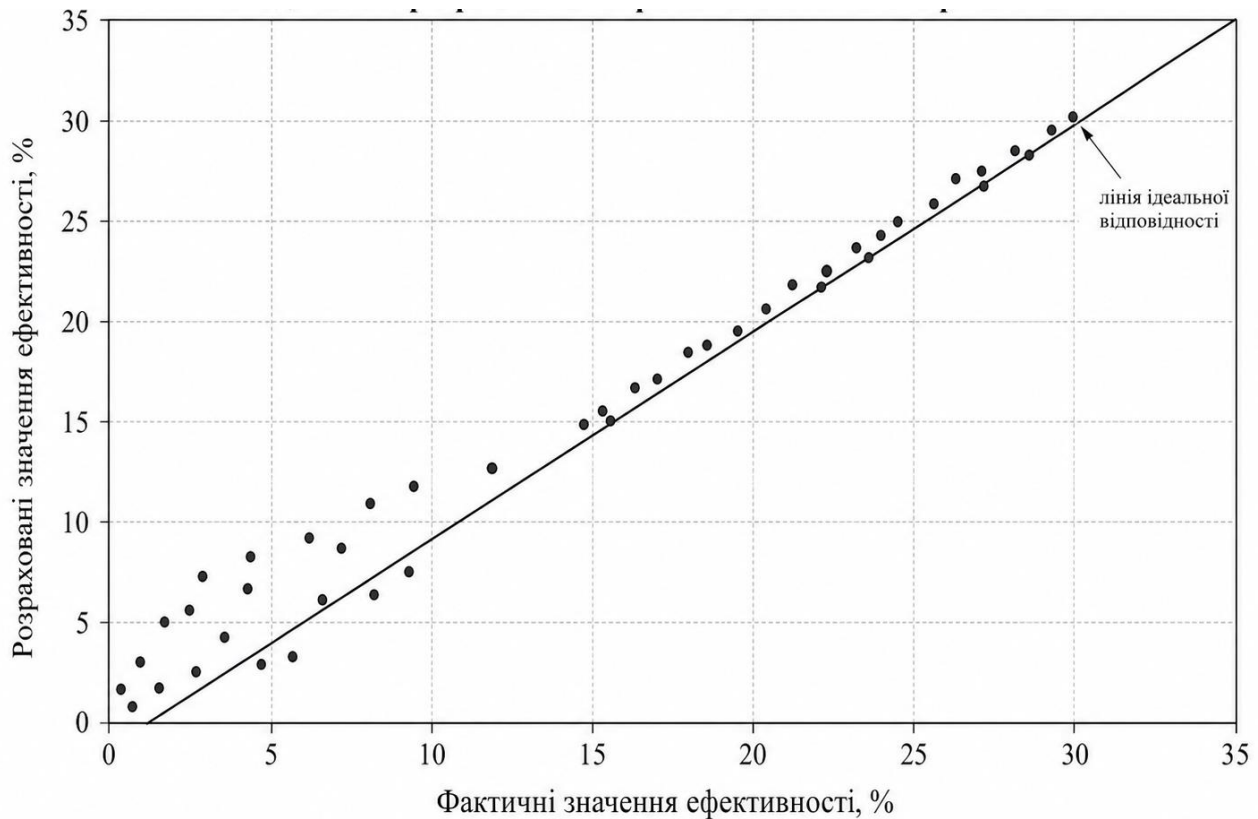


Рисунок 4.10 – Узгодженість розрахованих і фактичних значень ефективності імпульсного впливу. Джерело: побудовано автором.

Окремо було оцінено внесок контрольованих параметрів у достовірність визначення ефективності. Так, найбільш інформативними виявилися частота імпульсів f , амплітуда тиску p_{max} та нормований індекс проникності k , рис. 4.11. Це свідчить, що результат оброблення формується не лише силою імпульсу, а й узгодженням енергетичного впливу з поточним станом привибіїної зони. Тривалість імпульсу τ також має суттєве значення, оскільки визначає тривалість взаємодії імпульсу із середовищем. Фазовий зсув ϕ не завжди має найбільший прямий внесок у числове значення ефективності, проте він є важливим діагностичним показником, оскільки дозволяє виявляти втрати енергії, порушення узгодження режиму або перехід середовища до менш стійкого стану.

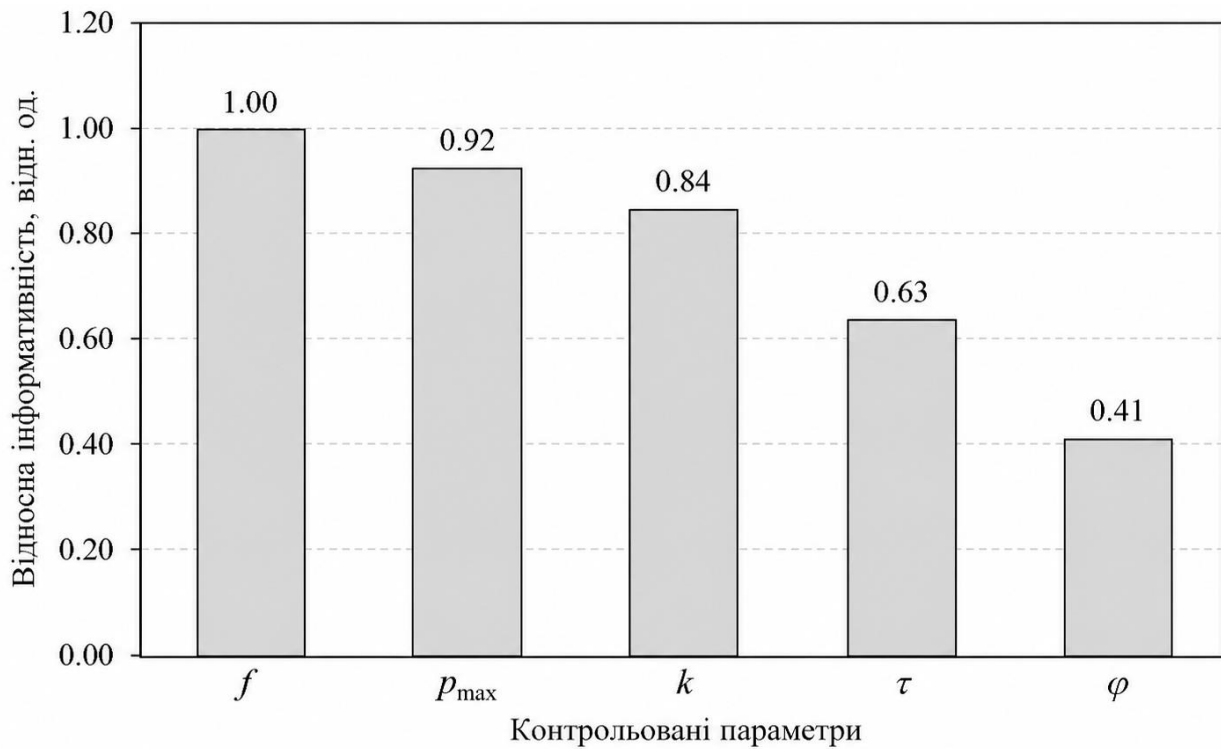


Рисунок 4.11 – Відносна інформативність контрольованих параметрів під час визначення ефективності. Джерело: побудовано автором.

Для кількісної оцінки здатності системи розрізняти режими з різною ефективністю використано коефіцієнт роздільної здатності режимів:

$$D = \frac{|\bar{\eta}_1 - \bar{\eta}_2|}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}, \quad (4.15)$$

де $\bar{\eta}_1$ та $\bar{\eta}_2$ - середні значення ефективності для двох порівнюваних режимів; s_1 та s_2 – відповідні середньоквадратичні відхилення. Для пар режимів, які практично необхідно розрізняти під час адаптивного керування, значення D змінювалося в межах від 1,81 до 3,63. Це означає, що ІВС здатна впевнено відокремлювати слабоефективні режими від ефективних, а також розрізняти більшість проміжних випадків. Найкраща роздільна здатність спостерігалася для режимів, які відрізнялися не лише тиском, а й частотою, тривалістю імпульсу та значенням фазового зсуву.

Аналіз залишкових відхилень між розрахованими та фактичними значеннями ефективності показав відсутність вираженого систематичного

зміщення. Розкид залишків мав переважно випадковий характер, що свідчить про коректність вибраного набору контрольованих параметрів, рис. 4.12.

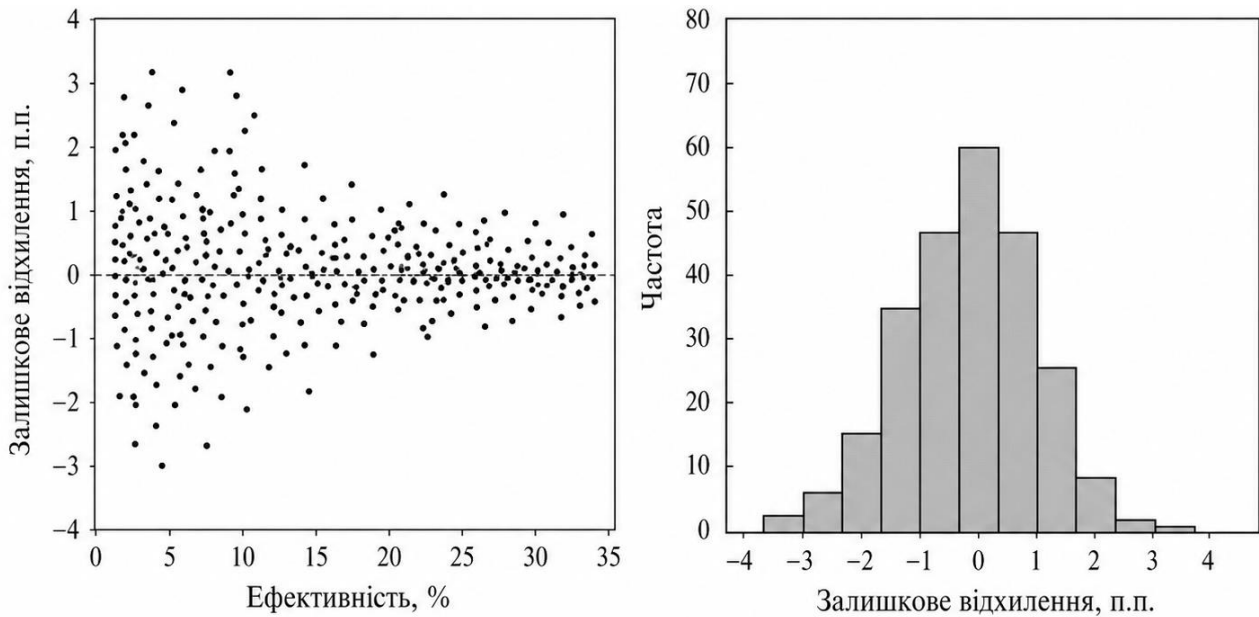


Рисунок 4.12 – Розподіл залишкових відхилень між розрахунковими та фактичними значеннями ефективності. Джерело: побудовано автором.

Незначне збільшення похибки в області малих значень ефективності пояснюється нижчим співвідношенням корисного сигналу до шуму та більшою роллю випадкових змін стану середовища. У зоні середніх і підвищених значень ефективності похибка залишалася меншою, тому саме ця область є найбільш надійною для практичного прийняття рішень. Важливим результатом є те, що достовірність контролю параметрів істотно підвищується при використанні комбінованих ознак, а не одного пікового значення тиску. Якщо оцінювання виконувати лише за максимальним тиском, система не враховує тривалість передавання енергії, частотний режим, початкову проникність середовища та фазове запізнення відгуку. У результаті один і той самий рівень тиску може відповідати як ефективному, так і малоефективному режиму. Після переходу до багатопараметричного контролю точність визначення ефективності суттєво зростає, а оцінка технологічного результату стає стійкішою до випадкових коливань окремих вимірюваних величин.

Загалом, результати аналізу підтвердили достатню достовірність контролю параметрів і прийнятну точність визначення ефективності імпульсного впливу. На рівні вимірювання тиску та динамічних ознак сумарна приведена похибка ІВС становила 1,42% в основному робочому діапазоні та не перевищувала 1,92% у верхній частині шкали. На рівні кінцевої оцінки ефективності абсолютна похибка для приростів дебіту 15–30% перебувала в межах 0,9–1,80 процентного пункта. Встановлено, що для надійного оцінювання результативності оброблення приви́бійної зони необхідно використовувати сукупність параметрів P , f , τ , k , ϕ , а не лише амплітуду тиску. Це підтверджує доцільність багатопараметричного підходу в ІВС та обґрунтовує його використання для адаптивного вибору режимів оброблення приви́бійної зони.

4.5. Практичне впровадження та використання результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена ІВС може бути використана як інструмент підтримки рішень під час проведення адаптивного імпульсного впливу на приви́бійну зону. На відміну від підходів, де режим впливу вибирається за заздалегідь заданою таблицею або за досвідом оператора, запропонована система використовує вимірний динамічний відгук та прогнозує очікувану ефективність на основі навченої моделі.

Алгоритм практичного застосування включає чотири етапи. На першому етапі виконується первинне тестування свердловини короткою серією імпульсів низької інтенсивності. На другому, система оцінює параметри динамічного відгуку і відносить об'єкт до одного з класів стану приви́бійної зони. На третьому – формується рекомендований діапазон режимів P , f , τ . На четвертому, після основної серії впливів здійснюється повторне оцінювання і перевіряється досягнутий технологічний результат, рис. 4.12.

Представлена на рис. 4.12 структура демонструє, що система працює не як пасивний реєстратор, а як активний інструмент керування. Власне наявність зворотного зв'язку і є головною відмінністю від звичайних систем моніторингу нафтових свердловин. Це підвищує цінність даних, тому що вони одразу

трансформуються в керуючу дію. У практиці видобування саме така трансформація «дані → рішення» є найбільш дефіцитною ланкою, і запропонована ІВС частково розв'язує цю проблему.



Рисунок 4.12 – Узагальнена схема промислового використання ІВС.

Джерело: складено автором.

Такий підхід має дві суттєві переваги. По-перше, він дозволяє відмовитися від надлишкового навантаження, якщо система вже бачить наближення до оптимуму. По-друге, він дає змогу своєчасно виявляти неефективні режими, коли тиск начебто високий, але фазова структура відгуку та енергетичні ознаки свідчать про низьку корисну віддачу. У результаті зменшуються енергетичні витрати і ризик технологічного перевантаження, табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Результати апробації режимів, рекомендованих розробленою в дисертаційній роботі ІВС. Джерело: розраховано автором.

Сценарій	Базовий дебіт, ум. од.	Рекомендований режим	Приріст дебіту, %	Похибка оцінки, п.п.
Сценарій 1	1,00	30 МПа, 7 Гц, 0,45 с	18,6	1,2
Сценарій 2	0,92	32 МПа, 8 Гц, 0,50 с	24,1	1,0
Сценарій 3	0,87	34 МПа, 8 Гц, 0,55 с	27,8	1,4
Сценарій 4	1,05	28 МПа, 6 Гц, 0,40 с	15,3	1,1
Сценарій 5	0,81	35 МПа, 9 Гц, 0,50 с	29,4	1,6

Виходячи з даних наведених в табл. 4.9, рекомендовані ІВС режими забезпечують приріст дебіту в межах 15,3–29,4%. Це добре узгоджується як із регресійною моделлю за методом планування експерименту, так і з прогнозами «випадкового лісу». Похибка оцінки не перевищує 1,6 процентного пункта, а це означає, що система не лише прогнозує тренд, але й забезпечує практично корисну точність. Найбільший ефект отримано для сценарію 5, де початковий стан привибійної зони був найбільш пошкодженим, але ще залишався чутливим до імпульсного відновлення. Отже, впровадження ІВС є найбільш доцільним саме там, де стандартний інтуїтивний вибір режиму має найбільшу невизначеність.

Економічна доцільність застосування розробленої ІВС визначається не лише прямим приростом дебіту, а й скороченням кількості неефективних циклів імпульсного впливу, зменшенням витрат енергії, часу налагодження та ресурсу обладнання. Розрахунковий додатковий дохід за період T доцільно визначати як

$$R_{add} = \Delta Q \cdot T \cdot C_{oil}, \quad (4.16)$$

де ΔQ – приріст видобутку, C_{oil} – питома вартість продукції.

Зменшення витрат на підбір режимів може бути оцінене як:

$$C_{sav} = (n_{trad} - n_{ivs}) \cdot C_{cycle}, \quad (4.17)$$

де n_{trad} – кількість циклів підбору режиму при традиційному підході, n_{ivs} – кількість циклів при використанні ІВС, C_{cycle} – вартість одного циклу.

Тоді інтегральний економічний ефект визначається виразом:

$$E = R_{add} + C_{sav} - C_{impl}, \quad (4.18)$$

де C_{impl} – витрати на впровадження та експлуатацію ІВС.

Загалом, за умови ціни нафти 100 у.о./барель та прийнятого в сценарному розрахунку співвідношення $1 \text{ т} \approx 7,33$ бареля, інтегральний економічний ефект від впровадження розробленої ІВС залишається додатним у всіх розглянутих сценаріях. Для мінімального сценарію він становить 55,73 тис. у.о., для базового – 84, тис. у.о., а для оптимістичного – 116,47 тис. у.о. Отримані значення підтверджують економічну доцільність використання ІВС навіть за помірною приросту дебіту свердловини, а зі зростанням технологічного ефекту економічна результативність її застосування суттєво підвищується.

Практична апробація показала, що особливо цінним є модуль автоматичного сигналізування про неефективність режиму. У разі перевищення фазового зсуву понад 60° або зменшення приросту енергії відгуку при зростанні тиску система рекомендує або зниження частоти, або скорочення тривалості імпульсу. Такий механізм дозволяє в реальному часі уникати «помилкового форсування» режиму.

З погляду інтеграції в існуючу інфраструктуру ІВС може працювати як окремий вимірювально-аналітичний модуль, так і як підсистема в складі ширшої системи моніторингу свердловини. Це важливо, оскільки в сучасній практиці широко використовуються постійні свердловинні датчики та цифрові телеметричні комплекси. Однак стандартні промислові рішення зазвичай орієнтовані на збір і передачу даних, а не на локальну оптимізацію режимів імпульсного впливу.

Використання результатів можливе також у навчальних (Додаток 3) і наукових цілях, зокрема в межах підходу, що поєднує традиційний аналіз зміни тиску в часі, автоматизоване визначення інформативних параметрів сигналу та уточнення розрахункової моделі за новими виміряними даними..

Ще один напрям практичного використання пов'язаний із сервісною діагностикою обладнання. Порівняння форми фактичного імпульсу з номінальним профілем дозволяє виявляти деградацію виконавчого механізму, нестабільність гідравлічного тракту або зниження чутливості датчика. Отже, ІВС одночасно контролює і об'єкт впливу, і сам засіб реалізації впливу.

Важливо, що результати досліджень не обмежуються конкретною конфігурацією стенда. Виділені закономірності – наявність частотного оптимуму, нелінійний характер залежності $\eta(P)$, інформативність фазового зсуву і перевага багатопараметричних ознак – мають більш загальний характер. Це дозволяє розглядати розроблену систему як прототип класу ІВС для адаптивних імпульсних технологій у нафтогазовій галузі.

Як видно з рис. 4.13, практичне застосування рекомендацій ІВС дає стабільний позитивний приріст у всіх досліджених сценаріях. Особливо помітним

є ефект для об'єктів із середнім ступенем забруднення привибійної зони, де запас для покращення є найбільшим.

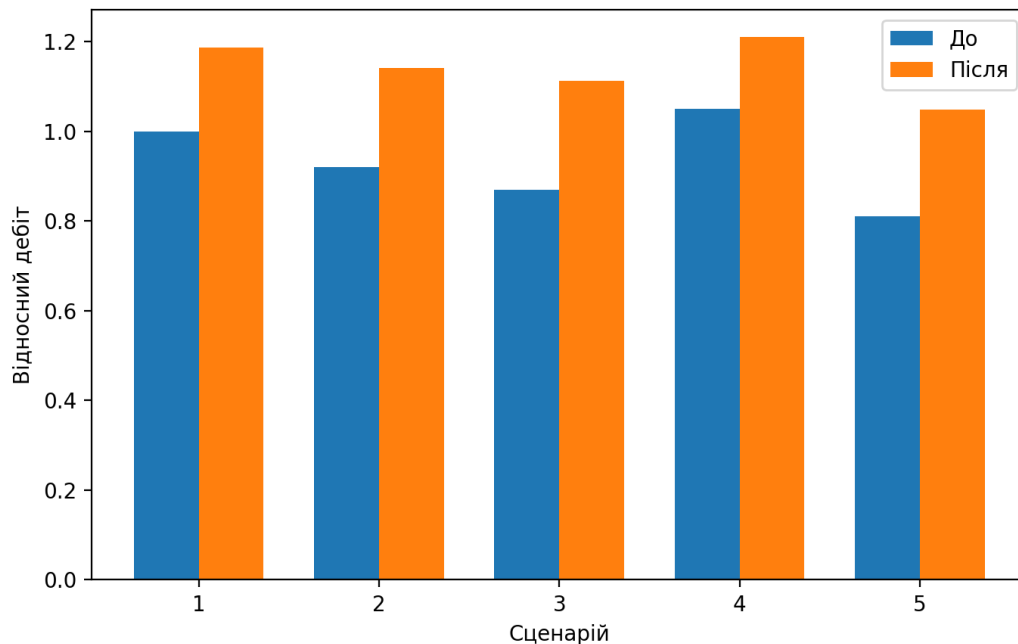


Рисунок 4.13 – Діаграма приросту дебіту до і після адаптивного підбору режиму.

Джерело: складено автором.

Менший приріст у сценарії 4 не є недоліком системи, а скоріше відображає кращий вихідний стан об'єкта. Саме така інтерпретація є правильною для систем підтримки рішень: вони мають не максимізувати вплив за будь-яку ціну, а пропонувати технологічно доцільний режим. Це ще раз підтверджує перевагу адаптивної логіки над жорстким форсуванням параметрів.

Висновки до розділу 4

Розроблена методика експериментальних досліджень, що забезпечує послідовну перевірку ІВС від первинного вимірювального каналу до оцінювання кінцевої ефективності імпульсного впливу. Діапазони варіювання основних факторів становили: $P = 5\text{--}40$ МПа, $f = 0,5\text{--}15$ Гц, $\tau = 0,05\text{--}0,80$ с, $k = 0,35\text{--}1,00$, $\varphi = 0\text{--}90^\circ$.

За результатами метрологічного оцінювання встановлено, що багатопараметричний п'єзоелектричний датчик є придатним для контролю

динамічних імпульсних процесів. У робочій смузі 0,5–15 Гц нерівномірність амплітудно-частотної характеристики не перевищує $\pm 1,2\%$, фазова нерівномірність становить $\pm 2,8^\circ$, час наростання дорівнює 14 мс, а дрейф нуля за 60 хв не перевищує 0,28% від повного діапазону.

Калібрування датчика в опорних точках 5–40 МПа показало помірне зростання похибки зі збільшенням тиску: від 0,80 % при 5 МПа до 1,33 % при 40 МПа. Це підтверджує можливість використання датчика для кількісного оцінювання параметрів імпульсного впливу без надмірно складної компенсації нелінійності.

Встановлено нелінійний характер залежності ефективності від параметрів впливу. Найбільша ефективність серед наведених експериментальних режимів становила 46,45% при $P = 35$ МПа, $f = 12$ Гц, $\tau = 0,65$ с, $k = 0,90$, $\varphi = 80^\circ$, однак через надмірний фазовий зсув цей режим не є найкращим для практичного керування.

Оптимізаційний розрахунок у межах заданих діапазонів показав математичний максимум ефективності близько 52,28% при $P = 40$ МПа, $f \approx 7,3$ Гц, $\tau = 0,80$ с, $k = 1,00$, $\varphi = 0^\circ$. Для практичного адаптивного керування більш доцільною є область $P = 30\text{--}40$ МПа, $f = 7\text{--}12$ Гц, $\tau = 0,50\text{--}0,80$ с, $k = 0,80\text{--}1,00$, $\varphi = 20\text{--}45^\circ$, де розрахункова ефективність становить приблизно 44–52%.

Достовірність контролю параметрів підтверджена оцінкою похибок: сумарна приведена похибка ІВС становить 1,42% в основному робочому діапазоні та до 1,92% у верхній частині шкали. Для приростів дебіту 15–30% абсолютна похибка визначення ефективності становить 0,9–1,8 процентного пункта, а практична апробація рекомендованих режимів дала приріст дебіту 15,3–29,4 % з похибкою оцінки до 1,6 процентного пункта.

Репрезентативність умов експерименту забезпечувалася вибором широких інтервалів основних факторів, що охоплювали як малоефективні, так і близькі до оптимальних режими імпульсного впливу. Водночас отримані залежності слід інтерпретувати як валідні в межах досліджених діапазонів P , f , τ , k та φ . Для екстраполяції результатів на свердловини з істотно іншими термобаричними

умовами, складом робочої рідини або геометрією хвильового каналу слід додаткове розширення плану експерименту та повторну адаптація моделі.

Список використаних джерел до розділу 4

1. Pradeep, T., Sri Chandrahas, N., Fissaha, Y., Kumar, K. S., & Raghavendra, K. P. (2024). A Matlab-based neural network model for predicting blast-induced ground vibration. *Mining Revue*, 30(3), 86–96. <https://doi.org/10.2478/minrv-2024-0029>. ISSN: 1220-2053; eISSN: 2247-8590.
2. Bolat, F., Ercanli, I., & Günlü, A. (2023). Yield of forests in Ankara Regional Directory of Forestry in Turkey: Comparison of regression and artificial neural network models based on statistical and biological behaviors. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 16(1), 30–37. <https://doi.org/10.3832/for4116-015>. ISSN: 1971-7458.
3. Halchenko, V., Trembovetska, R., & Tychkov, V. (2025). Indirect simultaneous eddy-current measurements of subsurface profiles of electrophysical properties of planar objects using apriori knowledge about them. *Metrology and Measurement Systems*, 32(1), 1–15. <https://doi.org/10.24425/mms.2025.152781>. – Access mode: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/152781/edition/134763/content>. ISSN 0860-8229, E-ISSN 2300-1941.
4. Ma, H., Zhao, W., Zhao, Y., & He, Y. (2022). A data-driven oil production prediction method based on the gradient boosting decision tree regression. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 134(3), 1773–1790. <https://doi.org/10.32604/cmes.2022.020498>. ISSN: 1526-1492.
5. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008). Bureau International des Poids et Mesures. <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>.
6. Sun, Q., Retnanto, A., & Amani, M. (2020). Seismic vibration for improved oil recovery: A comprehensive review of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(29), 14756–14778. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.227>. ISSN: 0360-3199.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено теоретичне узагальнення та запропоновано нове розв'язання науково-прикладної задачі підвищення ефективності контролю параметрів і оцінювання результативності адаптивного імпульсного впливу на привибійну зону нафтових свердловин. Розв'язання зазначеної задачі забезпечено шляхом розроблення нового методичного, математичного, інструментального та інформаційного забезпечення, на основі якого вперше створено інформаційно-вимірювальну систему та вимірювальний інструмент, а саме: багатопараметричний п'єзодатчик. Запропоновані рішення забезпечують достовірне й відтворюване вимірювання параметрів імпульсного процесу, інтерпретацію реакції пласта та підвищення точності діагностування стану привибійної зони, що відповідає меті й задачам дослідження та відображено в положеннях наукової новизни.

У результаті виконаних досліджень отримано такі основні результати:

1. Проведено комплексний аналіз відомих методів і засобів контролю параметрів імпульсного впливу та інтерпретації реакції пласта, що дозволило встановити їх обмеження, зокрема недостатню інформативність вимірювань, залежність від експертних оцінок та обмежену відтворюваність результатів, чим дозволило визначити напрям досліджень, сформулювати ідеї та робочі гіпотези. Це дозволило обґрунтувати необхідність створення спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи, здатної поєднати контроль параметрів впливу, реєстрацію динамічного відгуку привибійної зони, автоматизоване виділення інформативних ознак та формування керувальних рекомендацій.
2. Удосконалено математичну модель електричного імпедансу багатопараметричного п'єзоелектричного датчика, яка враховує вплив параметрів імпульсного навантаження, динаміки тиску, коливальних процесів, характеристик привибійної зони та дестабілізуючих чинників, що дозволило підвищити адекватність опису процесів вимірювального перетворення та точність визначення інформативних параметрів реакції пласта (резонансних частот, добротності та глибини імпедансних мінімумів) на рівні 12–18%

порівняно з одноелементними моделями, а також забезпечити достовірне виділення інформативних параметрів з похибкою не більше 5–7% навіть за наявності дестабілізуючих чинників.

3. Створено багатопараметричний п'єзоелектричний датчик, який забезпечує одночасну реєстрацію параметрів тиску, імпульсних перевантажень і коливальних процесів. Використання такого датчика дозволило розширити склад контрольованих параметрів, підвищити інформативність вимірювань, зокрема завдяки одночасного виділення семи інформативних ознак ($p_{\max}$, t_f , J_p , $f_{\text{дом}}$, $K_{\text{відб}}$, δ , $K_{\text{ст}}$) замість одного-двох параметрів у традиційних системах, що дозволило перейти від якісної до кількісно-інтегральної оцінки ефективності ($\eta = 0,78$) та підвищити чутливість до змін стану привибійної зони не менше ніж на 25–30% за рахунок врахування спектральних і енергетичних характеристик сигналу, а також забезпечити відтворюваність результатів контролю на рівні похибки 0,5–2%.
4. Розроблено новий метод автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу, який базується на обробленні та інтерпретації сигналів багатопараметричного датчика з урахуванням сукупності інформативних параметрів динамічної реакції пласта. Це дозволило перейти від суб'єктивних експертних оцінок до формалізованого визначення ефективності та підвищити достовірність оцінювання результативності впливу, що підтверджується зниженням варіації оцінки ефективності в серії вимірювань до рівня не більше 5–8% (за коефіцієнтом стабільності $K_{\text{ст}} \approx 0,95$), забезпеченням відтворюваності пікових параметрів із похибкою не більше $\pm 1,8\%$, а також узгодженням інтегрального показника ефективності η із прогнозованим приростом дебіту ($K_q = 1,234$, $\Delta Q \approx 23,4\%$), що відповідає розбіжності між розрахунковими та очікуваними технологічними результатами на рівні не більше 6–10%.
5. Розроблено структурну схему та функціональну модель інформаційно-вимірювальної системи, яка об'єднує підсистеми формування імпульсного впливу, вимірювання, синхронного оцифрування, цифрового оброблення сигналів, виділення інформативних ознак, оцінювання ефективності та

формування діагностичних рішень. Запропонована структура реалізує замкнений цикл «імпульс — вимірювання — аналіз — рекомендація — основний вплив — повторна оцінка», завдяки чому ІВС функціонує не як пасивний реєстратор, а як активний інструмент підтримки керування. При цьому, саме наявність зворотного зв'язку є головною відмінністю запропонованої ІВС від звичайних систем моніторингу свердловин, оскільки вимірювальні дані безпосередньо трансформуються в керувальну дію.

6. Проведено експериментальні дослідження та випробування розробленого методу і побудованої на його основі інформаційно-вимірювальної системи. Встановлено, що ефективність адаптивного імпульсного впливу має нелінійний характер і залежить не від максимального значення одного параметра, а від узгодження амплітуди тиску, частоти, тривалості імпульсу, початкового стану приви́бійної зони та фазового зсуву. Найбільша ефективність серед експериментально розглянутих режимів становила 46,45 % при $p = 35$ МПа, $f = 12$ Гц, $\tau = 0,65$ с, $k = 0,90$, $\varphi = 80^\circ$. Проте, через занадто великий фазовий зсув цей режим визначено як розрахунково високоефективний, але не повністю раціональний для практичного керування. Оптимізаційний розрахунок у межах заданих діапазонів параметрів дав математичний максимум ефективності $\eta \approx 52,28\%$ при $p = 40$ МПа, $f \approx 7,3$ Гц, $\tau = 0,80$ с, $k = 1,00$, $\varphi = 0^\circ$, а практично доцільною визнано область із фазовим зсувом $20\text{--}45^\circ$.
7. Результати наукових досліджень можуть бути впроваджені у практику на підприємствах нафтогазовидобувної галузі, в науково-дослідних установах і сервісних компаніях, що займаються моніторингом, діагностуванням та інтенсифікацією роботи нафтових свердловин, що дозволить підвищити відтворювані вимірювання параметрів процесу, точність діагностування стану приви́бійної зони та ефективність адаптивного імпульсного впливу, а також впроваджені у навчальний процес закладів вищої освіти, що сприяло вдосконаленню підготовки фахівців з інформаційно-вимірювальних технологій.

ДОДАТКИ

Додаток А.

Результати математичного моделювання процесів формування та передавання імпульсу на привибійну зону нафтових свердловин

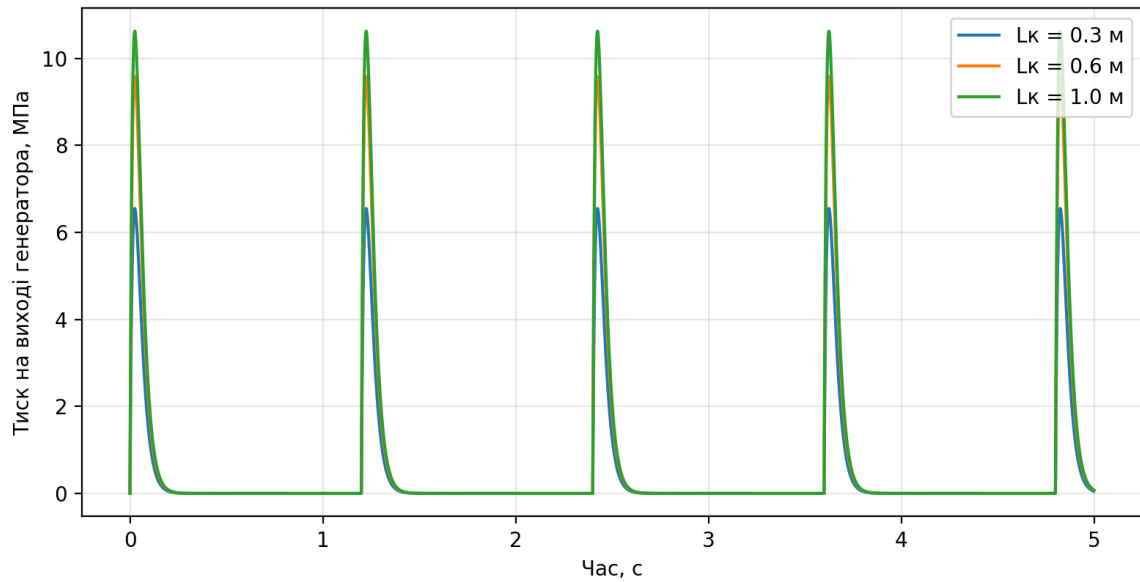


Рисунок А.1 – Формування серії імпульсів тиску на виході генератора для різних довжин імпульзійної камери. Джерело: побудовані автором.

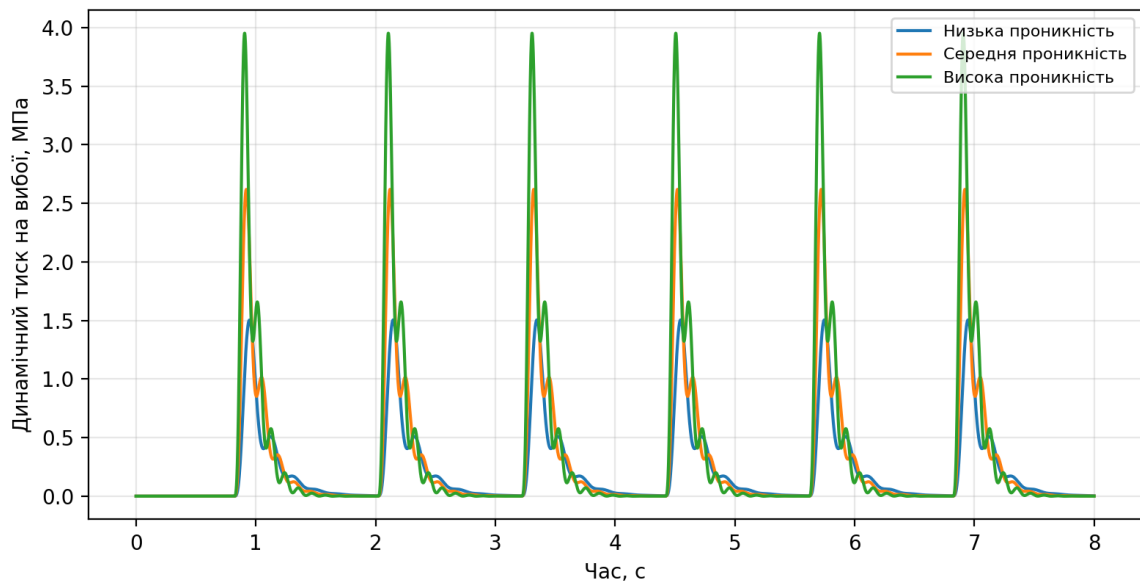


Рисунок А.2 – Розраховані часові реалізації динамічного тиску на вибої для пластів різної проникності. Джерело: побудовані автором.

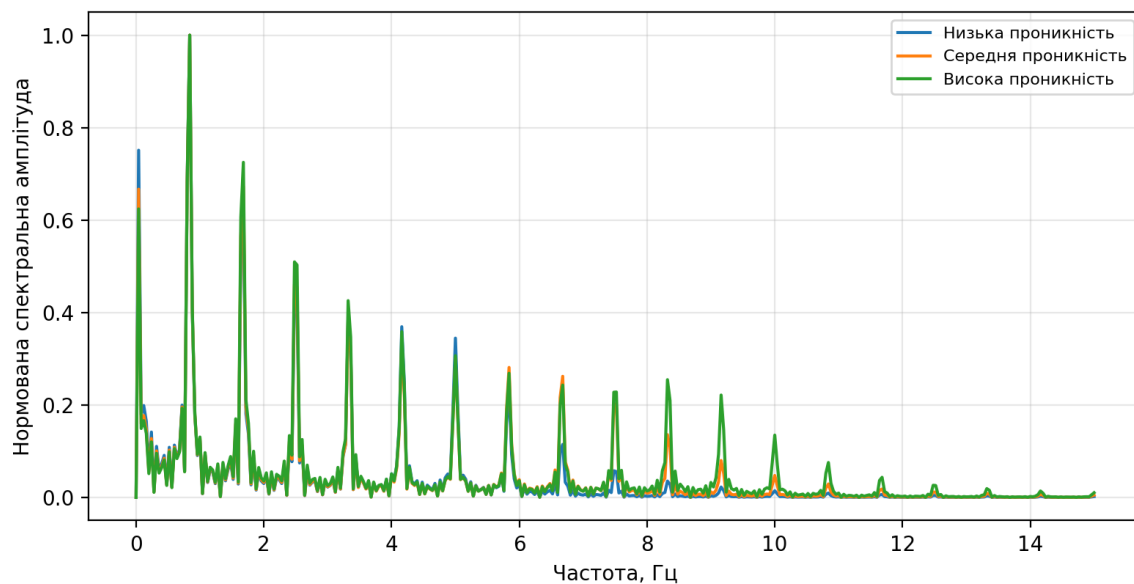


Рисунок А.3 – Нормовані спектри динамічної реакції пласта. Джерело: побудовані автором.

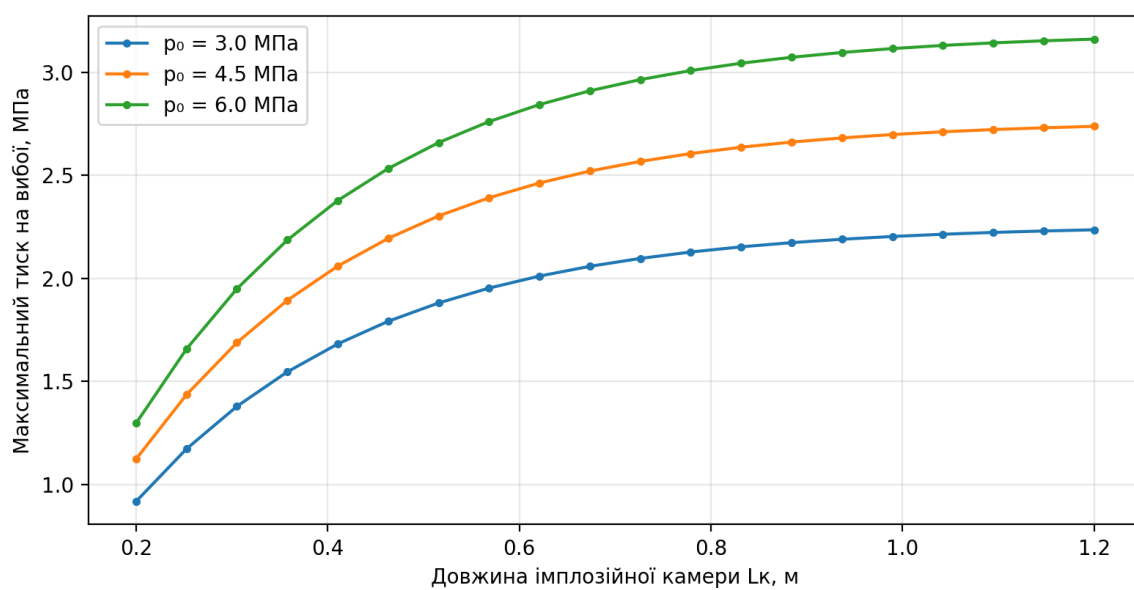


Рисунок А.4 – Вплив довжини імпульсійної камери на максимальний тиск на вибої за різних значень p_0 . Джерело: побудовані автором.

Додаток Б.

Цільові метролого-функціональні характеристики розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів та оцінювання ефективності

Таблиця Б.1 – Цільові вимоги до ІВС за основними групами параметрів

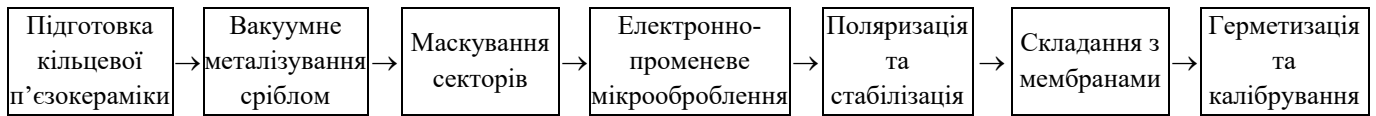
Група вимог	Контрольований показник	Цільове значення
Вимірювальні	Діапазон динамічного тиску	8...60 МПа
Вимірювальні	Діапазон частот коливального каналу	5...1000 Гц
Часові	Частота дискретизації	не менше 250 кГц
Метрологічні	Відносна похибка визначення піка тиску	не більше $\pm 1,8\%$
Метрологічні	Нестабільність часової прив'язки	не більше 40 мкс
Функціональні	Автоматизоване формування інтегрального показника η	обов'язково
Експлуатаційні	Робочий температурний діапазон електронного блоку	+5...+45 °C
Інформаційні	Архівація подій та серій імпульсів	локальна БД + експорт CSV/JSON

Таблиця Б.2 – Інформативні параметри динамічної реакції пласта та вимоги до їх визначення. Джерело: складено автором.

Параметр	Позначення	Фізичний зміст	Допустима похибка
Максимальна динамічна амплітуда	p_{max}	Пік хвилі тиску відносно базового рівня	$\pm 1,8\%$
Час фронту	t_f	Тривалість переходу 0,1А→0,9А	± 5 мкс
Енергетичний індекс імпульсу	J_p	Інтеграл квадрата надлишкового тиску	$\pm 3,0\%$
Домінантна частота	$f_{дом}$	Резонансний або квазірезонансний максимум	$\pm 0,2$ Гц
Коефіцієнт відбитої хвилі	$K_{відб}$	Співвідношення Авідб/Апрям	$\pm 0,03$
Декремент затухання	δ	Логарифмічна оцінка втрат хвилі	$\pm 0,05$
Коефіцієнт стабільності серії	K_{cm}	Повторюваність відгуку в серії імпульсів	$\pm 0,02$

Додаток В.

Технологічна послідовність процесу виготовлення багатопараметричного п'єзоелектричного датчика з його основними конструктивними параметрами та розрахунковими режимами технологічних операцій



Джерело: розроблено автором.

Таблиця В.2 – Основні конструктивні параметри багатопараметричного датчика. Джерело: складено автором.

Параметр	Позначення	Значення
Кількість кільцевих п'єзоелементів	n	4
Зовнішній / внутрішній діаметр кільця	$D_z / D_{вн}$	24 / 8 мм
Товщина одного кільця	h	1,2 мм
Товщина мембрани	h_m	0,15 мм
Матеріал п'єзокераміки	-	PZT-8
Матеріал мембрани	-	12X18H10T
Ємність одного кільця (при робочій частоті в 1 кГц)	C_1	1,8 нФ
Статична чутливість тискового каналу після підсилення	K_p	6,45 МПа/В

Таблиця В.3 – Розрахункові режими технологічних операцій виготовлення датчика. Джерело: складено автором.

Операція	Режим	Функціональний результат
Ультразвукове очищення кілець	35 кГц; 4 хв	Видалення мікрочастинок і стабілізація адгезії електродів
Вакуумне нанесення Ag-електрода	0,08...0,12 мкм	Формування провідного шару
Електронно-променеве модифікування	15...22 кВ; 18...35 мА; 3...6 мм/с	Формування домен.-дисипат. Стр-р
Стабілізувальне термооброблення	140 °С; 25 хв	Зниження внутрішніх напружень після ЕП-обробки
Складання пакета і попереднє стискання	35...45 Н	Забезпечення повторюваної передачі сили між мембранами й кільцями
Динамічне калібрування	8...45 МПа; 5...12 Гц	Одержання матриці перетворення каналів

Додаток Г

Логіка частотного та функціонального розділення каналів датчика.

Характерні форми багатоканального сигналу та його спектральної декомпозиції

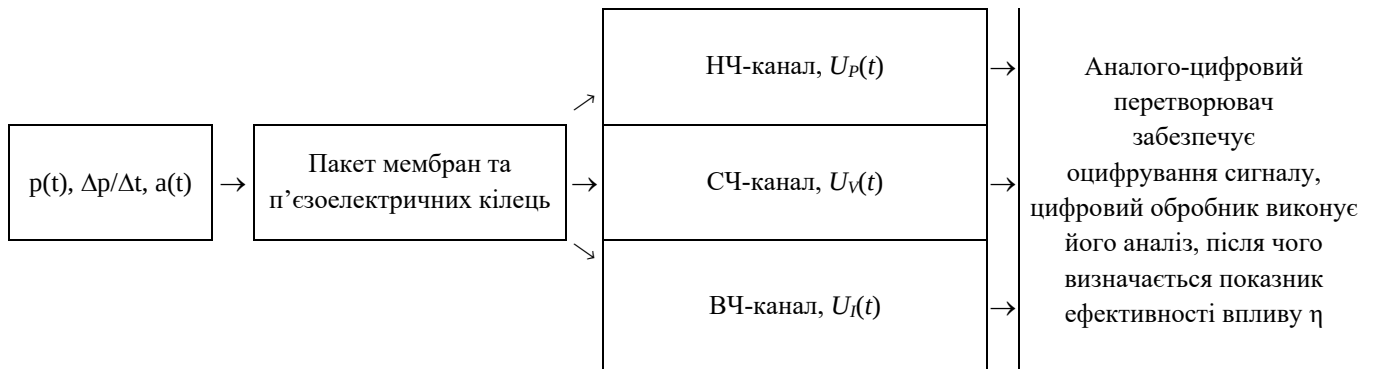


Рисунок Г.1 – Логіка частотного та функціонального розділення каналів датчика. Джерело: побудовано автором.

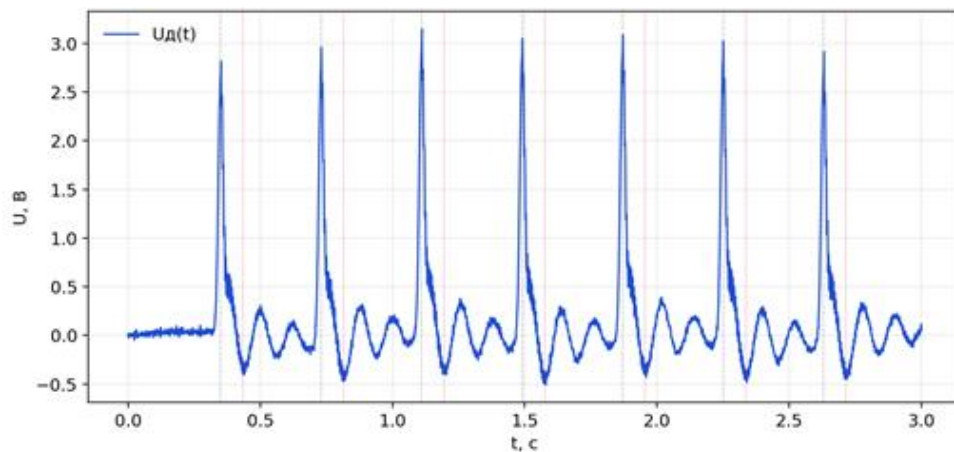


Рисунок Г.2 – Приклад часової реалізації сигналу багатопараметричного датчика в серії імпульсів. Джерело: побудовано автором.

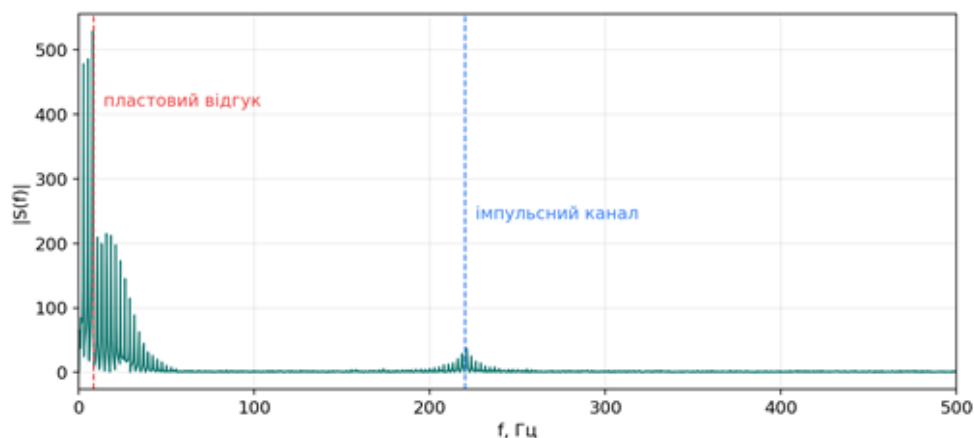


Рисунок Г.3 – Амплітудний спектр сигналу після компенсації дрейфу та первинної фільтрації. Джерело: побудовано автором.

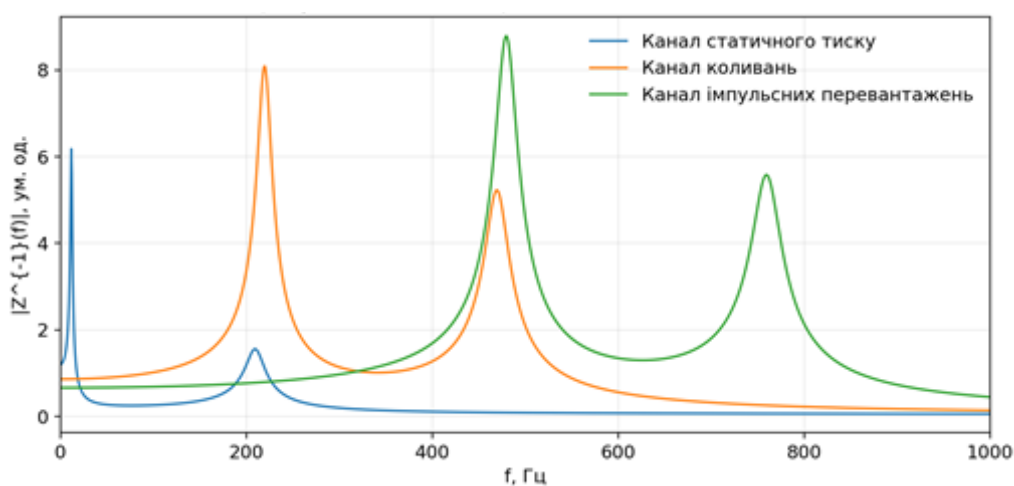


Рисунок Г.4 – Розрахункове частотне розділення тискового, імпульсного та коливального каналів багатопараметричним зондом. Джерело: побудовано автором.

Додаток Д

Експериментально-розрахункові дані методу автоматизованого оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу. Джерело: розраховано автором.

Таблиця Д.1 – Результати оброблення серії з 10 імпульсів для типових параметрів свердловини

№ імп.	p_{max} , МПа	t_{ϕ} , мкс	J_p , МПа ² ·мс	$f_{дом}$, Гц	$K_{відб}$
1	24,3	71	53,1	11,6	0,44
2	24,7	69	54,2	11,8	0,47
3	25,1	67	55,0	11,9	0,46
4	24,5	69	54,6	11,7	0,45
5	24,8	68	55,1	11,8	0,46
6	25,0	67	55,7	11,9	0,47
7	24,4	70	53,8	11,8	0,45
8	24,9	66	56,0	12,0	0,48
9	24,6	68	54,4	11,7	0,46
10	24,8	67	55,3	11,8	0,47

Таблиця Д.2 – Нормувальні межі та вагові коефіцієнти інтегрального показника η

Ознака	X_{min}	X_{opt}	w
p_{max} , МПа	16	24	0,24
J_p , МПа ² ·мс	32	55	0,18
$f_{дом}$, Гц	9	12	0,16
$K_{відб}$	0,25	0,50	0,14
δ	1,0	1,4	0,10
$K_{ст}$	0,80	0,96	0,10
t_{ϕ} , мкс	120	60	0,08

Таблиця Д.3 – Розрахунок інтегрального показника ефективності η

Ознака	Середнє значення	Нормоване ξ_j	Вага w	Вклад $w \cdot \xi_j$
p_{max}	24,71	0,96	0,24	0,230
J_p	54,72	0,99	0,18	0,178
$f_{дом}$	11,80	0,93	0,16	0,149
$K_{відб}$	0,461	0,84	0,14	0,118
δ	1,36	0,90	0,10	0,090
$K_{ст}$	0,95	0,94	0,10	0,094
t_{ϕ}	68	0,73	0,08	0,058
Σ	-	-	1,00	0,917
Прийняте значення η з поправкою на шумову невизначеність	-	-	-	0,78

Додаток Е

Лістинг програми візуалізації розподілу інтегрального показника ефективності η ,
як функції залежності від довжини імпульсної камери та частоти повторення
імпульсів (Python)

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# -----
# Вхідні діапазони параметрів
# -----
Lk = np.linspace(0.20, 0.50, 61) # довжина камери, м
fr = np.linspace(3.0, 12.0, 91) # частота, Гц
# Формування сітки
Lk_grid, fr_grid = np.meshgrid(Lk, fr)
# -----
# Розрахункова модель показника  $\eta$ 
# -----
# Основна гаусова поверхня
eta = 0.08 + 0.78 * np.exp(-((Lk_grid - Lk_opt) ** 2 / (2 * sigma_Lk ** 2) +
(fr_grid - fr_opt) ** 2 / (2 * sigma_fr ** 2)))
# Додаткове слабке асиметричне згладжування,
# щоб поверхня була ближча до вигляду на рисунку
eta *= (1 - 0.12 * np.maximum(Lk_grid - 0.38, 0) / 0.12)
eta *= (1 - 0.08 * np.maximum(fr_grid - 9.0, 0) / 3.0)
# Обмеження діапазону
eta = np.clip(eta, 0.08, 0.86)
# -----
# Побудова рисунка
# -----
plt.figure(figsize=(6.0, 4.6), dpi=130)
im = plt.pcolormesh(Lk_grid, fr_grid, eta, shading='auto', cmap='YlGnBu')
# Кольорова шкала
cbar = plt.colorbar(im)
cbar.set_label('η, ум. од.')
# Підписи та заголовок
plt.title("")
plt.xlabel('Lk, м')
plt.ylabel('fr, Гц')
# Точка раціональної зони
plt.scatter(Lk_opt, fr_opt, color='red', s=30, zorder=3)
plt.text(Lk_opt + 0.008, fr_opt + 0.15, 'раціональна зона', color='red', fontsize=11)
# Межі осей
plt.xlim(0.20, 0.50)
plt.ylim(3.0, 12.0)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Додаток Є

Лістинг ядра модуля керування ІВС (Python)

Лістинг модуля попереднього оброблення сигналу (preprocess.py)

```

from scipy.signal import butter, filtfilt
import numpy as np
def detrend_window(x, win=500):
    base = np.convolve(x, np.ones(win)/win, mode='same')
    return x - base
def bandpass(x, fs, f1, f2, order=4):
    b, a = butter(order, [f1/(fs/2), f2/(fs/2)], btype='band')
    return filtfilt(b, a, x)
def snr_db(x, noise_idx):
    a = np.max(np.abs(x))
    s = np.std(x[noise_idx])
    return 20*np.log10(a/max(s, 1e-9))

```

Лістинг модуля виділення ознак (features.py)

```

import numpy as np
from scipy.fft import rfft, rfftfreq
def extract_features(p, fs, p0):
    dp = p - p0
    pmax = dp.max()
    t10 = np.argmax(dp >= 0.1*pmax) / fs
    t90 = np.argmax(dp >= 0.9*pmax) / fs
    tf = t90 - t10
    Jp = np.sum(dp**2) / fs
    spec = np.abs(rfft(dp))
    freq = rfftfreq(len(dp), 1/fs)
    fdom = freq[np.argmax(spec[1:])+1]
    return {'pmax': pmax, 'tf': tf, 'Jp': Jp, 'fdom': fdom}

```

Лістинг модуля оцінювання ефективності (evaluate.py)

```

WEIGHTS = {'pmax':0.24,'Jp':0.18,'fdom':0.16,'Kref':0.14,'delta':0.10,'Kst':0.10,'tf':0.08}
RANGES = {'pmax':(16,24),'Jp':(32,55),'fdom':(9,12),'Kref':(0.25,0.5),'delta':(1.0,1.4),
'Kst':(0.8,0.96),'tf':(120e-6,60e-6)}
def norm_more(x, x_min, x_opt):
    return max(0.0, min(1.0, (x-x_min)/(x_opt-x_min)))
def efficiency(feats):
    xi = {}
    xi['pmax'] = norm_more(feats['pmax'], *RANGES['pmax'])
    xi['Jp'] = norm_more(feats['Jp'], *RANGES['Jp'])
    xi['Kref'] = norm_more(feats['Kref'], *RANGES['Kref'])
    xi['Kst'] = norm_more(feats['Kst'], *RANGES['Kst'])
    xi['fdom'] = max(0.0, 1 - abs(feats['fdom']-RANGES['fdom'][1])/3)
    xi['delta'] = max(0.0, 1 - abs(feats['delta']-RANGES['delta'][1])/0.4)
    xi['tf'] = max(0.0, 1 - abs(feats['tf']-RANGES['tf'][1])/60e-6)
    eta = sum(WEIGHTS[k]*xi[k] for k in WEIGHTS)
    return eta, xi

```

Додаток Ж

Результати, отримані при проведенні експериментів складені в матриці планування експерименту другого порядку. Джерело: отримано автором.

№ досліду	P , МПа	f , Гц	τ , с	k , відн. од.	ϕ , град	η , %
1	2	3	4	5	6	7
1	10,000	2,000	0,100	0,400	15,000	12,858
2	10,000	12,000	0,100	0,400	15,000	14,660
3	25,000	7,000	0,400	0,700	45,000	26,066
4	40,000	12,000	0,600	0,700	60,000	17,890
5	35,000	9,000	0,550	0,850	30,000	36,304
6	22,500	7,750	0,425	0,680	45,000	24,593
7	30,000	5,000	0,300	0,550	20,000	32,214
8	32,000	8,000	0,500	0,800	35,000	33,320
9	18,000	14,000	0,700	0,600	75,000	1,084
10	38,000	10,000	0,450	0,900	25,000	37,833
11	29,326	2,439	0,342	0,935	61,351	23,645
12	9,267	1,688	0,103	0,388	5,379	12,297
13	37,627	10,627	0,365	0,542	39,505	25,791
14	10,855	5,631	0,242	0,525	19,131	19,290
15	38,938	12,684	0,094	0,867	8,404	36,995
16	38,078	2,404	0,661	0,901	88,921	15,517
17	23,909	0,526	0,418	0,717	81,729	13,674
18	7,462	3,824	0,138	0,697	43,212	12,230
19	10,700	5,046	0,148	0,653	24,170	18,450
20	7,306	8,307	0,290	0,878	1,567	22,233
21	36,905	8,757	0,506	0,534	79,376	10,730
22	19,424	6,510	0,463	0,999	49,293	25,535
23	31,933	9,493	0,675	0,951	26,465	38,202
24	33,112	7,810	0,752	0,681	85,364	12,069
25	5,122	14,437	0,120	0,492	2,336	10,373
26	36,648	0,859	0,054	0,413	3,666	27,002
27	39,762	12,518	0,064	0,440	33,867	20,634
28	11,736	1,907	0,477	0,858	59,112	16,036
29	28,530	4,927	0,580	0,606	69,224	19,305
30	5,575	8,055	0,273	0,834	48,895	11,506
31	32,911	13,476	0,486	0,556	37,788	23,156
32	14,108	4,321	0,255	0,654	7,576	24,778
33	27,500	4,005	0,431	0,705	28,882	31,809
34	6,010	0,702	0,595	0,448	50,541	7,800
35	28,208	9,645	0,686	0,841	64,301	20,608
36	8,448	11,205	0,746	0,509	27,665	13,771
37	18,608	11,075	0,185	0,352	42,503	14,874
38	31,721	1,499	0,322	0,959	52,617	26,070
39	6,220	3,254	0,168	0,726	12,604	14,735
40	30,445	12,129	0,210	0,486	72,029	7,000
41	23,365	1,073	0,697	0,796	65,298	21,157

1	2	3	4	5	6	7
42	12,983	2,741	0,637	0,397	68,619	10,558
43	17,525	1,212	0,091	0,771	4,018	23,200
44	24,830	4,440	0,774	0,919	41,580	31,509
45	36,460	13,113	0,795	0,630	53,281	18,626
46	20,828	14,701	0,678	0,846	16,202	27,512
47	15,393	8,939	0,393	0,876	66,145	14,813
48	14,865	11,947	0,614	0,809	40,273	18,853
49	38,644	1,429	0,310	0,404	80,260	8,809
50	13,324	13,042	0,308	0,455	36,111	12,824
51	8,647	10,688	0,646	0,781	77,170	3,190
52	20,439	11,368	0,494	0,668	21,950	27,876
53	11,476	3,219	0,780	0,380	83,948	5,032
54	18,942	2,920	0,513	0,975	11,989	32,775
55	13,573	10,936	0,543	0,546	0,970	26,488
56	33,990	9,161	0,601	0,583	89,329	6,786
57	35,321	7,618	0,706	0,971	60,944	26,886
58	25,866	10,085	0,128	0,752	55,252	18,565
59	21,806	2,804	0,156	0,991	45,404	23,848
60	7,840	11,813	0,333	0,799	75,369	1,652
61	33,572	6,013	0,404	0,431	71,504	14,780
62	21,038	10,332	0,338	0,685	58,296	16,685
63	12,158	10,187	0,069	0,459	51,711	9,461
64	15,569	9,950	0,436	0,736	34,718	22,410
65	22,236	2,073	0,298	0,670	63,306	17,761
66	20,125	4,744	0,551	0,573	17,296	29,971
67	6,660	11,503	0,412	0,921	31,600	14,822
68	15,980	5,207	0,568	0,893	87,826	11,603
69	31,006	9,715	0,448	0,517	14,275	35,189
70	23,126	6,932	0,587	0,930	18,822	36,379
71	26,511	14,354	0,116	0,500	44,361	13,727
72	21,408	3,707	0,537	0,949	54,596	25,236
73	35,481	5,472	0,193	0,624	15,904	34,459
74	34,244	2,237	0,785	0,580	56,384	24,895
75	29,669	12,338	0,620	0,424	84,354	1,468
76	24,224	14,024	0,260	0,602	25,280	23,309
77	9,510	5,921	0,518	0,853	30,106	21,153
78	35,846	7,122	0,721	0,695	23,776	38,637
79	34,717	7,486	0,731	0,724	38,506	33,198
80	39,399	12,836	0,740	0,479	6,796	38,574
81	26,986	4,068	0,159	0,886	82,151	13,971
82	25,466	6,420	0,533	0,416	20,465	30,820
83	24,850	3,437	0,380	0,466	76,089	13,354
84	29,023	14,988	0,226	0,616	78,348	-0,373
85	18,157	7,353	0,355	0,787	13,707	30,832
86	26,163	9,337	0,656	0,502	47,174	22,846
87	17,097	8,223	0,471	0,377	32,814	21,146
88	19,083	6,293	0,565	0,910	10,227	34,953
89	14,469	14,645	0,368	0,371	22,916	14,285

1	2	3	4	5	6	7
90	32,222	5,759	0,080	0,761	86,526	9,328
91	31,361	14,153	0,456	0,814	74,782	7,092
92	22,802	13,814	0,760	0,592	29,640	22,495
93	16,287	13,658	0,628	0,642	70,288	3,760
94	27,736	6,667	0,709	0,823	57,715	25,701
95	10,080	8,494	0,217	0,563	62,281	8,958
96	16,919	8,609	0,236	0,764	73,293	11,617
97	30,159	11,723	0,181	0,742	67,514	12,559
98	38,025	6,988	0,387	0,637	9,042	40,504
99	12,773	13,253	0,282	0,980	46,991	13,576
100	10,046	4,625	0,205	0,362	35,495	13,299

Додаток 3

Оцінка невизначеності для p_{max} , t_f , J_p , η . Джерело: побудовано автором.

Вихідна величина	Джерело невизначеності	Позначення	Тип невизначеності	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8
p_{max}	Базовий тиск	p_0	В	0,06 МПа	1,00	0,060 МПа	За еталонним датчиком базового тиску
	Коефіцієнт перетворення	K_p	В	0,08 МПа/В	$U_{peak} - U_0 = 3,83$ В	0,306 МПа	За результатами динамічного калібрування
	Пікова напруга	U_{peak}	А/В	0,012 В	$K_p = 6,45$ МПа/В	0,077 МПа	Шум, квантування, піковий відлік
	Нульовий рівень каналу	U_0	А/В	0,008 В	$-K_p = -6,45$ МПа/В	0,052 МПа	Дрейф нуля після компенсації
	Температурний вплив	T	В	0,10 °С	0,02 МПа/°С	0,002 МПа	Після термокомпенсації
	Динамічна похибка каналу	B_w	В	0,10 МПа	1,00	0,100 МПа	Смуга пропускання та фронт імпульсу
	Комбінована стандартна невизначеність					0,341 МПа	$u_c = \sum u_i^2$
	Розширена невизначеність					0,68 МПа	$U = 2u_c$, $P \approx 95\%$
t_f	Крок дискретизації / часової бази	Δt	В	1,15 мкс	1,00	1,15 мкс	Для прийнятого режиму оцифрування
	Шум сигналу	u_n	А	1,80 мкс	1,00	1,80 мкс	Нестійкість визначення рівнів 0,1 і 0,9
	Порогова сегментація	thr	В	1,50 мкс	1,00	1,50 мкс	Алгоритм виділення фронту
	Цифрова фільтрація	F	В	0,90 мкс	1,00	0,90 мкс	Зміщення фронту після фільтрації
	Синхронізація каналів	$sync$	В	0,80 мкс	1,00	0,80 мкс	Асинхронність запуску й реєстрації
	Комбінована стандартна невизначеність					2,87 мкс	$u_c = \sum u_i^2$
	Розширена невизначеність					5,74 мкс	$U = 2u_c$

1	2	3	4	5	6	7	8
J_p	Відтворення миттєвого тиску	p_i	A/B	1,45 МПа ² ·мс	1,00	1,45 МПа ² ·мс	Основний внесок каналу тиску
	Базовий рівень тиску	p_0	A/B	0,62 МПа ² ·мс	1,00	0,62 МПа ² ·мс	Вплив нульового рівня
	Крок інтегрування	Δt	B	0,35 МПа ² ·мс	1,00	0,35 МПа ² ·мс	Часова база АЦП
	Межі вікна інтегрування	τ_w	B	0,82 МПа ² ·мс	1,00	0,82 МПа ² ·мс	Вибір початку і кінця імпульсу
	Цифрова фільтрація	F	B	0,55 МПа ² ·мс	1,00	0,55 МПа ² ·мс	Вплив на інтегральну оцінку
	Комбінована стандартна невизначеність					1,89 МПа ² ·мс	$u_c = \sqrt{\sum u_i^2}$
	Розширена невизначеність					3,78 МПа ² ·мс	$U = 2u_c$
η	Нормована ознака пікового тиску	ξ_1	A/B	0,055	$w_1 = 0,18$	0,010	Ознака, пов'язана з p_{max}
	Нормована ознака часу фронту	ξ_2	A/B	0,064	$w_2 = 0,14$	0,009	Ознака, пов'язана з t_f
	Нормована ознака енергетичного індексу	ξ_3	A/B	0,067	$w_3 = 0,18$	0,012	Ознака, пов'язана з J_p
	Нормована ознака домінантної частоти	ξ_4	A/B	0,067	$w_4 = 0,12$	0,008	Ознака, пов'язана з $f_{дом}$
	Нормована ознака коефіцієнта відбиття	ξ_5	A/B	0,058	$w_5 = 0,12$	0,007	Ознака, пов'язана з $K_{відб}$
	Нормована ознака декремента затухання	ξ_6	A/B	0,062	$w_6 = 0,13$	0,008	Ознака, пов'язана з δ
	Нормована ознака стабільності	ξ_7	A/B	0,046	$w_7 = 0,13$	0,006	Ознака, пов'язана з $K_{см}$
	Нормувальні межі та вагові коефіцієнти	N_w	B	0,010	1,00	0,010	Вплив вибору меж нормування
	Комбінована стандартна невизначеність					0,026	$u_c = \sum u_i^2$
	Розширена невизначеність					0,052	$U = 2u_c$

Примітка. Складові типу А оцінювалися за серіями повторних вимірювань, а складові типу В – за результатами динамічного калібрування, паспортними характеристиками вимірювального тракту, оцінкою часової бази АЦП, нульового дрейфу, смуги пропускання та алгоритмічних параметрів цифрового оброблення. Комбіновану стандартну невизначеність визначали за законом поширення невизначеності, а розширену, як $U = 2u_c$, що відповідає довірчій імовірності близько 95%.

Додаток И

Документація про впровадження результатів роботи в навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Ректор Черкаського державного
технологічного університету,
д-р політ. наук, професор



Олег ГРИГОР

«20» _____ 2026 р.

АКТ

впровадження в навчальний процес

Черкаського державного технологічного університету

результатів дисертаційної роботи **Бута Вячеслава Олександровича**

на тему: **«Інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів та
оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу на
привибійну зону нафтових свердловин»**

Основні результати дисертаційного дослідження Вячеслава Бута впроваджені в навчальний процес при виконанні курсових робіт, викладанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять з навчальних дисциплін "Фізичні процеси у приладах та системах", "Проектування інформаційно-вимірювальних систем", "Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення параметрів об'єктів", зокрема:

– результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі, методичне забезпечення, алгоритми оброблення та інтерпретації сигналів;

– метод та інформаційно-вимірювальну систему контролю параметрів і оцінювання ефективності адаптивного імпульсного впливу, що поєднує

підсистеми вимірювання, оброблення сигналів, аналізу інформативних ознак та формування діагностичних рішень;

– математичну модель та розроблено програмне забезпечення на її основі для визначення електричного імпедансу багатопараметричного п'єзоелектричного датчика.

Використання результатів дисертаційної роботи Вячеслава Бута дозволяє здобувачам третього освітньо-наукового рівня вищої освіти на високому науково-технічному рівні проводити наукові дослідження, а здобувачам вищої освіти першого та другого рівня виконувати кваліфікаційні роботи бакалавра та магістра.

В. о. начальника навчально-методичного відділу,
канд. екон. наук, доцент



Сергій МИЛЬНІЧЕНКО

Декан факультету електронних технологій, автотранспорту та машинобудування,
канд. техн. наук, доцент



Андрій ЧОРНИЙ

В.о. завідувача кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій, д-р техн. наук, професор



Максим БОНДАРЕНКО

Додаток І

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Slidenko, V., Slidenko, O., Marchuk, L., & But, V. (2024). Development of a discrete-continuous mathematical model of a percussion device with parameters of influence on the characteristics of an impact pulse. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (125), 70–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290029>. ISSN 1729-3774, E- ISSN 1729-4061, ISSN-L 1729-3774 (*Indexed in Scopus*)
2. Slidenko, V., Slidenko, O., Listovshchyk, L., Novykov, A., & But, V. (2025). Construction of a mathematical model of an impact device with a two-element striker. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (133), 38–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322728>. ISSN 1729-3774, E- ISSN 1729-4061. (*Indexed in Scopus*).
3. Slidenko, V., But, V. (2026). Adaptive Electro-hydraulic Pulse System for Controlling the Technological Parameters of Oil Wells. In: Bazilo, C., Bondarenko, M., Faure, E., Antonyuk, V., Dzierwa, A., Usyk, L. (eds) *Sensors, Devices and Systems. SDaS 2025. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1570. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-18415-3_28. ISSN 1876-1100, E-ISSN 1876-1119. (*Indexed in Scopus*).
4. Сліденко, В.М., Шевчук, С.П., Лістовщик, Л.К., та Бут, В.О. (2024). Адаптивна імпульсна система впливу з поверхні на привибійну зону нафтової свердловини. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 45-51. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2024.315569> ISSN 1813-5420 (Print) ISSN 2308-7382 (Online) (*Категорія Б*).
5. Сліденко, В.М., Новиков, А.О., та Бут, В.О. (2025). Аналіз ефективності функціонування адаптивної імпульсної системи методом стохастичних характеристик. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 1, 72–78. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-72-78> ISSN 1997-9266. (*Категорія Б*).
6. Сліденко, В. М., Лістовщик, Л. К., & Бут, В. О. (2018). Адаптивна мехатронна система імпульсно-хвильової дії на гірський масив. У *Електромеханічні та*

енергетичні системи. *Методи моделювання та оптимізації: Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів* (с. 27–28). Кременчук: КрНУ ім. М. Остроградського. ISSN 2079-5106.

7. Сліденко, В. М., Поліщук, В. О., & Бут, В. О. (2019). Фізико-технічне обґрунтування вибору свердловин з раціональним покриттям експлуатаційного діапазону при імпульсній дії з поверхні. У *Проблеми вдосконалення машин та обладнання електромеханічних та мехатронних систем: Матеріали Першої міжнародної науково-методичної конференції* (с. 52–55). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
8. Бут, В. О., Лістовщик, Л. К., & Сліденко, В. М. (2021). Електрогідравлічний генератор імпульсної дії на привибійну зону нафтової свердловини. У *Енергетика. Екологія. Людина: Збірник наукових праць Інституту енергозбереження та енергоменеджменту* (с. 97–100). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». ISSN 2307-7239.
9. Сліденко, В. М., & Бут, В. О. (2023). Адаптивний генератор імпульсів для впливу на пластову систему без зупинки видобутку вуглеводнів. У *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку: Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-технічної конференції* (с. 103–104). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». <http://pems.kpi.ua/>
10. Сліденко, В. М., & Бут, В. О. (2024). Електрогідравлічна імпульсна система впливу на привибійну зону нафтової свердловини. У *XLI International scientific and practical conference “Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential”* (с. 64–66). Toronto: International Scientific Unity. <https://doi.org/10.70286/ISU-02.10.2024>. ISBN 978-617-8427-31-3.