

## АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361799

УДК 681.586:622.24.05:62-505

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИВИБІЙНІЙ ЗОНІ СВЕРДЛОВИН ВИДОБУТКУ ВУГЛЕВОДНІВ

Бут В. О., Туз В. В.

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

E-mail: [viacheslav.but@gmail.com](mailto:viacheslav.but@gmail.com); [v.tuz@chdtu.edu.ua](mailto:v.tuz@chdtu.edu.ua)

У статті розглянуто розроблення та теоретичне дослідження інформаційно-виміральної системи контролю імпульсних електрогідролічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності дії на привибійну зону пласта, забезпечення стабільності режимів імпульсного електрогідролічного впливу та отримання достовірної виміральної інформації про перебіг швидкоплинних процесів у складних умовах свердловинної експлуатації. Особливу увагу приділено п'єзоелектричним виміральноним сенсорам, як одним з основних компонентів розроблюваної системи, оскільки саме вони забезпечують реєстрацію короточасних змін тиску, хвильових збурень і динамічних навантажень, що виникають під час імпульсної дії. Обґрунтовано доцільність використання таких сенсорів з урахуванням їх високої швидкодії, достатньої чутливості, широкого частотного діапазону та придатності до роботи в умовах значних механічних і гідродинамічних впливів. Запропоновано структурний підхід до побудови інформаційно-виміральної системи, який передбачає застосування первинних п'єзоелектричних перетворювачів, вузлів підсилення та фільтрації сигналів, засобів аналого-цифрового перетворення, програмованого логічного контролера та програмно-аналітичного модуля оброблення результатів. У межах теоретичного дослідження проаналізовано вплив параметрів імпульсу, характеристик вимірального каналу та властивостей контрольованого середовища на точність і інформативність реєстрованих сигналів. Показано, що застосування п'єзоелектричних сенсорів у складі такої системи створює передумови для підвищення на 18-22 % точності контролю амплітудно-часових характеристик процесу, розширення можливостей моніторингу технічного стану (збільшення діапазону вимірюваних тисків на 15-20 % та швидкості вимірювання – на 23-28 %) та подальшої реалізації адаптивного керування електрогідролічним впливом у привибійній зоні свердловин.

**Ключові слова:** п'єзоелектричні сенсори; ударно-хвильові збурення; сенсорний канал; амплітудно-часові характеристики; свердловинний моніторинг; метрологічна стабільність.

**Вступ**

Як відомо [1], зниження проникності привибійної зони пласта на сьогодні є однією з основних причин втрати продуктивності нафтових і газових свердловин на різних етапах їх експлуатації. Кольматация порового простору асфальтенами, смолистими відкладеннями, глинистими частинками, продуктами буріння та цементажу призводить до погіршення фільтраційно-ємнісних властивостей колектору, зростання гідродинамічного опору та, як наслідок, до зниження видобутку вуглеводнів. Традиційні способи відновлення проникності привибійної зони [2 – 4], як-от: хімічні, механічні та термічні, нерідко супроводжуються необхідністю зупинки свердловини, значними енерговитратами, високою вартістю робіт або ризиками вторинного негативного впливу на пласт. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування імпульсних

електрогідролічних методів [5], які забезпечують формування хвильового впливу на привибійну зону пласта без суттєвого порушення штатного режиму експлуатації свердловини, а також створюють передумови для інтенсифікації припливу вуглеводнів.

Водночас ефективність імпульсної електрогідролічної дії визначається не лише енергетичними та конструктивними параметрами генератора імпульсів, а й можливістю оперативного та достовірного контролю швидкоплинних процесів, що виникають у свердловинному середовищі. Йдеться, насамперед, про вимірювання миттєвих змін тиску, амплітудно-часових характеристик ударних хвиль, частоти повторення імпульсів, інтенсивності їх затухання та реакції гідродинамічної системи на зовнішню дію [6]. За відсутності спеціалізованої інформаційно-виміральної системи (ІВС) зовнішній вплив на

гідродинамічну систему здійснюється фактично в режимі обмеженого контролю, чим зменшує стабільність процесу, ускладнює адаптацію режимів дії до конкретних умов свердловини та знижує достовірність прогнозування технологічного результату. Саме тому у приладобудівному аспекті актуальним є розроблення спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи контролю імпульсних електрогідрравлічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів.

Наукова ідея роботи полягає у побудові такої інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує функціональний зв'язок між електротехнічними параметрами імпульсної електрогідрравлічної дії, хвильовими процесами в системі «рідина – колона – цемент – порода» та вимірюваними сигналами в режимі реального часу. Подальша ж реалізація цієї системи дозволить перейти від фіксації окремих параметрів до комплексного моніторингу динаміки впливу – аж до адаптивного керування режимами електрогідрравлічного оброблення привибійної зони.

#### **Постановка проблеми**

У рамках даної роботи об'єктом дослідження є імпульсні електрогідрравлічні процеси, що виникають у затрубному просторі свердловини та передаються до привибійної зони у вигляді хвиль тиску, імпульсних потоків і гідроударних збурень. Відповідно, предметом дослідження виступає інформаційно-вимірювальна система контролю цих процесів. У такій постановці проблема зводиться до необхідності побудови спеціалізованої ІВС, здатної забезпечити достовірне відтворення динаміки швидкоплинних імпульсних процесів у свердловинному середовищі та створити інформаційну основу для подальшого адаптивного керування режимами електрогідрравлічної дії.

Аналіз наявних наукових і прикладних підходів свідчить, що в сучасних дослідженнях достатньо ґрунтовно висвітлено питання побудови адаптивних імпульсних систем впливу з поверхні на привибійну зону пласта, структури імпульсних генераторів імпульсів, математичного опису імпульсної взаємодії у свердловинному середовищі, функціонально-логістичних моделей адаптації системи до змінних умов середовища, а також конструктивних і енергетичних параметрів електрогідрравлічних систем [7-10]. Проте, у межах цих підходів інформаційно-вимірювальна складова здебільшого розглядається як допоміжний елемент, а не як самостійний об'єкт наукового дослідження. Зокрема, недостатня увага приділена питанням побудови окремої ІВС контролю з акцентом на використання п'єзоелектричних сенсорів, вузлів підсилення та фільтрації, аналого-цифрового перетворення, оброблення сигналів засобами програмованих логічних контролерів, а також забезпе-

чення метрологічної придатності системи в умовах швидкоплинних імпульсних процесів.

Так, окремим напрямом сучасних досліджень є удосконалення енергетичних, схемотехнічних і динамічних характеристик імпульсних електрогідрравлічних систем. У роботах авторів Чжехао Чжана, Байшена Ні, Стюарта Волша, Даніеля Фоглерта та інших [11, 12] розглядаються механізми ослаблення й перерозподілу енергії ударної хвилі, параметри високовольтного розряду, питання нестійкості та коливальних процесів у колах імпульсного живлення. Також цими авторами проведено підбір енергетичних режимів для досягнення необхідного хвильового впливу на середовище. Зокрема, експериментальні дослідження високовольтних імпульсів показують, що характер руйнування породи істотно залежить від енергетики імпульсу, форми розряду та параметрів ударної хвилі, а роботи з оптимізації підводного електричного ударного впливу прямо орієнтовані на встановлення раціональних співвідношень між параметрами розрядного елемента та досяжним хвильовим ефектом. Проте в самих цих працях основний акцент зроблено на джерелі імпульсу та фізиці руйнування, тоді як вимірювальна підсистема контролю розглядається фрагментарно.

Паралельно з цим, в суміжних галузях відбувається інтенсивний розвиток підходів до сенсорного моніторингу швидкоплинних процесів у складних і жорстких умовах експлуатації. У сучасних оглядах сенсорних технологій для жорстких інженерних умов експлуатації, авторами Цян Лю, Ян Ван, Цзянь Ву, Шуайхуа Е та іншими, робіт [13, 14] окремо відзначається прогрес механічних, оптичних та акустичних сенсорів для високотемпературних, високонапірних і корозійно-активних середовищ. Паралельно з цим, ними встановлене зростання ролі засобів передавання, візуалізації та інтелектуального оброблення даних. Крім того, у сфері структурного моніторингу спостерігається активне впровадження інтелектуальних сенсорних технологій, включаючи п'єзоелектричні, волоконно-оптичні та мікроелектромеханічні сенсорні.

Показово, що за бібліометричними даними [15] кількість публікацій у цьому напрямі зростала з 15 у 2019 році до 359 у 2023 році. У прикладних роботах Хуана Ву, Сівей Пен та інших [16, 17] із керування гідрравлічними системами вже демонструються ефективні підходи до онлайн-ідентифікації та зменшення коливань тиску, зокрема методи на основі RBF-нейромереж, які дали змогу зменшити амплітуду флуктуацій тиску на 72 % і знизити енергоспоживання приблизно на 29 %. Разом з тим ці результати здебільшого стосуються систем транспортування рідини або загального технічного моніторингу і не орієнтовані безпосередньо на контроль імпульсних

електрогідравлічних процесів у привибійній зоні свердловин.

Отже, аналіз наявних досліджень показує, що на сьогодні достатньо глибоко опрацьовано фізичні основи імпульсного електрогідравлічного впливу, конструктивно-енергетичні параметри генераторів, закономірності поширення ударних хвиль, а також окремі підходи до адаптивного керування гідравлічними системами та сенсорного моніторингу у складних умовах.

Проте, спеціалізована ІВС контролю імпульсних електрогідравлічних процесів, яка б розглядалася як самостійний об'єкт дослідження і поєднувала п'єзоелектричні сенсори, вузли підсилення, фільтрації, аналого-цифрового перетворення, програмно-логічне оброблення сигналів у реальному часі та метрологічне забезпечення, у відомих працях фактично не виділена. В недостатній мірі також розкрито питання функціонального зв'язку між електротехнічними параметрами розряду, хвильовими процесами в системі «рідина–колона–цемент–порода» та інформаційними параметрами вимірюваного сигналу. Саме ця науково-прикладна прогалина зумовлює доцільність розроблення та теоретичного дослідження спеціалізованої ІВС контролю імпульсних електрогідравлічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів.

Виходячи з вищезазначеного, актуальність роботи зумовлена потребою підвищення ефективності імпульсної електрогідравлічної дії на привибійну зону свердловин, оскільки результат такого впливу визначається не лише параметрами генератора імпульсів, а й можливістю достовірного контролю швидкоплинних хвильових процесів у системі «затрубний простір – рідина – цемент – порода». Так, за відсутності спеціалізованої ІВС ускладнюється оцінювання амплітудно-часових характеристик імпульсів, реакції середовища та адаптація режимів впливу до умов конкретної свердловини. Тому розроблення ІВС є важливим для підвищення точності контролю, інформативності та створення передумов для адаптивного керування процесом.

*Метою статті* є розроблення та теоретичне дослідження інформаційно-вимірювальної системи контролю імпульсних електрогідравлічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів, орієнтованої на підвищення інформативності, керуваності та ефективності технологічного впливу на пласт.

Отже, запропоновані в роботі підходи та отримувані результати спрямовані на створення теоретично обґрунтованої ІВС контролю імпульсних електрогідравлічних процесів, здатної підвищити точність оцінювання амплітудно-часових параметрів впливу, забезпечити інформативний зворотний зв'язок щодо реакції середовища та

сформувати основу для подальшого адаптивного керування технологічним впливом на привибійну зону свердловин видобутку вуглеводнів.

### **Принципи побудови ІВС контролю імпульсних електрогідравлічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів**

За стійким переконанням авторів статті, ІВС контролю імпульсних електрогідравлічних процесів у привибійній зоні свердловин має будуватися не як допоміжний канал спостереження, а як центральний функціональний елемент усієї адаптивної системи впливу. Це зумовлено тим, що сам технологічний результат електрогідравлічної дії визначається не лише параметрами генератора імпульсів, а й точністю вимірювання реальної реакції середовища на кожний імпульс. Саме тому принцип побудови ІВС має ґрунтуватися на безперервному зв'язку між джерелом імпульсної дії, гідродинамічним середовищем, сенсорним каналом вимірювання та програмно-аналітичним модулем, що формує рішення щодо корекції режиму впливу.

Вихідними вимогами до такої системи є здатність реєструвати швидкоплинні імпульси тиску в діапазоні, що відповідає робочим режимам електрогідравлічної системи, а також забезпечувати вимірювання амплітуди, тривалості імпульсу, часу фронту, частоти повторення, декремента затухання та часової реакції середовища. Для досліджуваної системи базовими є режими, при яких гідроударні навантаження формуються в діапазоні 20–60 МПа, тривалість імпульсу становить 200 – 500 мкс, а частота повторення перебуває в межах 5 – 20 Гц. Окрім того, ІВС має залишатися працездатною за зміни густини робочої рідини в діапазоні від 900 кг/м<sup>3</sup> до 1100 кг/м<sup>3</sup> та модуля її пружності у 1,5 – 2,5 ГПа. Саме ці параметри найбільше впливають на швидкість поширення хвилі, форму сигналу і характер затухання.

За таких умов основною вимірювальною задачею, що ставилася перед авторами, була задача достовірної реєстрації субмілісекундних ударно-хвильових збурень (а не оцінювання квазістатичного тиску, як для подібних систем [18], що знайшли широке застосування при контролі імпульсних електрогідравлічних процесів). Саме тому доцільно використовувати п'єзоелектричні керамічні перетворювачі, які мають високу швидкодію, добре працюють з короткими імпульсними навантаженнями, край чутливі до механічних і гідродинамічних збурень та придатні до функціонування в умовах вібраційних перевантажень. На відміну від стандартних квазістатичних датчиків тиску, які дають корисну інформацію про середні значення параметрів технологічного режиму, п'єзоелектричні сенсори здатні відтворювати саме динаміку процесу: фронт імпульсу, його пік, подальше згасання та повторюваність циклів.

Принципово важливим елементом авторської ІВС є використання розроблених за участю автора датчиків, побудованих на основі двох керамічних дискових п'єзоелементів, електрично з'єднаних між собою паралельно, причому між ними та з кожного зовнішнього боку розміщено тонкі металеві мембрани (рис. 1). Така багатопшарова побудова забезпечує більш рівномірну передачу хвильового навантаження на чутливі елементи, розподіляє локальні механічні напруження та зменшує ризик концентрованого перевантаження окремого диска. У функціональному сенсі мембрани виконують одночасно роль механічного узгоджувального елемента, захисного бар'єра і проміжного силопередавального середовища.



Рис. 1. Прототип авторського п'єзоелектричного керамічного датчика

Перевагою використання саме двоелементної паралельної схеми є підвищення сумарної зарядової віддачі сенсорного вузла, збільшення енергетичної інформативності корисного сигналу та поліпшення співвідношення "сигнал-шум" у реаль-

ному вимірювальному каналі. На практиці це означає, що навіть за коротких імпульсів і наявності технологічних завод систем отримує більш стійкий і виразний вимірювальний відгук, ніж у разі використання традиційного одноелементного п'єзосенсора. Крім того, симетричне розташування мембран і дискових елементів покращує умови осьового навантаження та зменшує вплив паразитних поперечних деформацій, що особливо важливо при реєстрації гідроударних процесів із крутим фронтом.

На відміну від традиційних закордонних вимірювальних рішень [19], які найчастіше базуються на серійних одноелементних динамічних датчиках тиску типу ІЕРЕ/ІСР (Industrial Dynamic Pressure Sensor), авторський сенсорний вузол оптимізований саме під умови імпульсної електрогідролічної дії у свердловині.

Конструкція такого вузла орієнтована не на загальнопромисловий контроль пульсацій, а на реєстрацію короткотривалих хвильових процесів з подальшим використанням сигналу в контурі адаптивного керування. Традиційні ж серійні зарубіжні вимірювальні пристрої такого типу придатні для високошвидкісних вимірювань, проте, зазвичай, не інтегровані з алгоритмами прив'язки до моменту спрацювання імпульсного генератора, не орієнтовані на роботу в структурі поверхневої адаптивної системи впливу та не здатні формувати розширений набір параметрів для корекції наступного циклу безпосередньо в процесі їх роботи.

Структурно-функціональна схема пропонованої ІВС (рис. 2), включає кілька взаємопов'язаних рівнів.

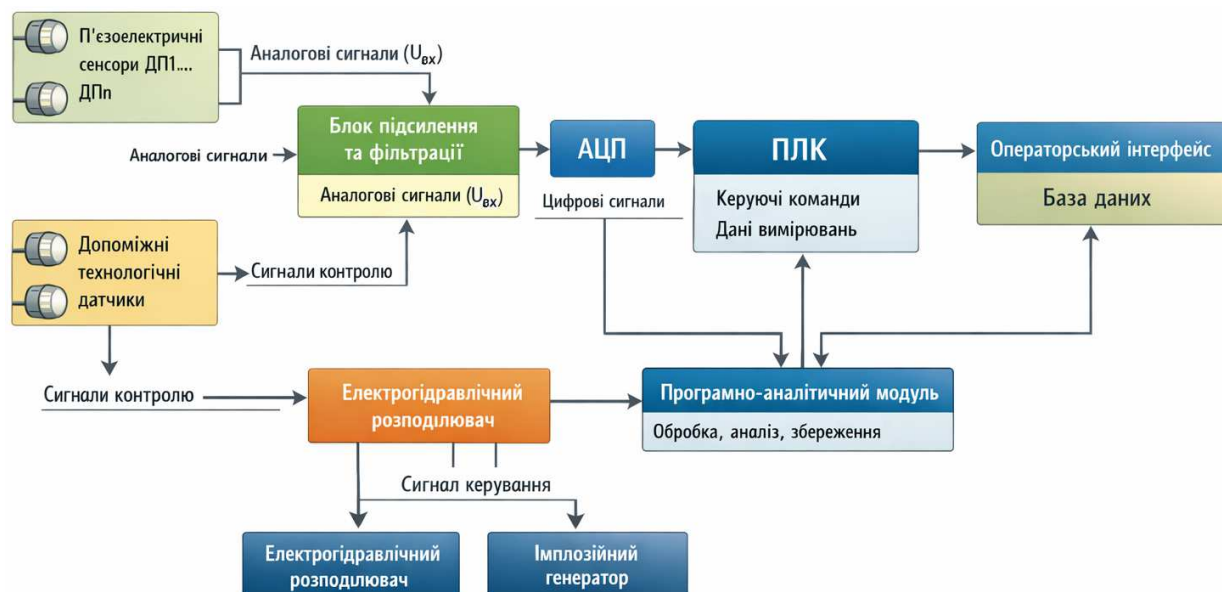


Рис. 2. Структурно-функціональна схема ІВС контролю імпульсних електрогідролічних процесів: ДП1...ДПn – п'єзоелектричні сенсори

Перший рівень становлять первинні п'єзоелектричні сенсори, розташовані в контрольних точках гідротракту, де реєструються швидкоплинні зміни тиску.

Другий рівень складають допоміжні технологічні датчики, призначені для контролю базового тиску, стану насосного агрегату, режиму гідролінії та допоміжних параметрів технологічного циклу.

Третій рівень – це блок попереднього оброблення сигналів, який виконує підсилення, аналогову фільтрацію, розв'язку та узгодження рівнів із блоком аналого-цифрового перетворення.

Далі йдуть програмно-аналітичний модуль, операторський інтерфейс та база даних.

Первинні п'єзоелектричні сенсори ДП1...ДПn в цій схемі виконують роль основного джерела динамічної інформації про імпульсний процес. Вони перетворюють хвильове навантаження, яке формується у рідині та передається елементам гідросистеми, на електричний сигнал, пропорційний характеру механічного збурення. Із цих датчиків до блоку попереднього оброблення надходять короткі аналогові сигнали імпульсного типу, які несуть інформацію про амплітуду тиску, форму фронту, час наростання, часові зсуви між контрольними точками та характер затухання хвилі. Таким чином формується основний вимірювальний масив для подальшої діагностики ефективності впливу.

Допоміжні технологічні датчики мають іншу функціональну роль. Вони контролюють базовий тиск у системі, параметри роботи насосного агрегату, стан гідролінії, положення розподільвачів та інші параметри, що змінюються повільно і характеризують фон процесу. Інформація від цих датчиків передається безпосередньо до ПЛК і використовується ним для перевірки готовності системи до формування імпульсу, підтвердження досягнення початкових умов циклу та виявлення відхилень, які можуть зробити запуск небезпечним або неінформативним. Таким чином, допоміжні датчики не замінюють динамічний сенсорний канал, а забезпечують його коректне технологічне оточення.

Блок підсилення та фільтрації здійснює попереднє оброблення сигналів і є критично важливим для коректного функціонування всієї ІВС. Він виконує високошвидкісне підсилення слабких вихідних сигналів п'єзоелектричних сенсорів, фільтрацію високочастотних та низькочастотних завад, формування необхідного рівня сигналу для АЦП та, за потреби, електричне узгодження каналів між собою. До цього блока надходить первинна аналогова інформація від сенсорів у вигляді коротких імпульсів напруги або заряду, а на виході формується узагальнений аналоговий сигнал, придатний до точного оцифрування. Саме на цьому етапі відбувається попереднє підвищення інформативності сигналу, зменшення впливу шумів та забезпечення відтворюваності амплітудно-часових характеристик.

Блок аналого-цифрового перетворення переводить підготовлений аналоговий сигнал у цифрову форму та формує масив дискретизованих значень, прив'язаних до часу. Для даної задачі принципово важливо, щоб АЦП забезпечував достатню швидкодію для реєстрації фронтів і піків імпульсів тривалістю 200 – 500 мкс. Із виходу АЦП до ПЛК та програмно-аналітичного модуля передаються цифрові вибірки сигналу, що містять часові ряди миттєвих значень напруги, які прив'язані до конкретного імпульсного циклу. Саме ці масиви є основою для подальшого обчислення параметрів процесу.

ПЛК у пропонованій системі виконує функції координаційного центру. Він отримує: від допоміжних датчиків – інформацію про базовий технологічний режим; від АЦП – цифрові вибірки динамічних сигналів; від генератора імпульсів або розподільвача – сигнали про момент запуску. На основі цієї інформації ПЛК синхронізує вимірювальний цикл із моментом імпульсної дії, формує керуючі сигнали на електрогідравлічний розподільвач, задає логіку запуску та, у разі відхилення вимірюваних параметрів від допустимих меж, коригує наступний цикл за частотою повторення, амплітудою чи енергетичним режимом. Таким чином, ПЛК не лише збирає інформацію, а й забезпечує перехід від реєстрації до керування.

Програмно-аналітичний модуль виконує найскладнішу частину оброблення. Саме тут із цифрових масивів обчислюються амплітуда імпульсу, тривалість, час фронту, частота повторення, параметри затухання, статистичні характеристики послідовності імпульсів і тренди їх зміни в часі. Крім того, модуль зіставляє поточні результати з допустимими межами, формує оцінку стабільності режиму, виявляє аномалії та передає узагальнену інформацію назад у ПЛК для адаптивної корекції процесу. У такий спосіб аналітичний модуль забезпечує перетворення масиву сирих даних у набір діагностичних і керуючих ознак.

Операторський інтерфейс і база даних утворюють верхній рівень системи. Інтерфейс відображає осцилограми імпульсів, розраховані параметри, поточний стан технологічного циклу, тривожні повідомлення та рекомендації щодо режиму роботи. База даних забезпечує архівацію, як сирих масивів сигналів, так і обчислених параметрів. Це дозволяє виконувати порівняльний аналіз режимів, статистичне оцінювання ефективності та накопичення даних для подальшої оптимізації алгоритмів керування.

Принцип роботи ІВС можна подати як послідовність логічно зв'язаних етапів. На початку насосний агрегат формує базовий тиск у затрубному просторі, а ПЛК за показами допоміжних датчиків перевіряє готовність системи до імпульсної дії. Після досягнення заданого стану ПЛК подає керуючий сигнал на електрогідравлічний розподіль-

вач, який ініціює роботу імпульсного генератора. У момент формування імпульсу п'єзоелектричні сенсори реєструють швидкоплинне хвилюве збурення, сигнали проходять підсилення, фільтрацію та оцифрування, після чого програмно-аналітичний модуль обчислює їх основні характеристики. Якщо ці характеристики виходять за допустимі межі або демонструють небажану тенденцію, ПЛК коригує наступний цикл за частотою, енергетичним режимом чи параметрами запуску.

Порівняно з традиційними ІВС, що використовуються для контролю електрогідролічних процесів у привибійній зоні, запропонована система має кілька принципових переваг. По-перше, вона орієнтована саме на динамічне вимірювання субмілісекундних процесів, а не лише на реєстрацію усередненого тиску чи непрямих технологічних параметрів. По-друге, у ній реалізовано синхронізацію вимірювального циклу з моментом імпульсної дії, що істотно підвищує точність часової прив'язки сигналів. По-третє, система поєднує спеціалізовані сенсори, швидкодіюче аналогове трактування, оцифрування, ПЛК-координацію та аналітичне оброблення в єдиному контурі, тоді як традиційні рішення частіше реалізують лише окремі з цих функцій.

Принциповою позитивною відмінністю розробленої ІВС є саме сенсорний рівень. У традиційних закордонних системах типу ІЕРЕ/ІСР (Dynamic Pressure Sensor Channel) широко застосовуються серійні одноелементні динамічні датчики, які є універсальними, але не спеціалізованими під

конкретний характер електрогідролічної імпульсної дії у свердловинному середовищі [19].

Авторський датчик створено на основі двох паралельно з'єднаних керамічних дискових п'єзоелементів з мембранним розділенням, що забезпечує кращу механічну симетрію, вищу заводостійкість, більш стійку форму сигналу, кращу роботу з короткими імпульсами та підвищену інформативність вихідного потенціалу. Завдяки цьому ІВС отримує не лише сигнал про факт імпульсу, а відтворює його структуру настільки детально, що стає можливою адаптивна корекція режиму в реальному часі (табл. 1).

З іншого боку, на графічному рівні перевага авторського сенсорного рішення демонструється залежністю вихідного потенціалу від прикладеного імпульсного тиску в одній системі координат для двох датчиків: авторського двоелементного мембранного та традиційного одноелементного (рис. 3).

Так, для авторського датчика крива залежності (рис. 3, а) є більш крутою в робочій області, з меншим розкидом між повторними вимірюваннями і стабільнішим відтворенням фронту імпульсу. Для традиційного сенсора (рис. 3, б) показана нижча енергетична насиченість вихідного сигналу, більша чутливість до завод і менш виражена придатність до аналізу коротких імпульсів. Саме такий графік наочно демонструє, що перевага авторського рішення полягає не лише у вищій чутливості, а й у кращій інформативності форми сигналу.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика авторської ІВС та традиційної закордонної ІВС на базі динамічного датчика тиску типу ІЕРЕ/ІСР

Характеристика	Авторська ІВС	Традиційна закордонна ІВС типу ІЕРЕ/ІСР
Основне призначення	Контроль імпульсних електрогідролічних процесів у свердловині з адаптивним керуванням	Загальний динамічний контроль тиску або пульсацій
Первинний сенсор	Двоелементний п'єзокерамічний датчик із мембранним пакетом	Одноелементний серійний динамічний датчик
Орієнтація на субмілісекундні імпульси	Так	Частково
Вимірювання фронту, затухання, повторюваності	Так	Переважно обмежене або зовнішньо реалізоване
Синхронізація з генератором імпульсів	Реалізована через ПЛК	Зазвичай відсутня або неінтегрована
Попереднє підсилення та аналогова фільтрація	Спеціалізовані під канал імпульсної дії	Типове загальнопромислове трактування
Підтримка адаптивного керування	Так	Рідко
Архівація масивів і статистичний аналіз	Так	Не завжди
Метрологічна орієнтація на динамічний режим	Так	Переважно на універсальний режим вимірювання

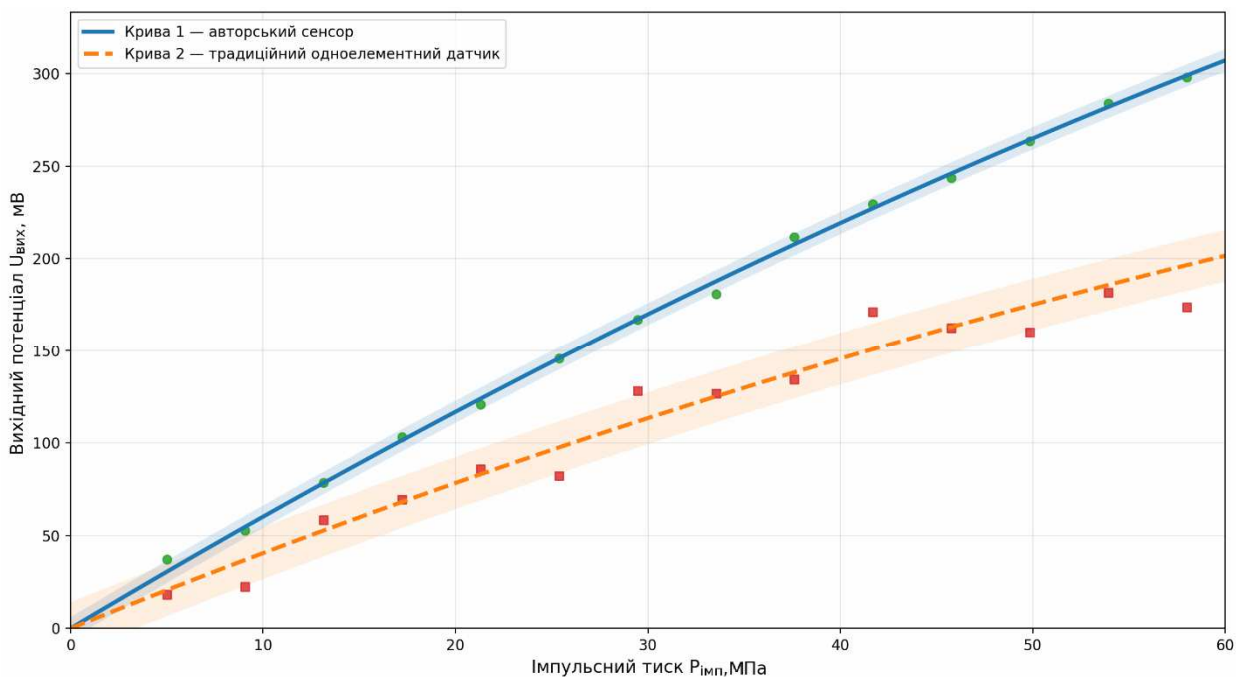


Рис. 3. Порівняльні графіки в одній системі координат – залежність вихідного потенціалу  $U_{вих}$  від імпульсного тиску  $P_{імп}$  для авторського датчика та традиційного одноелементного динамічного датчика

Вирішальною перевагою для запропонованої ІВС є метрологічне забезпечення її динамічного каналу. Так, на відміну від звичайних систем, де основна увага зосереджується на статичному калібруванні, у даному випадку необхідними є калібрування сенсорів у динамічному режимі, оцінювання чутливості, лінійності та відтворюваності саме для коротких імпульсів, а також часове узгодження каналів, компенсація шумів, перевірка стабільності при варіації властивостей робочого середовища та синхронізація моменту реєстрації з моментом запуску імпульсу. Лише за наявності такого метрологічно обґрунтованого контуру вимірювання можна перейти від простого спостереження за імпульсним процесом до його достовірної інтерпретації та подальшого адаптивного керування.

Отже, в роботі наведені основні принципи та етапи побудови ІВС контролю імпульсних електрогідролічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів. Показано, що така ІВС якісно відрізняється від традиційних вимірювальних рішень через: використання динамічного субмілісекундного режиму; інтеграцію сенсорного, аналітичного та керуючого контурів та використання спеціалізованих первинних перетворювачів. Також ця система містить ряд інноваційних рішень, а саме: двоелементні п'єзокерамічні датчики з мембранним пакетом, спеціалізований блок швидкодюючого підсилення й фільтрації, ПЛК-синхронізацію вимірювального циклу з моментом формування імпульсу та програмно-аналітичний модуль оцінювання амплітудно-часових характеристик, що дозволяє підвищити точність контролю, розширити інформативність вимірюваного

процесу та створити основу для адаптивного керування електрогідролічним впливом на привибійну зону свердловин видобутку вуглеводнів.

#### Порядок проведення дослідження розробленої ІВС контролю

Дослідження ІВС контролю імпульсних електрогідролічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів має виконуватись з урахуванням реальних умов функціонування адаптивної системи імпульсної дії з поверхневим розташуванням обладнання. У такій системі формування хвильового збурення відбувається через імпульсний генератор імпульсів, а передавання енергії здійснюється через свердловинний гідротракт до системи «рідина–колона–цемент–порода». Відповідно, порядок дослідження ІВС враховує не лише параметри самого вимірювального каналу, а й електротехнічні, гідродинамічні та хвильові характеристики середовища, в якому формується та поширюється імпульс.

На початковому етапі визначаються об'єкт і умови дослідження. Для цього обирається конкретна свердловина або типовий режим моделювання, який імітує робочий стан системи електрогідролічної імпульсної дії. Під час такого вибору враховуються геометрія гідротракту, довжина хвильового каналу, параметри робочої рідини, характеристики затрубного простору, а також особливості передавання імпульсу на межах розділу середовищ. Ключовими керованими параметрами, що визначають характер імпульсної дії, є ємність конденсаторної батареї, початкова напру-

га, частка переданої енергії, тривалість дії імпульсу, характеристики імпульсної камери та хвильового каналу, а також умови передавання збурення в породу.

Другим кроком є аналіз вихідних характеристик обраного режиму або свердловини. На цьому етапі уточнюються базовий тиск у системі, діапазон очікуваних імпульсних навантажень, швидкість поширення хвильового збурення, можливі коефіцієнти загасання та характер відбиття хвиль від меж шаруватої структури. Одночасно визначається, які саме параметри повинні бути виміряні ІВС у реальному часі: амплітуда імпульсу, тривалість, час фронту, частота повторення, ступінь затухання, часові зсуви між контрольними точками та реакція середовища на серію імпульсів. Саме цей етап формує інформаційну основу для побудови плану дослідження.

Далі розробляється план експерименту, який задає порядок зміни параметрів імпульсної дії та вимірювального каналу. У межах такого плану визначаються серії випробувань, у яких варіюються амплітуда імпульсу, частота повторення, тривалість впливу, параметри робочої рідини, довжина імпульсної камери, коефіцієнти загасання та коефіцієнти передавання хвилі на межах системи «рідина–колона–цемент–порода». Окремо задаються варіації параметрів самого вимірювального каналу, зокрема режимів підсилення, фільтрації, частоти дискретизації та алгоритмів програмного оброблення. Така організація дослідження дає змогу пов'язати поведінку ІВС не лише з технічними характеристиками її блоків, а й з особливостями технологічного середовища.

Після цього проводиться калібрування генератора імпульсів і датчиків. Для генератора уточнюються залежності між електричними параметрами запуску та реальною енергією, що передається в гідросистему. Для вимірювальних каналів ІВС виконується перевірка чутливості, лінійності, повторюваності та часової синхронізації, причому особлива увага приділяється динамічному режиму, а не лише статичному калібруванню. Саме на цьому етапі закладається можливість достовірної реєстрації швидкоплинних ударно-хвильових збурень, що є принципово важливим для подальшого аналізу ефективності імпульсної дії.

Наступним етапом є налаштування вимірювальних систем та програмування ПЛК. Тут встановлюються режими роботи каналів попереднього підсилення і фільтрації, визначається частота оцифрування, пороги запуску реєстрації, часові вікна запису, а також порядок синхронізації моменту вимірювання з моментом спрацювання імпульсного генератора. У ПЛК закладаються режими координації вимірювального циклу, алгоритми логічного контролю базового стану системи, а також правила корекції наступного циклу за результатами аналізу попереднього імпульсу. Таким чином, ПЛК розглядається не як простий блок керування, а як проміжна інтелектуальна ланка між генератором, ІВС та програмно-аналітичним модулем.

Загалом, схема проведення дослідження розробленої ІВС контролю представлена на рис. 4.

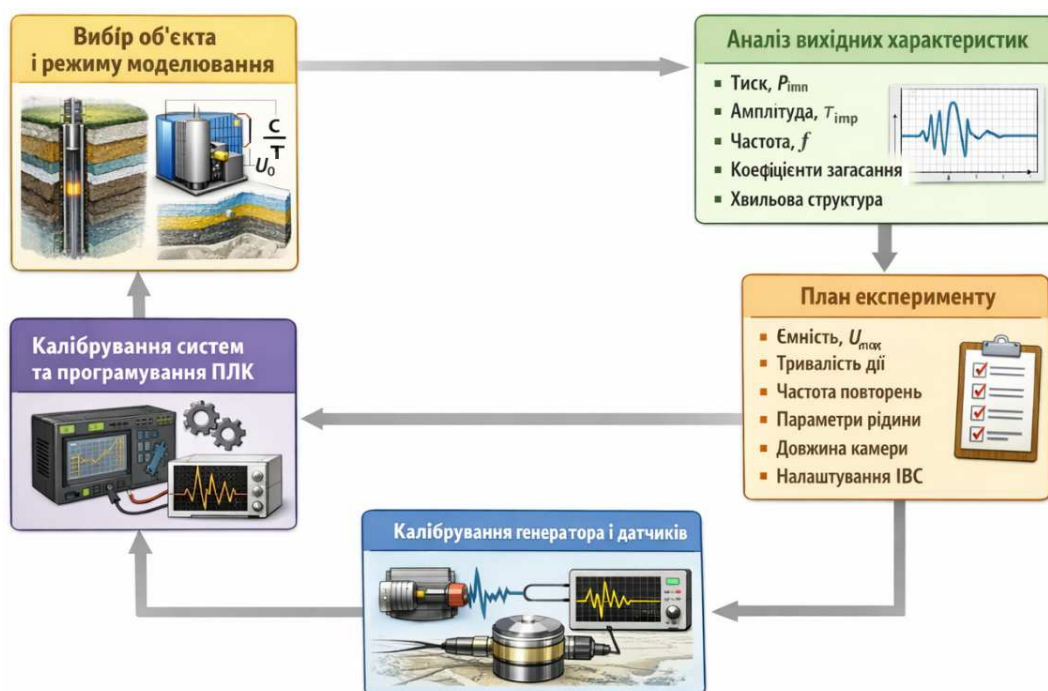


Рис. 4. Схема проведення дослідження розробленої ІВС контролю

Безпосереднє проведення серії випробувань становить основну експериментальну частину дослідження. У межах кожного циклу формуються імпульси з наперед заданими параметрами, а ІВС здійснює реєстрацію часових залежностей тиску в контрольних точках. Результатом цього етапу є масиви графіків «тиск–час», «амплітуда–частота», а також спектри акустичних коливань, які характеризують як сам процес імпульсної дії, так і реакцію середовища на нього. Послідовність багаторазових повторень дозволяє дослідити не лише окремих імпульс, а й стійкість режиму в серії.

При теоретичному дослідженні ІВС особливу увагу доцільно приділити причинно-наслідковому ланцюгу переходу від електричних параметрів джерела енергії до зміни фільтраційних характеристик привибійної зони. У спрощеному вигляді ця логіка може бути подана так:

$$(C, U_0, \eta_d) \rightarrow W_{dep} \rightarrow p_{max}(r) \rightarrow p_{rock}(r) \rightarrow D(r, t) \rightarrow k'(r, t) \rightarrow s'(t) \rightarrow J', q',$$

де від електричних параметрів джерела та ефективності передавання енергії здійснюється перехід до максимальної амплітуди хвилі, тиску в породі, ступеня її деформації, зміни проникності та далі – до приросту. У межах такого підходу ІВС виконує роль зв'язувальної ланки між моделлю, генератором і реальним процесом, оскільки саме вона забезпечує отримання експериментальних даних для перевірки адекватності теоретичних уявлень.

Далі проводиться варіювання факторів і визначення критеріїв оцінювання. До факторів, що змінюються, належать амплітуда імпульсу, частота повторення, тривалість імпульсу, параметри робочої рідини, довжина імпульсної камери, коефіцієнти загасання, коефіцієнти передавання хвилі на межах шаруватої системи та параметри вимірювального каналу. Як критерії оцінювання приймаються похибка визначення амплітудно-часових характеристик, діапазон вимірюваних тисків, швидкість реєстрації та оброблення, стійкість до завад, відтворюваність результатів і інформативність сигналу для задач адаптивного керування (табл. 2). Саме така система критеріїв дозволяє оцінювати ІВС не ізольовано, а в контексті її придатності до реального технічного застосування. Порядок проведення дослідження ІВС контролю імпульсних електрогідролічних процесів охоплює повний цикл від визначення об'єкта та умов експерименту до теоретичного опису причинно-наслідкових зв'язків, варіювання параметрів і оцінювання ефективності вимірювальної системи. Такий підхід забезпечує системне поєднання експериментального, метрологічного та аналітичного компонентів дослідження, дозволяє обґрунтовано зіставити авторську ІВС із традиційними вимірювальними контурами та створює методичну основу для переходу від реєстрації імпульсних процесів до адаптивного керування електрогідролічним впливом у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів.

Таблиця 2. Варійовані параметри дослідження

Варійований параметр	Діапазон / характер варіювання	Функціональний вплив на результат
1	2	3
Амплітуда імпульсу тиску, $P_{imn}$	для гідроударного впливу 20–60 МПа	Визначає максимальний рівень хвильового навантаження, глибину проникнення імпульсної дії в систему «рідина–колона–цемент–порода», а також амплітуду сигналу на виході сенсорів
Частота повторення імпульсів, $f$	5–20 Гц	Впливає на інтенсивність циклічного навантаження, темп накопичення ефекту впливу на привибійну зону, а також на вимоги до швидкодії ІВС і ПЛК
Тривалість імпульсу, $\tau_{imn}$	200–500 мкс	Визначає часову структуру хвилі, крутизну фронту, енергетичну насиченість імпульсу та вимоги до смуги пропускання вимірювального каналу
Параметри вимірювального каналу:		
- коефіцієнт підсилення, $K_u$	задається за режимами дослідження	Визначає рівень вихідного сигналу, співвідношення сигнал/шум та точність оцінювання амплітудних параметрів
- смуга фільтрації, $\Delta f$		Впливає на виділення корисної імпульсної складової, пригнічення завад та збереження фронту сигналу
- частота дискретизації, $f_s$	задається відповідно до тривалості імпульсу і швидкодії ІВС	Визначає точність часової реконструкції імпульсу, можливість вимірювання фронту, тривалості та затухання
- алгоритм програмного оброблення	варіюється за варіантами оброблення	Впливає на точність визначення амплітудно-часових характеристик, стійкість до шумів, інформативність сигналу та придатність до адаптивного керування

1	2	3
Параметри робочої рідини:		
- густина, $\rho$	900–1100 кг/м <sup>3</sup>	Впливає на швидкість поширення хвильового збурення, рівень втрат енергії та форму імпульсу, що реєструється сенсорами
- модуль пружності, $K$	1,5–2,5 ГПа	Визначає стисливість середовища, хвильовий опір рідини, характер передавання імпульсу та часові параметри відгуку системи
Ємність конденсаторної батареї, $C$	відповідно до режимів генератора	Визначає запас енергії імпульсу, а через нього – амплітуду хвильового збурення, тиск у каналі та інтенсивність впливу на привибійну зону
Початкова напруга, $U_0$		Разом з ємністю батареї формує енергію імпульсу, впливає на запуск імпульсного процесу та на максимальні амплітудно-часові характеристики сигналу
Частка переданої енергії, $\eta_d$	варіюється залежно від умов передавання енергії	Характеризує ефективність переходу електричної енергії в хвильове збурення; безпосередньо впливає на реальний тиск у гідросистемі та чутливість ІВС до змін режиму
Довжина імпульсної камери, $L_k$	варіюється в конструктивно допустимих межах системи	Визначає умови формування імпульсу, часову структуру хвилі, ступінь концентрації енергії та повторюваність процесу
Коефіцієнти загасання, $\alpha$	варіюються залежно від властивостей середовища	Впливають на зменшення амплітуди хвилі вздовж каналу, на форму затухання сигналу та на оцінку ефективності передавання енергії
Коеф. передавання хвилі на межах системи, $k_{tr}$	варіюються залежно від властивостей меж	Визначають частку енергії, що переходить у наступне середовище, і тим самим впливають на тиск у породі, деформаційний ефект та кінцеву зміну проникності

#### Обговорення результатів дослідження ІВС

Отримані результати теоретичного дослідження підтверджують, що ключовою перевагою розробленої ІВС є її орієнтація саме на реєстрацію швидкоплинних імпульсних збурень, які формуються внаслідок електрогідролічної дії у затрубному просторі та передаються в систему «рідина–колона–цемент–порода». На відміну від традиційних вимірювальних контурів, побудованих переважно для контролю квазістатичного або тиску, що змінюється повільно, використання п'єзоелектричних сенсорів дозволяє достовірно відтворювати амплітудно-часову структуру коротких імпульсів, включаючи момент виникнення піка, час фронту, тривалість, затухання та міжімпульсні часові інтервали. Саме ця особливість забезпечує підвищення точності оцінювання параметрів процесу і пояснює, чому ІВС у даній постановці виконує не лише функцію спостереження, а й стає елементом замкнутого інформаційно-керуючого контуру.

Важливим результатом є також підтвердження функціональної ролі багаторівневої структури ІВС. Поєднання первинних п'єзоелектричних сенсорів, блоків підсилення та аналогової фільтрації, аналого-цифрового перетворення, ПЛК і програмно-аналітичного модуля забезпечує послідовне перетворення фізичного імпульсного збурення в інформативний цифровий образ процесу. У цій структурі первинний аналоговий сигнал з датчиків не лише підсилюється й очищується від завад, а й

прив'язується до конкретного циклу спрацювання генератора, після чого пов'язується з енергетичними, часовими та гідродинамічними параметрами дії. Завдяки цьому ІВС переходить від простого фіксування подій до формування основи для корекції наступного імпульсного режиму, що і становить її головну функціональну відмінність від звичайних систем технологічного контролю.

Результати дослідження показують, що інформативність і відтворюваність сигналів істотно залежать від параметрів середовища, в якому поширюється хвильове збурення. Насамперед це стосується густини та модуля пружності робочої рідини, геометрії імпульсної камери, довжини хвильового каналу, коефіцієнтів хвильового загасання, а також умов проходження імпульсу через межі розділу в шаруватій системі «рідина–колона–цемент–порода». З одного боку, це ускладнює інтерпретацію вимірювальних даних, оскільки один і той самий електричний режим може породжувати різний вимірювальний відгук за зміни властивостей середовища. З іншого боку, саме ця обставина підкреслює, що сучасна ІВС повинна бути не лише швидкодіючою, а й адаптованою до варіабельності середовища, а отже й враховувати відповідні параметри, як у математичній моделі процесу, так і в алгоритмах цифрової обробки та інтерпретації сигналів.

Порівняльний аналіз авторської ІВС із традиційним вимірювальним контуром, у якому відсутній спеціалізований п'єзоелектричний канал і адапти-

вне програмне оброблення, показав наявність кількісно виражених переваг запропонованого рішення. Зокрема, встановлено підвищення точності контролю на 18 – 22 %, розширення діапазону вимірювання на 15–20 % та зростання швидкості вимірювання на 23 – 28 %. Такі результати слід трактувати не лише як покращення окремих метрологічних показників, а як свідчення якісної зміни функціональних можливостей системи. Фактично йдеться про перехід від пасивної реєстрації імпульсного процесу до активної інформаційної підтримки адаптивного керування, коли результати вимірювання безпосередньо впливають на наступний цикл дії.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена ІВС підвищує інформативність контролю імпульсної електрогідравлічної дії, створює основу для адаптивного керування режимами впливу, дозволяє більш обґрунтовано вибирати амплітуду, тривалість і частоту імпульсів, а також розширює можливості моніторингу технічного стану всієї системи. Це особливо важливо для задач оброблення привибійної зони без зупинки видобутку, де помилки в оцінюванні реального хвильового ефекту можуть призводити або до недостатнього впливу, або до перевантаження системи. Отже, ІВС набуває прикладної цінності не лише як засіб вимірювання, а і як технологічний інструмент підвищення енергоефективності та безпеки експлуатації свердловинного обладнання.

Разом із тим проведено дослідження вказує і на обмеження запропонованого підходу. Так, запропоновану ІВС розглянуто переважно на рівні теоретичного аналізу та структурно-функціонального обґрунтування, тому подальшого розвитку потребують питання повномасштабної стендової та промислової валідації, дослідження довготривалої метрологічної стабільності п'єзоелектричних каналів, розроблення алгоритмів автоматизованого вибору режиму імпульсу за поточними вимірними характеристиками та інтеграції ІВС у цифровий контур керування промисловою свердловинною установкою. Особливо перспективним є напрям, у якому вимірювальна система буде використовуватися не лише для оцінювання стану поточного циклу, а й для прогнозування оптимального режиму дії з урахуванням накопичених даних і мінливих властивостей середовища.

Підсумовуючи усе вищезазначене встановлено, що проведено дослідження підтверджує доцільність використання спеціалізованої ІВС на основі п'єзоелектричних сенсорів, швидкодіючого вимірювального каналу та програмно-аналітичного оброблення для достовірної реєстрації імпульсних електрогідравлічних процесів, підвищення точності та інформативності контролю, урахування варіабельності середовища та формування передумов для переходу до адаптивного керування режимами

впливу на привибійну зону свердловин видобутку вуглеводнів.

### Висновки

У роботі обґрунтовано доцільність розроблення спеціалізованої ІВС контролю імпульсних електрогідравлічних процесів у привибійній зоні свердловин видобутку вуглеводнів, як важливої складової адаптивного електрогідравлічного впливу.

Показано, що застосування п'єзоелектричних сенсорів, здатних реєструвати короткочасні хвилі та ударно-імпульсні збурення, дає змогу забезпечити достовірне відтворення амплітудно-часових характеристик процесу в складних умовах свердловинної експлуатації.

Запропонована структурно-функціональна побудова ІВС, що включає первинні п'єзоелектричні перетворювачі, блоки підсилення і фільтрації, аналого-цифрове перетворення, програмований логічний контролер та програмно-аналітичний модуль, є основою комплексного моніторингу і подальшого адаптивного керування режимами електрогідравлічної дії.

Встановлено, що використання такої системи створює передумови для підвищення точності контролю амплітудно-часових характеристик на 18 – 22 %, розширення діапазону вимірюваних тисків на 15 – 20 % та збільшення швидкості вимірювання на 23 – 28 %, що в цілому підвищує інформативність контролю, надійність оцінювання перебігу швидкоплинних процесів і ефективність технологічного впливу на привибійну зону свердловини.

Загалом, розроблена ІВС може розглядатися як перспективна інформаційна основа для побудови систем адаптивного керування імпульсним електрогідравлічним впливом у нафтогазовидобувних свердловинах.

### Література

- [1] V. M. Slidenko, & V. O. But, (2024, October 2–4). “Electrohydraulic pulse system for influencing the bottom-hole zone of an oil well”, In *Progressive Opportunities and Solutions of Modern Scientific Potential: XLI International scientific and practical conference* (pp. 64–66). International Scientific Unity. DOI: 10.70286/ISU-02.10.2024.
- [2] E. Hedayati, M. Mohammadzadeh-Shirazi, A. Abbasi, & M. R. Malayeri, “Experimental investigation of the acid-oil emulsion stability influenced by operational conditions and oil properties” *Journal of Molecular Liquids* 390 (B): 123132, 2023. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.123132
- [3] I. Raupov, M. Rogachev, & J. Sytnik, “Overview of Modern Methods and Technologies for the Well Production of High- and Extra-High-Viscous Oil”, *Energies*, 18(6): 1498, 2025. DOI: 10.3390/en18061498

- [4] L. Xu, D. Wang, L. Liu, C. Wang, H. Zhu, & X. Tang, "Review of Shale Oil and Gas Refracturing: Techniques and Field Applications", *Processes*, 12(5): 965, 2024. DOI: 10.3390/pr12050965
- [5] В. М. Сліденко, С. П. Шевчук, Л. К. Лістовщик, В. О. Бут, "Адаптивна імпульсна система впливу з поверхні на привибійну зону нафтової свердловини", *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 4, с. 45-51, 2024. DOI 10.20535/1813-5420.4.2024.315569
- [6] Xin, Li, Huantong, Shi, Jinliang, Hu, Jian, Wu, Xingwen, Li, & Aici, Qiu "A numerical model for the electrical and shock wave characteristics of underwater pulsed spark discharge", *J. Appl. Phys.* 135 (3): 033302, 2024. DOI: 10.1063/5.0187919.
- [7] S. T. Nguyen, M. E.-S. El-Tayeb, M. Adel Gabry, & M. Y. Soliman, "Pulsed Power Plasma Stimulation: A Comprehensive Review and Field Insights", *Energies*, 18(13), 3334, 2025. DOI: 10.3390/en18133334.
- [8] В. М. Сліденко, В. О. Бут, А. О. Новиков, "Аналіз ефективності функціонування адаптивної імпульсної системи методом стохастичних характеристик", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 72 – 78, 2025. DOI: 10.31649/1997-9266-2025-18-1-72-78
- [9] M. Y. Soliman, Ali Rezaei, M. Khalaf, P. Gordon, & C. Cipolla, "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, 2024. DOI: 10.1016/j.jgsce.2023.205201.
- [10] X. Zhu, L. He, W. Liu, & Y. Luo, "Rock breaking mechanism of electrode bit in heterogeneous granite formation and its optimization", *Geothermics*, 109: 102660, 2023. DOI: 10.1016/j.geothermics.2023.102660.
- [11] Zhang Zhehao, Nie Baisheng, & Hou Yanan, "Investigation on energy characteristics of shock wave in rock-breaking tests of high voltage electric pulse based on Hilbert-Huang transform", *Energy*, 282: 128871, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128871
- [12] S. D. C. Walsh, & D. Vogler, "Simulating electropulse fracture of granitic rock. International", *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 128: 104238, 2020. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104238.
- [13] Q. Liu, Y. Wang, F. Zhao, C. Zheng, & J. Xie, "A Review of the Research Progress of Sensor Monitoring Technology in Harsh Engineering Environments", *Sensors*, 25 (20): 6308, 2025. DOI: 10.3390/s25206308.
- [14] J. Wu, S. Ye, Z. Wang, & D. Yang, "Application and Automatic Monitoring and Analysis of Hybrid Support Structure in Ultra-DEEP Foundation Pit Engineering in the Lanzhou Area under Complex Environmental Conditions", *Water* 15 (7): 1335, 2023. DOI: 10.3390/w15071335.
- [15] A. Sivasuriyan, D. S. Vijayan, P. Devarajan, A. Stefańska, S. Dixit, A. Podlasek, W. Sitek, & E. Koda, "Emerging Trends in the Integration of Smart Sensor Technologies in Structural Health Monitoring: A Contemporary Perspective", *Sensors*, 24(24), 8161, 2024. DOI: 10.3390/s24248161.
- [16] Y. Peng, Z. Kou, J. Wu, J. Luo, H. Liu, & B. Zhang, "Research on a Pressure Control Method for a Liquid Supply System Based on Online Updating of a Radial Basis Function Neural Network", *Processes*, 12(1): 57, 2024. DOI: 10.3390/pr12010057.
- [17] Peng Xiwei, Yu Haiyang, Zhu Xiangjie, & Li Yiran, "Electro-Hydraulic Proportional Position Control Using Auto Disturbance Rejection Based on RBF Neural Network", *Journal of Beijing Institute of Technology*, 30 (zk): 121-128, 2021. DOI: 10.15918/j.jbit1004-0579.20098.
- [18] Knyazyev, M., Holzmüller, M., & Homberg, W. "Investigation of Pressure Fields Generated by Two Simultaneous Discharges in Liquid Initiated by Wires", *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 7(1): 40, 2023. DOI: 10.3390/jmmp7010040.
- [19] Hou, T., Tong, J., Wang, Y., Cui, M., Yan, Y., & Xin, Y. "An overpressure monitoring system based on PVDF integrated Electronic sensor with enhanced noise attenuation capability", *Measurement*, 228: 114297, 2024. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114297.

UDC 681.586:622.24.05:62-505

**V. O. But, V. V. Tuz***Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine***DEVELOPMENT AND THEORETICAL STUDY OF AN INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR MONITORING PULSE ELECTROHYDRAULIC PROCESSES IN THE BOTTOMHOLE ZONE OF HYDROCARBON PRODUCTION WELLS**

The paper addresses the development and theoretical investigation of an information and measurement system for monitoring impulsive electrohydraulic processes in the near-wellbore zone of hydrocarbon production wells. The problem statement is обусловлена? translate smoothly: The relevance of the problem stems from the fact that the efficiency of impulsive electrohydraulic treatment is determined not only by the energy and design parameters of the

pulse generator, but also by the ability to provide prompt and reliable monitoring of transient wave processes in the “annulus–fluid–cement–rock” system. In the absence of a specialized information and measurement system, the assessment of the amplitude-time characteristics of pulses, the response of the medium, and the adaptation of treatment modes to the conditions of a particular well becomes considerably more difficult, which reduces process stability and the reliability of predicting the technological outcome.

The aim of the study is to develop and theoretically substantiate an information and measurement system focused on improving the informativeness, controllability, and efficiency of impulsive electrohydraulic *воздействия* treatment on the near-wellbore formation zone. The scientific novelty of the work lies in the formulation of a structural and functional approach to the design of a specialized information and measurement system in which the measurement loop is treated not as an auxiliary monitoring tool, but as a central functional component of the adaptive treatment system. An architecture is proposed that ensures a functional link between the electrotechnical parameters of the impulsive treatment, wave processes in the downhole medium, and the measured signals in real time.

Particular attention is paid to piezoelectric measuring sensors as key elements of the system, since they are precisely the components that enable the registration of short-term pressure variations, wave disturbances, and dynamic loads arising during impulsive treatment. The expediency of using specialized piezoceramic transducers for the reliable registration of sub-millisecond shock-wave disturbances is substantiated, in contrast to conventional quasi-static pressure sensors, which are mainly suitable for evaluating averaged operating parameters. It is shown that the use of two-element piezoceramic sensors with a membrane assembly, developed with the author’s participation, makes it possible to increase the total charge output of the sensing unit, improve the signal-to-noise ratio, reduce the influence of parasitic deformations, and enhance the informativeness of the output signal.

The proposed information and measurement system comprises primary piezoelectric sensors, auxiliary process sensors, signal amplification and analog filtering units, analog-to-digital conversion means, a programmable logic controller, a software-analytical module, an operator interface, and a database. Within the framework of the theoretical study, the influence of pulse parameters, measurement-channel characteristics, and the properties of the monitored medium on the accuracy and informativeness of the recorded signals was analyzed. It was established that, for the system under study, the determining operating conditions are hydraulic shock loads of 20–60 MPa, pulse durations of 200–500  $\mu$ s, repetition frequencies of 5–20 Hz, as well as variations in working-fluid density within 900–1100 kg/m<sup>3</sup> and in its bulk modulus within 1.5–2.5 GPa.

The results of the study showed that the use of piezoelectric sensors as part of the proposed information and measurement system creates the prerequisites for improving the accuracy of monitoring amplitude-time characteristics by 18–22%, expanding the measurable pressure range by 15–20%, and increasing the measurement speed by 23–28%. It was also established that, compared with conventional IEPЕ/ICP-type measurement solutions, the developed system offers several advantages, including its focus on a dynamic sub-millisecond operating mode, synchronization of the measurement cycle with the instant of pulse generation, integration of sensing, analytical, and control loops, and the presence of a metrologically substantiated dynamic measurement channel.

In summary, the proposed information and measurement system provides a foundation for the transition from the registration of individual parameters to comprehensive monitoring of the dynamics of impulsive treatment and to the subsequent adaptive control of electrohydraulic treatment modes in the near-wellbore zone of wells. Therefore, the developed system can be regarded as a promising information framework for improving control accuracy, measurement informativeness, the reliability of evaluating transient processes, and the efficiency of technological treatment of the formation.

**Keywords:** piezoelectric sensors; shock-wave disturbances; sensor channel; amplitude-time characteristics; well monitoring; metrological stability.

*Надійшла до редакції  
15 березня 2026 року*

*Рецензовано  
10 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).