

УДК 532.593

DOI: 10.33310/2524-0978-2019-1-7-50-54

Валерій ПОЗДЕЄВ

pozdeev1405@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1224-7329

Олександр МЕЛЬНИК

melnikaleksandr908@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9778-4109

м. Миколаїв

МЕТОДИ МІНІМІЗАЦІЇ СПОТВОРЕНЬ ПРОФІЛЮ ЗБУРЕНЬ ПРИ ВИМІРЮВАНІ ІМПУЛЬСНОГО ТИСКУ В РІДКИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Роботу присвячено розробці методів мінімізації спотворень профілю збурень при вимірюванні імпульсного тиску в рідких середовищах. Розглянуто питання зниження похибок вимірювань шляхом оптимального вибору параметрів вимірювального тракту та проблеми регуляризації отриманих розв'язків оберненої задачі. Наведено рекомендації щодо забезпечення достовірності показань апаратури інформаційно-вимірювальних комплексів в імпульсних технологіях.

Ключові слова: імпульсний тиск, профіль збурень, математична модель, датчик тиску, вимірювальний тракт, рідке середовище.

Постановка проблеми

Профілі збурень, що генеруються різноманітними імпульсними джерелами, дають важливу інформацію про механізми імпульсних технологій. Однак показання існуючих датчиків імпульсного тиску вже при характерному часі в межах кількох мікросекунд супроводжується значними похибками результатів. Дослідження в даному часовому діапазоні неможливі без зниження систематичних похибок при вимірюванні імпульсних тисків. Одна з основних проблем сучасної експериментальної техніки полягає в підвищенні точності вимірювання. При цьому якщо зменшення випадкових похибок вимірювання досягається збільшенням їхньої кількості і подальшою статистичною обробкою даних, то задача зниження систематичних похибок є набагато складнішою. Великі значення амплітуд та швидкостей зміни імпульсного тиску призводить до проблеми ідентифікації сигналу датчика з істиною формою профілю збурень. Проблему можна вирішити як удосконаленням вимірювальної апаратури та методики вимірювання, так і математичним описом цих процесів, що дозволить встановити сигнал на базі мате-

матичної обробки даних вимірювань. Актуальність роботи обумовлено широким застосуванням імпульсних джерел в сучасній промисловості, також методи відновлення неспотвореного профілю збурень за результатами вимірювань можна використовувати в сучасних системах моніторингу розрядноімпульсних технологій [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Багатьма авторами розроблено ряд методів вимірювань імпульсних тисків, створено численні конструкції датчиків [2-4]. Характерні особливості таких вимірювань полягають в тому, що датчик, показує не істинний профіль збурення, а власне перетворення збурення від імпульсного тиску. Це пов'язано з тим, що датчик має деяку інерційність, тому миттєво не реагує на зміни зовнішнього впливу внаслідок збурення, і після припинення впливу миттєво не повертається до начального стану. Крім того, при електророзряді в рідині в безпосередній близькості від плазмового каналу вимірювання ускладнюються тими факторами, що імпульсні тиски перевищують межу міцності керамічних матеріалів і природних п'єзокристалів чутливих елеме-

нтів датчиків та високими рівнями електромагнітного впливу, що супроводжує високовольтний електророзряд в рідині [3, 4]. Таким чином, показання датчиків спотворено перехідними процесами. Для вирішення проблеми усунення систематичних похибок при імпульсних гідродинамічних вимірюваннях треба удосконалювати методики вимірювання та на базі математичної моделі вимірювального тракту обробляти отримані дані. Така обробка може здійснюватися за заданим алгоритмом інформаційно-вимірювальним комплексом [5].

Постановка завдання

Роботу присвячено розробці методів мінімізації спотворень профілю збурень при вимірюванні імпульсного тиску в рідких середовищах, що дасть можливість усунення похибок результатів при подальшій обробці даних. В цьому плані сферичний датчик є найбільш простим об'єктом моделювання, а поєднання його метрологічних переваг з можливістю аналітичного опису слід вважати його істотним пріоритетом.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо зв'язок частотної характеристики з параметрами вимірюваної імпульсної хвилі. Переваги та недоліки вимірювальної апаратури, в тому числі датчиків, характеризуються, як правило, кількісними параметрами – величиною похибки. Поняття кількісної характеристики точності вимірювань може бути застосовано тільки в тому випадку, коли якісні спотворення профілю сигналу досить малі. Як показує практика, при вимірюванні імпульсних тисків можливі значні якісні спотворення форми сигналу [2-4]. В цьому випадку кількісну характеристику можна використовувати тільки у відношенні вимірювання певної гармонійної компоненти тиску, і брати до уваги похибку вимірювання на визначеній частоті. Така характеристика вимірювального тракту враховується якщо частотний спектр гідродинамічного збурення зосереджений в досить ву-

зькій смузі, однак стає не впливовою при широкосмуговому сигналі.

Розглянемо випадок, коли амплітудно-частотна характеристика вимірювального тракту близька до ідеальної. При проходженні через тракт широкосмугового сигналу, спектр якого помітно відрізняється від нуля лише в області частот, в якій амплітудно-частотна характеристика не суттєво відрізняється від ідеальної, можна говорити про наближене збереження його профілю і, таким чином, використовувати кількісні характеристики для оцінки внесених спотворень.

Будемо вважати, що неспотворений профіль тиску є визначеною розривною функцією, яка тотожно дорівнює 0 при $t \leq 0$, та невід'ємно і монотонно спадає при $t > 0$:

$$P_0(t) = P_n(t)\delta(t); P_n(t) \geq 0; \\ \dot{P}_n(t) < 0 \text{ при } t > 0.$$

Основними практично важливими характеристиками такої функції є її значення і крутизна спаду в початковий момент. Розглянемо зв'язок між відносними похибками вимірювання пікового тиску й крутизни його спаду та загальними параметрами вимірювального тракту (нерівномірність амплітудно-частотної характеристики, крутизна її спаду і смуга пропускання).

Вихідним сигналом датчика є напруга на вході вимірювального приладу. Вводимо амплітудно-частотну характеристику вимірювального тракту відповідно ідеальну і реальну. У деяких випадках зручно скористатися виразом, який представляє собою відміну реальної характеристики від ідеальної. В якості додаткової умови, що накладається на реальну характеристику, припускаємо, що фазові спотворення відсутні. Як показали оціночні наближення, відносні похибки вимірювання пікового тиску і крутизни спаду в разі хвиль експоненціального профілю можна вважати приблизно рівними. Похибка в даному випадку являється функцією, що здійснює осциляцію, тому похибки вимірювань параметрів двох

хвиль, відмінність між якими порівняно невелика, можуть виявитися істотно різними.

Розглянемо мінімізацію спотворень при вимірюваннях імпульсного тиску у вільному полі. Як вже було сформульовано вище, єдиним радикальним шляхом вирішення основної проблеми імпульсних гідродинамічних вимірювань є аналітичне відновлення неспотвореного профілю тиску за результатами отриманих даних, що здійснюється на основі побудованої математичної моделі вимірювального тракту і розв'язанні оберненої задачі теорії вимірювання. Для найбільш поширених конструкцій датчиків отримані алгоритми відновлення профілю тиску, вони в більшості випадків є не складними, але порівняно громіздкими, що вимагає додаткової обробки результатів.

Однак в ряді випадків, коли характерні часи процесу не надто малі, а вимоги до точності вимірювання не надто високі, можна виключити громіздку процедуру аналітичного відновлення неспотвореного профілю та шляхом відповідного вибору параметрів вимірювального тракту знизити похибки вимірювання до прийнятної величини.

Математична модель вимірювального тракту [6] дозволяє не тільки отримати алгоритми відновлення профілю тиску, а й вирішити питання про вибір оптимальних значень параметрів вимірювального тракту в тому випадку, коли є можливість використовувати результати вимірювання безпосередньо, без аналітичного відновлення. Розглянемо детально питання оптимального вибору характеристик елементів вимірювального тракту коли вимірювання імпульсного тиску в вільному полі проводяться за допомогою сферичного п'єзокерамічного датчика. Взагалі ступінь внесених змін залежить від профілю вимірюваного тиску, однак, представляючи профіль тиску у вигляді інтеграла Фур'є, можна досягти, щоб похибка амплітудно-частотної характеристики тракту до деякої граничної частоти була мінімальною або не виходила за деякі межі. Межа частоти визначається або максимальною частотою, що присутня в спект-

рі збурення, або верхньою межею смуги пропускання вимірювального приладу. Можливий і інший підхід. Обираючи деякий характерний для імпульсного збурення профіль, мінімізувати спотворення профілів такого типу. В якості характерного можна обрати імпульс тиску, що експоненціально спадає, з розривним фронтом. Для того, щоб ввести відносну похибку реальної амплітудно-частотної характеристики необхідно знайти вираз для ідеальної характеристики, у вигляді деякого коефіцієнту, що залежить від частоти.

Якісний аналіз вимірювального тракту [6] показує, що його спотворення зменшуються при збільшенні опору навантаження і зменшенні розмірів датчика. Таким чином, не існує реально досяжних значень параметрів вимірювального тракту, що повністю мінімізують частотну похибку вимірювання.

Перейдемо до питання про вибір параметрів тракту коли профіль збурення має ударний характер, тобто відноситься до класу $P(t) = P_0 e^{-\alpha t}$. У цьому випадку аналіз показує, що переважна тенденція збільшення вхідного опору і зменшення розмірів датчика залишається в силі, проте виникає і додаткова вимога. Дійсно, вклад членів, пов'язаних з дифракційними і перехідними процесами різко зростає. Таким чином, переходячи до розмірних величин, сформулюємо зазначену вимогу в такій формі: при вимірюванні ударних профілів тиску має місце свого роду резонанс при якому співвідношення параметрів (1) є небажаним:

$$RC \approx \alpha^{-1}, \quad (1)$$

де R – опір активного навантаження; C – сумарна ємність датчика і вхідного ланцюга; α – показник загасання хвилі.

Крім області припустимих значень ($r_0 \ll \alpha c_0$) є і друга специфічна область, при якій спотворення профілю тиску теж малі. Вочевидь, конструктивне виготовлення датчику, що задовольняє умові (2) є набагато простішим:

$$r_0 = \alpha c_0, \quad (2)$$

де r_0 – радіус датчика; c_0 – швидкість звуку в рідині.

Таким чином, якщо характерний час збурення приблизно відомо, обираючи розміри датчика згідно (2) і з огляду на умову (1), можна істотно підвищити точність вимірювання при використанні порівняно великих датчиків.

Перейдемо до питання аналітичного відновлення неспотвореного профілю тиску по напрузі на вході вимірювального приладу і розглянемо регуляризацію задачі відновлення неспотвореного профілю тиску. Слід зазначити, що розв'язання оберненої задачі є нестійким. В даному випадку отриманий вираз містить необмежені оператори диференціювання. Ці обставини не призведуть до ускладнень, якби напругу на вході вимірювального приладу було задано у вигляді точної аналітичної залежності. Однак чисельне диференціювання експериментально отриманої кривої або числового масиву є небажаним, оскільки суттєво збільшує похибку відновленого результату. Таким чином, виникає необхідність регуляризації отриманого розв'язання. Для конкретизації цієї умови необхідно мати деякі оцінки максимально можливої швидкості зміни вихідної напруги. Ця швидкість обмежується або максимальною швидкістю змін напруги, які ще здатен відобразити прилад, або максимальною частотою, яка присутня в спектрі тиску чи максимальною частотою смуги пропускання приладу. Принаймні один з факторів, що лімітують, буде присутній завжди.

Позначимо максимальну частоту через ω_m . Тоді умова регуляризації набуває вигляду:

$$\mu \omega_m^{*2} + (1 + \mu) \omega_m^* \ll 1; \quad \omega_m^* = \xi \omega_m; \\ \mu = \xi / RC; \quad \xi = t - t_0.$$

Цю умову можна задовільнити при виконанні наступних нерівностей, що записано для розмірних величин:

$$r_0 < \frac{c_0}{\omega_m}; \quad RC \ll \frac{1 - \omega_m \xi}{\omega_m (1 + \omega_m \xi)}. \quad (3)$$

Як бачимо, перша з умов є надзвичайно жорсткою, оскільки виготовлення міні-

атюрного датчика пов'язане з конструктивними труднощами. Задовольнити другій умові набагато простіше. Тому доцільно замінити першу з нерівностей (3) рівністю:

$$r_0 = \frac{0,9c_0}{\omega_m}. \quad (4)$$

Тоді друга нерівність набуває вигляду

$$RC \ll \frac{0,05}{\omega_m}. \quad (5)$$

Вирази (4) і (5) являють собою умови, яким повинні задовольняти параметри вимірювального тракту для того, щоб відновлення профілю хвилі тиску відбувалося з достатньою точністю. Однак в більшості випадків зазначена умова формується як вимога до діаметру датчика. Він повинен не перевищувати мінімальну довжину хвилі в спектрі збурення, в той час як з (4) маємо, що мінімальна довжина хвилі повинна бути менше довжини великого кола сферичного датчика. Що стосується умови (5), то з неї маємо необхідність зниження вхідного опору вимірювального приладу, в той час як на практиці існує протилежна тенденція. Однак необхідність зниження вхідного опору можна отримати з таких міркувань: прагнення зробити вхідний опір приладу максимальним пов'язано зі змогою уникнути диференціювання сигналу, яке може привести до суттєвих додаткових спотворень. Однак при диференціюванні сигналу прямого вимірювання відновлення профілю буде пов'язане з інтегруванням – операцією, яка знижує похибки, в тому числі і додаткові випадкові, що виникають при перетворенні осцилограм в числові масиви. Таким чином, при розв'язанні задачі подальшого відновлення неспотвореного профілю збурень диференціювання сигналу стає позитивним фактором.

Сумарна ємність датчика і вхідного ланцюга, як правило, лежить в діапазоні від 100 до 500 пФ і не може бути суттєво знижена. Отже, основним варійованим параметром у (5) стає опір навантаження, незважаючи на те, що зниження його є небажаним через зменшення рівня сигналу датчика.

Висновки і перспективи досліджень

На базі проведеного аналізу характерних особливостей імпульсних гідродинамічних вимірювань запропоновано методи мінімізації спотворень профілю збурень при вимірюванні імпульсного тиску в рідких середовищах. Розглянуто питання зниження похибок вимірювання шляхом оптима-

льного вибору параметрів вимірювального тракту та проблеми регуляризації отриманих розв'язків оберненої задачі. Застосування запропонованих методів та дотримання наведених рекомендацій забезпечить стабільність і достовірність показань апаратури в складі інформаційно-вимірювальних комплексів з моніторингу швидкоплинних процесів в імпульсних технологіях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гулый Г.А. Основы разрядноимпульсных технологий. Київ: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д. Датчики: справочное пособие. Москва: Техносфера, 2012. 624 с.
3. Суркаев А.Л., Кульков В.Г. Исследование импульсного волнового пьезодатчика давления. *Акустический журнал*. 2006. т. 52. № 2. С. 264-268.
4. Жекул В.Г., Смирнов А.П., Тафтай Э.И. и др. Пьезоэлектрический волноводный датчик для измерения импульсного давления в замкнутых объемах жидкости при высоковольтном электрическом разряде. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017. № 5. С. 31-35.
5. Мельник О. Інформаційно-вимірювальна система для реєстрації імпульсного тиску в рідких середовищах. *Геометричне моделювання та інформаційні технології*. №1 (5). Миколаїв: МНУ імені В.О. Сухомлинського, 2018. С. 91-95.
6. Поздеев В., Мельник О. Математичне моделювання вимірювального тракту для визначення імпульсного тиску в рідині. *Геометричне моделювання та інформаційні технології*. №2 (6). Миколаїв: МНУ імені В.О. Сухомлинського, 2018. С. 60-64.

Valeriy POZDEEV, Olexandr MELNIK
Mykolayiv

METHODS TO MINIMIZE DISTORTION OF THE DISTURBANCE PROFILE WHEN MEASURING THE PULSE PRESSURE IN LIQUID MEDIA

The work is devoted to the development of methods for minimizing the distortions of the perturbation profile when measuring the pulse pressure in liquid media. The issues of reducing measurement errors by the optimal choice of parameters of the measuring path and the problem of regularization of the obtained solutions of the inverse problem are considered. The recommendations on ensuring the reliability of the indications of the equipment of information-measuring complexes in pulse technologies are given.

Keywords: pulse pressure, disturbance profile, mathematical model, pressure sensor, measuring path, liquid medium.

Валерій ПОЗДЕЕВ, Александр МЕЛЬНИК
Николаев

МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ПРОФИЛЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Работа посвящена разработке методов минимизации искажений профиля возмущений при измерении импульсного давления в жидких средах. Рассмотрены вопросы снижения погрешностей измерений путем оптимального выбора параметров измерительного тракта и проблемы регуляризации полученных решений обратной задачи. Приведены рекомендации по обеспечению достоверности показаний аппаратуры информационно-измерительных комплексов в импульсных технологиях.

Ключевые слова: импульсное давление, профиль возмущения, математическая модель, датчик давления, измерительный тракт, жидкая среда.

Стаття надійшла до редколегії 31.03.2019