

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СИГНАЛІВ ПРИ КОНТРОЛІ ТРУБ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ДИФРАКЦІЙНО-ЧАСОВИМ МЕТОДОМ

С.М. Глабець¹, В.С. Єременко¹, Ю.В. Куц^{1,2}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: s.glabets@gmail.com

²Інститут загальної енергетики НАН України. 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 172. E-mail: y.kuts@ukr.net

У статті наведено результати аналізу підповерхневого та донного сигналів при контролі дифракційно-часовим методом (ДЧМ) товстостінних труб, виготовлених із поліетилену високої щільності. Експериментальні сигнали отримувались за допомогою ультразвукового дефектоскопа OmniScan SX. Дослідження обвідної і фази сигналів виконано в середовищі MatLab. Показано, що обвідна та частота прийнятих сигналів, зокрема підповерхневого та донного, суттєво відрізняється від номінальних значень відповідних характеристик сигналів збудження п'єзоперетворювачів, що необхідно враховувати під час проведення та інтерпретації результатів контролю, а також при пошуку та обґрунтуванні нових діагностичних ознак. Бібліогр. 19, рис. 8.

Ключові слова: ультразвуковий неруйнівний контроль, дифракційно-часовий метод, зварне з'єднання поліетиленових труб

Вступ. Одним із передових методів ультразвукового контролю (УЗК) є дифракційно-часовий метод (ДЧМ, відомий в англійській літературі як ToFD – Time of Flight Diffraction) [1]. Цей метод розроблений у 1970-х роках у Великобританії під керівництвом доктора Моріса Сілка (Dr. Maurice Silk,) і спершу випробовувався як експериментальна технологія визначення розміру вертикальних тріщин у сталевих виробках [1]. Згодом, завдяки високій чутливості та продуктивності, цей метод був апробований як інструмент пошуку та оцінювання розмірів дефектів у зварних з'єднаннях товстостінних сталевих виробів [2].

В основі ДЧМ лежить явище дифракції різних типів ультразвукових хвиль на краях дефектів об'єкта контролю (ОК). Для збудження та реєстрації ультразвукових коливань використовують пару ультразвукових похилих п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) поздовжніх хвиль з широкою діаграмою направленості, розташованих на поверхні ОК на фіксованій відстані по різні сторони зварного з'єднання [3]. Класичний приклад розташування ПЕП для контролю стикового зварного з'єднання з використанням ДЧМ надано на рис. 1, де перший з двох ПЕП (випромінювач) спрямовує ультразвукову хвилю в ОК, другий ПЕП (приймач) реєструє всі ультразвукові хвилі в контрольованій ділянці. Для ДЧМ використовують ПЕП з малим діаметром п'єзопластини для забезпечення широкої діаграми направленості, високодемпфовані –

для генерації коротких імпульсів (орієнтовно 1,5 періоду сигналу-носія) [4].

У загальному випадку на приймальному ПЕП отримують послідовно чотири рознесені в часі сигнали, схематичне зображення яких представлено на рис. 2.

Вказаним позначенням на рис. 2 відповідають наступні сигнали [5]: 1 – сигнал від підповерхневої поздовжньої хвилі; 2 – сигнал дифракційної хвилі від верхньої кромки тріщини; за типом ця хвиля є поздовжньою, циркулярною, затримана відносно сигналу 1 на інтервал часу t_1 ; 3 – сигнал дифракційної хвилі від нижньої кромки тріщини, за типом ця хвиля також є поздовжньою, цирку-

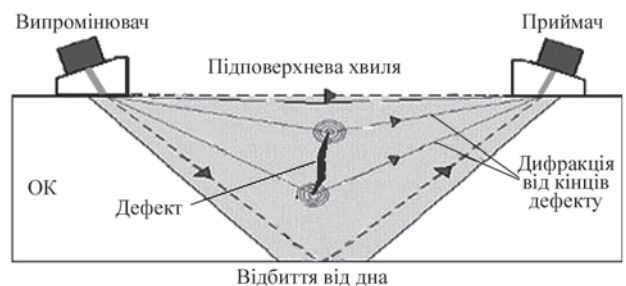


Рис. 1. Схема контролю зварного з'єднання за використанням ДЧМ

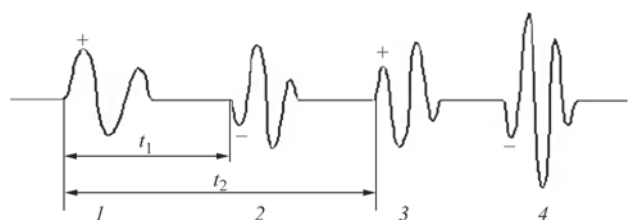


Рис. 2. Схематичний часовий ряд (А-скан розгортка) сигналів ДЧМ

Авторське право © Автор(и)
 © Видавць ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026
 Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

лярною, затриманою відносно сигналу один на інтервал часу t_2 ; 4 – сигнал, що відповідає віддзеркаленій від донної поверхні ОК хвилі.

Характерною особливістю часового ряду сигналів ДЧМ є інвертування їхньої фази (на рис. 2 ця зміна позначена символами «+» та «-»), що дає змогу використати тест на інверсію фази для ідентифікації дифрагованих сигналів. Наявність дифракційних сигналів 2 і 3 (рис. 2) свідчить про наявність несуттєвості матеріалу на ділянці. Головними інформаційними характеристиками методу є часові інтервали t_1 та t_2 . Оскільки ДЧМ передбачає оцінювання розмірів тріщини за цими часовими інтервалами, амплітуда відбитих сигналів та просторова орієнтація дефекту не мають настільки критичного впливу на результат контролю, як у традиційному луно-імпульсному методі [6].

Переваги ДЧМ широко представлені в літературі, найсуттєвішими з яких є наступні:

- здатність виявляти дефекти різної орієнтації, а не переважно перпендикулярні до променя, як у луно-імпульсному методі [7];
- ефективне виявлення дефектів зі складною геометрією та грубою поверхнею [8];
- інверсія фази дифрагованого сигналу від верхньої та нижньої кромки тріщини, що полегшує їх розпізнавання та вимірювання розмірів [9];
- висока чутливість до дефектів з низькою відбивною здатністю, як у сталевих, так і у поліетиленових зварних з'єднаннях [10].

Разом з тим ДЧМ притаманні певні обмеження та недоліки [3, 11], зокрема:

- наявність зон зі зниженою чутливістю біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь;
- мала амплітуда дифрагованих сигналів;
- можливість виникнення хибних дифрагованих сигналів на неоднорідностях матеріалу ОК;
- складність контролю ОК за значної кривизни його поверхні.

Отримані в [10] експериментальні дані засвідчили можливість використання ДЧМ для контролю стикових з'єднань труб із поліетилену високої щільності (ПВЩ, англ. HDPE). На сьогодні це питання лишається актуальним і потребує поглибленого дослідження його різних аспектів.

Метою роботи є дослідження частотних характеристик сигналів ДЧМ, зокрема підповерхневого та донного сигналів, отриманих при контролі цим методом товстостінних труб, виготовлених із поліетилену високої щільності.

Характеристика поліетиленових труб високого тиску. Особливості структури та певні фізичні характеристики ПВЩ ускладнюють його

контроль ультразвуковим методом. Поліетилен – це термопластичний матеріал, що легко формується та з'єднується плавленням. Винайдений у 1933 р., полімер формувався лише під високим тиском. У 1950-х роках була винайдена технологія низького тиску, яка значно знизила вартість і зробила виготовлення поліетилену безпечнішим. Щільність матеріалу визначається кількістю бічних відгалужень (коротких полімерних ланцюгів) від основного довгого полімерного ланцюга. Саме за цією ознакою й розрізняються поліетилен низького тиску, але високої щільності (ПВЩ), з малою кількістю розгалужень і поліетилен низької щільності (ПНЩ) з великою кількістю розгалужень. Поліетилен має як кристалічні, так і аморфні області та зветься напівкристалічним матеріалом.

Труби ПВЩ виготовляють із наступних марок поліетилену: PE40, PE80, PE100, що розрізняються за механічними властивостями [12]. У цілому до переваг ПВЩ належать наступні [13]:

- низька ціна;
- висока стійкість до корозії;
- легкість маніпулювання, транспортування та обробки;
- мала вага та гнучкість;
- швидкіший і простіший процес зварювання;
- значний термін експлуатації.

Методи з'єднання поліетиленових труб. Під час монтажу трубопроводів найпоширенішими способом з'єднання труб із ПВЩ є електротермічне стикове зварювання [14]. Зазначений метод передбачає стадії: нагрів попередньо підготовлених торцевих поверхонь труб за допомогою нагрівального інструмента, з'єднання розігрітих кінців між собою під дією тиску, витримка. У результаті відбувається дифузійне перемішування полімерного матеріалу, а після його охолодження формується міцне та герметичне зварне з'єднання. Витіснений назовні розігрітий матеріал формує валики (на зовнішній та внутрішній поверхнях труби), фактично не лишаючи зони термічного впливу у з'єднанні. За вимогами надалі валики можуть механічно видалятися з поверхні після повного охолодження.

Дефекти зварних з'єднань труб із ПВЩ. Згідно з наведеними в [14] результатами досліджень дефекти зварних швів містять: сторонні забруднення при монтажних роботах; часткове або повністю відсутнє з'єднання через неякісну підготовку торців до зварювання (як правило, орієнтоване перпендикулярно до радіально-осьової площини, тобто з нахилом 0°); холодне злипання (несплавлення), за якого утворений контакт є недостатнім

для передавання напруги зсуву; пори, викликані невідповідними циклами нагрівання та стискання; тріщини під час охолодження та невідповідну геометрію валиків зварних швів.

Особливості УЗК труб, виготовлених із ПВЩ. Разом з експлуатаційними перевагами труби з ПВЩ мають певні проблеми для УЗК щодо виявлення поширених дефектів. Згідно з дослідженням [15] поздовжня швидкість звуку в поліетилені залежить від багатьох факторів: хімічний склад, спосіб виготовлення та ін. Найвпливовішим фактором є температура – при її зміні від 0 до 50 °С швидкість поздовжніх хвиль зменшується від 2500 до 2150 м/с, що може ускладнити ультразвуковий контроль у польових умовах і потребує додаткових досліджень при налаштуванні дефектоскопа. Як зазначено у [15], для труб ПВЩ марки PE100 швидкість поздовжніх хвиль складає 2,340 м/с при температурі 20 °С, що близько до стандартних призм Rexolite. Ця обставина ускладнює введення ультразвукових коливань у матеріал під кутом.

Інша поширена проблема – високе згасання, що залежить від частоти ПЕП і відносно незначно варіюється у радіальному та осьовому напрямках. Для поздовжньої хвилі згасання складає 0,3...0,5 дБ/мм на частоті 2,25 МГц, поперечні хвилі майже відсутні [15].

Для УЗК металів зазвичай використовуються частоти з діапазону 1...10 МГц, оптимальною для ПВЩ щодо згасання є частота 2 МГц [15]. При використанні луна-імпульсного методу для збору даних доцільно обмежувати діапазон контролю зоною з прямим променем.

У [10] опубліковано результати дослідження акустичних властивостей ПВЩ у трьох ортогональних напрямках: через стінку, радіальному/окружному та осьовому напрямку труби. Для ПЕП частотою 2,25 МГц та діаметром п'єзопластини 9,5 мм виміряна акустична швидкість у ПВЩ складала 2240...2340 м/с, а затухання – 0,55...0,83 дБ/мм. Крім того, в [10] встановлено, що при частоті збудження ПЕП 2,25 МГц і поширенні хвилі в ОК на відстань 2'' (5,08 см, у прямому та зворотному напрямках) повертався сигнал частотою ~ 1,3...1,8 МГц, при частоті ПЕП 5 МГц повертався сигнал частотою ~2,2 МГц, а при 10 МГц отримували відповідно сигнал частотою ~3,5 МГц, що свідчить про втрату основної частоти збудження ПЕП.

У [16] зазначено, що при поширенні в ОК відбувається зміна як обвідної, так і частоти сигналів ДЧМ.

При попередніх дослідженнях авторами цієї публікації було зареєстровано частотну модуляцію

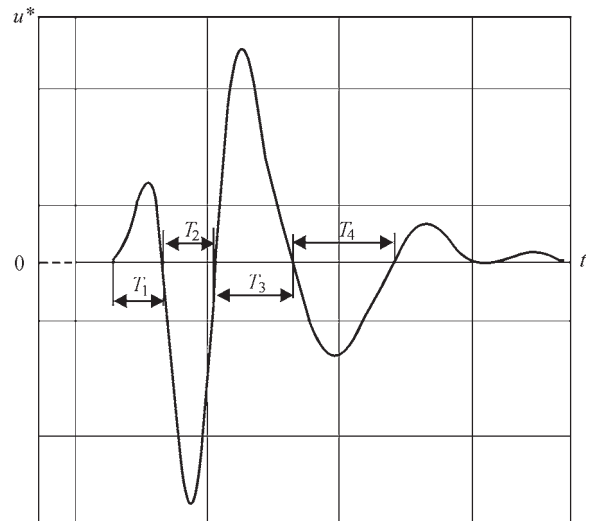


Рис. 3. Графік донного сигналу, характерний для реалізації ДЧМ при контролі труб із ПВЩ

донного сигналу, що вказано на рис. 3, де півперіоди мають різну тривалість, а саме, спостерігається збільшення їхнього часу: $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$.

Ефекти зміни частоти сигналу-носія в ДЧМ та частотні модуляції сигналів, отриманих при ультразвуковому контролі труб із ПВЩ, лишаються малодослідженими й не дають змоги коректно оцінити інформаційний потенціал сигналів ДЧМ.

Лабораторна установка для дослідження сигналів ДЧМ. Для отримання сигналів ДЧМ використовувався дефектоскоп OmniScan SX, який має функцію експорту А-сканів розміром до 8192 точок через USB-порт для подальшого оброблення та аналізу характеристик сигналів. Дефектоскоп має зручний сенсорний інтерфейс та екран з роздільною здатністю 800×600 пікселів для візуалізації результатів контролю та поточної інформації. В експерименті використовувались ПЕП C540-SM Centrascan Composite Miniature Angle Beam Transducer з п'єзопластинами діаметром 9,5 мм і робочою частотою 2,25 МГц та призма ST2-60L-WHC-HDPE з кутом введення ультразвукових коливань в ОК 60°. Поздовжні ультразвукові хвилі вводились в ОК через водяний канал у призмі завдовжки орієнтовно 12 мм. Аналогово-цифрове перетворення сигналів ДЧМ виконувалось із частотою дискретизації 100 МГц. Відстань між двома ПЕП дорівнювала 85 мм. Сканування поверхні ОК здійснювалось за допомогою ручного сканера HST-Lite Scanner. Фото лабораторної установки наведено на рис. 4.

Методика аналізу сигналів. Спектр ДЧМ-сигналів концентрується в невеликій ділянці в околі центральної частоти f , тому для аналізу таких сигналів допустиме їхнє представлення у вигляді моделі вузькосмугового сигналу. У загальному вид-

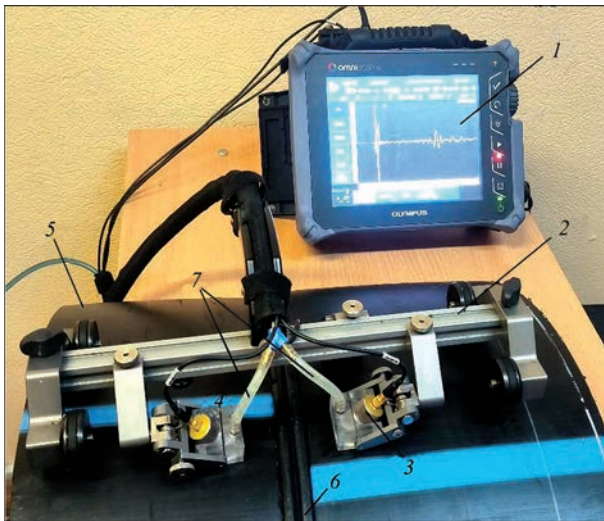


Рис. 4. Лабораторна установка для дослідження сигналів ДЧМ: 1 – дефектоскоп; 2 – скануючий пристрій; 3, 4 – ПЕП; 5 – фрагмент ОК; 6 – зварний шов; 7 – трубопровід подачі імпульсної рідини

гляді така модель у цифровій формі може бути представлена рівнянням [17]:

$$u[j] = U[j] \cos(\Phi[j]), \quad j = \overline{1, J}, \quad (1)$$

де J – обсяг вибірки, $J = \lceil T_a / T_d \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ – позначення операції виділення цілої частини числа, T_d , T_a – період дискретизації та час аналізу сигналу відповідно, j – номер відліку у вибірці.

Оскільки рівень шумової складової сигналу значно менший за амплітуду донного сигналу, в моделі (1) вона відсутня.

Визначення характеристик сигналу відбувається за допомогою дискретного перетворення Гільберта (ДПГ) [12], що реалізується оператором \mathbf{H}_d . Останній дає змогу отримати гільберт-образ вибірки $\tilde{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j])$.

Значення оцінок обвідної та фази сигналу для всіх точок вибірки обчислюються за формулами:

$$\hat{U}[j] = \sqrt{u^2[j] + \tilde{u}^2[j]}, \quad (2)$$

$$\hat{\Phi}[j] = \arctg \frac{\tilde{u}[j]}{u[j]} + \mathbf{L}(u[j], \tilde{u}[j]) \quad (3)$$

де \mathbf{L} – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу $[-0,5\pi; 0,5\pi)$, тобто за межі інтервалу однозначного визначення функції \arctg [18]. ДПГ дає змогу отримати вибірки обвідної та фази сигналів ММП під час сканування поверхні ОК з частотою дискретизації, що значно перевищує центральну частоту ($F_d \gg f$) та уможливує визначення динаміки зміни характеристик сигналу навіть у межах періоду сигналу-носія.

Оцінювання миттєвої частоти сигналу відбувається безпосередньо з дискретної фази сигналу згідно з виразом:

$$\hat{f}[j] = \frac{\hat{\Phi}[j] - \hat{\Phi}[(j-1)]}{2\pi T_d}, \quad 1 \leq j \leq J-1 \quad (4)$$

Зауважимо, що термін «миттєва частота» є внутрішньо суперечливим, оскільки зазвичай під частотою розуміють величину, обернену до періоду коливань. Проте похідна в часі від фази сигналу за розмірністю збігається з частотою, а у випадку гармонічного сигналу кількісно співпадає з його частотою. Тому далі ця величина використовується в аналізі швидкоплинних (локалізованих у часі) процесів і сигналів.

Методика аналізу структури ДЧМ-сигналів передбачає:

1. Отримання вибірки аналізованого сигналу $u_{\text{вх}}[j]$, $j = \overline{1, J}$.
2. Фільтрація (за необхідності) вибірки $u_{\text{вх}}[j]$, $j = \overline{1, J}$ та отримання її фільтрованої версії $u[j] = \mathbf{F}(u_{\text{вх}}[j])$, $j = \overline{1, J}$, де \mathbf{F} – оператор фільтрації.
3. Обчислення гільберт-образу вибірки $\tilde{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j])$, $j = \overline{1, J}$.
4. Обчислення оцінки обвідної сигналу $\hat{U}[j]$, $j = \overline{1, J}$ згідно з (2).
5. Обчислення оцінки фази сигналу $\hat{\Phi}[j]$ згідно з (3).
6. Визначення оцінки значень миттєвої частоти сигналу $\hat{f}[j]$ згідно з (4).

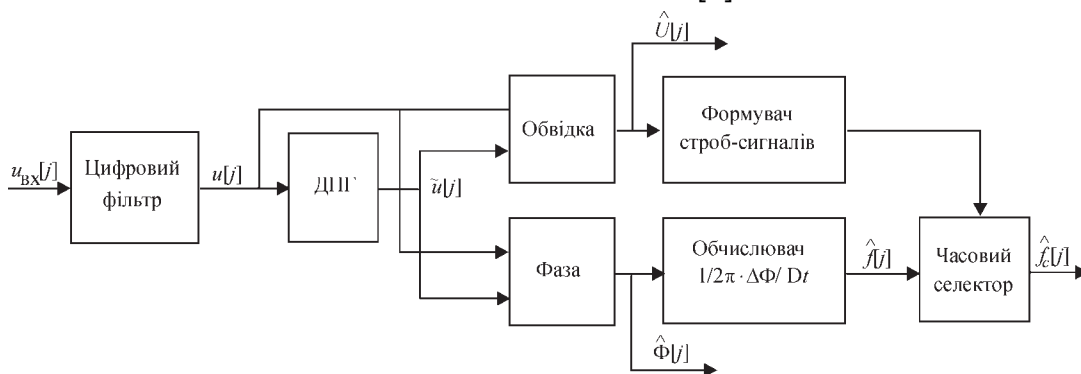


Рис. 5. Структурно-логічна схема отримання функції $\hat{f}[j]$

7. Виділення (за обвідною) для аналізу необхідних ділянок функції $\hat{f}[j]$, які відповідають підповерхневій, двом дифракційним і віддзеркаленій хвилям.

Структурно-логічну схему опрацювання ДЧМ-сигналу згідно з вказаною вище методикою наведено на рис. 5.

У цій схемі обвідна використовується для управління часовим селектором і виокремлення інформативних ділянок сигналу.

Опрацювання ДЧМ-сигналу та аналіз отриманого результату. У проведеному досліді ПЕП встановлювались на бездефектній ділянці труби для дослідження підповерхневих і донних сигналів. Реалізація обчислень експериментальних даних згідно з рівняннями (2)–(4) та візуалізація отриманих результатів виконана в середовищі MATLAB [19].

На рис.6, а зображено реалізацію сигналу (у відносних одиницях і без додаткової частотної фільтрації), отриману за допомогою ультразвукового дефектоскопа OmniScan SX та розраховану обвідну сигналу (крива 3). Сигнал містить два

радіоімпульси – реакцію на підповерхневу хвилю (крива 1) та донний сигнал (крива 2). З цього рисунку видно, що радіоімпульс 2 суттєво відрізняється від радіоімпульсу 1 підповерхневої хвилі як за частотою сигналу-носія, так і за формою обвідної. На рис. 6, б наведено функцію $\Phi[j]$ (з метою підвищення інформативності ділянки цієї функції на інтервалах між радіоімпульсами прирівняні 0).

Графік зміни миттєвої частоти в часі зображено на рис. 6, в. Отримана оцінка частоти містить значну шумову складову, яка не відповідає реальній частоті сигналу, і викликана особливістю алгоритму (4), чутливого до найменших коливань оцінки фази (фазових шумів) сигналу (3). Пояснення цього ефекту дає рис. 7. Унаслідок незначних високочастотних шумів у вхідному сигналі (червона крива (1) на рис. 7) виникають незначні локальні спотворення у відліках сигналу, що призводить до появи фазових шумів аналізованого сигналу і, як наслідок, до значних флуктуацій функції $\hat{f}[j]$. Цифрова фільтрація послідовності дає змогу зменшити цей ефект. Синя крива (2) на рис. 7 отримана

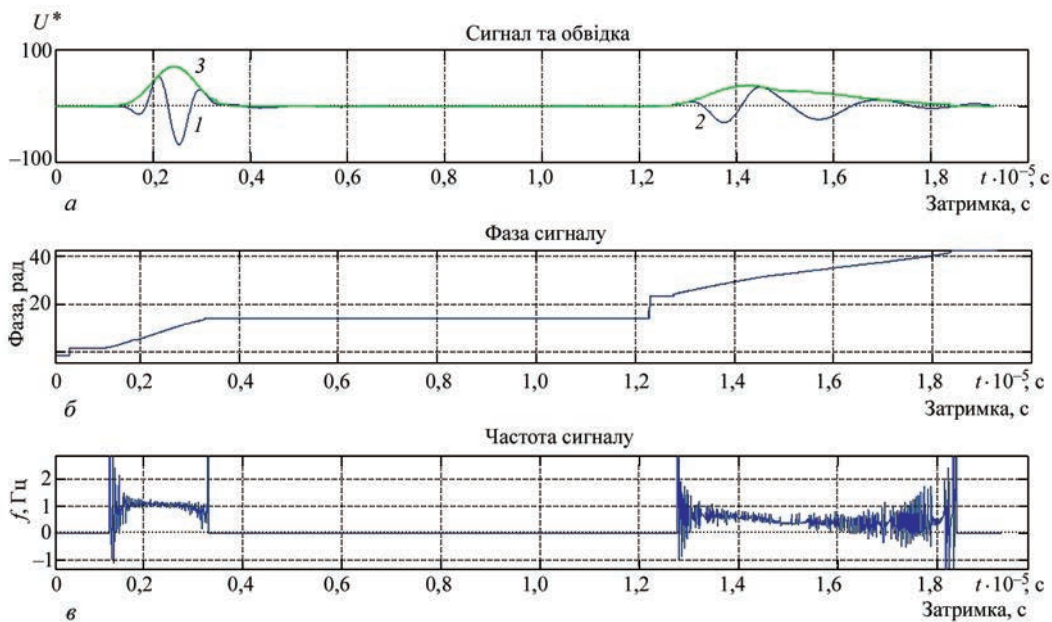


Рис. 6. Графіки реалізації сигналу ДЧМ і його обвідної (а), фрагментів обчислення його фази (б) та миттєвої частоти (в)

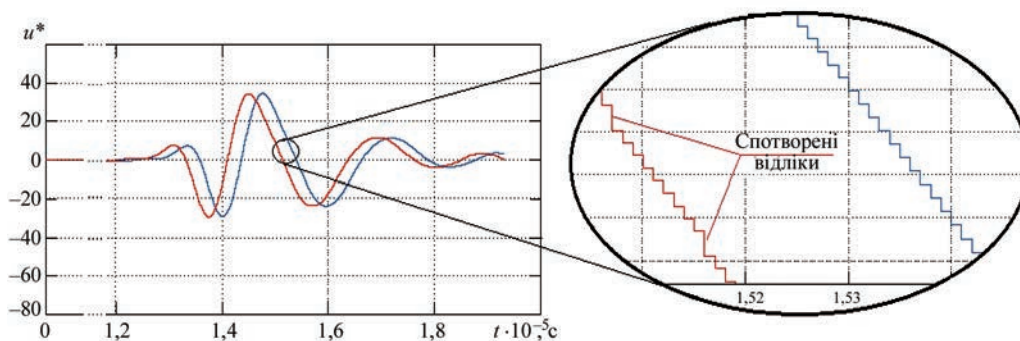


Рис. 7. Аналіз причини виникнення шумів функції $\hat{f}[j]$

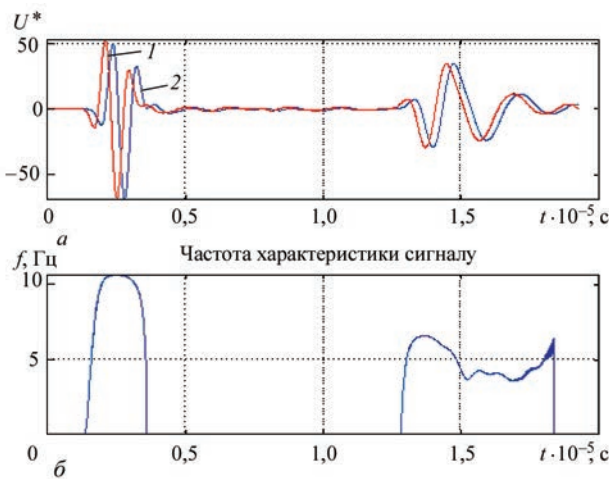


Рис. 8. Графіки досліджуваних радіоімпульсів (а) та їхні частотні характеристики (б): 1 – до фільтрації (червона), 2 – після фільтрації (синя)

на після проходження $u_{\text{вх}} [j]$ через фільтр через фільтр Баттерворда низької частоти 4-го порядку і частотою зрізу 2 МГц. Фільтри Баттерворда мають плоску амплітудо-частотну характеристику в полісі пропускання, і це дає змогу мінімізувати спотворення сигналу. Саме з метою зменшення фазових шумів у наведену на рис. 5 структуру введено цифровий фільтр.

На рис. 8, а наведено радіоімпульси, що відповідають підповерхневій та донній хвилям до та після фільтрації (як видно, застосований фільтр практично не змінив форму сигналів). Частотна характеристика цих сигналів наведена на рис. 8, б.

З аналізу отриманих результаті можна зробити наступні висновки:

- частота підповерхневого сигналу лежить в околі 1,05 МГц, модуляція частоти відсутня;
- донний сигнал суттєво трансформується за частотою та формою обвідної відносно підповерхневого сигналу та сигналу збудження;
- частота донного сигналу лежить в інтервалі 0,4...0,6 МГц;
- спостерігається модуляція миттєвої частоти донного сигналу впродовж часу його існування.

Зниження частот донного та підповерхневого радіоімпульсів частково може бути пов’язана з широкою діаграмою направленості ПЕП, широкою смугою частот зонduючого сигналу та зміною діаграми направленості ПЕП для різних частотних компонент зонduючого сигналу.

Висновки

Результати експериментальних досліджень сигналів ДЧМ, отриманих під час контролю товстостінних труб з поліетилену високої щільності, показали наступне:

- частота підповерхневої хвилі в ~2,1 рази менша за робочу частоту ПЕП, модуляції частоти не спостерігається;
- частота донного сигналу в середньому в ~4,5 разів менша за робочу частоту ПЕП;
- спостерігається, по-перше, трансформація форми та збільшення тривалості обвідної донного імпульсу, по-друге, модуляція його миттєвої частоти в межах радіоімпульсу, що може пояснюватися широкою діаграмою направленості ПЕП.

Показано, що процедура визначення частотної характеристики сигналу за їхньою дискретною фазовою характеристикою є дуже чутливою до фазових шумів, зменшення яких можна забезпечити за рахунок частотної фільтрації аналізованих сигналів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз фазової та амплітудної характеристик дифрагованих сигналів з метою пошуку нових інформаційних (діагностичних) ознак дефектів у трубах із поліетилену високої щільності.

Список літератури/References

1. Silk, M.G., Lidington, B.H. (1975) The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth. *Non-Destructive Testing*, 8(3), 146–151. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-1021\(75\)90024-9](https://doi.org/10.1016/0029-1021(75)90024-9)
2. Taghipour, M.H. (2015) Study and evaluation of advanced TOFD method for inspection of polyethylene pipes butt welding. *J. of Physical Science and Application*, 5(5), 349–355. DOI: <https://doi.org/10.17265/2159-5348/2015.05.005>
3. Charlesworth, J.P., Temple, J.A.G. (2001) *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction*. 2nd Ed. Baldock: Research Studies Press.
4. Ginzel, E. (2025) CIVA confirmation of frequency dependence of TOFD lateral wave. University of Waterloo. *e-Journal of Nondestructive Testing*. DOI: <https://doi.org/10.58286/31565>
5. Boháček, M., Mičian, M., Koňár, R., Hlavatý, I. (2017) Ultrasonic testing of butt weld joint by TOFD technique. *Manufacturing Technology*, 17(6), 842–847. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/6/842>
6. Temple, J.A.G. (1984) The amplitude of ultrasonic time-of-flight diffraction signals compared with those from a reference reflector. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 16, 145–159. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(84\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(84)90063-2)
7. Mayworm, R.C., Alvarenga, A.V., Costa-Félix, R.P.B. (2015) A metrological based realization of time-of-flight diffraction technique. *Physics Procedia*, 70, 590–593. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.029>
8. Nath, S.K., Balasubramaniam, K., Krishnamurthy, C.V., Narayana, B.H. (2010) Reliability assessment of manual ultrasonic time-of-flight diffraction inspection for complex geometry components. *NDT & E International*, 43(2), 152–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.10.007>
9. Ogilvy, J.A., Temple, J.A.G. (1983) Diffraction of elastic waves by cracks: Application to time-of-flight inspection. *Ultrasonics*, 21(6), 259–269. DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(83\)90058-6](https://doi.org/10.1016/0041-624X(83)90058-6)
10. Crawford, S.L., Cumblidge, S.E., Doctor, S.R., Hall, T.E., Anderson, M.T. (2008) *Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion*. Technical Letter Report JCN N6398, Task 2D. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory.
11. Kenzie, B., Speck, J. (2005) Developments in integrity management with TOFD inspection. *Inspectioning J.* <https://doi.org/10.1016/j.insp.2005.08.001>

- inspectioneering.com/journal/2005-07-01/273/developments-in-integrity-mana
12. ДСТУ EN 12201-1:2018. Системи трубопроводів для водопостачання, дренажу та каналізації під тиском. Поліетилен (ПЕ). Частина 1. Загальні положення. Київ, ДП «УкрНДНЦ».
DSTU EN 12201-1:2018. *Piping systems for water supply, drainage and sewerage under pressure. Polyethylene (PE). Part 1. General provisions.* Kyiv, State Enterprise «UkrNDNC» [in Ukrainian].
 13. Correia, C. (2017) TOFD examination of HDPE butt weld fusion joints. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 22(6), 1–11. https://www.academia.edu/74628863/TOFD_Examination_of_HDPE_Butt_Weld_Fusion_Joints
 14. Pettigrew, I.G. (2014) Advanced ultrasonic inspection of HDPE welds. In: *Proceedings of the Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia, OTC-25065-MS. DOI: <https://doi.org/10.4043/25065-MS>
 15. Qi, G., Li, Y., Ding, N. (2019) Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 677(2), 022050. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022050>
 16. Ginzel, E. (2025) CIVA confirmation of frequency dependence of TOFD lateral wave. *e-Journal of Nondestructive Testing*. DOI: <https://doi.org/10.58286/31565>
 17. Babak, V., Babak, S., Eremenko, V., Kuts, Y., Myslovych, M., Scherbak, L., Zaporozhets, A. (2021) *Models and measures in measurements and monitoring*. Cham: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>
 18. Babak, V., Babak, S., Eremenko, V., Kuts, Y., Myslovych, M., Scherbak, L. (2023) Application of discrete Hilbert transform to estimate the characteristics of cyclic signals. In: *Zaporozhets, A. (ed.) Systems, decision and control in energy IV*. Cham: Springer, pp. 93–115. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_5
 19. Лазарев Ю.Ф. (2013) *Довідник з MATLAB: електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування*. Київ, НТУУ «КПІ».
Lazarev, Y.F. (2013) *MATLAB Handbook: an electronic textbook for course and diploma design*. Kyiv, NTUU «KPI» [in Ukrainian].

ANALYSIS OF SIGNAL STRUCTURE IN HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PIPE INSPECTION USING THE TIME-OF-FLIGHT DIFFRACTION TECHNIQUE

S.M. Glabets¹, V.S. Eremenko¹, Yu.V. Kuts^{1,2}

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: glabets@gmail.com

²Institute of General Power Engineering of the NAS of Ukraine. 172 Antonovycha Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: y.kuts@ukr.net

The article presents the results of experimental studies of the subsurface and bottom signals obtained during the inspection of thick-walled high-density polyethylene (HDPE) pipes using the time-of-flight diffraction (ToFD) method. The experimental signals were obtained using an OmniScan SX ultrasonic flaw detector. Analysis of the signal envelope and phase was performed in the MatLab environment. It is shown that the envelope and frequency of the received signals, in particular the subsurface and bottom ones, differ significantly from the nominal values of the respective characteristics of excitation signals of the piezoelectric transducers, which must be taken into account during inspection and interpretation of the testing results, as well as in the search for and justification of new diagnostic features. 19 Ref., 8 Fig.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing, time-of-flight diffraction, welded joint of polyethylene pipes

ORCID

Глабець С.М. – <https://orcid.org/0009-0004-2740-9209>, Єременко В.С. – <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>,

Куц Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8493-9474>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

С.М. Глабець

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37.

E-mail: s.glabets@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.М. Глабець, В.С. Єременко, Ю.В. Куц (2026) Дослідження структури сигналів при контролі труб з поліетилену високої щільності дифракційно-часовим методом. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 01, 47–53.

DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.05>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 09.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 27.03.2026

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 23.04.2026

