

# ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

---

УДК 620.19:681.518.5

## АНАЛІЗ ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ СТАНУ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ

П. Й. Єлісєєв, Д. О. Ковальов, О. Г. Архипов

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

E-mail: petr.eliseev@list.ru, kovalovdanyil@gmail.com

Розглянуто систему циклічно-навантажена сталь–електроліт. Кінетика корозійно-механічного розвитку тріщини контролюється потенціометричним методом. Сигнал, що надходить під час руйнування сталі, має три складові: повільне падіння потенціалу, короточасні імпульси, що виникають у момент розвитку тріщини, і шум, обумовлений сторонніми чинниками. На першому етапі аналізу з сигналу вилучається методом фільтрації низькочастотний тренд. Далі, статистичними методами встановлюють параметри шуму та виділяють інформаційний імпульсний високочастотний сигнал. Послідовність появи імпульсів та її інтенсивність дають змогу оцінювати поточний стан об'єкта і прогнозувати залишковий ресурс.

**Ключові слова:** імпульс, різниця потенціалів, корозійно-механічне руйнування, фільтрація, статистичні оцінки.

## ANALYSIS OF THE PULSE METHOD FOR CHECKING THE STATE OF CORROSION-MECHANICAL FRACTURE OF EQUIPMENT

P. I. Eliseyev, D. O. Kovalov, O. G. Arkhypov

V. Dahl East Ukrainian National University

The system of the cyclically loaded steel–electrolyte is considered. The kinetics of corrosion-mechanical propagation of a crack is controlled by the potentiometric method. The signal that appears during the process of steel fracture includes three parameters namely: potential decrease, short-term pulses and noise, fracture generated by external factors. The first step of analysis is an exclusion of low-frequency trend from the signal by the filtration method. Further, noise parameters by statistical methods and informational pulsed high-frequency signal are extracted. The sequence of appearance of the pulses and intensity of their appearance allows the estimation of the current state of the equipment and allows us to predict the residual life.

**Keywords:** impulse, potential, corrosion-mechanical damage, filtering, statistical estimate.

На сучасних підприємствах під час експлуатації виробничого обладнання з часом гостро виникає питання визначення його корозійного стану та залишкового ресурсу. Особливо це стосується обладнання хімічної та нафтогазопереробної промисловості. При цьому в цих галузях найпоширеніші корозійні процеси в середовищі рідких електролітів.

Для об'єктивного оцінювання стану обладнання та його залишкового ресурсу застосовують системи корозійного моніторингу найвразливіших ділянок технологічних об'єктів [1, 2].

Одним з перспективних методів моніторингу корозійно-механічного руйнування обладнання є імпульсний метод [3, 4]. Він полягає в аналізі динаміки утворення і розвитку тріщин та інших видів пошкоджень обладнання за допомогою потенціометричних вимірювань.

© П. Й. Єлісєєв, Д. О. Ковальов, О. Г. Архипов, 2015

Цей метод має високу чутливість та стабільність результатів. Поряд з цим значною проблемою систем контролю, побудованих на імпульсному методі, є забезпечення об'єктивності результатів, які характеризують оціночні параметри корозійного стану обладнання. Складність задачі обумовлена тим, що корозійні процеси є низькопотенціальними. Водночас значення потенціалів завод виробничих процесів в обладнанні, на багато порядків вищі. Таким чином, задача відокремлення цільової інформації, за якою оцінюють корозійний стан обладнання, є дуже складною та нетривіальною.

Мета роботи – удосконалити інформаційне забезпечення електрохімічного імпульсного методу контролю шляхом аналізу складу сигналу, що надходить від системи моніторингу, та розробити методи підвищення точності одержуваної інформації.

**Методика досліджень.** Оскільки реальний об'єкт дослідження (наприклад, технологічний апарат у хімічному виробництві) є складною системою, що продукує разом з інформаційним сигналом багато сигналів завод, прийняли рішення замінити його фізичною моделлю. Такий підхід дав змогу опрацювати методики та алгоритм виділення інформаційного сигналу системи із його суми з заводами. Фізична модель, аналогічно реальному об'єкту, продукує два види завод відповідно до системи контролю: зовнішні (продукуються технологічним об'єктом контролю) та внутрішні (складовими частинами системи моніторингу). Особливістю сигналу модельних завод є його висока однорідність.

Фізична модель, яка імітує систему електрохімічного моніторингу разом з технологічним об'єктом, наведена на рис. 1. Модельний час 3...4 години.

Як модель технологічного об'єкта моніторингу використовували відрізки труб з нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т, діаметром 32 мм, товщиною стінки 2 мм та довжиною 500 мм. Робоче середовище 3%-й водний розчин NaCl. Для пришвидшення руйнування всередині труби нанесли гострий концентратор напружень трикутного профілю. Трубу циклічно навантажували з частотою 5 Гц і амплітудою коливань 11 мм. Середня температура під час експерименту становила 15°C.

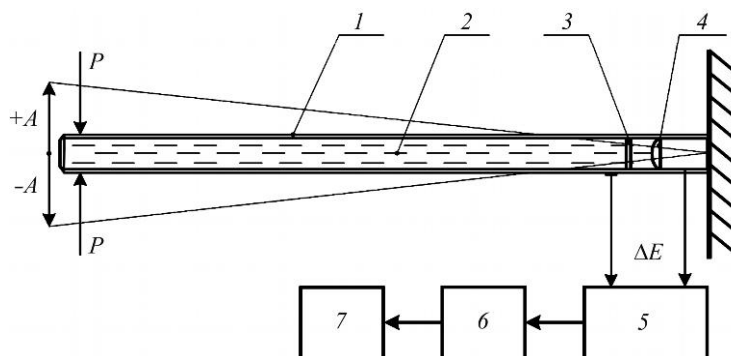


Рис. 1. Схема імпульсного контролю: 1 – об'єкт моніторингу (відрізок труби); 2 – 3%-й водний розчин NaCl; 3 – концентратор напружень; 4 – одноелектродний електрохімічний датчик; 5 – блок вводу аналогового сигналу (нормувальний перетворювач); 6 – аналого-цифровий перетворювач; 7 – контролер.

Один кінець досліджуваного зразка 1 нерухомо закріплювали. До другого кінця прикладали циклічні зусилля. Внутрішній об'єм труби заповнювали 3%-им розчином NaCl, в який занурювали одноелектродний електрохімічний датчик 4. Другим електродом вимірювальної системи була стінка труби 1. На внутрішньому боці на відстані 25 мм від місця закріплення нанесли трикутний концентратор напружень глибиною 1 мм. Різницю електрохімічних потенціалів  $\Delta E$  між елек-

тродом 4 і стінкою труби 1 передавали до блоку вводу аналогового сигналу (нормувального перетворювача) 5 та далі до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 6. Оцифрований сигнал передавали до контролера 7 персонального комп'ютера [5].

Моніторинг корозійно-механічного руйнування технологічних об'єктів за електрохімічним імпульсним методом здійснюється за двома параметрами: різницею електрохімічних потенціалів  $\Delta E$  та інтенсивністю появи імпульсів різниці електрохімічних потенціалів  $\theta(\Delta E)$  [3, 4]. Імпульсом вважають коротку за часом стрибкоподібну зміну  $\Delta E$ , яка виникає внаслідок розвитку корозійної тріщини у вершині концентратора напружень 3.

**Результати досліджень.** Методи та алгоритм виділення корисного сигналу, який характеризує етап корозійно-механічного руйнування об'єкта, дослідили на фізичній моделі (рис. 1).

Корозійно-механічне руйнування обумовлюють зміни електрохімічних потенціалів у системі метал–середовище. Таким чином, вимірюючи значення електрохімічного потенціалу цієї системи, отримуємо інформацію про стан обладнання у результаті корозійно-механічного руйнування.

Різниця електрохімічних потенціалів, яка виникає на вході вимірювального перетворювача (двоелектродної системи), формує на його виході електрорушійну силу.

$$\Delta E(t) = \Delta E_{M1-P} - \Delta E_{P-M2},$$

де  $\Delta E(t)$  – різниця потенціалів;  $\Delta E_{M1-P}$  – різниця електрохімічних потенціалів на межі метал 1–розчин;  $\Delta E_{P-M2}$  – різниця електрохімічних потенціалів на межі розчин–метал 2.

Таким чином, отримуємо інформаційний сигнал про зміну стану корозійно-механічного руйнування об'єкта

$$x(t) = \varphi(\Delta E(t)).$$

Сформований сигнал вимірювальної інформації подається на вхід блока вводу аналогового сигналу (нормувального перетворювача), далі до АЦП та в оцифрованому вигляді до контролера. Слід зазначити, що отриманий сигнал залежить не лише від значення вимірюваної величини, але й від ряду інших величин, які тут є випадковими збуреннями.

Загальний вид функції вихідного сигналу системи моніторингу наведено на рис. 2.

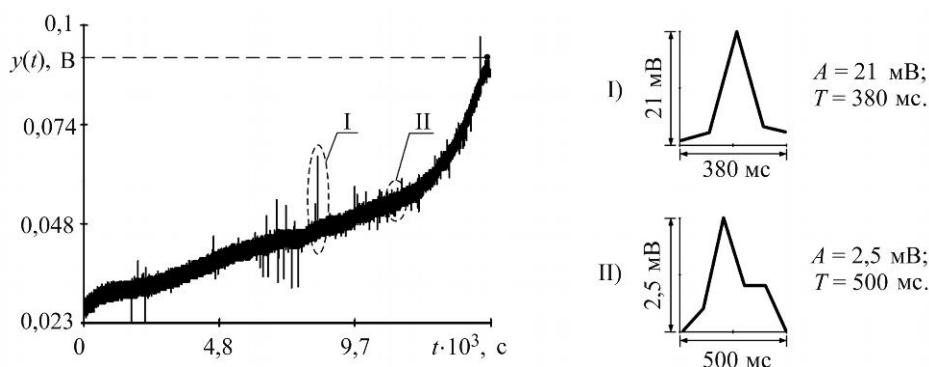


Рис. 2. Графік функції вихідного сигналу фізичної моделі (а) та розгортка виділених ділянок імпульсів (I) і шумів (II) та їхні характеристики: амплітуда ( $A$ ) і тривалість ( $T$ ) (б).

У загальному випадку, без урахування динамічної характеристики вимірювального каналу, зв'язок між сигналами на вході системи моніторингу та виході описують так:

$$y(t) = f[x(t), z(t)],$$

де  $y(t)$  – вихідний сигнал системи моніторингу;  $x(t)$  – сигнал корисної інформації;  $z(t)$  – сигнал завад, які впливають на вимірюваний сигнал (збурення).

З досліджень [3, 4] видно, що функція  $y(t)$  є адитивною функцією сигналу корисної інформації та завад

$$y(t) = x(t) + z(t).$$

Частотний аналіз функції  $y(t)$  показує, що до її складу входять дві чітко виражені складові – низькочастотна  $l(t)$  та високочастотна  $h(t)$ :

$$y(t) = l(t) + h(t).$$

Низькочастотна складова сигналу  $y(t)$  є результатом зміни електрохімічного потенціалу обладнання внаслідок корозійної втоми [1] (зовнішні завади). Цей процес досить повільний, відчутні зміни відбуваються протягом багатьох місяців і років. Під час експерименту модельний час значно пришвидшений, але все одно він становить декілька годин. Таким чином, період зміни низькочастотної складової на декілька порядків більший періоду високочастотної складової сигналу  $y(t)$ .

Високочастотна складова сигналу  $y(t)$  утворюється з імпульсів, які виникають під час зародження тріщин, їхнього розвитку та деяких інших процесів за механічних навантажень металу. Ці дані складають інформаційний ресурс системи контролю.

Крім того, до високочастотної складової сигналу  $y(t)$  додається також високочастотний сигнал шуму  $z(t)$ , який генерується елементами вимірювального каналу (внутрішні завади).

Перед тим як аналізувати стан корозійно-механічного руйнування імпульсним методом, необхідно розв'язати задачу відновлення корисної складової сигналу  $x(t)$  за вимірним сигналом  $y(t)$ . Отриманий таким чином інформаційний ресурс надалі застосовують для контролю та аналізу корозійно-механічного руйнування обладнання.

Розглянемо основні підходи для розв'язання цієї задачі.

Переважає більшість методів статистичної обробки сигналів виходять з того, що як інформаційний сигнал  $y(t)$ , так і сигнал шуму  $z(t)$  є стаціонарними випадковими процесами з відомими статистичними характеристиками: математичним сподіванням, дисперсією та автокореляційною функцією.

У цьому випадку високочастотний сигнал накладається на низькочастотний, що відображає загальний тренд зміни вимірюваного сигналу. Враховуючи суттєву різницю у частотних характеристиках сигналів, вилучити тренд з вимірюваного сигналу можна шляхом відповідної фільтрації. Можливість застосування фільтрації, а також якість результату значною мірою залежить від того, наскільки відрізняються частотні спектри складових функцій (близькість або перекриття спектрів). Аналіз результатів експерименту показує, що діапазони розглядуваних частот відрізняються, якнайменше, на порядок.

Структурний синтез оптимального фільтра – завдання досить складне. Тому на практиці, зазвичай, обмежуються параметричним синтезом фільтрів, тобто задають структуру передатної функції фільтра, після чого визначають її оптимальні параметри.

У роботі застосований фільтр Баттерворта (Butterworth filter) [6] із амплітудно-частотною характеристикою

$$G^2(\omega) = \frac{G_0^2}{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}},$$

де  $n$  – порядок фільтра;  $\omega_c$  – частота зрізу (частота з амплітудою 3 дБ);  $G_0$  – коефіцієнт підсилення за сталою складовою (підсилення на нульовій частоті).

Фільтри цього класу характеризуються тим, що їхня амплітудно-частотна характеристика максимально гладка на частотах смуги пропускання і знижується практично до нуля на частотах смуги глушення. До недоліків цього фільтра порівняно з іншими можна віднести пологіший спад характеристики. Цей недолік долається проектуванням фільтра вищого порядку, що ускладнює його реалізацію. Однак у цій роботі це не важливо, бо частотні смуги пропускання та глушення мають значну відмінність навіть попри суттєво ущільнений модельний час. Цілком задовільні результати одержані для фільтрів 4...7 порядків (рис. 3).

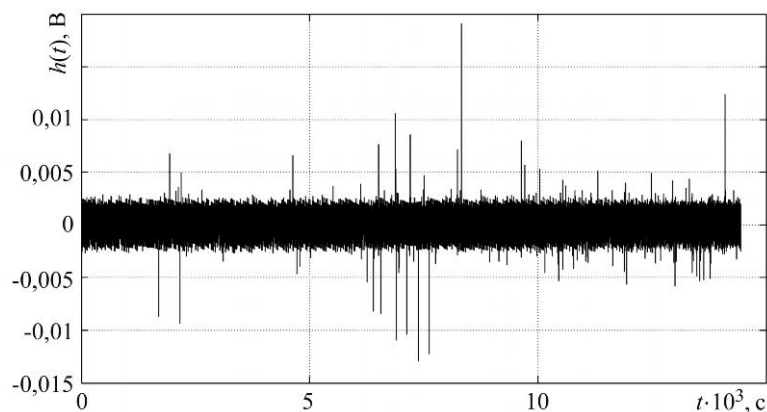


Рис. 3. Графік функції високочастотної складової  $h(t)$  вимірюваного сигналу.

На наступному кроці постає задача виділення високочастотного інформаційного сигналу із його суміші з сигналом шуму.

Порівняльний аналіз інформаційного та шумового сигналів показує, що їхні частотні параметри досить близькі, тому застосовувати частотні методи фільтрації не доцільно. Через те використаємо методи фільтрації, які базуються на відмінностях характеристик розподілу випадкових величин, якими є інформаційний та шумовий сигнали.

Апріорі приймаємо, що сигнал шуму генерується у системі вимірювання та обробки інформації елементами електричної схеми. Враховуючи велику кількість цих елементів та їхні складні взаємозв'язки, можна впевнено зазначити, що густина розподілу ймовірності сигналу шуму, який є функцією випадкової змінної, має характер, наближений до нормального розподілу. Це підтверджується додатковими дослідженнями фізичної моделі без циклічних навантажень, тобто без утворення та розкриття тріщин і, відповідно, без інформаційного сигналу. Сигнал шуму, який генерувався системою виміру, спочатку пропустили крізь фільтр високої частоти для усунення низькочастотної складової під час виходу системи на стаціонарний режим. Для підтвердження гіпотези про нормальність розподілу отриманих результатів, побудовано функцію густини розподілу експериментальних результатів (центровані значення  $\Delta E_0$ ) та стандартну функцію нормального розподілу з тими ж параметрами (математичне сподівання та дисперсія) (рис. 4).

Надалі виходимо з того, що високочастотний інформаційний сигнал генерується під впливом періодичної зовнішньої сили, яка має детермінований характер – циклічні навантаження з частотою 5 Гц. Не дивлячись на детермінованість впливу, утворення та розкриття тріщин розглядаємо як випадковий процес, за-

лежний від багатьох чинників. Тому поява високочастотного імпульсу зміни різниці потенціалів є подією випадковою, але вона, вочевидь, не матиме нормального розподілу. Виходячи з цього, припустимо, що значення вимірюваної величини, які не відповідають характеристикам нормального розподілу випадкової величини (статистичні викиди), як раз і є ознакою шуканого параметра.

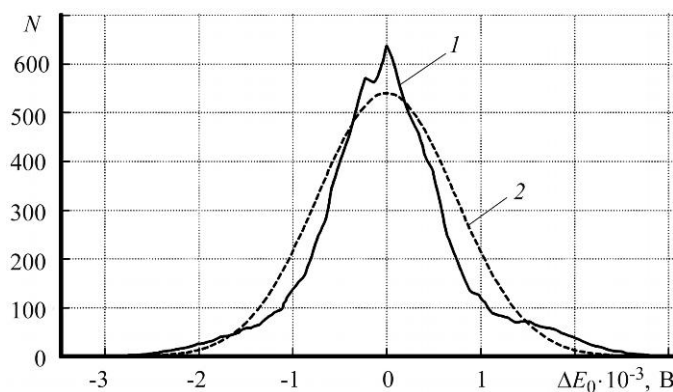


Рис. 4. Графік розподілу густини сигналу шуму (1) та стандартного нормального розподілу (2).

Алгоритм статистичної фільтрації реалізовано на основі тесту Граббса для одного викиду [7]. Цей метод застосовують для виділення аномальних результатів вимірів тільки за нормального закону.

Метод полягає в наступному. Нехай  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – вибірка отриманих даних, а  $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$  – побудований на вибірці варіаційний ряд. Перевіряється гіпотеза  $H_0$ , коли всі  $X_1, X_2, \dots, X_n$  належать одній генеральній сукупності. Для цього розраховують тестову статистику Граббса за формулою

$$G_n = \frac{X_{(n)} - \bar{X}}{S},$$

де

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}.$$

Для перевірки значущості найменшого результату спостереження

$$G_1 = \frac{X_{(1)} - \bar{X}}{S}.$$

Якщо значення тестової статистики більше за критичне, то тестовану позицію називають статистичним викидом і виключають з вибірки. Після цього перевірку повторюють для іншої позиції. При цьому, якщо викидом було найвище значення, то наступну перевірку виконують для мінімального значення.

Алгоритм повторюють поки з'являються статистичні викиди.

Зафіксувавши їх, отримали вибірку значень імпульсної зміни різниці потенціалів, яка є високочастотною складовою вимірюваної величини  $x(t)$  (рис. 5).

Адекватність одержаних результатів перевірено за допомогою експертних оцінок. Песимістична оцінка – ~88%, оптимістична – ~97%.

Подальший їх аналіз дозволяє з високою точністю контролювати стан поверхні об'єкта, швидкість утворення та розвитку тріщин на поверхні та інші показники корозійно-механічного руйнування металу. Для застосування розробленого імпульсного методу діагностування стану корозійно-механічного руйнування

обладнання необхідна його адаптація для умов експлуатації у режимі реального часу.

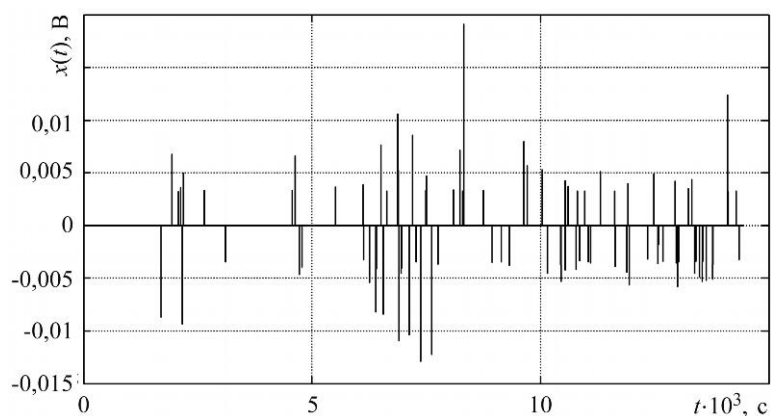


Рис. 5. Графік імпульсної складової вимірюваної величини  $x(t)$ .

### ВИСНОВКИ

Проаналізовано сигнал, який отримують потенціометричним методом і який свідчить про корозійно-механічне руйнування металу. Запропоновано та обґрунтовано методи, а також розроблено та експериментально перевірено алгоритми виділення окремих складових сигналу. На даних фізичної моделі перевірено адекватність одержаних результатів.

1. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: Сполом, 2008. – 302 с.
2. Розробка методу оцінки ступеня пошкодження обладнання нафтохімічної промисловості / М. С. Хома, В. І. Похмурський, О. Г. Архипов, В. А. Борисенко // 36. наук. статей “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. – 2009. – С. 149–154.
3. Архипов А. Г., Любимова-Зинченко О. В., Ковалев Д. А. Электрохимический импульсный метод мониторинга коррозионно-механических повреждений // Приборы и методы измерений. – 2012. – 1 (4) – С. 75–79.
4. Импульсный метод определения коррозионно-механического повреждения в среде электролитов / В. И. Похмурский, М. С. Хома, О. Г. Архипов, Д. А. Ковалев // Тез. докл. Междунар. конф. посвящена 110-летию со дня рождения чл.-кор. АН СССР Г. В. Акимова. Фундамент. аспекты корроз. материаловед. и защиты металлов от коррозии. – М., 2011. – С. 138.
5. Патент № 55489 Україна, МПК (2010) G01N 3/32, G01N 27/26. Імпульсний спосіб / В. І. Похмурський, М. С. Хома, П. О. Архипов та ін. – № u201008556. – Опубл. 10.12.2010; Бюл. № 23.
6. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
7. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. – М.: Стандартинформ, 2013. – 24 с.

Одержано 26.10.2015