

УДК 621.774:622.23/24]:620.039]:669.14.018.8

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ АНАЛІЗУ СТАНУ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

ЄЛІСЄЄВ П. Й. ^{1*}, *к.т.н., доц.*,
АРХИПОВ О. Г. ², *д.т.н, проф.*,
ЛЮБИМОВА-ЗИНЧЕНКО О. В. ³, *к.т.н., доц.*,
КАРПЮК Л. В. ⁴, *старший викладач*,
ЗАЙКА Р. Г. ⁵, *к.т.н., доц.*

^{1*}Кафедра обладнання хімічних підприємств, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля Технологічний інститут, вул.Донецька, 43, учбовий корпус, 93400, Северодонецьк, Луганська область, Україна, тел. +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

² Кафедра обладнання хімічних підприємств, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля Технологічний інститут, вул.Донецька, 43, учбовий корпус, 93400, Северодонецьк, Луганська область, Україна, тел. +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

³ Кафедра загальної та фізичної хімії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля Технологічний інститут, вул.Донецька, 43, лабораторний корпус, 93400, Северодонецьк, Луганська область, Україна, тел. 06452-2-89-95, 050-949-49-77, e-mail: aspirant-snu@i.ua

⁴ Кафедра обладнання хімічних підприємств, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля Технологічний інститут, вул.Донецька, 43, учбовий корпус, 93400, Северодонецьк, Луганська область, Україна, тел. +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

⁵ Кафедра загальної та фізичної хімії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля Технологічний інститут, вул.Донецька, 43, лабораторний корпус, 93400, Северодонецьк, Луганська область, Україна, тел. +38 (064) 28995, e-mail: zfx_kaf@sti.lg.ua

Анотація. *Мета.* Розглядається система: циклічно-навантажена сталь – електроліт. Кінетика корозійно-механічного розвитку тріщини контролюється потенціометричним методом. Сигнал, що надходить під час процесу деградації сталі, має три складові: повільне падіння потенціалу, короткочасні імпульси, що виникають у момент розвитку тріщини і шум, обумовлений сторонніми факторами. На першому етапі аналізу з сигналу вилучається методом фільтрації низькочастотний тренд. Далі, статистичними методами встановлюються параметри шуму та виділяється інформаційний імпульсний високочастотний сигнал. Послідовність появи імпульсів та інтенсивність їхньої появи дозволяє оцінювати поточний стан об'єкта і прогнозувати залишковий ресурс.

Ключові слова: імпульс; різниця потенціалу; корозійно-механічне руйнування; фільтрація; статистичні оцінки

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ КОРРОЗИЙНО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

ЕЛИСЕЕВ П. И. ^{1*}, *к.т.н., доц.*,
АРХИПОВ А. Г. ², *д.т.н, проф.*,
ЛЮБИМОВА-ЗИНЧЕНКО О. В. ³, *к.т.н., доц.*,
КАРПЮК Л. В. ⁴, *старший преподаватель*
ЗАЙКА Р. Г. ⁵, *к.т.н., доц.*

^{1*}Кафедра оборудования химических предприятий, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля Технологический институт, ул.Донецкая, 43, учебный корпус, 93400, Северодонецк, Луганская область, Украина, тел. +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

² Кафедра оборудования химических предприятий, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля Технологический институт, ул.Донецкая, 43, учебный корпус, 93400, Северодонецк, Луганская область, Украина, тел. +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

³ Кафедра общей и физической химии, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля Технологический институт, ул.Донецкая, 43, лабораторный корпус, 93400, Северодонецк, Луганская область, Украина, тел. 06452-2-89-95, 050-949-49-77, e-mail: aspirant-snu@i.ua

⁴ Кафедра оборудования химических предприятий, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля Технологический институт, ул.Донецкая, 43, учебный корпус, 93400, Северодонецк, Луганская область, Украина, тел. +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

⁵ Кафедра общей и физической химии, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля Технологический институт, ул.Донецкая, 43, лабораторный корпус, 93400, Северодонецк, Луганская область, Украина, тел. +38 (064) 28995, e-mail: zfx_kaf@sti.lg.ua

Аннотация. *Цель.* Рассматривается система: циклически-нагруженная сталь - электролит. Кинетика коррозионно-механического развития трещины контролируется потенциометрическим методом. Сигнал, который поступает во время процесса деградации стали, имеет три составляющих: медленное падение потенциала, кратковременные импульсы, которые возникают в момент развития трещины и шум, обусловленный посторонними факторами. На первом этапе анализа из сигнала изымается методом фильтрации низкочастотный тренд. Далее, статистическими методами устанавливаются параметры шума и выделяется информационный импульсный высокочастотный сигнал. Последовательность появления импульсов и интенсивность их появления позволяет оценивать текущее состояние объекта и прогнозировать остаточный ресурс.

Ключевые слова: импульс; разность потенциала; коррозионно-механическое разрушение; фильтрация; статистические оценки

DEVELOPMENT OF ALGORITHM OF ANALYSIS OF THE STATE OF CORROSIVE AND MECHANICAL DESTRUCTION OF THE OBJECT

ELISEEV P. I ^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc.*,
ARHIPOV A. G. ², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
LJUBIMOVA-ZINCHENKO O. V. ³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc.*,
KARPJUK L. V. ⁴, *senior lecturer*
ZAIKA R. G. ⁵, *Cand. Sc. (Tech.). Assoc.*

^{1*} Department of equipment of chemical enterprises, East Ukrainian National University n.a. V. Dal Technological institute, Donetskaya Street 43, educational Building, 93400, Severodonetsk, Lugansk region, Ukraine, Contact tel.: +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

² Department of equipment of chemical enterprises, East Ukrainian National University n.a. V. Dal Technological institute, Donetskaya Street 43, educational Building, 93400, Severodonetsk, Lugansk region, Ukraine, Contact tel.: +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

³ Department of General and Physical Chemistry, East Ukrainian National University n.a. V. Dal Technological institute, Donetskaya Street 43, laboratory building, educational Building, 93400, Severodonetsk, Lugansk region, Ukraine, Contact tel.: 06452-2-89-95, 050-949-49-77, e-mail: aspirant-snu@i.ua

⁴ Department of equipment of chemical enterprises, East Ukrainian National University n.a. V. Dal Technological institute, Donetskaya Street 43, educational Building, 93400, Severodonetsk, Lugansk region, Ukraine, Contact tel.: +38 (064) 54802, e-mail: oxp_kaf@sti.lg.ua

⁵ Department of General and Physical Chemistry, East Ukrainian National University n.a. V. Dal Technological institute, Donetskaya Street 43, laboratory building, educational Building, 93400, Severodonetsk, Lugansk region, Ukraine, Contact tel.: +38 (064) 28995, e-mail: zfx_kaf@sti.lg.ua

Abstract. Purpose. We consider the system: cyclic-loaded steel - electrolyte. The kinetics of corrosion-mechanical development of cracks is controlled by potentiometric method. The signal in the process of degradation of steel, has three components: a slow decline in capacity, short pulses occurring at the time of the development of cracks and noise due to extraneous factors. At the first stage of the analysis signal is removed by filtering the low frequency trend. Next, set the parameters of statistical methods of noise and information stands pulse frequency signal. The sequence of the pulses and the intensity of their occurrence allows to evaluate the current state of the object and predict the residual life.

Key words: momentum, potential difference, corrosion-mechanical destruction, filtering, statistical estimates.

Вступ

При експлуатації виробничого обладнання з часом гостро виникає питання визначення корозійного стану обладнання та прогнозування його залишкового ресурсу. Системи постійного корозійного моніторингу і контролю найбільш вразливих ділянок технологічних об'єктів допомагають об'єктивно оцінювати стан обладнання та його залишковий ресурс.

На даному етапі немає універсального методу корозійного моніторингу і контролю, який би був ефективним для будь-яких матеріалів та середовищ. Тому дуже важливо в кожному конкретному випадку правильно підібрати найбільш ефективну комбінацію цих методів. Для корозійних процесів за участю рідких електролітів [1,2,3] найбільш застосовуваними є електрохімічні методи контролю корозії. Вони характеризуються високою універсальністю, високою чутливістю і точністю. На їх основі розробляються методи прогнозування залишкового

ресурсу обладнання [3,4]. Дана робота присвячена одному з перспективних електрохімічних методів корозійного контролю та моніторингу – електрохімічному імпульсному методу контролю корозійно-механічного руйнування технологічних об'єктів [4, 5].

Мета

Метою даної роботи є удосконалення інформаційного забезпечення електрохімічного імпульсного методу моніторингу завдяки аналізу складу сигналу, що надходить від системи моніторингу та розробки методів підвищення вірогідності одержуваної інформації.

Методика досліджень

Дослідження проводились на фізичній моделі, що імітує систему електрохімічного моніторингу разом з технологічним об'єктом (рис.1). Модельний час складав 3...4 години.

В якості технологічного об'єкта моніторингу використовували відрізки труб з нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т, діаметром 32 мм, товщиною стінки 2 мм, довжиною 500 мм. Робочим середовищем був 3%-й водний розчин хлориду натрію (NaCl). Для пришвидшення процесу руйнування всередині труби було нанесено гострий концентратор напружень трикутного профілю. Труба піддавались циклічним навантаженням з частотою 5 Гц і амплітудою коливань 11 мм. Середня температура в ході експерименту складала 15 °С.

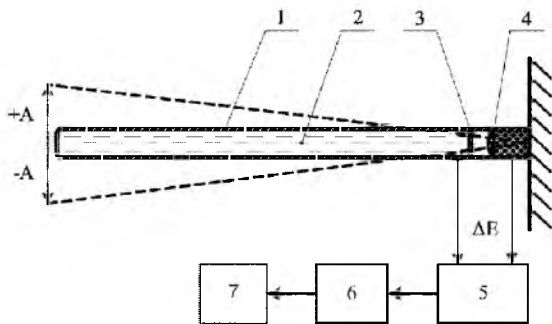


Рис. 1. Схема імпульсного контролю :/ Scheme Impulse control:

1 – об'єкт моніторингу (відрізок труби); / 1 - monitoring object (pipe section); 2 – 3 %-ий водний розчин NaCl; / 2-3% aqueous solution of NaCl; 3 – концентратор напружень; / 3 - stress concentrator; 4 – одноелектродний електрохімічний датчик; / 4 - single-electrode electrochemical sensor; 5 – блок вводу аналогового сигналу (нормуючий перетворювач); / 5 - block input of the analog signal (normalizing converter); 6 – аналого-цифровий перетворювач; / 6 - analog-to-digital converter; 7 – контролер. / 7 - controller.

Моніторинг та контроль корозійно-механічного руйнування технологічних об'єктів за електрохімічним імпульсним методом здійснюється за двома параметрами: різницею електрохімічних потенціалів ΔE та інтенсивністю появи імпульсів

різниці електрохімічних потенціалів ΔE [4, 5]. Імпульсом вважається коротка за часом стрибкоподібна зміна ΔE , що виникає внаслідок розвитку корозійної тріщини у вершині концентратора напружень 3.

Результати досліджень та їх обговорення

Розглянуто фізичну модель (рис. 1) як систему одержання та перетворення інформації. Процеси корозійно-механічного руйнування, що мають місце в системі, обумовлюють зміни електрохімічних потенціалів у системі метал – розчин. Таким чином, вимірюваною величиною є різниця електрохімічних потенціалів. Ця величина впливає на вхід вимірювального перетворювача, в якості якого виступає двоелектродна система, на виході якої формується електрорушійна сила (ЕРС).

$$x(t) = \Delta E(t) = \Delta E_{M1-P} - \Delta E_{P-M2}, \quad (1)$$

де $\Delta E(t)$ – електрорушійна сила;

ΔE_{M1-P} – різниця електрохімічних потенціалів на границі метал 1 – розчин;

ΔE_{P-M2} – різниця електрохімічних потенціалів на границі розчин – метал 2.

Сформований сигнал вимірювальної інформації подається на вхід блоку вводу аналогового сигналу (нормуючого перетворювача) та далі до аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Слід зазначити, що отриманий сигнал $y(t)$ залежить не тільки від значення вимірюваної величини, але й від ряду інших випадкових величин, так званих збурень

$$y(t) = f[x(t), z(t)] \quad (2)$$

де z – величина, що впливає на вимірювану величину (збурення).

Загальний вид функції $y(t)$ вихідного сигналу наведено на рис. 2.

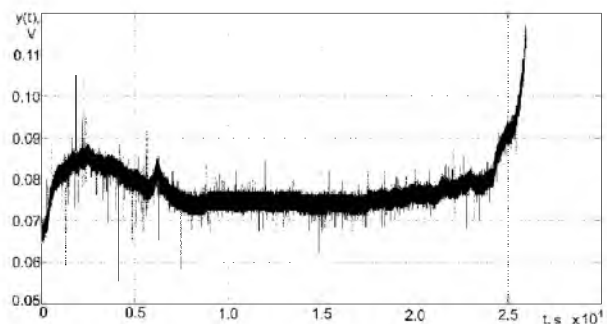


Рис. 2. Графік функції вихідного сигналу фізичної моделі / Graph of the function of the output signal of the physical model

З досліджень [4, 5] випливає, що функція (1) є адитивною функцією

$$y(t) = x(t) + z(t) \quad (3)$$

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

$$y(t) = l(t) + h(t) \quad (4)$$

де $l(t)$ – низькочастотна складова сигналу $y(t)$;
 $h(t)$ – високочастотна складова сигналу $y(t)$.

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

Високочастотна складова сигналу $y(t)$ утворюється з імпульсів, що виникають в процесах утворення тріщин, їхнього розвитку та деяких інших процесів під час механічних навантажень металу.

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

Перед тим як здійснювати аналіз стану корозійно-механічного руйнування імпульсним методом, необхідно розв'язати задачу відновлення високочастотної складової сигналу вимірюваної величини $x(t)$ за отриманим сигналом $y(t)$ [6].

Розглянемо основні підходи до 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 даному випадку високочастотний сигнал накладається на низькочастотний, що відображає загальний тренд зміни вимірюваного сигналу. Вилучення тренду з вимірюваного сигналу можна здійснити шляхом відповідної фільтрації. Можливість застосування фільтрації, а також якість результату в значній мірі залежить від того, наскільки відрізняються частотні спектри складових функцій (близькість або перекриття спектрів). Аналіз результатів проведеного експерименту показує, що діапазони частот, які ми розглядаємо, відрізняються, як найменше, на порядок.

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

У роботі був застосований фільтр Баттерворта (Butterworth filter) із амплітудно-частотною характеристикою

$$G^2(\omega) = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (5)$$

де n – порядок фільтра;

ω_c – частота зрізу (частота, на якій амплітуда дорівнює -3dB);

G_0 – коефіцієнт підсилення за постійною складовою (підсилення на нульовій частоті).

Фільтри цього класу характеризуються тим, що їхня АЧХ максимально гладка на частотах полоси пропускання і знижується практично до нуля на частотах полоси заглушення. До недоліків цього фільтра порівняно з іншими типами можна віднести більш пологий спад характеристики. Цей недолік долається проектуванням фільтра більш високого порядку, що ускладнює його реалізацію. Однак у даній роботі це не є суттєвим, бо частотні смуги пропускання та заглушення мають значну відмінність навіть попри високо ущільненому модельному часі. Цілком задовільні результати одержані для фільтрів 4...7 порядків (рис. 3).

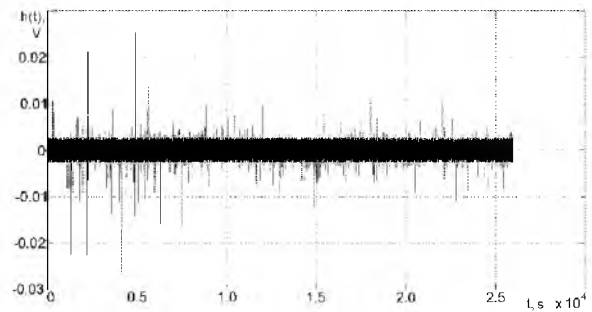


Рис. 3. Графік функції високочастотної складової $h(t)$ вимірюваного сигналу / Graph of the function high frequency component of the measured signal

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

Порівняльний аналіз інформаційного та шумового сигналу показують, що їхні частотні параметри досить близькі, тому застосування частотних методів фільтрації не доцільно. Виходячи з цього, застосуємо методи фільтрації, що базуються на відмінностях характеристик розподілення випадкових величин, якими є інформаційний та шумовий сигнали.

Апріорі приймається, що сигнал шуму генерується у системі вимірювання та обробки інформації елементами електричної схеми. Виходячи з великої кількості цих елементів та їхніх складних взаємозв'язків можна впевнено зазначити, що щільності розподілу ймовірності шумового сигналу, який є функцією випадкової змінної, має характер, наближений до нормального розподілу. Це

підтверджується додатковими дослідженнями фізичної моделі без циклічних навантажень, тобто без наявності ефекту утворення та розкриття тріщин і, відповідно, без наявності інформаційного сигналу. Сигнал шуму, що генерувався системою виміру, спочатку був, як і в попередньому випадку, пропущений скрізь фільтр високої частоти (рис. 4).

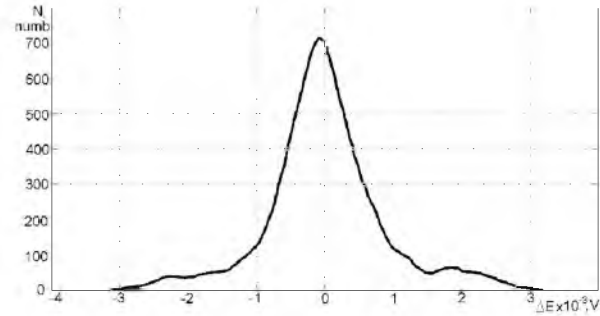


Рис. 4. Графік щільності ймовірності шумового сигналу / Graph of the probability density of the noise signal

Надалі будемо виходити з того, що високочастотний інформаційний сигнал генерується під впливом періодичної зовнішньої сили, що має детермінований характер – циклічні навантаження з частотою 5 Гц. Не дивлячись на детермінованість впливу, утворення та розкриття тріщин ми розглядаємо як випадковий процес, залежний від багатьох чинників. Тому поява високочастотного імпульсу зміни різниці потенціалів є подією випадковою, але вона вочевидь не буде мати нормальний розподіл. Виходячи з цього припустимо, що значення вимірюваної величини, які не відповідають характеристикам нормального розподілення випадкової величини (статистичні викиди), як раз і є відлунням шуканого параметру.

Реалізуємо алгоритм статистичної фільтрації на основі тесту Граббса для одного викиду [7,8]. Цей метод застосовується для виділення аномальних результатів вимірів тільки у випадку нормального закону.

Метод полягає в наступному. Хай X_1, X_2, \dots, X_n – вибірка отриманих даних, $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$ побудований на виборці варіаційний ряд. Перевіряється гіпотеза H_0 у тому, що всі X_1, X_2, \dots, X_n належать однієї генеральної сукупності. Для перевірки цієї гіпотези розраховують тестову статистику Граббса за формулою:

$$G_n = \frac{X_{(n)} - \bar{X}}{s}, \quad (6)$$

де $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$;

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

Для перевірки значущості найменшого результату спостереження

$$G_1 = \frac{X_{(1)} - \bar{X}}{s} \quad (7)$$

У випадку, якщо значення тестової статистики більше критичного значення, позицію, що тестують, називають статистичним викидом в виключають з вибірки. Після цього перевірку повторюють для іншої позиції. При цьому, якщо викидом було найвище значення, то наступну перевірку проводять для мінімального значення.

Алгоритм повторюється до тих пір, поки з'являються статистичні викиди [9,10].

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

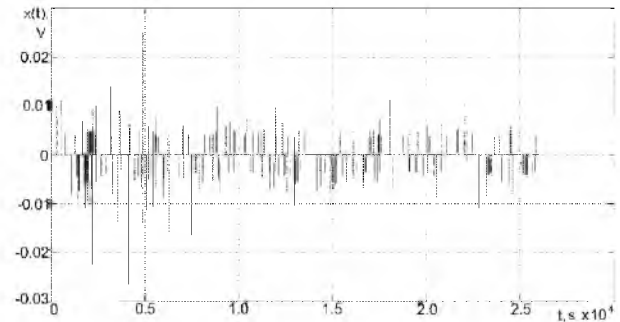


Рис. 5. Графік імпульсної складової вимірюваної величини $x(t)$ / Graph pulsed component of the measured quantity $x(t)$

Адекватність одержаних результатів було у першу чергу перевірено за допомогою експертних оцінок. Песимістична оцінка складала біля 88%, оптимістична – близько 97%.

Подальша обробка одержаних даних дозволяє з високою точністю контролювати якість стану поверхні об'єкту, швидкість процесів утворення та розвитку тріщин на поверхні та інші показники корозійно-механічного руйнування металу [11,12,13].

Залишається питання обробки результатів виміру у реальному часі. Розв'язання цієї задачі дозволить отримувати актуальні значення досліджуваної величини у будь який час. Але, враховуючі вельми повільну зміну параметру в умовах реального об'єкту, постановку задачі у такому формулюванні можна поставити після розв'язання більш актуальних проблем принципового характеру.

Висновки

1. Проведено аналіз сигналу, що отримується потенціометричним методом, який свідчить про процеси корозійно-механічного руйнування металу.

2. Запропоновано та обгрунтовано методи виділення окремих складових сигналу.

3. Розроблено та експериментально перевірено алгоритми виділення окремих складових сигналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Похмурський В. І. Корозійна втома металів і сплавів / В. І. Похмурський, М. С. Хома – Львів: Сполум, 2008. – 301 с. old.lp.edu.ua/index.

Pohmurs'kij V. I. Korozijnna vtoma metaliv i splaviv / V. I. Pohmurs'kij, M. S. Homa – L'viv: Spolom, 2008. – 301 s.

2. Хома М. С. Розвиток електрохімічних методів корозійного моніторингу обладнання хімічної та нафтопереробної промисловості / М. С. Хома, О. Г. Архипов // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – Спец. вип. № 8. Т.2 – С. 543-548.

Homa M. S. Rozvitok elektrohimičnih metodiv korozijnogo monitoringu obladnannja himičnoї ta naftopererobnoї promislivosti / M. S. Homa, O. G. Arhipov // Fiz.-him. mehanika materialiv. – 2010. – Spec. vip. № 8. T.2 – S. 543-548.

3. Никифорчин Г. Особливості протекторного захисту від корозії навантажених низьколегованих сталей / Г. Никифорчин, О. Цирульник, Б. Генег // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – Т.1, Спецвип. №4. – С. 360-364. uk.orgsun.com.

Nikiforčin G. Osoblivosti protekturnogo zahistu vid korozii navantazhenih niz'kolegovanih stalej / G. Nikiforčin, O. Cirul'nik, B. Genega // Fiz.-him. mehanika materialiv. – 2004. – T.1, Specvip. №4. – S. 360-364.

4. Похмурський В. Умови та критерій корозійно-втомного руйнування корозійнотривких сталей / В. Похмурський, М. Хома // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – Спец. вип. № 1. – С. 5-10. lp.edu.ua/sites/default/files/Tezy_ISUMEL-11.pdf.

Pohmurs'kij V. Umovi ta kriterij korozijnno-vtomnogo rujnuvannja korozijnotrivkih stalej / V. Pohmurs'kij, M. Homa // Fiz.-him. mehanika materialiv. – 2002. – Spec. vip. № 1. – S. 5-10.

5. Розробка методу оцінки ступеня пошкодження обладнання нафтохімічної промисловості / М. С. Хома, В. І. Похмурський, О. Г. Архипов, В. А. Борисенко / Збірник наук. статей "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин" – 2009. – С. 149-154. www1.nas.gov.ua.

Rozrobka metodu ocinki stupenja poshkodzhennja obladnannja naftohimičnoї promislivosti / M. S. Homa, V. I. Pohmurs'kij, O. G. Arhipov, V. A. Borisenko / Zbirnik nauk. statej "Problemi resursu i bezpeki ekspluatacij konstrukcij, sporud ta mashin" – 2009. – S. 149-154.

6. Электрохимический импульсный метод мониторинга коррозионно-механических повреждений / Архипов А. Г., Любимова-Зинченко О. В., Ковалёв Д. А. // Минск : Приборы и методы измерений. – 2012. – 1(4) – С. 75-79. <http://rep.bntu.by/handle/data/4108>.

Jelektrohimičeskij impul'snyj metod monitoringa korrozionno-mehaničeskikh povrezhdenij / Arhipov A. G.,

4. На даних фізичної моделі перевірено адекватність одержаних результатів.

Ljubimova-Zinchenko O. V., Koval'ov D. A. // Minsk : Pribory i metody izmerenij. – 2012. – 1(4) – S. 75-79.

7. Архипов О.Г. Застосування імпульсного методу для оцінки пошкоджені обладнання і визначення залишкового ресурсу / О.Г. Архипов // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2009. - № 2[132], ч.2. – С. 84-89. fan.ru/wievjob.

Arhipov O.G. Zastosuvannja impul'snogo metodu dlja ocinki poshkodzhen' obladnannja i viznachennja zalishkovogo resursu / O.G. Arhipov // Visnik SNU im. V. Dalja. – 2009. - № 2[132], ch.2. – S. 84-89.

8. Импульсный метод определения коррозионно-механического повреждения в среде электролитов / В. И. Похмурский, М. С. Хома, О. Г. Архипов, Д. А. Ковалев // Тезисы докладов. Междунар. конф. посвящена 110-летию со дня рождения член-кор. АН СССР Г. В. Акимова. Фундамент. аспекты корроз. материаловед. и защиты металлов от коррозии. – Москва, 2011. – С. 138. [http://www.sti.lg.ua/files/nauka/vestnik/vestnik_%2013\(202\).pdf](http://www.sti.lg.ua/files/nauka/vestnik/vestnik_%2013(202).pdf).

Impul'snyj metod opredelenija korrozionno-mehaničeskogo povrezhdenija v srede jelektrolitov / V. I. Pohmurs'kij, M. S. Homa, O. G. Arhipov, D. A. Kovalev // Tezisy dokladov. Mezhdunar.konf. posvjashhena 110-letiju so dnja rozhdenija chlen-kor. AN SSSR G. V. Akimova. Fundament. aspekty korroz. materialoved. i zashhity metallov ot korrozii. – Moskva, 2011. – S. 138.

9. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с. <http://mexalib.com/view/3365>.

Aj'ficher Je. Cifrovaja obrabotka signalov. Praktičeskij podhod / Je. Aj'ficher, B. Dzhervis. Per. s angl. – M.: Vil'jams, 2004. – 992 s.

10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов : Учебное пособие.—СПб.: Питер, 2003.—608с. ISBN 5-318-00666-3

Sergienko A.B. Cifrovaja obrabotka signalov : Učebnoe posobie.—SPb.: Piter, 2003.—608s. ISBN 5-318-00666-3

11. ГОСТ Р 8.736–2011 / М.: Стандартиформ, 2013. – 24 с. http://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_8.736-2011.

GOST R 8.736–2011 / M.: Standartinform, 2013. – 24 s.

12. ГОСТ 11.002-73. Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений. – М.:Изд.-во стандартов, 1974. http://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_8.736-2011

GOST 11.002-73. Prikladnaja statistika. Pravila ocenki anomal'nosti rezul'tatov nabljudenij. – M.:Izd.-vo standartov, 1974.

13. ГОСТ 27.002.-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд.-во стандартов, 1990. http://standartgost.ru/g/ГОСТ_Р_8.736-2011.

GOST 27.002.-89. Nadezhnost' v tehnikе. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija. – M.: Izd.-vo standartov, 1990.

Стаття рекомендована до публікації д-ром.техн.наук, проф. В. П. Большаковым (Україна); д-ром.физ.-мат.наук, проф. А. В. Коваленко (Україна)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015