

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ СИГНАЛАМИ
У СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

О.А. Владимирський^{1*}, докт. техн. наук, В.М. Зварич^{2**}, докт. техн. наук,
І.А. Владимирський^{1***}, канд. техн. наук, В.О. Артемчук^{1****}, докт. техн. наук

¹ Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,
вул. Генерала Наумова, 15, Київ, 03164, Україна,

e-mail: av1000000@ukr.net.

² Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: zvaritch@gmail.com.

Необхідність розвитку методів визначення кореляційного зв'язку між даними про технічний стан об'єктів енергетичної галузі в Україні обумовлено ускладненням діагностування значної кількості обладнання внаслідок його тривалої експлуатації та зносу. Старіння підвищує кількість впливових на стан обладнання факторів, які потрібно враховувати, кількісно пов'язувати між собою за допомогою визначення відповідного інформативного кореляційного зв'язку. Однак поширені методи цього визначення часто не враховують різноманітності умов проведення діагностування, відповідних часових обмежень, тому потребують розвитку та вдосконалення. У роботі, як приклад, розглянуто діагностування технологічних трубопроводів електростанцій. Проблема оперативного визначення в них місць розгерметизації обумовлена значним загальним зносом енергообладнання та загострюється внаслідок війни. В роботі представлено розвиток течешукачів кореляційного типу. Надано приклад відповідної технічної реалізації приладу, який можна застосовувати як автономну інформаційно-вимірювальну підсистему комплексу контролю технічного стану обладнання електростанцій. Розглядаються як методи, що базуються на основі взаємних кореляційних функцій, так і ентропійні методи. Такі методи можуть бути з успіхом використано під час побудови інформаційно-вимірювальних систем діагностування електротехнічного обладнання, що використовують не тільки вібраційні сигнали, але й інші інформаційні сигнали, наприклад, акустично-емісійні сигнали. Бібл. 14, рис. 1.

Ключові слова: взаємна кореляційна функція, течешукач, ентропія, копула-ентропія.

Вступ. Забезпечення сталого функціонування електростанцій в умовах тривалої експлуатації обладнання пов'язане з розвитком відповідних інформаційно-вимірювальних систем контролю та діагностування. Це стосується контролю та діагностування як основного, так і допоміжного обладнання, до якого можна віднести велику кількість технологічних трубопроводів. Для електростанцій, що працюють на вугіллі, газі, мазуті це циркуляційні трубопроводи у системах охолодження турбін, системи маслопроводів, трубопроводи подачі палива. Для гідроелектростанцій це напірні водоводи та байпасні трубопроводи, системи технічного водопостачання та аварійних зливів, лінії охолодження гідрогенераторів. Для атомних електростанцій це протяжні підземні трубопроводи технічного водопостачання відповідальних споживачів, контурів охолодження реактору, системи дренажу та промивання. Крім цього, слід контролювати справність підземних пожежних трубопроводів, які прокладено по територіях електростанцій, бо справність цих трубопроводів набуває підвищеної актуальності з причини військових загроз.

© Владимирський О.А., Зварич В.М., Владимирський І.А., Артемчук В.О., 2025
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-3250-556X>; ** <https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-7706-334X>; **** <https://orcid.org/0000-0001-8819-4564>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Проблема значного загального зносу обладнання загострюється під час воєнного стану внаслідок додавання мілітарних впливів на трубопровідні системи, що забезпечують сталу генерацію електричної енергії та безпеку. Труднощі виникають під час контролю наявності та визначенні місця витoku в умовах потужних технологічних заводів, низького тиску у трубопроводі, малого відношення сигнал витoku–завада. Реєстрацію витoku часто маскує відсутність надходження води з пошкодження у технологічні місця доступу до трубопроводу і т. і. Від оперативності визначення та ліквідації витoku іноді напряду залежить можливість подальшої експлуатації енергоблоку. Наприклад, для АЕС встановлено граничний термін ліквідації пошкодження у підземному трубопроводі технологічної води охолодження реактора. У разі виникнення витoku підключається резервна лінія охолодження. Але, якщо за встановлений термін часу виток на пошкодженій лінії трубопроводу не буде знайдено та усунуто, реактор підлягає обов'язковій зупинці. Протяжність відповідної лінії трубопроводу може налічувати кілометри.

Задля реєстрації витоків, оперативного і точного визначення місць їхнього розташування доцільно використовувати найбільш ефективні сучасні методи, до яких відноситься кореляційний акустичний метод. В даний час фірмами-виробниками випускається велика кількість різноманітного діагностичного обладнання для діагностування трубопроводів. Найбільш авторитетними розробниками і виробниками діагностичної апаратури для систем водо- та теплопостачання можна вважати фірми Великобританії (HWM-Water Ltd, Primayer Limited, Guided Ultrasonics Ltd), Німеччини (SebaKMT, Herman Sewerin GmbH), США (Fluid Conservation Systems) та Швейцарії (Gutermann). Діагностичне обладнання представлених вище авторитетних фірм виробників, безумовно, може претендувати на високі оцінки якості виготовлення, надійності, застосування передових технологічних досягнень електроніки. Ці прилади можна було б застосовувати як автономні інформаційно-вимірювальні підсистеми комплексу контролю технічного стану обладнання електростанцій. Проте не вдалося виявити ознак відмінності використовуваних ними моделей трубопроводів від найпростіших. А це означає, що проблеми із забезпеченням необхідних показників оперативності, достовірності та точності в умовах корозійного пошкодження та зносу, що характерно для вітчизняних технологічних систем трубопроводів електростанцій, є актуальними, особливо за наявності мілітарних загроз. Практично це виражається у неоднозначності показань течешукачами координат витоків через складну хвильову структуру зареєстрованих шумів; відсутність чіткої реєстрації течешукачем витoku через мале відношення сигнал-завада у реєстрованих сигналах; помилковість показань координат витоків через відмінність фактичної швидкості акустичних хвиль у трубопроводі від заданої у течешукачі; залежність показань приладу від вибору місць встановлення датчиків на трубопровід; наявність, крім витоків, стоншень стінок трубопроводів, що резонують з шумом витoku та ряд інших факторів.

Кореляція є важливою характеристикою процесів таких як радіотехнічні сигнали, акустичні сигнали, вібраційні сигнали і т. і.

Існує два типи зв'язків між інформаційними сигналами, які описують технічний стан об'єкту, що досліджується [1].

- Перший тип – лінійний зв'язок, який оцінюється взаємною коваріацією або кореляцією і, як правило, базується на багатовимірному нормальному розподілі для моделювання структури залежності між інформаційними сигналами. Проблемою є те, що метод лінійної залежності ігнорує деякі флуктуації відносно асиметрії та ексцесу розподілів, є чутливим до ряду спотворень вихідних даних. Якщо вибірка реалізації інформаційного сигналу недостатньо велика, припущення про нормальність є сумнівним.
- Інший тип залежності вимірюється зв'язуючою функцією (яку іноді називають копулою, *copula*). Це функція, яка пов'язує між собою одновимірні функції розподілу та використовує гнучкий багатовимірний розподіл замість багатовимірного нормального апроксимуючого розподілу. Копула – це багатовимірна функція розподілу, яка враховує важкість хвостів розподілу та асиметрію розподілу інформаційного, здатна враховувати деякі інші спотворення вихідних даних.

Перший та інший типи є основою методів визначення відповідно лінійного та нелінійного зв'язку між випадковими вимірюваними величинами.

Метою роботи є підвищення ефективності вирішення завдань технічного діагностування об'єктів енергетичної галузі, зокрема визначення місць витоків у технологічних трубопроводах

електростанцій, шляхом додаткового врахування деяких типів спотворень і статистичних особливостей інформаційних сигналів у методах визначення між ними взаємозв'язку.

Розглянемо більш детально обидва типи зв'язку та відповідні методи стосовно вирішення задач технічного діагностування електротехнічного обладнання.

Застосування методів на основі лінійного кореляційного зв'язку. Цей тип зв'язку між даними щодо технічного стану електротехнічного обладнання є найбільш простим за обчисленням та поширеним. Тому методи, побудовані на його основі, можна вважати традиційними. Під час вирішення задач технічного діагностування ці методи часто використовують оцінки взаємної кореляційної функції (ВКФ) двох сигналів. ВКФ вібраційно-акустичних сигналів від рознесених у просторі датчиків є ефективним засобом визначення місць протікань у підземних трубопроводах [2–4], у фланцевих з'єднаннях в шахтах реакторів атомних електростанцій [5], в інших судинах з газом чи рідиною зі збитковим тиском. ВКФ використовується у кореляційних течешукачах, які широко застосовуються для пошуку витоків у підземних трубопровідних мережах електростанцій. Використання ВКФ дає змогу не тільки зареєструвати пошкодження на фоні завад, а ще й визначити просторову координату пошкодження для проведення у цьому місці ремонту обладнання. Під час діагностування ділянки підземного трубопроводу таке визначення відбувається за формулою

$$L_x = \frac{L}{2} + \frac{V_\Gamma \cdot dT}{2}, \quad (1)$$

де L_x – відстань від одного з датчиків до витoku; L – довжина трубопроводу між датчиками; V_Γ – швидкість поширення по трубопроводу від витoku до датчиків акустичних хвиль, зокрема хвиль гідравлічного удару; dT – затримка за часом між приходом акустичних хвиль до одного і до другого датчиків, визначувана за максимумом взаємної кореляційної функції

$$\bar{R}_{x,y}(dT) = \max_{\tau}(\bar{R}_{x,y}(\tau)), \quad (2)$$

де $\bar{R}_{x,y}(\tau)$ – оцінка ВКФ $R_{x,y}(\tau)$ сигналів $x(t)$ та $y(t)$ з датчиків, де ВКФ за означенням дорівнює [6]

$$R_{x,y}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau)dt. \quad (3)$$

Сигнали шуму витoku, що містяться у $x(t)$ і $y(t)$, розглядаються як випадкові стаціонарні процеси. Враховуючи (2), умовою задовільного застосування цього типу статистичного зв'язку між змінними $x(t)$ і $y(t)$ є наявність чітко проявленого у структурі ВКФ її максимального сплеску. Але на практиці цьому проявленню часто заважають фізичні явища, що супроводжують поширення сигналів від витoku до датчиків, потужні зовнішні завади, статистичні особливості зареєстрованих вихідних даних. Найбільш суттєві впливи спричиняють дисперсія інформативних акустичних та вібраційних хвиль [7], їх загасання та, як наслідок, мале відношення сигнал–завада [8], наявність інших хвиль з іншими груповими швидкостями поширення, інтерференційні спотворення реєстрованих датчиками сигналів $x(t)$ і $y(t)$ [2] та ін. Зазначені впливи на ВКФ призводять до наявності у її структурі завадових сплесків, розмивань за часом інформаційного сплеску ВКФ, навіть до його повного зникнення. Інтерференційні явища, особливо під час реєстрації сигналів на трубопроводах великих діаметрів, призводять до часткової чи повної декореляції інформативних сигналів в залежності від положень датчиків на трубопроводі.

Боротися з подібними впливами на результати технічного діагностування можна за двома напрямками: вдосконалювати методи визначення та застосування оцінок лінійного кореляційного зв'язку між вихідними даними чи застосовувати методи на основі інших типів інформаційного зв'язку, більш стійких до спотворень та статистичних особливостей сигналів. Оскільки їх природа та вплив є дуже різними, доцільно застосовувати обидва напрямки.

Вдосконалення методу визначення та застосування оцінок лінійного кореляційного зв'язку. Дослідження, проведені в ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України у напрямку визначення інформативності ВКФ про пошкодження, що діагностуються, свідчать про те, що ця функція містить набагато більше корисної інформації, ніж звичайно використовується. Вилучити цю інформацію з ВКФ можна за допомогою її подальшої обробки шляхом обчислення просторово-частотних спектрів параметрів ВКФ [2]. Задля їх отримання оцінка ВКФ цифрових сигналів $\bar{R}_m(k)$ обчислюється для різних положень m пари датчиків на об'єкті. Під час діагностування трубопроводів достатньо

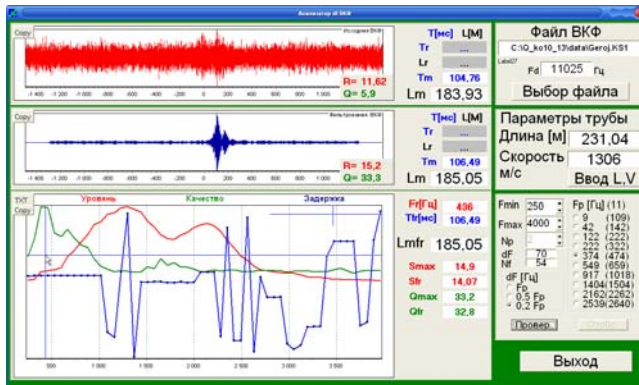
застосувати кілька положень [4]. Наприклад, m може приймати значення 1, 2 і 3. Оцінки $\bar{R}_m(k)$ обчислюють у широкій смузі робочого діапазону частот приладу. Далі, $\bar{R}_m(k)$ розкладають на вузькосмугові ВКФ $\psi_{mf}(k)$, де f позначає центральну частоту відповідної смуги частот. Потім, для кожної $\psi_{mf}(k)$ обчислюють її параметри. Ці параметри спрямовані на з'ясування хвильової структури ВКФ з метою визначення координат пошкоджень за найбільш якісними показниками ВКФ інформативних та не спотворених хвиль. Метод розроблявся для діагностування підземних трубопроводів, але може бути корисним та адаптованим для діагностування інших протяжних у просторі об'єктів. Вирази для обчислення параметрів ВКФ стосовно діагностування ділянки підземного трубопроводу електростанції, що знаходиться під внутрішнім тиском у режимі експлуатації, мають наступний вигляд [3]:

$$\begin{aligned}\psi'_{mf}(k) &= \eta(\psi_{mf}(k)) \cdot \Omega_{mf}(k), \\ A_{mf} &= \max_k(\psi'_{mf}(k)) = \psi'_{mf}(k_{mf}), \\ Q_{mf} &= \frac{A_{mf}}{\sqrt{M_{mf} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} [\psi_{mf}(k) \cdot \Omega_{mf}(k)]^2}}, \\ dT_{mf} &= \frac{k_{mf}}{F_d}, \\ L_{xmf} &= \frac{L_m}{2} + \frac{V_\Gamma \cdot dT_{mf}}{2},\end{aligned}\tag{4}$$

де N – число відліків ВКФ; η – функція перетворення $\psi_{mf}(k)$ для підвищення точності визначення часових параметрів взаємної кореляційної функції, наприклад, її обвідна; $\Omega_{mf}(k)$ – вагова функція для можливого виключення з аналізу частини $\psi_{mf}(k)$; M_{mf} – масштабний множник для урахування дії зважування; A_{mf} і Q_{mf} – оцінки потужності та відношення сигнал–завада (якості) для хвилі та джерела, які домінують у вимірюваннях в f -й смузі частот при m -й позиції пари датчиків, розташованих по обидві сторони від пошкодження; dT_{mf} – різниця групових затримок відповідної хвилі, яка дійшла від пошкодження до датчиків; L_{xmf} – оцінка координати її джерела, обчислена подібно (1), але з врахуванням залежності визначеної координати від частоти та положень датчиків на трубопроводі; F_d – частота дискретизації за часом безперервних сигналів з датчиків; k_{mf} – відлік смугової кореляційної функції, який відповідає (4); L_m – довжина об'єкту діагностування у вигляді ділянки підземного трубопроводу між парою датчиків приладу, які знаходяться у позиції m на трубопроводі в місцях доступу до нього. Предметом подальшого параметричного аналізу ВКФ є її просторово-частотні спектри A_{mf} , Q_{mf} і L_{xmf} . За їх сумісним за частотою аналізом визначаються такі значення L_{xmf} , які за наданими спектрами відповідають координатам пошкоджень з найбільшою вірогідністю. Більш детально метод надано у роботах [2–4]. Перевагами параметричного аналізу ВКФ перед звичайним аналізом ВКФ, аналізом частотних спектрів кореляційних функцій та функцій когерентності є швидкість та повнота надання оператору інформації про завжди важливі параметри домінуючих за потужністю ВКФ окремих хвиль у складній структурі вихідної ВКФ. Метод надає змогу кількісно, параметрично узгодити просторову і частотну селекцію послаблених сигналів від пошкоджень, врахувати наявні інтерференційні явища та має інші корисні властивості [2–4].

Викладена обробка ВКФ впроваджена у параметричному кореляційному течешукачі К-10.5М2 розробки ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України (рис. 1). На рис. 1, а для фіксованого m $\bar{R}_m(k)$ показана на верхньому графіку червоним кольором, спектри нормованих параметрів A_{mf} , Q_{mf} і L_{xmf} сумісно за частотою показано на нижньому графіку відповідно червоним, зеленим та синім кольором. Графік $\psi_{mf}(k)$, який за частотою відповідає максимуму Q_{mf} , показано на середньому, синьому

графіку рис. 1, а. Максимальний сплеск цієї $\psi_{mf}(k)$ для даного положення m датчиків на трубопроводі (рис. 1. б) за обчисленими параметрами відповідає найбільш вірогідній координаті L_{xmf} прихованого під землею витоку [3].



а

б



в

г

д

Рис. 1 – Формат параметричного аналізу ВКФ течешукача К-10.5М2 (а), радіоблок з датчиком на трубопроводі під час вимірювань (б), вібродатчики (в), виносні радіоблоки (г), блок оператора течешукача (д)

В повоєнний час доцільно мати мобільні системи моніторингу та діагностики, подібні наведеній на рис. 1 системі. Такі системи повинні давати можливість оперативної оцінки технічного стану як основного, так і допоміжного обладнання електростанцій. Особливо привабливими в такий час є використання бездротових технологій побудови систем контролю та діагностики.

Структура таких систем залежить від того, моніторинг та діагностику якого обладнання треба проводити.

Існує ряд сучасних технологічних рішень, які вже стали стандартами бездротового зв'язку і використовуються для обміну даними між об'єктами на певній відстані. Більш широко застосовується серія стандартів IEEE 802.11 (Wi-Fi), стандарт IEEE 802.15.1 (Bluetooth), а також рішення за стандартом 802.15.4 (ZigBee, WirelessHART, MiWi). Великі перспективи має використання стандарту LPWAN, що забезпечує велику дальність зв'язку, але має обмеження в швидкодії [9]. Однак під час використання таких технологій виникають питання, пов'язані з кібербезпекою таких приладів та систем.

Використання поняття ентропії для побудови систем діагностування. В даній роботі автори також використовують поняття ентропії для опису залежностей інформаційних сигналів. Шеннон [10] ввів подібну міру інформації в своїй теорії комунікації, Джейнс [11] використав поняття ентропії в задачах статистичної механіки, Кульбак та Лейблер [12] – для опису дивергенції (дистанції) між статистичними популяціями.

Взаємна інформація (ВІ) може бути використана для опису нелінійної кореляції між двома випадковими величинами [13]. Точне обчислення ВІ залишається складним завданням для неперервних випадкових величин. Розглядаючи неперервну випадкову величину X , її ентропію Шенона можна виразити як

$$H(X) = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log f(x) dx, \quad (5)$$

де $f(x)$ – гранична (маргінальна) функція розподілу ймовірностей від X . Далі, розглядаючи іншу неперервну змінну Y , ВІ між X та Y можна виразити як

$$I(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \log \frac{f(x, y)}{f_1(x)f_2(y)} dx dy, \quad (6)$$

де $I(X, Y)$ – це ВІ між X та Y ; $f_1(x)$ та $f_2(y)$ – щільність розподілу ймовірностей для X та Y , відповідно; та $f(x, y)$ – взаємна щільність розподілу ймовірностей для X та Y . Це дослідження вводить кумулятивну теорію для більш точної оцінки ВІ. Згідно [1], якщо $f(x, y)$ є багатовимірною взаємною функцією розподілу двох випадкових величин X, Y , а $f_1(x)$ та $f_2(y)$ є відповідними маргінальними функціями розподілу, то можна встановити функціональний зв'язок між взаємною функцією розподілу та кожною маргінальною функцією розподілу

$$F(x, y) = C[F_1(x), F_2(y)] = C(u, v), \quad (7)$$

де $u = F_1(x)$; $v = F_2(y)$; $U \sim U(0, 1)$; $V \sim U(0, 1)$.

Щільність розподілу ймовірностей, що відповідає $C(u, v)$, представлена як

$$c(u, v) = \frac{d^2 C(u, v)}{dudv} = \frac{d^2 C(u, v)}{dF_1(u)dF_2(v)} = \frac{d^2 F(x, y)}{f_1(x)f_2(y)dxdy} = \frac{f(x, y)}{f_1(x)f_2(y)}, \quad (8)$$

де $c(u, v)$ – зв'язуюча (копула copula) щільність розподілу ймовірностей випадкових змінних u та v , а її опорний діапазон $[0, 1]$. Крім того, підставимо рівняння (8) у рівняння (5), щоб знайти зв'язуючу (копула)-ентропію

$$\begin{aligned} H_c(U, V) &= - \int_0^1 \int_0^1 c(u, v) \log c(u, v) dudv = \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x, y)}{f_1(x)f_2(y)} \log \frac{f(x, y)}{f_1(x)f_2(y)} dF_1(x) dF_2(y) = \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \log \frac{f(x, y)}{f_1(x)f_2(y)} dx dy. \end{aligned} \quad (9)$$

Використавши вирази (6) та (9), отримаємо

$$I(X, Y) = -H_c(U, V). \quad (10)$$

Наведена вище формула означає, що ВІ випадкових змінних дорівнює від'ємній ентропії копули. Оцінюючи ВІ на основі копулової ентропії, необхідно лише оцінити відповідну копулову функцію за даними спостережень випадкових змінних, а потім підставити її в рівняння (9) для розв'язання. У цьому дослідженні представлено метод оцінки щільності ядра (KDE) задля отримання маргінальної щільності ймовірності $f_1(x)$ та $f_2(x)$ наступним чином [14]:

$$f_1(x) = \frac{1}{nh} \sum_{t=1}^n k\left(\frac{x - x_t}{h}\right), \quad f_2(x) = \frac{1}{nh} \sum_{t=1}^n k\left(\frac{y - y_t}{h}\right), \quad (11)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ та $y_1, y_2, \dots, y_n$ – випадкові вибірки спостережень з невідомих розподілів X та Y відповідно; $k(\cdot)$ – функція ядра; h – ширина смуги.

Розглядаючи N змінних, отриманих із вимірювальних сигналів на основі параметричної копула ентропії, глобальну матрицю асоціацій можна записати як

$$G_{obs} = \begin{pmatrix} 1 & -H_c(u_1, u_2) & \dots & -H_c(u_1, u_N) \\ -H_c(u_2, u_1) & 1 & \dots & -H_c(u_2, u_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -H_c(u_N, u_1) & -H_c(u_N, u_2) & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

де значення кожного елементу представляє нелінійну кореляцію між усіма змінними в цьому діагностичному процесі.

Задля побудови розв'язувальних правил з діагностик та енергетичних об'єктів можна скористатися методом, викладеним в [14], який передбачає лінійне масштабування глобальної матриці асоціацій G_{obs} , декомпозиції G_{obs} , деконволюції матриці власних значень матриці G_{obs} та вибір відповідного порогу.

Висновки. Оскільки поширені традиційні методи оцінки кореляційного зв'язку між даними про стан об'єктів діагностування у вигляді кореляційних функцій мають зазначені в роботі обмеження, результати досліджень показали, що під час побудови відповідних діагностичних систем енергетичної галузі, зокрема технологічних трубопроводів електростанцій, доцільно застосування наступних двох напрямків підвищення достовірності діагностування.

1. Вдосконалення традиційних методів шляхом додаткового обчислення та аналізу показових діагностичних параметрів кореляційних функцій. Такий підхід дає змогу формалізувати суттєві ускладнення, визначити ступінь їхнього впливу на результат діагностування та завдяки цьому сформулювати способи зменшення цього впливу. Зокрема, реалізувати цілеспрямовану параметричну просторово-частотну селекцію інформативних ознак пошкоджень в умовах інтерференційних спотворень вихідних сигналів, малого відношення сигнал-завада та ін.

2. Використання методів оцінки нелінійного зв'язку, зокрема розглянутого методу на основі визначення взаємної інформації сигналів. Властивості та переваги подібних методів відносно традиційних потрібно визначати з врахуванням конкретних завдань та умов діагностування. Аналітичну відмінність ВКФ від ВІ можна простежити, зіставляючи відповідні вирази

$$BK\Phi(X,Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xyf(x,y) dx dy, \quad I(X,Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \log \frac{f(x,y)}{f_1(x)f_2(y)} dx dy,$$

де $BK\Phi(X,Y)$ відповідає ВКФ (3) та поширеній у практиці діагностування її оцінці $\bar{R}_{xy}(\tau)$ (2) стаціонарних випадкових сигналів $x(t)$ і $y(t)$, обчисленій для окремого значення τ з достатньо малими статистичною похибкою та зсувом. Наочною відмінністю, наприклад, є незалежність $I(X,Y)$ безпосередньо від величин сигналів x і y , що може підвищувати стійкість оцінки ВІ $I(X,Y)$ до деяких видів потужних завад.

3. Необхідно відзначити, що викладені методи можуть бути використані під час побудови інформаційно-вимірювальних систем діагностики різних типів електротехнічного обладнання, що в своїх алгоритмах використовують аналіз зв'язків інформаційних сигналів.

Автори висловлюють щире подяку Національному фонду досліджень України за грантову підтримку, завдяки якій були виконані та виконуються викладені дослідження в рамках проекту №2023.04/0022 «Розроблення апаратно-програмного комплексу та методики оперативного виявлення пошкоджень систем тепло- та водопостачання з врахуванням їх зношеності та мілітарних впливів».

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETERMINING CORRELATION BETWEEN SIGNALS IN TECHNICAL DIAGNOSTIC SYSTEM

O.A. Vladimirsky¹, V.M. Zvaritch², I.A. Vladimirsky¹, V.O. Artemchuk¹

¹G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering National Academy of Sciences of Ukraine, 15, Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine,

e-mail: av1000000@ukr.net.

²Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: zvaritch@gmail.com.

A development of new approaches to determining the correlation between data on the technical condition of energy sector facilities in Ukraine is due to the complication of diagnosing a significant amount of equipment due to its long-term operation and wear and tear. Ageing increases the number of factors affecting the condition of equipment that need to be taken into account and quantitatively linked to the condition of the equipment by determining the appropriate informative correlation. However, common methods to this definition often do not take into account the variety of diagnostic conditions and relevant time constraints, and therefore need to be developed and improved. The paper considers the diagnostics of technological underground pipelines of power plants. underground pipelines as an example. The problem of quickly identifying depressurised areas in these facilities is caused by significant general wear and tear of energy equipment and is exacerbated by the war. The paper describes the methods of development of leak detectors of the correlation type. An example of the corresponding technical implementation of the device is provided. Both methods based on mutual correlation functions and entropy methods are considered. Such methods can be

successfully used in the construction of information and measurement systems for diagnosing electrical equipment that use not only vibration signals, but also other information signals, such as acoustic emission signals. References 14, figure 1.

Keywords: mutual correlation function, leak detector, entropy, copula-entropy.

1. Ning Zhao, Winston T. Lin. A copula entropy approach to correlation measurement at the country level. *Applied Mathematics and Computation*. 2011. Vol. 218. Issue 2. Pp. 628–642. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2011.05.115>.
2. Vladimirsky A.A., Vladimirsky I.A. Correlation parametric methods for determining the coordinates of leaks in underground pipelines. *Elektronne modeliuvannia*. 2021. Vol. 43. No 3. Pp. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.003>. (Ukr)
3. Vladimirsky A.A., Vladimirsky I.A. Spatial and Frequency Correlation Parametric Methods for Determining the Coordinates of Leaks in Underground Pipelines. *Elektronne modeliuvannia*. Vol. 43. No 4. Pp. 22–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.022>. (Ukr)
4. Vladimirsky A.A., Vladimirsky I.A. Parametric correlation method for determining the coordinates of pipeline leaks. Patent UA No 144444, 2020. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1456109/> (Ukr)
5. Skalozubov V.I., Biley D.V., Gablaia T.V., Komarov Yu.A., Klyuchnikov A.A., Foltov I.M. Development and optimization of control systems for nuclear power plants with WWER. Chernobyl: Institute for Nuclear Power Plant Safety Problems, 2008. 512 p. (Rus)
6. Cooper G., McGillem C. Probabilistic Methods of Signal and System Analysis. Moskva: Mir, 1989. 376 p. (Rus)
7. Rewerts L.E., Roberts R., Clark M.A. Dispersion compensation in acoustic emission pipeline leak location. In Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 16. Pp. 427–434. New York: Plenum Press, 1997. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-5947-4_57 (accessed at 15.06.2025) DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5947-4_57.
8. Callakot R. Diagnostics of damages. Moskva: Mir, 1989. 512 p. (Rus)
9. Gyzhko Yu.I., Zvaritch V.M. Features of Construction of Elements of Multilevel Expert Systems for Diagnostics of Electrical Equipment Units of Wireless System Element. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 5. Pp. 94–98. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.094>. (Ukr)
10. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell. Syst. Tech. J.* 1948. No 27. Pp. 379–423. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.
11. Jaynes E.T. Information theory and statistical mechanics. *Phys. Rev.* 1957. No 106. Pp. 620–630. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>.
12. Kullback S., Leibler L.A. On information and Sufficiency. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1951. Vol. 22. Pp. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729694>.
13. Yan-Ning Suna, Yun-Jie Pana, Li-Lan Liu, Zeng-Gui Gao, Wei Qin. Reconstructing causal networks from data for the analysis, prediction, and optimization of complex industrial processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 138. Article no 109494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109494>.
14. Sun Y., Qin W., Zhuang Z. Nonparametric-copula-entropy and network deconvolution method for causal discovery in complex manufacturing systems. *J. Intell. Manuf.* 2022. Vol. 33. Pp. 1699–1713. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01751-w>.

Надійшла 02.07.2025
Остаточний варіант 08.09.2025