
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.41.01.003>

УДК 004.942: 620.179.18: 621.643.8

О.А. Владимирський, канд. техн. наук
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел. +380 44 4248773, e-mail: leakdetect@rambler.ru; av1000000@ukr.net)

Параметричні методи діагностування підземних трубопроводів з урахуванням багатохвильового поширення інформаційних сигналів

Розроблено нові методи якісного діагностування підземних трубопроводів теплових мереж з урахуванням особливостей багатохвильового поширення по трубопроводах акустичних сигналів. Узагальнений методологічний підхід має наступні етапи: формування діагностичної моделі ділянки трубопроводу з урахуванням багатохвильового поширення акустичних сигналів; обчислення масивів кореляційних функцій інформаційних сигналів, за якими будуть формуватися масиви діагностичних параметрів, чутливих до інтерференції акустичних хвиль. Ці параметри потім використовуються як параметри якості управління при вирішенні діагностичної задачі як задачі нелінійного програмування.

К л ю ч о в і с л о в а: багатохвильове поширення, вібросигнал, діагностична модель, кореляція, трубопровід, витік, корозійне стоншення.

Проблеми генерації та поширення хвиль в рідинах і газах, динаміки взаємодії сферичних і циліндричних тіл в рідині при хвильових і коливальних впливах, теорії нелінійних коливань оболонок обертання, частково заповнених рідиною, досліджено у роботах [1—6]. Питання щодо реалізації та особливостей застосування засобів пошуку витоків та діагностування стану металу підземних трубопроводів, а також необхідність та шляхи експериментального уточнення фактичних параметрів поширення акустичних хвиль розглянуто у [7—10]. Однак питання практичного врахування складної багатохвильової структури акустичних даних при пошуку витоків та діагностуванні металу міських підземних трубопроводів, явищ інтерференції, яскраво вираженої просторової залежності параметрів акустичних даних від місць їхньої реєстрації поки що значною мірою залишаються відкритими. Це суттєво обмежує достовірність та

© Владимирський О.А., 2019

розвиток діагностування трубопроводів. Тому створення методів та засобів віброакустичної діагностики, які враховують фактичну багатохвильову структуру поширення вібросигналів уздовж підземних трубопроводів та супутні акустичні явища для виявлення витоків і місць корозійного стоншення металу трубопроводів з необхідною достовірністю та дистанційністю, є вкрай актуальним.

Постановка задачі. Принципово важливим показником якості методів діагностування підземних трубопроводів є дистанційність. Саме з цієї причини розглядається низькочастотний діапазон віброакустичних сигналів. Типові значення для пошуку витоків від 100 до 5000 Гц для оцінки корозійного зносу від 20 до 10000 Гц. На цих частотах загасання вібросигналів при поширенні уздовж трубопроводів істотно нижче, ніж на ультразвуку. Разом з тим, на низьких звукових частотах істотно вище рівень зовнішніх шумів, в тому числі від будівельних та ремонтних робіт, транспорту, від різних стаціонарних обертових механізмів (вентиляторів, насосів) та ін. Тому низькочастотні методи діагностування повинні містити відповідні розвинуті засоби боротьби з перешкодами та методи врахування їхніх проявів. Але відносно виявлення розмірів небезпечних корозійних пошкоджень та їхньої відстані від місць доступу до трубопроводів (теплових камер тощо) низькочастотні методи є корисними і перспективними.

Експериментально встановлено, що через інтерференцію акустичних хвиль (ІАХ) ступінь їхнього частотного перекриття в сумарному багатохвильовому сигналі $y(i)$, який реєструється на поверхні трубопроводу, залежить від місць генерації і реєстрації акустичного сигналу. Також з'ясовано, що вибираючи відповідні місця, можна підібрати такі умови ІАХ, за яких ступінь частотного перекриття тієї чи іншої хвилі з іншими хвилями буде мінімальними. Тобто можна вибрати «вигідні» місця для реєстрації вібрації, викликаної окремою хвилею, і потім зробити її остаточну частотну селекцію із загального реєстрованого сигналу. Отже, в умовах ІАХ відбувається взаємне спотворення часових, фазочастотних характеристик результатів реєстрації хвиль, які несуть інформацію про координати пошкодження. Усунути ці спотворення лише шляхом частотної селекції окремих хвиль, не вдаючись до зазначеної просторової селекції, не завжди вдається, що і є однією з основних причин помилкових результатів діагностування трубопроводів.

Таким чином, достовірне дистанційне визначення координат суттєвих пошкоджень металу трубопроводів (витоків та корозійних стоншень) обумовлює необхідність використовувати саме низькочастотні активні та пасивні методи діагностування підземних трубопроводів. Однак при цьому необхідно враховувати складну багатохвильову структуру інформа-

ційних сигналів та інтерференційні хвильові спотворення. Це зумовлює потребу у формуванні відповідного загального для задач визначення пошкоджень металу трубопроводів методологічного підходу, який враховував би зазначену складну структуру реєстрованих на поверхні трубопроводу інформаційних сигналів.

Загальний методологічний підхід. Беручи до уваги можливість впливати на результат інтерференційних спотворень вибором місць реєстрації сигналів, у запропонованому підході діагностування частотну селекцію хвиль доповнюємо просторовою селекцією. З цією метою вихідними даними взято не окремі сигнали з кінців діагностованої ділянки трубопроводу (ДДТ), а масиви акустичних даних, синхронно зареєстровані в декількох рознесених у просторі точках на одному або двох кінцях ДДТ в місцях доступу (МД) до трубопроводу.

При застосуванні пасивних методів формуються масиви цифрових акустичних даних $\{x_n(i)\}$ і $\{y_n(i)\}$, де n відповідає одному з положень датчика на одному кінці ДДТ, а j — на іншому кінці.

При застосуванні активних методів формується тестовий сигнал $x(i)$ і масив акустичних відгуків на нього $\{y_{nj}(i)\}$, де n відповідає одному з положень випромінювача, а j — одному з положень датчика. Вказані масиви формуються синхронно, що забезпечує несуттєвий рівень розсинхронізації при тривалій роботі, а також прийнятну величину внесених амплітудно-частотних і фазо-частотних викривлень.

В процесі виконання кожного з поставлених завдань формується відповідна діагностична модель ДДТ. Метою формування діагностичної моделі є отримання уявлення про явища багатохвильового поширення (БП) акустичних сигналів та ІАХ, які істотно впливають на точність і достовірність вирішення діагностичної задачі у вигляді, зручному для розробки відповідного практичного методу з необхідними показниками якості щодо точності, достовірності та ін.

Загальний підхід при формуванні діагностичної моделі ДДТ полягає в наступному. Уявляємо ДДТ у вигляді матриці елементарних смугових фільтрів (рис. 1) з частотною характеристикою $\exp(-j\omega T_\eta)H_\eta(\omega)$, де η — номер хвилі, що моделюється, має свою фазову і групову швидкість, загасання та свій частотний діапазон, $\eta=1, \dots, G$; $H_\eta(\omega)$ — частотна функція, що визначає частотні властивості η -ї модельованої хвилі, а саме зайнятий хвилею частотний діапазон, загасання і групову затримку поширення основної енергії; T_η — частотно-незалежна затримка поширення η -ї хвилі, яка визначає фазову швидкість її поширення.

Таким чином, ДДТ уявляємо сукупністю каналів поширення акустичних даних, яка складається з G каналів (хвиль). Кожну окрему хвилю

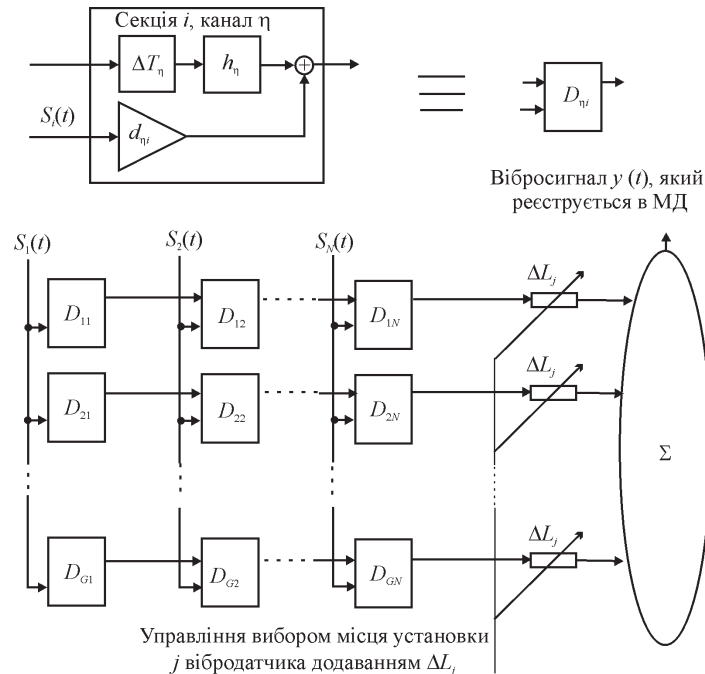


Рис. 1. Модель формування вібросигналу, який реєструється на ДДТ в умовах ІАХ

подаємо у вигляді відгуку лінійного смугового фільтра, складеного із N послідовно з'єднаних ланок (секцій). Вплив на ДДТ акустичного шуму від джерел зовнішніх завод і витоків надано у вигляді широкосмугових шумоподібних сигналів $S_i(t)$. Елементи ΔL_j введено з метою позначення управління умовами ІАХ при реєстрації акустичних сигналів на поверхні трубопроводу. Сигнал, зареєстрований на поверхні трубопроводу в точці j МД, має вигляд

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^N y_{ji}(t), \quad y_{j1}(t) = \sum_{\eta=1}^G \xi_{\eta y_i}(t), \quad (1)$$

$$\xi_{\eta y_i}(t) = d_{\eta i} \int_0^T (S_i(t-\tau) \varphi_{y\eta i}(\tau)) d\tau,$$

де $d_{\eta i}$ — коефіцієнт передачі, з яким сигнал від i -го джерела акустичного шуму $S_i(t)$ трансформується у η -ту хвилю; $\varphi_{y\eta i}(t)$ — імпульсна характеристика частини η -го каналу моделі, що відокремлює джерело $S_i(t)$ від

місця реєстрації вібросигналу; $\xi_{\eta yi}(t)$ — частина акустичного сигналу $S_i(t)$, яка переноситься η -ю хвилею до точки реєстрації; $y_{ji}(t)$ — складова реєстрованого сигналу $y_j(t)$, породжена i -м джерелом акустичного шуму.

Для подальшого виконання завдань діагностики $y_{ji}(t)$ із (1) подамо через характеристики поширення сигналу $S_i(t)$ по η -й хвилі:

$$y_{ji}(t) \approx \sum_{\eta=1}^G \left(\varepsilon_{\eta}^{L_{yi}} S_{i\eta} \left(t - \frac{L_{yi}}{V_{\eta}} \right) \right), \quad (2)$$

де $S_{i\eta}(t)$ — частина сигналу $S_i(t)$ в смузі пропускання η -го фільтра, яка поширюється з груповою швидкістю V_{η} ; ε_{η} — питомий коефіцієнт загасання в η -й модельованій хвилі; L_{yi} — відстань від i -го джерела сигналу $S_i(t)$ до місця реєстрації.

У сумі (2) зазначено хвилі η , які надходять у точку j прийому від одного джерела $S_i(t)$. Різниця між часом поширення всіх хвиль η від джерела $S_i(t)$ є постійною в часі і залежить від вибору точки реєстрації j в МД. Це когерентні хвилі, тому часткове або повне суміщення частотних діапазонів хвиль у сумі (2) призводить до явища інтерференції. При цьому в (1) ІАХ від різних, не пов'язаних одне з одним джерел, виявляються незалежно одна від іншої.

Таким чином, застосування зміщення точки прийому уздовж трубопроводу в МД дозволяє сигнали від одних джерел виділяти, а від інших — заглушати через штучні зміни для них умов ІАХ. Враховуючи дане просторове управління прийомом вібросигналів, подамо (2) у вигляді

$$y_{ji}(t) \approx \sum_{\eta=1}^G \left(\varepsilon_{\eta}^{L_{yi} + \Delta L_j} S_{i\eta} \left(t - \frac{L_{yi}}{V_{\eta}} - \frac{\Delta L_j}{V_{\eta}} \right) \right), \quad (3)$$

де ΔL_j — j -те зміщення датчика уздовж трубопроводу в МД, яке на рис. 1 показано, як відповідний елемент просторового управління співвідношенням фаз різних хвиль, наприклад управління співвідношенням фаз η -ї та $\eta+1$ -ї хвиль внаслідок нерівності $V_{\eta} \neq V_{\eta+1}$. Вираз (3) відображає потенційну можливість, в умовах ІАХ, проведення просторової селекції джерел акустичних шумів за допомогою відповідного вибору положення датчика.

З метою усунення впливу акустичних завад первинні дані, що є масивами синхронних багатоканальних записів віброакустичних сигналів, піддаються кореляційній обробці, в результаті якої формуються масиви оцінок кореляційних функцій $\{R_{nj}(k)\}$. У пасивних методах масиви акустичних даних, зареєстровані на кінцях ДДТ при різних положеннях n і j

датчиків відповідно з одного і з іншого боку ДДТ, обробляються за формулою

$$R_m(k) = R_{nj}(k) = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} (x_n(i) y_j(i+k)),$$

$$\forall n=1,2,\dots,J, \forall j=1,2,\dots,J,$$

де $m=1,2,\dots,(J \times J) = M$. В активних методах кореляційні функції зондуємого (опорного) сигналу, який діє на трубопровід у l -му місці з зареєстрованим в j -му місці акустичним сигналом, обчислюються за формулою

$$R_m(k) = R_{lj}(k) = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} (x_l(i) y_j(i+k)), \quad \forall l=1,2,\dots,J, \quad \forall j=1,2,\dots,J. \quad (4)$$

Слід зазначити, що в (4) індекс l — номер точки встановлення випромінювача — поставлено не при $x(t)$, а при $y_{lj}(t)$.

Для отримання частотних спектрів просторово залежних діагностичних параметрів використовуємо спосіб частотного аналізу характеристик кореляційних функцій вібросигналів [11, 12]. Тобто для кожної величини $R_m(k)$ розраховуємо залежність від частоти ряду $\gamma=1,2,\dots,\Theta$ параметрів $P_{\gamma m\mu}$ результатів сканування $R_m(\tau)$ фільтрами з імпульсними характеристиками $h_\mu(k)$ в заданому діапазоні частот від f_i до f_a :

$$\psi_{m\mu}(k) = \sum_{n=1}^{N_h} (R_m(k-n) h_\mu(n)), \quad P_{\gamma m\mu} = \phi_\gamma(\psi_{m\mu}(k)),$$

де $\phi_\gamma(\psi_{m\mu}(k))$ — обрана для вирішення конкретної задачі діагностування функція, яка разом з $\psi_{m\mu}(k)$ формує γ -й параметр якості управління, що здійснюється перебором просторового m та частотного μ параметрів управління. Фільтри є лінійними смуговими з резонансними частотами

$$f_\mu = f_i + (\mu - 1)\Delta f, \quad \mu = 1, 2, \dots, M_1; \quad M_1 \in R; \quad M_1 = \frac{(f_a - f_i)}{\Delta f + 1}.$$

Після цього діагностичні параметри $P_{\gamma m\mu}$ подаються у вигляді об'єднаних графіків їх частотної залежності — спектрів параметрів, тому будемо подавати їх як функцію $P_{\gamma m}(f_\mu)$.

З метою формалізації та подальшої автоматизації алгоритму обробки даних і прийняття рішення щодо оцінки результатів діагностування зазначені завдання сформульовано в категоріях розв'язувана задача, керований параметр, параметри якості управління, результат управління і критерії істинності результату управління (див. таблицю). Вони вирішуються як

завдання нелінійного програмування. Критерії істинності результату управління використовуються на етапі створення алгоритмів з метою контролю за достовірністю результату їх роботи.

Для визначення координат пошкоджень пасивним методом використовуємо вираз

$$L_{i\eta} = \frac{L}{2} + \frac{V_{\eta} \Delta T_{\eta}}{2}, \quad (5)$$

де L — відстань між двома датчиками на кінцях ДДТ; $L_{i\eta}$ — відстань від датчика до пошкодження, обчислена за η -ю хвилею; V_{η} — швидкість поширення η -ї хвилі; ΔT_{η} — різниця часу поширення хвиль від пошкодження до датчиків, встановлених на кінцях ДДТ.

Для визначення координат ушкоджень активним ехолокаційним методом використовуємо вираз

$$L_{i\eta} = \frac{T_{\eta} - T_{u\eta} - T_{\partial\eta}}{2} V_{\eta} - \frac{L_{u\partial}}{2}, \quad (6)$$

де T_{η} — проміжок часу між подачею зондуючого сигналу в випромінювач і реєстрацією відгуку на нього датчиком, обчислений за η -ю хвилею; $T_{u\eta}$ —

Формування завдань діагностування

| Розв'язувана задача | Керований параметр | Параметр якості управління | Результат управління | Критерій істинності результату управління |
|--|-----------------------------|----------------------------|--|--|
| Визначення швидкості хвиль | $j, l, f_{\mu}, \Delta f$ | $P_{\gamma m}(f_{\mu})$ | Швидкість хвилі або групи хвиль | Повторюваність на однотипній ділянці трубопроводу, відповідність довідковим даним |
| Визначення загасання хвиль | $j, l, f_{\mu}, \Delta f$ | $P_{\gamma m}(f_{\mu})$ | Питоме загасання хвиль, групи хвиль | Повторюваність на однотипній ділянці трубопроводу |
| Визначення координат витоків | $j, n, f_{\mu}, \Delta f$ | $P_{2\gamma m}(f_{\mu})$ | Координата витoku | Підтвердження координати триточковим методом, відповідність результату розтину ДДТ в зазначеному місці |
| Визначення координат і ступеня корозійного стоншення стінки трубопроводу | j, l , параметри вейвлету | $P_{3\gamma m}(f_{\mu})$ | Координата і ступінь стоншення стінки трубопроводу | Відповідність результату розтину ДДТ в зазначеному місці з вимірюванням товщини металу стінки трубопроводу |

проміжок часу між подачею сигналу в випромінювач і фізичним збудженням у трубопроводі η -ї хвилі; $T_{\partial\eta}$ — проміжок часу між фізичним надходженням до датчика η -ї хвилі та її реєстрацією; $L_{\text{цд}}$ — поправка координати $L_{x\eta}$, викликана віддаленням місць установки випромінювача і датчика.

Головною особливістю БП вібросигналів є те, що воно залежить від типу хвилі η , за якою визначено параметри V_{η} , ΔT_{η} , T_{η} , $T_{\partial\eta}$, $T_{\text{ин}}$ у (5) і (6). Нетривіальним є забезпечення відповідності вказаних параметрів одному і тому ж типові хвилі η , а також вибір найбільш достовірного значення $L_{x\eta}$, якщо умови діагностування протяжного ДДТ дають можливість такого вибору. Відтак, при діагностиці протяжного ДДТ завдання ідентифікації хвиль, які фактично присутні і чітко реєструються, є фундаментальним. При цьому групова швидкість окремої хвилі є не тільки найважливішим параметром визначення координати пошкодження згідно з (5) і (6), а й найбільш яскравою її ознакою, яка проявляється при зондуванні (тестуванні) ДДТ з метою виявлення хвильової структури вібросигналів. Критерієм узгодження параметрів V_{η} , ΔT_{η} , T_{η} , $T_{\partial\eta}$, $T_{\text{ин}}$ у (5) та (6) з величиною V_{η} , одержуваною при активному тестуванні ДДТ, є загальний частотний діапазон. Проте у загальному випадку явища ІАХ вносять перешкоди до цього узгодження через часткове частотне перекриття хвиль і залежність їх рівнів, зареєстрованих у загальному сигналі, від місць реєстрації акустичних даних на кінцях ДДТ.

Для того щоб максимально звільнити одержувані параметри V_{η} , ΔT_{η} і T_{η} від заводового впливу, розроблено метод діагностування, заснований на параметричному просторово-частотному аналізі багатохвильової структури акустичних даних. При цьому передбачається виконання таких умов.

1. Домінуючі за потужністю хвилі поширюються уздовж ДДТ при тестуванні і діагностуванні в одних і тих самих діапазонах частот з однаковими або близькими швидкостями.

2. На поверхні ДДТ, з обох його кінців, є просторові області доступу, достатні для виконання процедур налагодження положень датчиків на найкращу селекцію хвиль, які домінують у своїх піддіапазонах частот над іншими хвилями, присутніми у даних піддіапазонах частот. Найкращою просторово-частотною селекцією вважаємо можливість отримання значень V_{η} , ΔT_{η} , T_{η} , практично достатньо достовірних для їх застосування у формулах (5), (6).

За допомогою запропонованого підходу розроблено ряд методів діагностики теплових мереж.

Кореляційний параметричний метод визначення характеристик поширення уздовж трубопроводу домінуючих за потужністю акустичних хвиль. Цей метод розроблено з метою експериментального визначен-

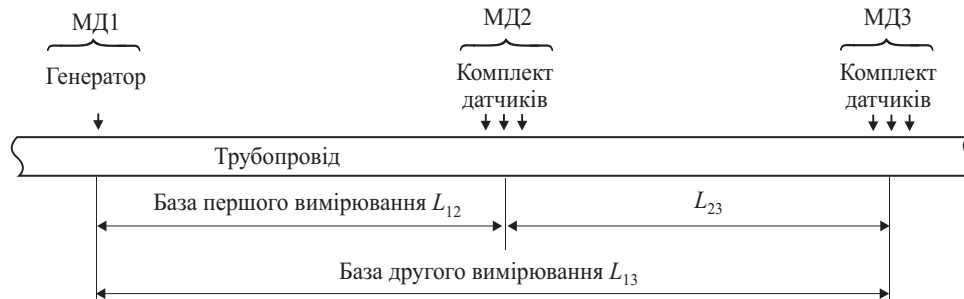


Рис. 2. Порядок вимірювання величини загасання домінуючих за потужністю акустичних хвиль

ня важливих для подальшої діагностики характеристик, а саме кількості домінуючих у своїх піддіапазонах частот хвиль, визначення цих діапазонів частот, обчислення групових швидкостей поширення хвиль та їхніх питомих коефіцієнтів загасання. Створення методу складається з наступних етапів:

формування діагностичної моделі ділянки трубопроводу у відповідності з викладеними принципами, орієнтованої на вирішення завдання щодо визначення кількості домінуючих хвиль, їх діапазонів частот та швидкостей;

формування переліку діагностичних параметрів $P_{\gamma m}(f_{\mu})$, чутливих до інтерференції хвиль, які за величиною характеризують якість просторово-частотної селекції тієї чи іншої хвилі, при цьому як один з параметрів $P_{\gamma m}(f_{\mu})$ використовується параметр потужності $A_{\eta}(f_{\mu})$ η -ї хвилі [11, 12];

визначення наявної на діагностованій ділянці трубопроводу кількості домінуючих хвиль, їх діапазонів частот та швидкості поширення за допомогою формування та вирішення задачі у категоріях, наведених у таблиці;

фіксація відповідного значення потужності $A_{\eta}(f_{\mu})$ для кожної хвилі η ;

розширення у відповідності з рис. 2 діагностованої ділянки трубопроводу для визначення питомого загасання наявних домінуючих за потужністю акустичних хвиль, якщо ділянка між МД2 та МД3 за діаметрами труб та умовами прокладання є однотипною з ділянкою між МД1 та МД2.

Обчислені для ділянки між МД1 та МД2 значення $A_{\eta}(f_{\mu})$ позначаємо як $A_{\eta 12}(f_{\mu})$, обчислені значення для ділянки між МД1 та МД3 — як $A_{\eta 13}(f_{\mu})$. Величина питомого загасання для відповідного діапазону частот має вигляд

$$U_{\text{п.з}\eta} = 20 \frac{\lg(A_{\eta 13}(f_{\mu})) - \lg(A_{\eta 12}(f_{\mu}))}{L_{23}},$$

де L_{23} — відстань між МД2 і МД3. Метод реалізовано у експериментальній системі РАСТР-1 [13].

Кореляційний параметричний метод визначення координат витоків. Цей метод створено з метою підвищення достовірності пошуку витоків теплових мереж через врахування наявного БП по трубопроводу вібросигналів від витоків при визначенні їхніх координат кореляційним течешукачем з відповідними режимами роботи та методикою застосування. Створення методу складається з наступних етапів:

формування діагностичної моделі ділянки трубопроводу у відповідності з викладеними принципами та орієнтованої на вирішення завдання пошуку витоків в умовах БП вібросигналів, явищ інтерференції хвиль та наявності крім витоків некорельованих між собою акустичних завад;

формування переліку діагностичних параметрів $P_{\gamma m}(f_{\mu})$, чутливих до інтерференції хвиль, які за величиною характеризують якість просторово-частотної селекції найбільш потужної та інформативної хвилі гідравлічного удару;

визначення координат найбільш потужного витoku на ділянці трубопроводу та за наявністю обчислення координат менших пошкоджень трубопроводу за допомогою формування та вирішення задачі в категоріях, наведених у таблиці.

Метод реалізовано у експериментальній системі РАСТР-1 [13] та у апаратно-програмних комплексах течешукачів серії К-10 різних модифікацій [14, 15]. Метод дозволяє отримати високі показники точності і достовірності: з ймовірністю 0,95 помилка визначення координат витоків підземних трубопроводів становить не більше 0,5...1 м на ділянках трубопроводів довжиною до 600 м і діаметром до 1020 мм.

Кореляційний параметричний метод визначення координат і оцінки ступеня корозійного стоншення стінки трубопроводу. Метод розроблено з метою визначення місць з суттєвим корозійним стоншенням стінки трубопроводу для проведення саме в цих місцях попереджувальних ремонтів теплових мереж. За допомогою цього методу можна визначити найбільш пошкоджені корозією ділянки для їх першочергового оновлення та місця для проведення шурфів з метою аналізу стану металу контактними методами і з'ясування умов подальшої безаварійної експлуатації теплопроводу. Створення методу складається з наступних етапів:

формування діагностичної моделі ділянки трубопроводу у відповідності з викладеними принципами, орієнтованої на визначення ехолокаційним способом місць та ступеня корозійного стоншення стінки трубопроводу в умовах БП вібросигналів і явищ інтерференції хвиль;

визначення швидкостей поширення інформаційних сигналів за допомогою кореляційного параметричного методу визначення характерис-

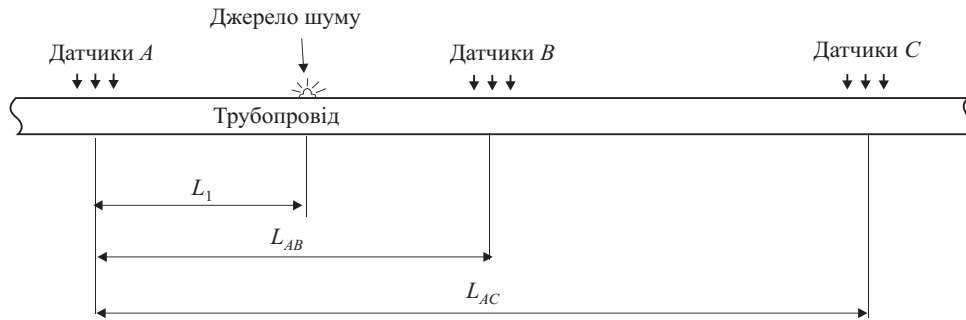


Рис. 3. Триточкове визначення координат джерела шуму

тик поширення уздовж трубопроводу домінуючих за потужністю акустичних хвиль;

визначення координат корозійного стоншення стінки трубопроводу та оцінка його ступеня через формування та вирішення задачі в категоріях, наведених у таблиці, з застосуванням вейвлет-аналізу результатів кореляційної обробки даних.

Метод реалізовано у апаратно-програмній системі РАСТР-1 [13]. Він забезпечує необхідні дистанційні характеристики: на ділянках трубопроводів теплопостачання з каналною прокладкою довжиною до 200 м визначення місць корозійного стоншення забезпечується з достовірністю близько 75%.

Адаптований до БП сигналів кореляційний триточковий метод визначення координат джерел шуму і швидкостей вібросигналів. Відомо, що за допомогою триточкових вимірювань (рис. 3) для «ідеальної» моделі можна отримати точні координати джерела шуму, яке перебуває на протяжному трубопроводному об'єкті. Один з перших випадків вживання фізичної трьохточка для кореляційних вимірювань описано в [16]. У роботі [17] запропоновано метод послідовної трьохточка.

В умовах БП вібросигналів розглянутий методологічний підхід дозволяє:

1) вилучити з (5) величину швидкості вібросигналу і отримати вираз для координати джерела шуму, обчисленого за η -ю хвилиною, у вигляді

$$L_{i\eta} = \frac{L_{AB} \times \tau_{ACi\eta} - L_{AC} \times \tau_{ABi\eta}}{2 \times (\tau_{ACi\eta} - \tau_{ABi\eta})},$$

де $\tau_{ACi\eta} - \tau_{ABi\eta}$ — різниця часу поширення η -ї хвилі від пошкодження до датчиків відповідно A та C і A та B , які встановлено на кінцях ДДТ (див. рис. 3);

2) вилучити з (5) координату джерела шуму і отримати вираз для швидкості вібросигналу, обчисленого за η -ю хвилею, у вигляді

$$V_{\eta} = \frac{L_{AC} - L_{AB}}{\tau_{ACi\eta} - \tau_{ABi\eta}} .$$

В умовах БП вібросигналів для досягнення максимальної точності на конкретній ДДТ необхідно використовувати сумісно частотну і просторову селекцію домінуючих за потужністю хвиль. Це виконується за допомогою наступних дій:

формування діагностичної моделі ділянки трубопроводу у відповідності з викладеними принципами, орієнтованої на визначення величин часових затримок $\tau_{ABi\eta}$ та $\tau_{ACi\eta}$ в умовах БП вібросигналів, явищ інтерференції хвиль та наявності крім джерела шуму некорельованих між собою акустичних завад;

формування переліку діагностичних параметрів $P_{\gamma m}(f_{\mu})$, чутливих до інтерференції хвиль, які за величиною характеризують якість просторово-частотної селекції наявних на трубопроводі хвиль, домінуючих у своїх піддіапазонах частот;

визначення параметрів $\tau_{ABi\eta}$ та $\tau_{ACi\eta}$, вільних від впливу інтерференційних спотворень, через формування та вирішення задачі в категоріях, наведених у таблиці.

Метод реалізовано у апаратно-програмному комплексі РАСТР-1 [13]. Зазначена модифікація триточкового методу, яка полягає у виділенні окремих хвиль, дозволяє коректно використовувати його в умовах БП вібросигналів, зокрема як критерій істинності (див. таблицю) при оцінці даних кореляційних течешукачів і для уточнення таблиць швидкостей хвиль уздовж труб типорозмірів, необхідних для кореляційних течешукачів.

Висновки

Запропонований методологічний підхід дозволяє врахувати особливості БП акустичних сигналів уздовж ДДТ для підвищення якості діагностування трубопроводів. Якість просторово-частотної селекції хвиль забезпечується застосуванням діагностичних параметрів, чутливих до ІАХ. За допомогою розробленої апаратно-програмної системи РАСТР-1 здійснюється структурно-параметрична ідентифікація параметрів моделі ДДТ, які є важливими для діагностування, а саме перелік домінуючих за потужністю акустичних хвиль, їх діапазон частот, швидкість і питоме загасання. Ефективність запропонованих кореляційних параметричних методів визначення координат витоків, визначення координат і оцінки ступеня корозійного стоншення стінки трубопроводу підтверджено результатами багаторічних методичних випробувань і виробничої експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гринченко В.Т., Комиссарова Г.Л.* Особенности распространения волн в заполненных жидкостью цилиндрах с податливыми стенками // *Акустичний вісник*, 2001, 3 (4), с. 22—33.
2. *Гринченко В.Т., Комиссарова Г.Л.* Распространение волн в полом упругом цилиндре с жидкостью // *Прикладная механика*, 1984, 1 (20), с. 21—26.
3. *Кубенко В.Д.* Нелинейные колебания цилиндрических оболочек. Київ: Вища школа, 1989, 208 с.
4. *Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Бояришина Л.Г. и др.* Нелинейная динамика осесимметричных тел, несущих жидкость. Киев: Наукова думка, 1992, 184 с.
5. *Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Краснопольская Т.С.* Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек. Киев: Наукова думка, 1984, 220 с.
6. *Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Крук Л.А.* О многомодовых нелинейных колебаниях цилиндрических оболочек, заполненных жидкостью // *Прикладная механика*, 2003, 1 (39), с. 85—94.
7. *Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др.* Об опыте применения АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2008, № 4, с. 85—95.
8. *Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А.* Непрерывный мониторинг магистральных газопроводов и газокompрессорных станций методом акустической эмиссии // Там же. 2011, № 4, с. 3—13.
9. *Недосека С.А.* Контроль линии синтеза аммиака системой АЭ диагностики ЕМА-3У // Там же. 2003, № 4, с. 24—28.
10. *Недосека С.А., Недосека А.Я.* Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (обзор) // Там же, 2005, № 3, с. 20—26.
11. *Владимирский А.А., Владимирский И.А.* Способ частотного анализа характеристик корреляционных функций вибросигналов // *Тези ХХ науково-технічної конф. «Моделювання»*. 12—14 січня 2000 р. Київ, ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2000, с. 23—24.
12. *Владимирський І.А.* Інформаційні технології та засоби підвищення достовірності кореляційних течешукачів : Дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2001, 185 с.
13. *Владимирский А.А., Владимирский И.А.* Разработка структуры экспериментальной системы активно-пассивного низкочастотного диагностирования состояния трубопроводов // *Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 2012, вип. 64, с. 55—57.
14. *Владимирский А.А., Владимирский И.А., Криворучко И.П., Савчук Н.П.* Разработка модернизированного корреляционного течешукателя К-10.5 М2 // *Зб. наук. праць «Моделювання та інформаційні технології»*. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2017, вип. 79, с. 68—70.
15. *Владимирский А.А., Владимирский И.А.* Методика комплексного использования течешукателей К-10 и А-10 при поиске утечек трубопроводов тепловых сетей // *Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 2000, вип. 9, с. 3—11.
16. *Заявка 53-5554* (Япония). G 01 M 3/24. Система контроля утечки газа в длинных газопроводах. / Осака Гасу К.К. Опубл. 1978, 6-139.
17. *Владимирский А.А.* Алгоритмы и микропроцессорные средства поиска утечек в трубопроводах : Дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1992, 213 с.

Отримано 10.01.19

REFERENCES

1. Grinchenko, V.T. and Komissarova, G.L. (2001), "Especially the propagation of waves in fluid-filled cylinders with compliant walls", *Akustychnyi visnik*, Vol. 3, no. 4, pp. 22-33.
2. Grinchenko, V.T. and Komissarova, G.L. (1984), "Propagation of waves in a hollow elastic cylinder with a liquid", *Prikladnaya mehanika*, Vol. 1, no. 20, pp. 21-26.
3. Kubenko, V.D. (1989), *Nelineynyye kolebaniya uglovykh obolochek* [Nonlinear vibrations of cylindrical shells], Vischa shkola, Kiev, Ukraine.
4. Kubenko, V.D., Kovalchuk, P.S. and Boyarshina, L.G. (1992), *Nelineynaya dinamika osetsimmetrichnykh tel, nesushchikh zhidkost* [Nonlinear dynamics of axisymmetric bodies carrying a fluid], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
5. Kubenko, V.D., Kovalchuk, P.S. and Krasnopolskaya, T.S. (1984), *Nelineynoye vzaimodeystviye form izgibnykh kolebaniy tsilindricheskikh obolochek* [Nonlinear interaction of the forms of bending vibrations of cylindrical shells], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
6. Kubenko, V.D., Kovalchuk, P.S. and Kruk, L.A. (2003), "On multimode non-linear oscillations of cylindrical shells filled with liquid", *Prikladnaya mehanika*, Vol. 1, no. 39, pp. 85-94.
7. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. and Yaremenko, M.A. (2008), "On the experience of using AE technology for continuous monitoring of equipment at the Odessa Port Plant", *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*, no. 4, pp. 85-95.
8. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. and Yaremenko, M.A. (2011), "Continuous monitoring of gas pipelines and gas compressor stations by the method of acoustic emission", *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*, no. 4, pp. 3-13.
9. Nedoseka, S.A. (2003), "Monitoring of ammonia synthesis line by AE diagnostic system EMA-3U", *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*, no. 4, pp. 24-28.
10. Nedoseka, S.A. and Nedoseka, A.Ya. (2005), "Diagnostic Systems Family «EMA». Basic principles and features of architecture (overview)", *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*, no. 3, pp. 20-26.
11. Vladimirskiy, A.A. and Vladimirskiy, I.A. (2000), "Method for frequency analysis of the characteristics of the correlation functions of vibration signals", *Tezy XX naukovno-tekhnichnoyi konf. «Modelyuvannya»* [XX science and technology conference «Modelyuvannya»], Kiev, Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, January 12-14, 2000, pp. 23-24.
12. Vladimirskiy, I.A. (2001), "Information technologies and means of increasing the reliability of correlation flow detectors", Cand. Sci. (Tech.) dissertation, Lviv, Ukraine.
13. Vladimirskiy, A.A. and Vladimirskiy, I.A. (2012), "Development of the structure of the experimental system of active-passive low-frequency diagnostics of the state of pipelines", *Zbirnyk naukovykh prats IPME im. G.E. Pukhova NAN Ukrainy*, no. 64, pp. 55-57.
14. Vladimirskiy, A.A., Vladimirskiy, I.A., Krivoruchko, I.P. and Savchuk, N.P. (2017), "Development of an upgraded correlation leak detector K-10.5M2", *Modelyuvannya ta Informatsiyi tehnologiyi (zbirnyk naukovykh prats IPME im. G.E. Pukhova NAN Ukrainy)*, no. 79, pp. 68-70.
15. Vladimirskiy, A.A. and Vladimirskiy, I.A. (2000), "Methods for the integrated use of leak detectors «K-10" and »A-10" when searching for leaks of pipelines of thermal networks", *Zbirnyk naukovykh prats IPME im. G.E. Pukhova NAN Ukrainy*, no. 9, pp. 3-11.
16. Osaka Gasu, K.K. (1978), Patent No.53-5554, G 01 M 3/24, "Control system for gas leakage in long pipelines", 1978, pp. 6-139.
17. Vladimirskiy, A.A. (1992), "Algorithms and microprocessor tools for leak detection in pipelines", Cand. Sci. (Tech.) dissertation, Kiev, Ukraine.

Received 10.01.19

А.А. Владимирский

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ МНОГОВОЛНОВОГО
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Разработаны новые методы качественного диагностирования подземных трубопроводов тепловых сетей с учетом особенностей многоволнового распространения по трубопроводам акустических сигналов. Общий методологический подход включает следующие этапы: формирование диагностической модели участка трубопровода с учетом многоволнового распространения акустических сигналов; вычисление массивов корреляционных функций информационных сигналов, по которым будут формироваться массивы диагностических параметров, чувствительных к интерференции акустических волн. Эти параметры затем используются как параметры качества управления при решении задачи диагностирования как задачи нелинейного программирования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: многоволновое распространение, вибросигнал, диагностическая модель, корреляция, трубопровод, утечка, коррозионное утончение.

A.A. Vladimirskiy

CREATION OF PARAMETRIC METHODS FOR DIAGNOSING
UNDERGROUND PIPELINES TAKING INTO ACCOUNT
THE MULTI-WAVE PROPAGATION OF INFORMATION SIGNALS

The article is devoted to solving the problems of developing new methods for qualitative diagnostics of underground pipelines of heat networks that take into account the specific features of wave propagation of acoustic signals through pipelines. A general methodological approach is presented. The approach includes the following steps: the formation of a diagnostic model of the pipeline section, taking into account the multi-wave propagation and wave interference; synchronous registration of the array of acoustic signals; calculating the arrays of their correlation functions; by correlation functions, calculation of arrays of diagnostic parameters sensitive to the interference of acoustic waves recorded at various points of the pipeline at the access points. Further, these parameters are used as control quality parameters in the nonlinear programming problem. Parameters are controlled in the process of solving a problem by choosing the spatial position of the sensors on the pipeline and the frequency ranges of the signals.

K e y w o r d s: multi-wave propagation, vibrosignal, diagnostic model, correlation, pipeline, leakage, corrosion refinement.

ВЛАДИМИРСЬКИЙ Олександр Альбертович, канд. техн. наук., пров. наук. співробітник Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1981р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — моделі, методи, апаратні і програмні засоби діагностування енергетичних і енергоємних об'єктів.

