

**Висновки:**

Оцінюючи в цілому аналітичний метод розрахунку кутових параметрів акустичного тракту системи „призматичний п'єзоперетворювач – циліндричний виріб”, можна відзначити наступне:

1. Сукупність отриманих виразів (1) – (8) дозволяє визначити важливу функціональну залежність кутів падіння і кутів заломлення  $\alpha$  і  $\beta$  будь-якого з променів пучка ультразвукових коливань від радіуса кривизни циліндричної поверхні  $R$  контрольованого виробу, радіуса п'єзоперетворювача  $a$  і співвідношення швидкостей поширення УЗК  $C_1/C_2 = n$  акустичного тракту системи „п'єзоперетворювач – контрольований об'єкт”.

2. Відносна простота розрахункових формул (1) – (8) робить аналітичний метод більш ефективним для оцінки характеру поширення ультразвукових коливань в зоні акустичного тракту, наприклад, при розробці методики луна-дефектоскопії або луна-товщинометрії виробів циліндричної форми.

3. Порівняльна оцінка аналітичного і графоаналітичного методів показує, що при використанні останнього виникає суб'єктивна похибка, що вноситься в результати розрахунків шуканих величин.

4. Оскільки розрахункові формули виведені для випадку, коли значення кута нахилу акустичної осі випромінювача від'ємне, у випадку його додатного значення необхідно керуватися наступними умовами:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{1n} &= \sin \alpha_{20}; & \sin \alpha_{2n} &= \sin \alpha_{10}; \\ \sin \beta_{1n} &= \sin \beta_{20}; & \sin \beta_{2n} &= \sin \beta_{10}, \end{aligned}$$

де “ $n$ ” - додатне, “ $0$ ” - від'ємне значення кута.

1. Єрмолов И.Н. *Физические основы эхо- и теплового методов ультразвуковой дефектоскопии*. – М.: Машиностроение, 1970. – 107 с., ил. 2. Выборнов Б.И. *Ультразвуковая дефектоскопия*. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с., ил. 3. Соколов В.С. *Дефектоскопия металлов*. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 79 с.

УДК 620.179.17:622.323

## ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТРУБ НАФТОВОГО СОРТАМЕНТУ

© Карпаш О.М., 2005

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

*Розглянуто питання розробки нових та удосконалення існуючих способів і методів підвищення інформативності результатів акустичного контролю труб нафтового сортаменту, у тому числі під час оцінки герметичності та міцності їх різьбових з'єднань. Викладено результати досліджень з підвищення точності вимірювання контакт-ного тиску в різьбових з'єднаннях акустичним методом.*

Основні труднощі у вирішенні проблеми неруйнівного контролю та технічної діагностики (НКТД) обладнання пов'язані з неповнотою та неоднозначністю інтерпретації інформації, яку одержують на практиці експериментів різними фізичними методами. Складність діагностування таких об'єктів визначається взаємозв'язком, стохастичністю і корельованістю багатьох одночасно триваючих фізичних процесів, складністю конструкцій основних вузлів обладнання та умов експлуатації, принциповими труднощами одержання достовірної інформації, необхідної для розпізнання несправностей і оцінки технічного стану.

Окрім того, на сучасному етапі розвитку науки і техніки України ставиться завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу, але й контроль за утворенням та докритичним розвитком тріщини, контроль напружено-деформованого стану матеріалу, вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дасть змогу через вимірювання цих параметрів вийти на оцінку залишкового ресурсу об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металоконструкцій [1].

Першим етапом у вирішенні поставленої проблеми є розробка нових та удосконалення існуючих методів математичного моделювання взаємодії зовнішніх фізичних полів з об'єктами контролю для кількості та достовірності діагностичної інформації. Особливо складним об'єктом контролю є трубні вироботи та їх різьбові з'єднання, оскільки у них складна геометрична форма, матеріал часто знаходиться під дією значних напружень, а розміри типових дефектів співрозмірні з розмірами витків різьби.

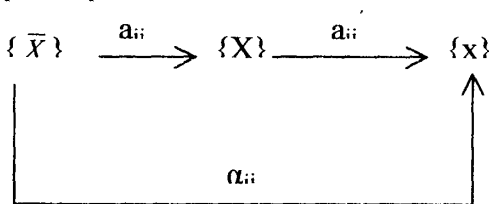
Розроблено новий підхід до дослідження поширення ультразвукових коливань у матеріалах, за яким використовується зведення ефективного середовища за модулями пружності, залежними від просторового розподілу попередніх напружень. Вирішення цього має суттєве значення для розвитку методів акустичного контролю взагалі і, зокрема, для однієї з найбільш актуальних проблем – контролю різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту.

Було розглянуто три стани пружного, в загальному випадку, анізотропного середовища (рис. 1):  $\{\bar{X}\}$  – стан ненапруженого середовища,  $\{X\}$  – стан, який відрізняється від стану  $\{\bar{X}\}$  наявністю скінченних неоднорідних напружень, які супроводжуються параметрами деформацій:

$$a_{ij} = \partial X_i / \partial \bar{X}_j = \delta_{ij} + U_{ij}, \quad (1)$$

$$n_{ij} = 0,5 \cdot (a_{mi} \cdot a_{mj} - \delta_{ij}) = 0,5 \cdot (U_{ij} + U_{ji} + U_{ij} \cdot U_{ji}); \quad (2)$$

де  $\delta_{ij} = 1, i = j; \delta_{ij} = 0, i \neq j; U_{ij} = \frac{\partial(X_i - \bar{X}_i)}{\partial X}$  – тензор дисторсій.



$\{\bar{X}\}, \{X\}, \{x\}$  - відповідно стан ідеального ненапруженого середовища, стан статичного напруженого середовища, стан з малими динамічними пружними деформаціями

Рис. 1. Три стани пружного середовища

Перехід із стану  $\{X\}$  у стан  $\{x\}$  описується інфінітезимальними тензорами  $\overset{\wedge}{a}$ ,  $\overset{\wedge}{n}$ . Параметри деформацій  $\overset{\wedge}{a}$ ,  $\overset{\wedge}{n}$ ,  $\overset{\wedge}{\alpha}$ ,  $\overset{\wedge}{\eta}$  визначаються аналогічно (1) та (2).

Виходячи з визначення термодинамічного потенціалу одиниці маси, показано, що константи пружності другого порядку в стані  $\{X\}$  можуть бути представлені як розклад по дисторсіях  $U_{mn}$  у лінійному наближенні:

$$C_{ijkl}(X) = C^0_{ijkl} + U_{mn} \times (C^0_{njkl} \cdot \delta_{im} + C^0_{inkl} \cdot \delta_{jm} + C^0_{ijnl} \cdot \delta_{km} + C^0_{ijkn} \cdot \delta_{lm} - C^0_{ijkl} \cdot \delta_{mn} + C^0_{ijklmn}). \quad (3)$$

де  $C^0_{ijkl}$  – константи пружності у ненапруженому стані  $\{X\}$ .

Аналогічні вирази можуть бути одержані для констант пружності вищих порядків. Звідси випливає, що пружні властивості однорідного, але неоднорідно деформованого середовища можуть змінюватись внаслідок неоднорідності дисторсій  $U_{mn}$ . Уже на цьому етапі дослідження у першому наближенні можна було б, використовуючі залежні від координат пружні константи (3) у стандартних рівняннях руху пружного середовища, запропонувати метод дослідження поширення пружних хвиль у попередньо напружених середовищах. Але більш точний підхід полягає у виведенні рівнянь руху в стані  $\{x\}$  і переводі цього рівняння до координат ненапруженого стану  $\{\bar{X}\}$ . У результаті вказаних перетворень одержано рівняння руху в переміщеннях стандартного виду

$$\rho \ddot{\bar{w}} = \mu^* \cdot \bar{\nabla}^2 \cdot \bar{w} + (\lambda + \mu)^* \cdot \bar{\nabla} \cdot (\bar{\nabla} \cdot \bar{w}) \quad (4)$$

з пружними константами, залежними від координат. Це рівняння еквівалентне системі рівнянь Гельмгольца

$$\bar{\nabla}^2 \Phi(\bar{x}) + K_{ol}^2 n_l^2(\bar{x}) \Phi(\bar{x}) = 0; \quad (5)$$

$$\bar{\nabla}^2 \bar{\Psi}(\bar{x}) + K_{of}^2 n_t^2(\bar{x}) \bar{\Psi}(\bar{x}) = 0, \quad (6)$$

де  $\Phi$  і  $\bar{\Psi}$  – скалярний і векторний пружні потенціали;  $\bar{w} = W \cdot e^{-i\omega t}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\bar{W} = \bar{\nabla} \cdot \Phi + \bar{\nabla} \cdot \bar{\Psi}$ ,  $\omega = 2\pi\nu$  – кругова частота;

$k_{ol} = \omega / C_{ol}$ ,  $n_l(\bar{x}) = C_{ol} / C_l(\bar{x})$ ;  $C_{ol}$ ;  $C_{of}$ ;

$n_t(\bar{x}) = C_{of} / C_t(\bar{x})$  – деякі фіксовані швидкості по-здовжніх і поперечних хвиль відповідно,  $C_l(\bar{x})$ ,

$C_t(\bar{x})$  – їх локальні значення;  $\bar{x}$  – координата ненапруженого стану.

У випадку високих частот доцільне застосування променевого методу. Тому розв'язок системи (5), (6) шукаємо у вигляді рядів Дебая:

$$\Phi(\bar{x}) = e^{iK_{ol}S} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} A_m(\bar{x}) / (ik_{ol})^m; \quad (7)$$

$$\bar{\Psi}(\bar{x}) = e^{iK_{ol}\bar{S}} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \bar{B}_m(\bar{x}) / (ik_{ol})^m, \quad (8)$$

де невідомі фази  $S$ ,  $\bar{S}$  та амплітуди  $A_m$ ,  $\bar{B}_m$  можуть бути знайдені з рівнянь ейконалу

$$(\nabla \bar{S})^2 = n_l^2; \quad (\nabla S)^2 = n_t^2 \quad (9)$$

та переносу

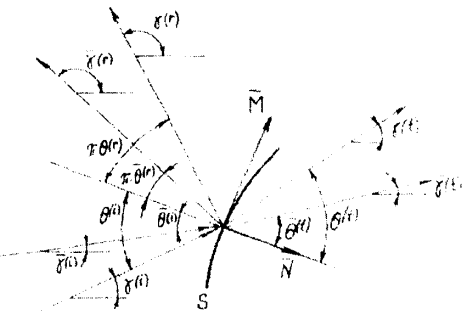
$$2\nabla A_m \nabla S + A_m \nabla^2 S = -\nabla^2 A_{m-1}; (A_m=0, m<0); \quad (10)$$

$$2\nabla \bar{B}_m \nabla \bar{S} + \bar{B}_m \nabla^2 \bar{S} = -\nabla^2 \bar{B}_{m-1};$$

$$(\bar{B}_m = 0, m < 0). \quad (11)$$

Розгляд задачі проілюстрований прикладом застосування розвинутого методу до знаходження траєкторій променів і хвильових полів від зосереджених джерел у середовищах з плоско- та циліндрично-шаровим розподілом попередніх напружень [2].

Також було досліджено можливість застосування методу променевих рядів Дебая до дослідження поширення, відбиття і заломлення пучків високочастотних хвиль (рис.2) за поперечного розподілу в циліндричних хвилеводах.



(i), (f), (r) – індекси відповідно падаючих, заломлених та відбитих хвиль;  $N$  – вектор, нормальний до границі розділу,  $M$  – вектор, дотичний до границі розділу

Рис. 2. Схема відбиття та заломлення високочастотних хвиль на криволінійній границі розділу

На відміну від більш складних умов попередньої задачі, у випадку плоских задач для однорідного середовища вдається знаходити довільну кількість членів променевих рядів і таким чином одер-

жувати більш точні розв'язки, які залишаються придатними і для нижчих частот (до довжин хвиль, зрівняваних з характерними розмірами дефектів), а також більш точно враховують вплив кривизни хвильових пучків і границь [3].

Таким чином, проведений аналіз характеру поширення ультразвукових коливань у пружних середовищах дає можливість зводити задачі про поширення хвиль у середовищах з неоднорідним напружено-деформованим станом до задач поширення хвиль у слабко неоднорідних середовищах, а також використовувати променевий метод для дослідження закономірностей поширення пружних хвиль у середовищах з плоско- та циліндрично-шаровим розподілом напружень.

Одержані результати були застосовані до дослідження особливостей поширення УЗК у різьбових частинах труб, що дало можливість:

- обчислювати параметри способу контролю для певної відомої або очікуваної орієнтації поверхні відбиття (дефекту, зони спряження, витка різьби тощо) без графічних побудов;

- забезпечувати мінімум втрат ультразвукової енергії завдяки найкращим умовам відбиття УЗК від площини дефекту, що стало основою для розробки способів контролю товстостінних труб, які неможливо контролювати іншим чином через значне затухання УЗК у товщі металу;

- розробити спосіб, який вперше дав змогу здійснювати дефектоскопію замкових різьбових з'єднань ОБТ усіх типорозмірів у згвинченому стані [4, 5].

Наступним етапом досліджень було встановлення характеру розподілу радіальних та кільцевих напружень в околі різьбового з'єднання, так як необхідно не тільки виявляти дефекти в різьбових з'єднаннях, але й контролювати їх якість та герметичність.

Над даною проблемою, відповідно до важливості найбільш вразливих ділянок, працювало багато відомих вчених. Так, С.Ф.Білик провів детальне дослідження напруженого стану труби під дією внутрішніх і зовнішніх тисків як на основі розв'язку задачі Ламе, так і на основі розв'язку задачі загальної теорії деформування осесиметричних оболонок. У результаті проведених досліджень знайдені закономірності для вибору оптимальних конструкцій різьбових з'єднань, профілів різьб та ін [6].

Дослідження напруженого стану в околі різьбового з'єднання проводились на основі оригінального розв'язку, побудованого накладанням двох розв'язків задачі Ламе - для внутрішньої і зовнішньої частин різьбового з'єднання. При такому підході, використовуючи граничну умову, яка враховує певний радіальний натяг  $\delta_r$  на радіусі різьбового

з'єднання, вдається одержати потрібний розв'язок, який характеризує напружено-деформований стан (НДС) у системі внутрішня - зовнішня частини з'єднання в залежності від величини радіального натягу  $\delta_r$ .

Розглянемо основні моменти розв'язання модельної задачі [7]. Симетричний відносно осі розподіл напружень у порожнистих циліндрах, які моделюють внутрішню і зовнішню частини різьбового з'єднання (рис. 3. а), для випадку плоскої деформації, що задовольняє рівнянням рівноваги плоскої задачі теорії пружності в полярній системі координат  $r, \varphi$ , має вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{2\sigma_{r\varphi}}{r} = 0. \quad (13)$$

Рішення системи рівнянь (12) і (13) для внутрішнього циліндра можна подати у вигляді:

$$\sigma_{rr}' = \frac{A_1}{r^2} + 2C_1; \quad (14)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}' = -\frac{A_1}{r^2} + 2C_1; \quad (15)$$

$$U_r' = \frac{-\frac{A_1}{r} + 2C_1 \cdot (1 - 2\nu_1) \cdot r}{2\mu_1}, \quad (16)$$

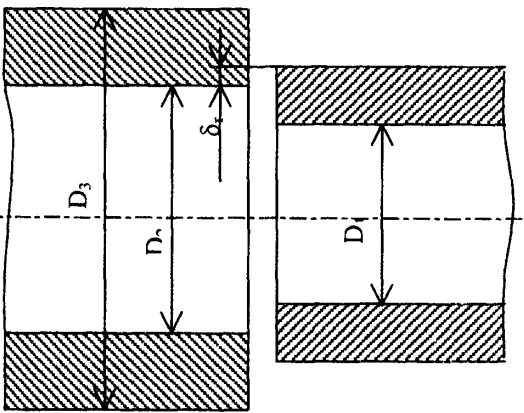
а для зовнішнього циліндра – у вигляді:

$$\sigma_{rr}'' = \frac{A_2}{r^2} + 2C_2; \quad (17)$$

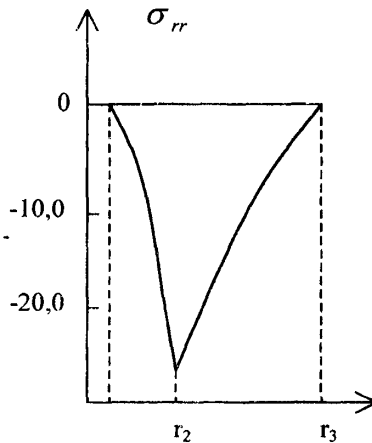
$$\sigma_{\varphi\varphi}'' = -\frac{A_2}{r^2} + 2C_2; \quad (18)$$

$$U_r'' = \frac{-\frac{A_2}{r} + 2C_2 \cdot (1 - 2\nu_2) \cdot r}{2\mu_2}. \quad (19)$$

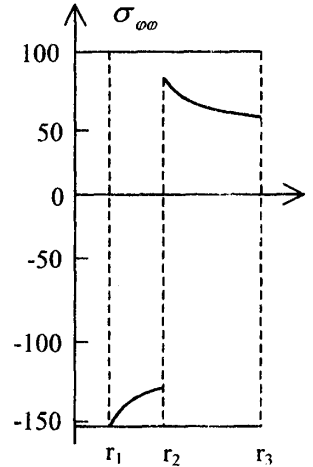
За граничні умови приймаються такі чотири співвідношення на радіусах з'єднуваних циліндрів (рис. 3):



а)



б)



в)

Рис. 3. Геометрія модельної задачі (а) та розподіл радіального (б) і кільцевого (в) напруження в околі різьбового з'єднання

$$\sigma_{rr}' = 0 \quad |r = r_1; \quad (20)$$

$$\sigma_{rr}'' = 0 \quad |r = r_3; \quad (21)$$

$$\sigma_{rr}' = \sigma_{rr}'' \quad |r = r_2; \quad (22)$$

$$U_r' + \delta_r = U_r'' \quad |r = r_2; \quad (23)$$

які дають можливість визначити чотири невідомі константи  $A_1, C_1, A_2, C_2$ :

$$A_1 = 2 \cdot \delta_r \cdot \left( \frac{1/r_2 + r_2/r_1^2 \cdot (1 - 2\nu_1) + \mu_1}{r^*/r_2 + (r_2 \cdot r^* \cdot (1 - 2\nu_2))/r} \right); \quad (24)$$

$$C_1 = \frac{A_1}{2 \cdot r_1^2}; \quad (25)$$

$$A_2 = -A_1 \cdot r^*; \quad (26)$$

$$C_2 = \frac{A_2 \cdot r^*}{2 \cdot r_3^2}; \quad (27)$$

$$r^* = \frac{1/r_1^2 - 1/r_2^2}{1/r_2^2 - 1/r_3^2}. \quad (28)$$

На рис. 3 зображено розподіл радіального  $\sigma_{rr}$  і тангенціального  $\sigma_{\varphi\varphi}$  напружень, які одержані на основі розв'язку (16) - (28) в системі двох порожнистих циліндрів, зібраних з натягом  $\delta_r$ . Система моделює різьбове з'єднання сталевих труб з параметрами:  $\nu_1 = \nu_2 = 0,28$ ;  $\mu_1 = \mu_2 = 8,0 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;  $\delta_r = 0,5$  мм.

Були розроблені та реалізовані нові підходи до оцінки якості різьбових з'єднань бурового обладнання на різних етапах його експлуатації, які полягають не тільки у виявленні засобами неруйнівного контролю дефектів типу порушення суцільності металу (тріщин, раковини, непровари, включення), але й у вимірюванні параметрів, що визначають його експлуатаційні характеристики на міцність і герметичність [ 8, 9, 10]. Запропоновано спосіб контролю якості процесу згвинчування, що базується на його фізичній суті, яка полягає в особливостях залежності крутного моменту згвинчування від величини контактної тиску та необхідності забезпечення в з'єднанні після його згвинчування певного значення радіальної деформації [11].

Суть запропонованого способу полягає в тому, що під час згвинчування різьбових з'єднань постійно з певним кроком  $\Delta\varphi$  (наприклад,  $\Delta\varphi = 0,1$  оберту) проводять вимірювання контактної тиску в спряжених поверхнях акустичним методом. Одночасно з тією ж дискретністю (кроком) визначають величину та знак похідної  $dP/d\varphi$ . Якість процесу згвинчування оцінюють за відхиленням значень контактних тисків від номінальних (порівняння йде під час кожного вимірювання), швидкості зміни величини і знака похідної  $dP/d\varphi$ .

У результаті проведених досліджень встановлено, що в якості нових інформаційних діагностичних ознак якості різьбового з'єднання можна приймати:

- під час згвинчування – момент досягнення в найбільш навантажених елементах різьбового з'єднання напружень, близьких до границі текучості матеріалу;

- після згвинчування та в процесі експлуатації – величину фактичної площі дотику та рівень радіальних деформацій і їх розподіл у спряжених елементах.

Також були проведені теоретичні дослідження з підвищення точності вимірювань контактної тиску в різьбових з'єднаннях акустичним методом.

На сьогоднішній день для визначення контактних тисків застосовуються акустичні інформаційно-вимірювальні системи (АІВС), які використовують властивість ультразвукових коливань поширюватись у пружних середовищах і змінювати свої параметри залежно від параметрів середовища, яке контролюється [12]. Об'єкти вимірювання, п'єзоелектричні перевертальні і решта субсистем АІВС перебувають під впливом внутрішніх і зовнішніх збурюючих факторів, а тому в таких системах виникають спотворення і неконтрольовані затримки вимірювальних сигналів, що призводить до дуже великих похибок вимірювань (50% і більше) [13].

У теорії і практиці розробки АІВС відомі різні способи підвищення точності процесу вимірювання. Наприклад, щоб виключити внутрішні динамічні похибки в каналі "випромінювач - об'єкт вимірювання - приймач", застосовують інверсні фільтри. Проте на даний час відсутні надійні й ефективні технічні засоби пригнічення неконтрольованих зовнішніх завад, якими у випадку вимірювання контактних тисків в різьбових з'єднаннях труб є: якість акустичного контакту, шорсткість спряжених поверхонь, неоднорідність хімічного і структурного складу матеріалів деталей, ступінь їх пружних і пластичних деформацій, наявність дефектів, зміни температурного режиму різьбових з'єднань та інші.

З точки зору усунення зовнішніх завад для визначення корисного сигналу можна було б використати смугові фільтри. Однак, як свідчить аналіз частотних діапазонів зовнішніх збурюючих впливів і корисних сигналів, ці діапазони перекриваються, і тому для покращання точності вимірювання корисного сигналу доцільно використовувати методи цифрової обробки сигналів із застосуванням оптимальних алгоритмів.

Множина перелічених неконтрольованих випадкових впливів призводить до стохастичного характеру вихідного інформаційного сигналу АІВС. Тому задачу підвищення точності оцінки амплітуди ультразвукового сигналу (УЗС) під час контролю контактних тисків треба вирішувати за допомогою існуючих АІВС та методів оптимальної фільтрації випадкових сигналів нестационарних процесів [14].

Для математичного опису процес акустичного визначення контактних тисків був представлений у вигляді еквівалентної моделі, що зображена на рис. 4. Тут АІВС розглядається як послідовне з'єднання динамічної (ДС) і вимірювальної (ВС) систем, які взаємодіють між собою у відповідності з прийнятою схемою акустичного контролю [15, 16].

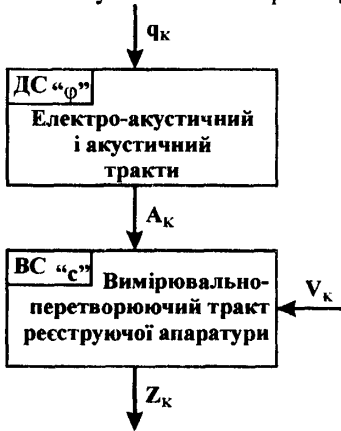


Рис. 4. Еквівалентна модель АІВС визначення контактних тисків

Експериментально встановлено, що амплітуда УЗС  $Z_k$  має випадковий характер, тобто є випадковою функцією кількості обертів або просторової координати  $l$ , і її закон розподілу практично співпадає з нормальним, або Гаусовим, законом розподілу. Якщо представити ефект впливу всіх випадкових збуджуючих факторів на амплітуду радіоімпульсу  $A_k$  у вигляді сумарної завади  $q_k$ , яка називається шумом об'єкта контролю, то можна одержати рівняння (42). Тобто можна припустити, що зміна амплітуди радіоімпульсу відбувається тільки під впливом адитивної випадкової послідовності  $q_k$ , оскільки зондуючий вхідний сигнал весь час залишається постійним, і ефект від його впливу враховується коефіцієнтом  $j$ . Беручи до уваги дискретний характер процесу акустичного контролю, доречно модель процесу представляти у вигляді різницевого рівняння, а випадкову функцію  $q$  розглядати як випадкову послідовність  $q_k$  типу гаусового білого шуму.

Для отримання повної моделі АІВС у просторі станів необхідно мати математичний опис вимірювальної системи (див. рис. 4), який можна представити у вигляді лінійної комбінації змінної стану  $A_k$  і завади  $V_k$ , тобто

$$Z_k = CA_k + V_k, \quad (29)$$

де  $Z_k$  — вихідне значення сигналу реєструючої апаратури, дБ;  $C$  — розмірний коефіцієнт, дБ/мкВ;

$V_k$  — незалежна випадкова послідовність, яка є шумом вимірювальної реєструючої апаратури типу гаусового білого шуму з відомою дисперсією  $\sigma_{V_k}^2$ , дБ<sup>2</sup>, і нульовим математичним очікуванням.

У підсумку отримуємо повну модель у просторі станів, у якій описується перехідний процес за просторовою координатою  $l$ , а коефіцієнт  $j$  переходу з одного стану  $A_k$  у другий стан  $A_{k+1}$  залежить від параметра  $B$ , що визначається зазначеним вище способом.

Стосовно одержаної моделі (29), структуру і параметри калманівського оптимального дискретного цифрового фільтра можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} A_k &= \varphi A_{k-1} + S_k(Z_k - C\varphi A_{k-1}); \\ S_k &= \eta_{k,k-1} * C^{-1}(\eta_{k,k-1} + \sigma^2 V_k)^{-1}; \\ \eta_{k,k-1} &= \eta_{k,k-1} + \sigma^2 q_k; \\ \eta_{k,k} &= \eta_{k,k-1} - S_k * C * \eta_{k,k-1}, \end{aligned} \quad (30)$$

де  $A_k, A_{k-1}$  — оцінка амплітуди радіоімпульсу на  $k$ -му та  $(k-1)$ -му відліках;  $S_k$  — коефіцієнт кореляції помилки фільтрації;  $\eta_{k,k-1}, \eta_{k,k}, \eta_{k-1,k-1}$  — помилка фільтрації у перехідному стані для  $k$ -го і  $(k-1)$ -го відліків.

Після деяких перетворень з урахуванням того, що  $CA_k = Z_k$  та  $CA_{k-1} = Z_{k-1}$ , рівняння оптимального фільтра набувають вигляду:

$$\begin{aligned} Z_k &= \varphi \left( 1 - \frac{\eta_{k,k-1}}{\eta_{k,k-1} + \sigma^2 V_k} \right) \cdot Z_k + \frac{\eta_{k,k-1} \eta_{k,k-1}}{\eta_{k,k-1} + \sigma^2 V_k}; \\ \eta_{k,k-1} &= \eta_{k-1,k-1} + \sigma^2 q_k. \end{aligned} \quad (31)$$

У результаті виконання рекурентної обчислювальної процедури (46) на кожному відліку  $k$  значення амплітуди  $Z_k$  (дБ) УЗС коректується з урахуванням статистичних характеристик  $\sigma_{q_k}^2, \sigma_{V_k}^2$  неконтрольованих випадкових збуджуючих впливів. Причому одержаний алгоритм має оптимальну структуру в розумінні мінімуму середньоквадратичної помилки оцінки амплітуди УЗС.

У кожному конкретному випадку реалізації фільтра необхідно задавати початкову оцінку амплітуди  $Z_0$ , початкову помилку фільтрації  $\eta_{00}$ , а також послідовності дисперсій  $\sigma_{q_k}^2, \sigma_{V_k}^2$ .

Підвищення точності оцінки амплітуди УЗС у визначенні контактних тисків за допомогою розглянутого оптимального фільтра суттєво залежить від достовірності визначення параметра  $B$  так дисперсій шумів об'єкта контролю і шумів вимірювальної та реєструючої апаратури. Останні можуть бути і постійними, що спрощує обчислювальний процес [17].

Теоретично обґрунтовано і практично перевірено можливість застосування, для підвищення точності вимірювання контактної тиску акустичним методом, методів оптимальної фільтрації випадкових сигналів нестационарних процесів, зокрема, цифрового фільтра Калмана.

Таким чином, після проведених теоретичних та експериментальних досліджень з підвищення інформативності та достовірності результатів акустичного контролю якості різьбових з'єднань були одержані такі основні результати.

1. Розроблено нові методи дослідження характеру поширення акустичних хвиль у технічних виробках складної форми (циліндричні та конічні вироби, різьбові з'єднання), матеріал яких знаходиться в напружено-деформованому стані.

2. Запропоновано нові інформаційні ознаки оцінки якості згинчування різьбових з'єднань різних конструкцій та розроблено оригінальні способи контролю їх міцності та герметичності, як під час згинчування так і в процесі експлуатації.

3. Розроблено нові способи підвищення достовірності результатів вимірювання контактних тисків акустичним методом в умовах спотворень та неконтрольованих затримок вимірювальних сигналів.

На основі та з використанням цих результатів були розроблені та широко впроваджені у виробництво технічні засоби (установки неруйнівного контролю ПЛНК-2, ПЛНК-9, СОТ-1, УКС-1, Контакт-1, ПТУ-2, скануючі пристрої та ін.) і понад 30 нормативних документів різних рівнів (ДСТУ, ГСТУ, СОУ, СТП і ін.) для контролю технічного стану нафтогазового обладнання.

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник: В 5т./ Під заг.ред. В.В.Панасюка. – К.: Наукова думка, 1988. – Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика /Під ред. З.Т.Назарчука. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.*  
 2. Карпаш О.М., Мигаль І.Г., Подільчук Ю.Н., Рубцов Ю.К. *Распространение высокочастотных упругих волн в телах с неоднородными начальными напряжениями // Междунар. научн. журнал «Прикладная механика», 1991, Т. 27, № 11, с. 34-43.*  
 3. Карпаш О.М., Рубцов Ю.К. *Уточненный анализ отражения пучков высокочастотных упругих волн при поперечном распространении в цилиндрических волноводах // Междунар. научн. журнал «Прикладная механика», т.30/40, №3, март 1994.*  
 4. Криничний П.Я., Карпаш О.М., Кійко Л.М. *Ультразвукова дефектоскопія різьбових з'єднань обважнених бурильних труб у зібраному стані // Методи та прилади контролю якості. – 2000. -№ 6, с.9-12.5. Пат РФ 1792530, G 01 N 29/04. Способ ультразвукового*

*контроля конических резьбовых соединений с упорными уступами // О.М.Карпаш, Я.М.Зинчак, П.Я.Криничный, И.Г.Мигаль, Я.М.Бажалук и Л.Н.Кийко. – № 4934690/28; Заявлено 29.03.91; Оpubл.30.01.93, Бюл. № 4. – 4с. 6. Билык С.Ф. Герметичность и прочность резьбовых соединений труб нефтяного сортамента. – М.: Недра. – 1981. – 351 с. 7. Про один з підходів до контролю якості скручування різьбових з'єднань у трубах нафтового сортаменту // Карпаш О.М., Бажалук Я.М., Зинчак Я.М., Подільчук Ю.Н., Рубцов Ю.К. Зб. "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ" – Львів, 1992 р., № 29, с. 73-77. 8. Карпаш О.М., Бажалук Я.М., Молчанов Н.О., Смерека А.С. /Способ разборки замковых соединений бурильных труб. – Патент Украины № 2362 БИ № 5-1, 1994. 9. Карпаш О.М., Кійко Л.М., Даниляк Я.Б., Молодецкий И.А. / Об одном из подходов к контролю качества резьбового соединения труб нефтяного сортамента // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 1996, № 4, с. 26-29. 10. Карпаш О.М., Криничний П.Я., Даниляк Я.Б., Козоріз А.В. / Контроль зусилля затяжки обважнених бурильних труб //Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 1999, № 2, с. 71-74. 11. Карпаш О.М. Способ ультразвукового контроля качества сборки соединений с натягом. А.с. № 1728782 БИ № 23, 1992 г. 12. Манолов Н.Т. Акустический метод исследования контакта твердых тел. / Автореф. Диссерт. На соиск. Уч. Степ. Канд. техн. наук. М.: 1970. – 29 с. 13.Щербинский В.Г. Основные факторы, влияющие на погрешность ультразвуковой дефектоскопии. /Дефектоскопия, 1991, № 5, с. 3-32. 14. Карпаш О.М., Степура О.И., Степура А.И. и др./ Методы параметрической идентификации повышения информативности при неразрушающем контроле. – Труды Межд. конф. «Комп. методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике», Минск, 1995, с. 109-112. 15. Карпаш О.М., Степура О.И., Молодецкий И.А. / Улучшение оценки амплитуды сигналов в ультразвуковой дефектоскопии // «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 1997, № 2, с. 19-21. 16. Карпаш О.М., Степура А.И. / Повышение точности ультразвукового метода: оценки величины контактных давлений в резьбовых соединениях. – Дефектоскопия, № 11. – 1993г. 17. Карпаш О.М., Ильницкий И.В., Степура А.И. / Ультразвуковое устройство для измерения контактных давлений. – А.с. № 1746297 БИ № 25, 1992 г.*