

РОЗРОБКА МОДЕЛІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Лютак З. П., Мандра А. А., 2005

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропоновані методи компенсації впливу температури на частотні характеристики ультразвукового первинного перетворювача. Розглянуто модель температурного впливу на кварцовий чутливий елемент, приведено основні залежності, які можна використовувати для практичних вимірювань, розроблена і описана модель температурного фільтрування чутливого елемента. Розроблено модель температурного регулювання кварцу SC зрізу, а також розроблено метод температурної компенсації термочутливості первинного перетворювача. Проведений аналіз зміни фізичних характеристик кварцової пластини в часі.

Ультразвукові методи широко використовують для неруйнівного контролю (НК) технічного стану об'єктів нафтової та газової галузей. На даний час розроблено методи неруйнівного контролю для товщинометрії, дефектоскопії, для оцінки напружено-деформованого стану практично всіх технологічних об'єктів промисловості. Таке широке застосування ультразвукових методів диктує високі вимоги до засобів вимірювання, які повинні бути, з одного боку, якомога більш універсальними, а з іншого боку забезпечувати задовільну точність і достовірність результатів контролю.

Основним блоком засобів неруйнівного контролю ультразвуковим методом є первинний перетворювач, бо саме він в основному визначає величину інструментальної похибки. На первинний перетворювач вносять деструктивний вплив багато чинників – це відхилення від номінального значення геометричних розмірів конструктивних вузлів, похибка несучої частоти та апертури чутливого елемента, товщина контактного шару, тощо. Проте найбільший – зміна температури та часу. Зміна температури при натурних вимірюваннях є випадковою величиною і може в окремих випадках швидко змінюватись, що суттєво впливає на результати вимірювання таких параметрів ультразвукової хвилі, як швидкість чи час поширення, величина загасання та шуму. Час вносить адитивну похибку, що важко визначити, оскільки швидкість старіння окремих конструктивних елементів є різною.

Визначення впливу температури та часу є складною задачею, тому актуальною є розробка методів компенсації впливу від цих деструктивних чинників.

Великий внесок з метою усунення впливу вказаних факторів на ультразвукові первинні перетворювачі було внесено Х. Тірстеном та Й. Єрмоловим,

які запропонували а потім удосконалили модель залежності частоти від температури [1, 5]. Дана модель є основою для подальших досліджень С. Галіо та М. Мурєя [11]. В своїх дослідженнях вони запропонували декілька підходів для термокомпенсації кварцових чутливих елементів: термостатування, температурне регулювання та температурне фільтрування.

Метод термостатування, який є одним із найефективніших методів виключення впливу температури на амплітудно-частотну характеристику, є непридатним для чутливих елементів, так як він реалізується в кінцевих пристроях і може використовуватися в лабораторних умовах для порівняння та градування інших методів. Тому найпоширенішими є методи температурного регулювання та фільтрування. Недоліком запропонованих С. Галіо та М. Мурєм методів температурного регулювання та фільтрування є те, що в них не враховано вплив електродів, шару протектора і зміну термоопору елементів електроакустичного тракту ультразвукового первинного перетворювача на амплітудно-частотну характеристику. У працях [1, 2, 3] дано загальний вигляд рівнянь впливу електродів на зміну частоти чутливого елемента, але ці рівняння не враховують параметри матеріалу чутливого елемента (пружні константи).

На даний час немає однієї математичної моделі, яка б інтегрально характеризувала процес впливу часових характеристик на зміну частоти чутливого елемента. Це пов'язано із великою трудомісткістю та дороговизною досліджень, впливом багатьох чинників на часові характеристики. Дослідження впливу часових характеристик на зміну частоти чутливого елемента проводились для одного вибраного чинника, наприклад, окислення, впливу старіння електродів або елементів вторинного пристрою.

Оскільки такі дослідження проводились різними науковцями в різний час для різних чутливих елементів, використати їх дослідження для певного типу первинного перетворювача без додаткових досліджень є проблематично. Тому задача розробки моделі впливу температури та часових характеристик на амплітудно-частотну залежність ультразвукових первинних перетворювачів є актуальною.

Відомо, що резонансна частота f_Q кварцової пластини, яка генерує акустичні хвилі, залежить від усередненого значення температури та значень її градієнтів в зоні коливань. Це можна оцінити наступним співвідношенням [4]:

$$\frac{\Delta f_Q}{f_Q} = \frac{\Delta f_Q^S}{f_Q} + \frac{\Delta f_Q^D}{f_Q}, \quad (1)$$

де $\Delta f_Q^S/f_Q$ - статична, а $\Delta f_Q^D/f_Q$ - динамічна складова.

Враховуючи, що основний вплив на зміну частоти вносить статична складова, розглянемо її більш детально, вважаючи динамічну складову шумом.

Залежність частоти пластини від температури матиме вигляд [4]:

$$\Delta f_Q^S/f_Q \approx a_{i0} \cdot \Delta T_Q, \quad (2)$$

де $a_{i0} \approx \pm 5 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-1}$ вибирають таким, щоб забезпечити ΔT_Q в діапазоні $0,1^\circ \text{ C}$; ΔT_Q - зміна температури кварцової пластини. Залежність (2) можна подати в такому вигляді:

$$\Delta f_Q^S/f_Q = a \cdot \Delta T_Q \approx a_{i0Q} \cdot (T_{i0} - T_Q) \cdot \Delta T_Q, \quad (3)$$

де значення $a_{i0Q} \sim 10 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ вибирається для

забезпечення необхідної стабільності, T_Q - температура кварцової пластини, T_{i0} - точка симетрії зміни частоти від температури кварцу.

Співвідношення (2) та (3) справджуються при ізотермічному процесі, проте в реальних умовах при швидкоплинних процесах температура пластини в різних її частинах відрізняється і градієнти температури викликають термічні напруження. Змоделювати такі динамічні ефекти є важкою задачею. В загальному дана залежність має вигляд [5]:

$$\frac{\Delta f_Q^D}{f_Q} \approx \bar{a} \cdot \frac{dT_Q}{dt}, \quad (4)$$

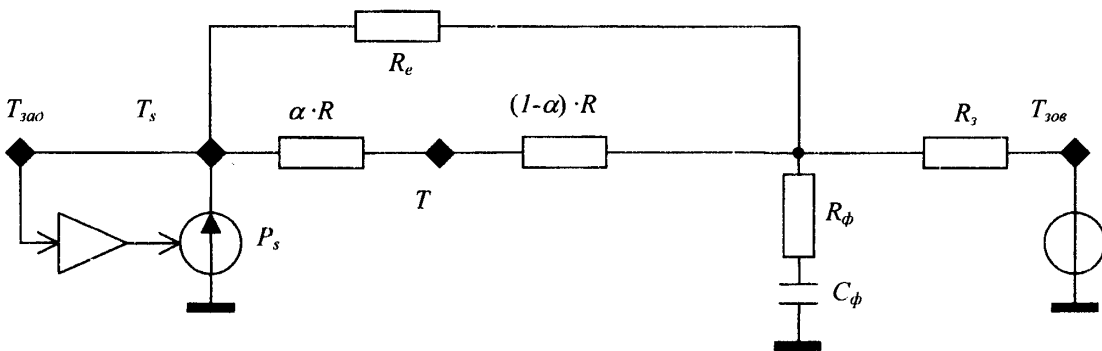
де $\bar{a} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ - константа SC зрізу.

Таким чином, при регулюванні температури первинного перетворювача температурний вплив на зміну частоти матиме вигляд:

$$\Delta f_Q/f_Q \sim a \cdot \Delta T_Q + \bar{a} \cdot \nabla \cdot \Delta T_Q, \quad (5)$$

де ∇ - оператор Лапласа.

Методи регулювання температури поділяються на пасивні і активні. До пасивних методів належить температурне фільтрування, яке полягає у термоізоляції чутливого елемента в первинних перетворювачах матеріалами із низькою теплопровідністю в експлуатаційному діапазоні температур. Дослідивши величину теплопровідності термоізоляційного матеріалу на одиницю товщини, можна компенсувати короточасні зміни температури. В електричній схемі-аналозі (рис. 1) вказаний матеріал буде діяти як високочастотний фільтр. У цій схемі опори $\alpha \cdot R$ та $(1 - \alpha) \cdot R$ описують здатність і характеристику SC зрізу кварцу до самотермокомпенсації [4].



P_s - джерело живлення; T_s - температура чутливого елемента в робочій області; T_{306} - задана температура роботи чутливого елемента; T - температура кварцової пластини, яка може відрізнятися від температури чутливого елемента в робочій області; T_{306} - зовнішня температура; R - термоопір чутливого елемента; α - коефіцієнт, що характеризує теплопровідність матеріалу чутливого елемента; R_ϕ - активний опір термофільтра; C_ϕ - ємність термофільтра; R_e - термоопір електродів; R_3 - термоопір шару протектора

Рис. 1. Електротермічна модель роботи кварцового чутливого елемента у зрівноваженому стані

В загальному термофільтр представляє собою тонкий шар термоізоляції, напильної на чутливий елемент. Такий матеріал крім термічних властивостей має також і акустичні властивості, зокрема, акустичний імпеданс, який вносить вплив на частотні характеристики первинного перетворювача. Тому для ефективного використання термофільтрів необхідно врахувати їх акустичні характеристики.

З цією метою розглянемо роботу чутливого елемента, навантаженого тонким шаром термофільтра із вхідним імпедансом Z_2 (рис. 2).

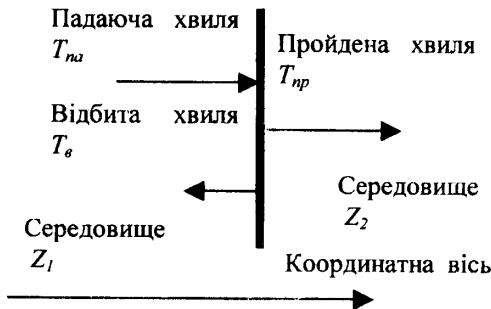


Рис. 2. Проходження акустичної хвилі на межі розділу двох середовищ

Імпеданс матеріалу чутливого елемента позначимо Z_1 , а його товщину через l . Опишемо відбиту та пройдену падаючу хвилю таким чином [12]:

$$\begin{cases} T_1 = T_{na} (e^{-j\beta_1 z} + \Gamma e^{j\beta_1 z}); \\ v_1 = -\frac{T_{na}}{Z_1} (e^{-j\beta_1 z} + \Gamma e^{j\beta_1 z}); \\ T_2 = T_{np} e^{-j\beta_2 z}; \\ v_2 = -\frac{T_{np}}{Z_2} e^{-j\beta_2 z}, \end{cases} \quad (6)$$

де T_1 – падаюча хвиля; T_2 – пройдена хвиля; v_1, v_2 – швидкості поширення акустичних хвиль в двох середовищах; T_{na}, T_{np} – амплітуди падаючої та пройденної хвиль відповідно, Γ – коефіцієнт відбиття падаючої хвилі; β_1, β_2 – постійні розповсюдження у двох середовищах.

Із формули (6) знаходимо коефіцієнт відбиття:

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (7)$$

Оскільки вхідний імпеданс Z_{ex} дорівнює відношенню напруженню хвилі до швидкості, запишемо його для першого шару із врахуванням (6):

$$Z_{ex} = \frac{-T(-l)}{v(-l)} = Z_1 \frac{e^{j\beta_1 l} + \Gamma e^{-j\beta_1 l}}{e^{j\beta_1 l} - \Gamma e^{-j\beta_1 l}}. \quad (8)$$

Враховуючи (7) знайдемо вхідний імпеданс із рівняння (8) для чутливого елемента з додатковим шаром:

$$Z_{ex} = Z_1 \frac{Z_2 \cos \beta l + jZ_1 \sin \beta l}{Z_1 \cos \beta l + jZ_2 \sin \beta l}. \quad (9)$$

Отримана залежність дає можливість оцінити доцільність використання того чи іншого матеріалу як термофільтра. Основним критерієм, за яким повинен вибиратися матеріал термофільтра, є пропускна здатність на вибраному діапазоні робочих частот чутливого елемента.

У загальному даний метод температурного регулювання керує джерелом живлення, за допомогою якого можна підтримувати температуру чутливого елемента T_s на заданому рівні $T_{зад}$, яке є близьким до точки симетрії зміни температури кварцу T_0 .

Проте, як видно із рис. 3, температура чутливого елемента не може бути однорідною. Тут T не буде рівною T_s , особливо, якщо матеріал чутливого елемента є двічі поверненим SC зрізом [4]. Припустимо, що кварцова пластинка працює в ідеальному стані, тобто статична зміна температури. Тоді статичний коефіцієнт підсилення G_I згідно рис. 3 матиме вигляд:

$$G_I = \Delta T_{306} / \Delta T = 1/\alpha. \quad (10)$$

Практично нам необхідно забезпечити термічний коефіцієнт підсилення на рівні 1500, тобто $\Delta T_Q \leq 0,1$ °C якщо $\Delta T_{306} \approx 150$ °C. Ця умова відповідає таким експлуатаційним умовам: - 10...+140 °C.

Розглянемо реальну кварцову пластинку товщиною t довжиною l , для того, щоб оцінити можливість забезпечення коефіцієнта термopідсилення на необхідному рівні.

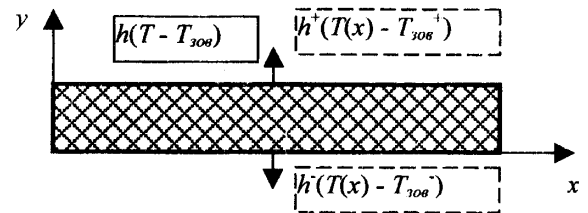


Рис. 3. Теплообмін кварцової пластини

Нехай кварцова пластинка має сталу температуру $T_{зад} = T_s = T_0$. Обмін теплотою із зовнішнім середовищем T_{306} виразимо коефіцієнтом h . Тоді отримаємо співвідношення розподілу температури в такому вигляді:

$$T(x, y) = \frac{T - T_{306}}{T_0 - T_{306}} = \sum_n \frac{m^{kn(l-x)} + m^{-kn(l-x)}}{m^{knx} + m^{-knx}} \cdot \cos(kn \cdot y), \quad (11)$$

де kn визначається із співвідношення $kn \cdot t \cdot \tan(kn \cdot m) = h \cdot m / \lambda$, λ – теплопровідність кварцової пластинки коли величина поперечного теплового потоку є більшою ніж поперечного, тобто

$\left| \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right| \gg |h(T - T_m)|$. Дана умова має місце, коли пластина є термоізолюваною, тоді температура вздовж осі ou (див. рис. 3) є незмінною. Таким чином (11) можна спростити до вигляду:

$$T(x, y) \approx T(x) = \frac{T - T_{306}}{T_0 - T_{306}} = \frac{\cosh(M(l-x))}{\cosh(M \cdot l)}, \quad (12)$$

де $M^2 = h / \lambda m$.

Залежність (12) можна застосувати також і до двохстороннього теплообміну, визначивши T_{306} та M так:

$$T_{306} = \frac{h^+ \cdot T_{306}^+ + h^- \cdot T_{306}^-}{h^+ + h^-}; \quad M^2 = \frac{h^+ + h^-}{\lambda m}. \quad (13)$$

Статичний коефіцієнт підсилення враховуючи (12) та (10), буде таким:

$$G = \frac{\Delta T_{306}}{\Delta T} = \left(1 - \frac{\tanh(M \cdot l)}{M \cdot L} \right)^{-1}. \quad (14)$$

Застосовуючи формулу (14) до кварцу SC зрізу частотою 5 МГц, ми отримуємо коефіцієнт підсилення не більше 300, що є не достатнім значенням для забезпечення експлуатаційних умов роботи чутливого елемента. Таким чином, нам необхідно застосувати додатковий метод - термокомпенсацію.

Для забезпечення механізму термокомпенсації необхідно врахувати зміни зовнішньої температури. Для цієї мети в схемі температурного регулювання використовуємо додатковий чутливий елемент T_{s2} , який контролює зміну температури і через лінію зворотного зв'язку регулює величину живлення у відповідності із зовнішньою температурою (рис. 4). Різниця температур тоді буде такою:

$$\Delta T = (1 - \alpha) \cdot \Delta T_s + \alpha \cdot \Delta T_{s2}. \quad (15)$$

Для забезпечення термокомпенсації необхідно, щоб $\Delta T = 0$. Тоді отримуємо, що

$$\Delta T_s = \frac{\alpha}{(\alpha - 1) \Delta T_{s2}}. \quad (16)$$

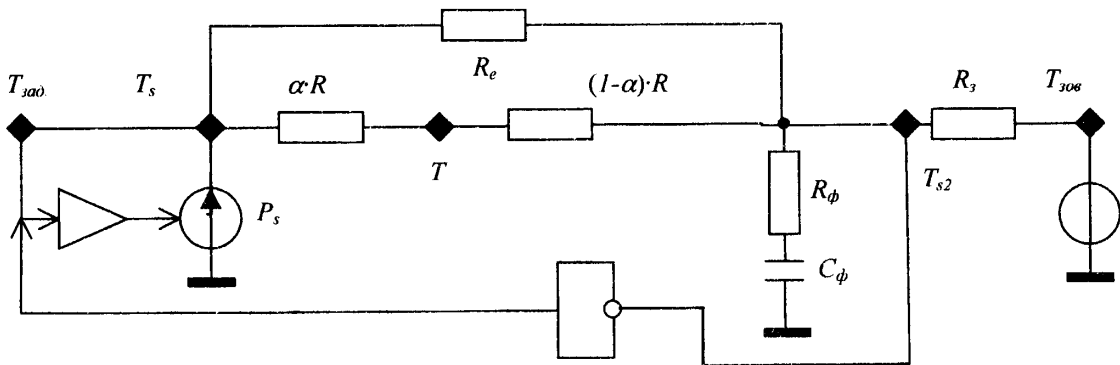


Рис. 4. Метод термокомпенсації роботи кварцового чутливого елемента

Таким чином забезпечується термостабілізація кварцового чутливого елемента, який може працювати в діапазоні температур від мінус 10 до +140 °С, не змінюючи власної частоти.

Зміну частоти кварцової пластини в часі можна поділити на короткотривалу та довгострокову, яку можна назвати процесом старіння. Короткотривала зміна частоти показана на рис. 5 [6].

Основними чинниками, які впливають на старіння кварцової пластини, є перенесення маси речовини із або на поверхню пластини внаслідок абсорбування чи десорбування, зняття напружень в кристалах кварцу, зміни в електродах, зміна величини розсіювання в корпусі перетворювача, зміна в самому матеріалі кварцу.

Внаслідок абсорбування чи десорбування матеріалу поверхні кварцу частота поперечних коливань в кристалі SC зрізу змінюється обернено пропорційно товщині пластини. Якщо кварцова пластина генерує гармонійні коливання частотою 5 МГц, то її товщина складає приблизно 1 мільйон атомарних шарів. Зміна маси чутливого елемента, яка дорівнює масі одного атомарного шару, дорівнює зміні її частоти на 5 Гц. Величина абсорбування / десорбування залежить від властивостей поверхні пластини, речовини, яка абсорбується пластиною та температури. Отже досліджувати процес старіння кварцового чутливого елемента можна лише для одного зрізу, наприклад, CS зрізу і в комплексі із первинним перетворювачем, оскільки саме від первинного перетворювача залежить вплив температури та окислювачів на чутливий елемент.

На рис. 6 показано процес окислення кварцової пластини в часі [7]. Хоча кварцовий чутливий елемент монтується герметично в первинний перетворювач, проте все-таки гази проникають крізь захисні шари та окислюють матеріал чутливого елемента. Тому конструктивні матеріали первинних перетворювачів необхідно вибирати за мінімальними пропусковими властивостями.

Величину абсорбування матеріалу можна оцінити за формулою [7]:

$$T_{1/2} = T_0 \cdot e^{E_D/R_s \cdot T} \quad (17)$$

де $T_{1/2}$ – час напівабсорбування молекул досліджуваного матеріалу, E_D – енергія десорбування, R_s – газова стала. Для матеріалу кварцу $E_D = 30$ Ккал/Моль і при температурі 25 °С рівень абсорбування складатиме 10^{-9} /день, а для матеріалу електродів ($E_D > 40$ Ккал/Моль) рівень абсорбування буде не менший за 10^{-17} /день, що можна вважати стабільним в часі. При температурі 150 °С абсорбування матеріалу кварцу відбувається в межах однієї секунди, після чого починається повільний процес абсорбування матеріалів із $E_D \geq 40$ Ккал/Моль.

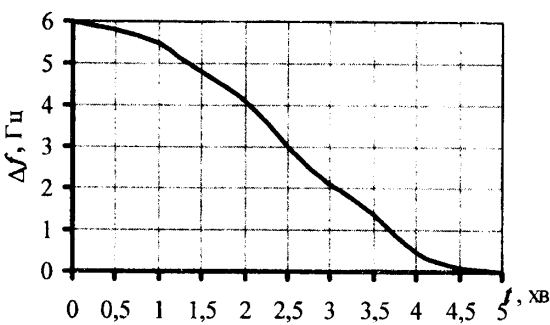


Рис. 5. Короточасова стабілізація кварцової пластини SC зрізу на частоті 5 МГц

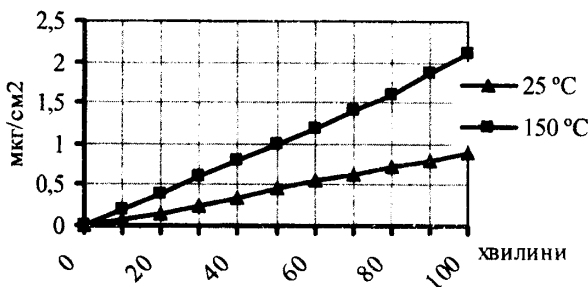


Рис. 6. Процес окислення кварцової пластини SC зрізу

На процес старіння чутливого елемента вносять вплив і електроди. Електроди, як правило, виготовляють із срібла, золота чи алюмінію у вигляді тонких пластин. Початкові монтажні напруження в тонких плівках змінюються із часовою константою, яка дорівнює кільком годинам [8]. Напруження в тонких плівках значною мірою залежать від матеріалу пластини, її поверхні, температури та присутності газів. Визначити дольову частку цих впливів є досить важко.

Наприклад, зміна опору в тонких плівках золота товщиною 700...1650 Å, які напилені на кварц, залежить тільки від температури [9]. Коли плівки напиляються при температурі 46 °С, то зміна опору (до 8.5 %) спостерігається протягом кількох тижнів після виготовлення. При напиленні електроду при температурі 112 °С зміна опору є досить низькою (0.8...1.5 %), проте атоми матеріалу електроду проникають в кристали чутливого елемента і змінюють його п'єзоелектричні характеристики.

Рівень дифузії RD можна оцінити за формулою [7]:

$$RD = -D \cdot \text{grad}(KC) \quad (18)$$

де KC – концентрація металу; $D = \frac{mh}{S(d_2 - d_1) \cdot t}$ –

константа дифузії; m – маса матеріалу, який дифузує; h – товщина шару дифузії; S – контактна площа металів; d_1 і d_2 – концентрація матеріалу, який дифузує по обидві сторони границі розділу металів; t – час.

У табл. 1 приведені константи дифузії металів, які часто використовуються при виготовленні електродів.

Важливим також є підбір матеріалів електроду з точки зору хімічних реакцій. Наприклад, широко-вживаний матеріал електродів (алюміній чи хром) при нагріванні утворює молекули AL_2O_3 та Cr_2O_3 , вивільнюючи таким чином кисень із кварцу (SiO_2).

Таблиця 1 – Константа дифузії при кімнатній температурі.

Пара металів які взаємодіють один з одним	Константа дифузії, cm^2/c
Алюміній дифузує в мідь	$1.17 \cdot 10^{-2}$
Золото дифузує в мідь	$4 \dots 16 \cdot 10^{-2}$
Мідь дифузує в срібло	$5.95 \cdot 10^{-5}$
Нікель дифузію в мідь	$6.5 \cdot 10^{-5}$
Паладій дифузує в мідь	$1.6 \cdot 10^{-4}$

З іншої сторони, такий матеріал електродів як золото чи срібло, які є неактивними з точки зору хімічних реакцій під впливом підвищених температур чи електромагнітних полів, дифузують в кварц, що не можна не враховувати при розробці первинних перетворювачів із високою напругою на електродіах [10].

На процес старіння первинного перетворювача впливає також і зміна в часі параметрів з'єднуючої ланки вторинного пристрою, а саме: конденсатора. В роботі [6] досліджено зміни ємності конденсаторів та індуктивності котушок в часі на величину $3 \cdot 10^{-4} \dots 70 \cdot 10^{-4} \%$ в день для конденсаторів, та $2 \cdot 10^{-4} \%$ в день для котушок.

1. Ермолов И. Н. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля.- М.: Машиностроение, 1986.- 280 с. 2. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990.- 269 с. 3. Yoonkee Kim. Force-Frequency effects of langasite isomorphs for precision resonators., U.S. Army Communications-Electronics Command, Research Development & Engineering Center for Monmouth, New Jersey, 07703, 2003. 4. J. A. Kusters, M. C. Fisher and J. G. Leach. Dual mode operation of temperature and stress compensated crystals., in Proc. 32nd AFCS, pp. 389-397, 1978. 5. H. F. Tiersten. Perturbation theory for linear electrostatic equation for small field superposed on a bias., J. Acoust. Soc. Arner., vol. 64, no. 3, pp. 382-387, 1978. 6. H. W. Jackson, "Tactical Miniature Crystal Oscillator," Proc. 34th Ann. Symp. on Frequency Control, pp.449-456, May 1980.

7. P. T. Landsberg, "On the Logarithmic Rate Law in Chemisorption and Oxidation," The J. of Chem. Physics, Vol. 23, pp. 1079-1087, 1955. 8. R. Abermann, "Measurements of the Intrinsic Stress in Thin Metal Films," Vacuum, Vol. 41, pp. 1279-1290, 1990. 9. J. R. Lloyd and S. Nakahara, "Low Temperature Void Growth and Resistivity Decay in Thin Evaporated Gold Films," Thin Solid Films, Vol. 45, pp. 411-420, 1977. 10. J. G. Gualtieri, "The Influence of Temperature and Electric Field on the Etch-Channel Density in Swept-Cultured Quartz," Proc. 39th Ann. Symp. on Frequency Control, pp. 247-254, 1985. 11. S. Galliou and M. Mourey, "Temperature Processing of an Ultra Stable Quartz Oscillator", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 48, pp. 1539-1546, 2001. 12. B. A. Auld, Acoustic Fields and Waves in Solids, Vol. 1. New York: John Wiley & Sons, Ins., 1973.

УДК 620.179.1+620.179.142+622.24.053

НОВІ ПІДХОДИ ДО КОНТРОЛЮ НАСОСНО-КОМПРЕСОРНИХ ТРУБ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ

© Молодецький І.А., Качан М.Б., Вісков О.В., 2005
Науково-виробнича фірма „Зонд”, м. Івано-Франківськ

Розглянуто безконтактний метод виявлення дефектів в НКТ за допомогою магнітних полів розсіювання з використанням високочутливих магніторезистивних перетворювачів. На основі проведених експериментальних досліджень визначено чутливість контролю, отримані характеристики сигналів від дефектів різної орієнтації.

Розвиток сучасного нафтогазовидобутку неможливий без підвищення вимог до експлуатаційної надійності та якісних характеристик використовуваного внутрішньо-свердловинного обладнання. Своєчасне виявлення потенційно небезпечних елементів трубних колон, в тому числі насосно-компресорних труб (НКТ), дозволяє попередити аварійні ситуації і, відповідно, виключити витрати, пов'язані з ліквідацією аварій. Крім того, об'єктивна оцінка якісного стану дозволяє прогнозувати ресурс працездатності об'єкту і таким чином суттєво продовжити термін його експлуатації. Адже значні збитки при аваріях призводять до того, що часто цілком працездатне обладнання вилучається з експлуатації з метою попередження відмов.

У даній статті основну увагу було зосереджено на вирішенні питання експрес-контролю тіла труби електромагнітним методом. Особливість електромагнітного контролю полягає в тому, що його можна

проводити без контакту перетворювача з об'єктом, їх взаємодія відбувається зазвичай на відстанях (від часток міліметра до кількох міліметрів), достатніх для вільного пересування перетворювача відносно об'єкта. Тому цими методами можна одержувати позитивні результати контролю навіть при високих швидкостях контролю об'єктів, що, в свою чергу, збільшує продуктивність контролю.

Отримання первинної інформації у вигляді електричних сигналів, безконтактність і висока продуктивність визначають широкі можливості автоматизації електромагнітних методів контролю. Одна з позитивних особливостей цих методів полягає в тому, що на сигнали перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забруднення газового середовища, радіоактивні випромінювання, забруднення поверхні об'єкту контролю непровідними речовинами.

При проведенні експериментальних досліджень