

УДК 620.179

ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ ТА ІНФОРМАТИВНОСТІ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТРУБНИХ ВИРОБІВ

© Вісков О. В.

завідувач відділом розробки та випробувань

засобів і методик неруйнівного контролю НВФ "Зонд"

(на час захисту - завідувач лабораторією перспективних досліджень НВФ "Зонд")

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Показано і теоретично обґрунтовано доцільність використання безконтактних електромагніто-акустичних перетворювачів для підвищення вірогідності акустичного контролю трубних виробів. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень доведено доцільність використання складномодульованих сигналів для покращення чутливості електронно-акустичного тракту акустичного дефектоскопа. Розроблена процедура параметричної ідентифікації дефектів. Розроблено та випробувано конструкції нових зносостійких електромагніто-акустичних перетворювачів.

У нафтогазовій галузі одним з найбільш поширених видів неруйнівного контролю (НК) трубних виробів є акустичний. Використання п'єзоперетворювачів (ПЕП) для генерування і приймання акустичних коливань у матеріалі об'єкту контролю (ОК) вимагає наявності проміжного акустичного середовища між поверхнями ПЕП та ОК. Порушення стабільності цього середовища безпосередньо впливає на вірогідність результатів НК. Наявність на поверхні ОК слідів корозії порушує стабільність акустичного контакту і призводить до пропуску дефектної ділянки або до невірної оцінки основних параметрів дефектів (координат залягання та еквівалентних розмірів). Крім того, тривала експлуатація ПЕП призводить до змін геометрії робочої поверхні, а отже і змін параметрів акустичного тракту в цілому. Це негативно впливає на результати контролю.

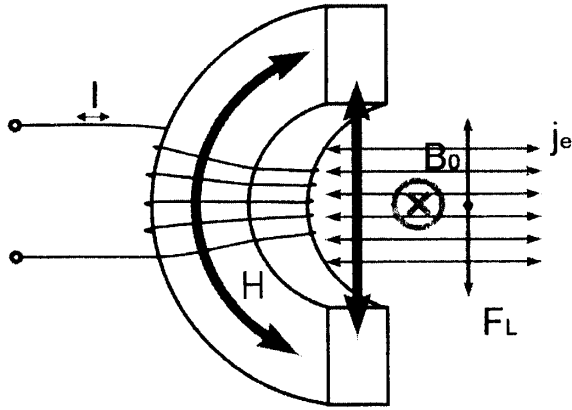
Важливою складовою загальної вірогідності акустичного НК є вірогідність інтерпретації його результатів. Дефект необхідно не лише виявити, але й вірно визначити його основні параметри. На даний час відомі методи визначення параметрів дефектів, але їх використання в польових умовах (наприклад, при підйомі труб із свердловини) пов'язане з труднощами (забезпечення належної швидкості контролю, шорсткість поверхні ОК і т.д.), що негативно впливають на вірогідність результатів, отриманих цими методами. Тому актуальною є розробка та нових засобів та технологій, які дозволили б з високою вірогідністю проводити акустичний НК труб нафтового сортаменту і впровадити нові методи ідентифікації параметрів дефектів, придатні для реалізації в польових умовах.

Аналіз альтернативних методів збудження акустичних коливань в матеріалі ОК та їх прийому без використання проміжного акустичного середовища показав, що найбільш прийнятним та перспективним в цьому плані є електромагніто-акустичний метод. Але використання загальновідомих конструкцій ЕМАП для задач НК труб нафтового сортаменту є обмеженим через високу ймовірність виходу перетворювача з ладу внаслідок механічного пошкодження чутливого елемента (радіочастотної котушки). Крім того, у порівнянні з ПЕП ЕМАП мають значно меншу чутливість. Тому було поставлено за мету розробити нові конструкції ЕМАП, які б не містили потенційно слабких до механічних впливів ланок безпосередньо в зоні контакту перетворювача з ОК, та підвищити їх чутливість.

Було запропоновано дві нові конструкції ЕМАП. Один з перетворювачів використовується для генерування та прийому лінійно-поляризованої зсувової хвилі, що розповсюджується по нормалі до поверхні об'єкту контролю й може використовуватись для визначення залишкової товщини стінок труб. Щоб забезпечити стійкість перетворювача до механічних пошкоджень було запропоновано розташовувати чутливі елементи перетворювача – генераторну та приймальну котушки - на додаткових магнітопроводах-півкільцях, виготовлених з аморфного заліза і розташованих в нижній частині перетворювача, з двох протилежних боків концентратора магнітного потоку.

Перетворювач з такою конфігурацією працює наступним чином: серія збуджувальних імпульсів від задаючого генератора подається на послідовний ко-

ливальний контур, утворений ємністю та індуктивністю, розташованою на одному з напівкільцевих магнітопроводів; в матеріалі магнітопроводу створюється змінний магнітний потік H , (рис. 1) значення якого пропорційне кількості витків котушки індуктивності та струму в ній.



I - змінний струм в котушці індуктивності;
 H - магнітний потік в осерді; B_0 - прикладене зовнішнє магнітне поле; J_e - вихрові струми;
 F_L - сила Лоренца

Рис. 1. Розподіл полів та сил у напівкільцевому магнітопроводі та в підповерхневому шарі ОК в момент генерування акустичних коливань

Цей магнітний потік виникає в осерді з відкритими кінцями (незамкнутий магнітопровід), розташованими в безпосередній близькості до поверхні об'єкту контролю, тому він замикається через матеріал об'єкту, що контролюється. Оскільки в матеріалі ОК в певний момент присутній змінний магнітний потік, з частотою, відповідною до частоти збуджуваних коливань, навколо нього в підповерхневому шарі матеріалу виникають вихрові струми j_e . У результаті взаємодії з постійним магнітним полем B_0 концентратора ці струми призводять до виникнення механічних зсувових коливань у підповерхневому шарі об'єкту контролю. Ультразвукова хвиля, що розповсюджується вглиб матеріалу по нормалі до поверхні ОК, зазнає відбиття від його протилежної поверхні, або від іншого відбивача, розташованого всередині об'єкта, і повертається до перетворювача. Приймальна котушка перетворювача включена в паралельний резонансний контур. Оскільки осердя приймальної котушки знаходиться в безпосередній близькості до магнітного концентратора, в ньому існує постійне магнітне поле, яке в момент приходу ультразвукової хвилі піддається модуляції. В результаті модуляції магнітного поля ультразвуковою хвилею в магнітному осерді створюється змінний магнітний потік, що призводить до виникнення змінного

струму в приймальній котушці, який в подальшому підсилюється та відображується дефектоскопом.

Перевірка працездатності та оцінка основних параметрів ЕМАП здійснювались на натурних зразках з штучними дефектами в різьбовій частині та в тілі труби, виготовлених із сталейних бурильних труб згідно з вимогами ГСТУ 320.02829777.002-95, та на сталейних пластинах різної товщини. На рис. 2 подано осцилограму сигналу, знятого з приймальної котушки перетворювача, встановленого на пластину, товщиною 15 мм. Як видно з цієї осцилограми, співвідношення сигнал/шум становить не менше 20 дБ, що є достатнім для задач товщинометрії труб нафтового сортаменту.

На рис. 3 схематично показано конструкцію ЕМАП для генерування та прийому горизонтально-поляризованої зсувової хвилі під заданим кутом до поверхні ОК та наведено розподіл полів і сил, що виникають в матеріалі ОК та в самому перетворювачі під час його роботи. Розроблений та випробуваний ЕМАП має основну робочу частоту 2,0 МГц та кут вводу акустичних коливань 67° . На обидві запропоновані конструкції ЕМАП у вересні 2002 р. були подані заявки в Європейське патентне бюро на отримання міжнародних патентів.

Подальша робота була спрямована на підвищення чутливості електронно-акустичного тракту акустичної системи з розробленими ЕМАП. При акустичному контролі з допомогою ЕМАП відбиті від дефектів сигнали можуть знаходитись нижче порогового рівня приймального тракту дефектоскопа і не виявляться. Це призводить до появи нової для акустичного контролю проблеми - проблеми виявлення луна-сигналів, що знаходяться нижче рівня шуму, або, іншими словами, таких, що знаходяться в суміші з випадковим, білим шумом.

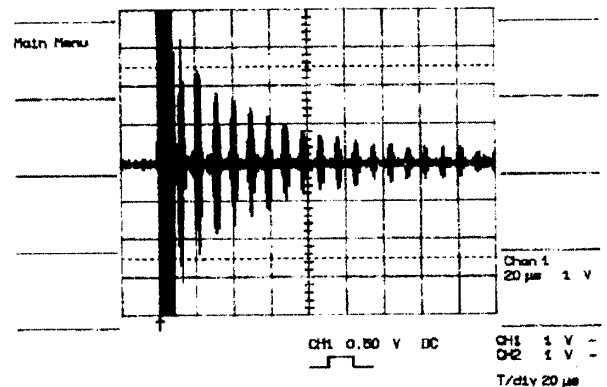
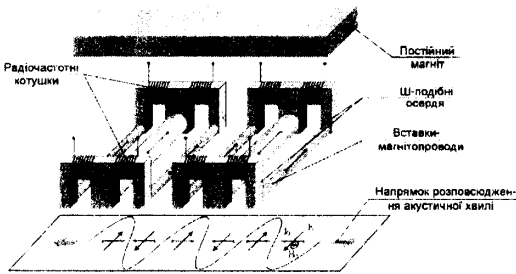


Рис. 2. Осцилограма сигналу перетворювача в режимі товщинометрії



B_0 - прикладене зовнішнє магнітне поле; J_e - вихрові струми; F_L - сила Лоренца

Рис. 3. Конструкція зносостійкого ЕМАП горизонтально-поляризованої зсувової хвилі

Ідея способу підвищення чутливості ЕМА-методу збудження акустичних коливань полягає у використанні складномодульованих сигналів (кодових послідовностей) при формуванні акустичного сигналу та методів оптимальної фільтрації при обробці отриманих сигналів. Вибір коду та конструктивне виконання узгодженого фільтра повинні передусім забезпечити максимально можливе заглушення стохастичних осциляцій. Серед багатьох систем кодування для систем зв'язку частіше всього застосовують код Баркера та код випадкової послідовності. Якщо код Баркера складається з N елементів, то при осциляціях автокореляційної функції на одиничному рівні основному максимуму відповідає висота N .

Для апробації цього методу підвищення чутливості електронно-акустичного тракту з використанням модульованих кодами Баркера як зонduючих сигналів, були проведені експериментальні дослідження на натурних зразках сталених бурильних труб із штучними дефектами. З цією метою було виготовлено лабораторну акустичну установку, основним функціональним блоком якої є IBM-PC/AT-сумісний комп'ютер із встановленими в ньому платами цифро-аналогового (ЛА-ЦАПн10М1) та аналого-цифрового (ЛА-н10М6РСІ) перетворення, виробництва "Руднев-Шиляєв". Необхідні для реалізації методу фазомодульовані сигнали, кодовані кодом Баркера, що використовувались як зонduючі сигнали, генерувались за допомогою цифро-аналогової частини установки і служили для генерування ЕМА-перетворювачем акустичної хвилі в ОК. Приймання акустичних коливань здійснювалось тим же ЕМАП. Підсилений інструментальним підсилювачем сигнал з ЕМАП подавався на вхід блоку АЦП, де відбувалась його дискретизація і подальший запис в пам'ять комп'ютера. Далі отримані набори даних оброблялись за допомогою програмного пакету MathLab.

Проведений натурний експеримент дає можливість стверджувати, що в польових умовах НК із застосування ЕМАП, що збуджується фазомодульованими послідовностями за кодом Баркера має на 11% більшу вірогідність результатів контролю, ніж НК із застосуванням ПЕП.

На підставі аналізу методик інструментальних досліджень можна однозначно стверджувати, що за своєю суттю процедура ультразвукової дефектоскопії наближається до процедури ідентифікації і повністю співпадає з нею у випадку застосування коротких зонduючих імпульсів, що описуються δ -функцією. При цьому ОК ідентифікується як лінійна динамічна система у вигляді імпульсної перехідної функції. По суті, має місце експериментальне визначення структури і (або) параметрів вихідного диференціального рівняння, яке описує розповсюдження в об'єкті акустичних хвиль, спотворених наявністю дефектів. За вихідні послання приймається, що параметри акустичних хвиль є нелінійними й випадковими функціями часу. Як гомоморфна модель ОК у рамках лінійної акустики розглядається еквівалентна система двох лінійних диференціальних рівнянь другого порядку, одне з яких залежить від просторової координати, а друге – від часу (принцип розділення змінних). Сутність методів акустичного контролю полягає в параметричній ідентифікації об'єкта вимірювань, апріорною математичною моделлю якого є вищезгадане диференціальне рівняння за часовою координатою.

Для одержання кількісної оцінки параметрів дефекту пропонується розглядати вихідний сигнал об'єкта, що досліджується, у вигляді функціонального ряду Вольтера й адитивної випадкової завади, що дає можливість враховувати як лінійні так і нелінійні властивості фізичного поля й вплив електричних та акустичних завод. Для опису реальних сигналів при практичних застосуваннях обмежимось першими трьома ядрами Вольтера. Це дозволяє ідентифікувати об'єкт вимірювань як систему, що є послідовним поєднанням стійкої лінійної частини з ваговою функцією $\omega_1(\tau)$ та безінерційної нелінійної частини. Можна сказати, що в цьому випадку:

$$z(t) = \int_0^{\infty} \omega_1(\tau) \cdot x(t-\tau) d\tau + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \omega_2(\tau_1, \tau_2) \cdot x(t-\tau_1) \times x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + n(t), \quad (1)$$

де $z(t)$ – вихідний сигнал вимірювальної системи; $\omega_1(\tau)$, $\omega_2(\tau_1, \tau_2)$ – ядра Вольтера першого та другого порядків; $x(t)$ – вхідний зонduючий сигнал; $n(t)$ – випадкова завада. Якщо $x(t)$ та $n(t)$ є стаціонарними випадковими процесами, некорельованими між собою, то має місце рівняння Вінера-Хопфа.

Для визначення ядер розкладу (1) треба використовувати в якості зонduючого сигнал Гаусового „білого шуму”.

Для випадку апроксимації об'єкта, що досліджується, лінійною моделлю, тобто лінійним ядром першого порядку або реакцією лінійної системи на імпульсний вплив, пропонуються тестові сигнали, в якості математичної моделі яких застосовуються індексні послідовності. Побудова останніх базується на використанні двозначного характеру мультиплікативної групи простого поля GF (p) (конечного поля Галуа по модулю p) з використанням поняття індексу, прийнятого в теорії чисел. Цей результат отримано на підставі аналізу частотного спектра гнучких коливань, що збуджуються в структурах, що зонduються, шляхом періодичних ударних впливів, а також з урахуванням тривалості перехідних процесів, які при цьому мають місце. У разі, коли об'єкт вимірювань доцільно розглядати як нелінійну систему, запропоновано використовувати тернарні псевдовипадкові сигнали багаторівневих послідовностей максимальної довжини. При цьому отримані теоретичні вирази для визначення ординат ядра першого (2) і другого (3) порядку:

$$w_1(\tau) = \frac{3}{2(M+1) \cdot \Delta^2} \int_0^{M\Delta} x(t-\tau)y(t)dt; \quad (2)$$

$$w_2(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{8 \cdot 3^{k-2} \cdot \Delta^3} \int_0^{M\Delta} x(t-\tau_1) \cdot x(t-\tau_2) \cdot y(t)dt$$

$$\tau_1 \neq \tau_2. \quad (3)$$

де k – порядок примітивного полінома, що породжується M -послідовністю; M – період відповідної M -послідовності; Δ – тривалість тактового інтервалу.

Для компенсації тренда при нестационарній поведінці дефекту використовуються псевдовипадкові двійкові сигнали із спеціально підібраною фазою. Щоб підвищити точність оцінки, була застосована рекурентна обчислювальна процедура фільтра Калмана, яка дозволяє ефективно заглушувати нестационарні шуми об'єкта і вимірювальної апаратури. З метою мінімізації похибки ідентифікації розроблена спеціальна методика вибору параметрів зонduючих сигналів.

Основні результати і висновки

1. У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено комплекс технічних засобів і технологій, які дозволяють підвищити вірогідність та інформативність результатів ультразвукового контролю трубних виробів.

2. Встановлено та класифіковано за рівнем значимості чинники, що зменшують вірогідність результатів контролю акустичного контролю. Запропоновано для зменшення їх впливу використовувати спеціально спроектовані електромагнітно-акустичні перетворювачі (ЕМАП).

3. Розроблено принципово нові конструкції зносостійких ЕМАП для генерування та прийому зсувової хвилі по нормалі і під заданим кутом до поверхні контролю.

4. Створена математична модель перетворення тестових сигналів в акустичних інформаційно-вимірювальних системах, яка дала можливість дослідити характер зміни акустичних полів залежно від фізичних параметрів дефектів і розробити метод інтерпретації результатів акустичних вимірювань.

5. Теоретично досліджено та експериментально підтверджено доцільність використання складних зонduючих сигналів (фазомодульований код Баркера) для підвищення чутливості електронно-акустичного тракту акустичних дефектоскопічних систем з первинними ЕМАП, що дає можливість виявляти дефекти малих розмірів. При цьому співвідношення сигнал/шум для умов, коли сигнал є маскований шумом, покращується на 8-17,5 дБ, залежно від довжини кодової послідовності.

6. Запропоновано процедуру параметричної ідентифікації дефектів для підвищення інформативності акустичного контролю. Встановлено, що нелінійну структуру досліджуваного об'єкта (дефекту) можна описати у вигляді функціонального ряду Вольтера та адитивної випадкової завади.

Отримано теоретичні вирази для визначення ординат ядра першого та другого порядків. Показано, що при параметричній ідентифікації дефектів як зонduючі доцільно використовувати багаторівневі псевдовипадкові сигнали, трійкові.

Це дає змогу при однаковій потужності з двійковим сигналом збільшити амплітуду трійкового приблизно в 1,2 рази, що створює більш сприятливі умови для ідентифікації типів дефектів.

7. Експериментально встановлено, що неруйнівний контроль в умовах бурової за допомогою запропонованих засобів дозволяє досягнути вірогідності контролю 87% на непідготовлених поверхнях труб у порівнянні з 76%, що досягаються контролем з використанням п'єзоелектричних перетворювачів.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу.

Захист відбувся 12 березня 2004 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу

Науковий керівник: докт. техн. наук, проф. Карпаш О.М.

Офіційні опоненти: докт. техн. наук, проф. Заміховський Л.М., докт. фіз.-мат. наук, проф. Снарський А.О.

Провідна установа: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ.