

# Фізичні та хімічні експерименти

УДК 534.8(088.8)

Г.Ф. Коныхін, В.Л. Верещагін, Р.А. Яценко

Українська інженерно-педагогічна академія

## ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРУ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ У СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Запропоновано технічне рішення для реалізації методу виміру звукових коливань, в основі якого лежить механізм електромеханічної нестійкості високочастотних радіотехнічних елементів при великому рівні запасеної енергії.

**Ключові слова:** звукові коливання, резонатор, електромеханічна нестійкість, амплітудна модуляція, детектування, збудлива й приймальна антени.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При акустичних вимірах на досягнутої точності звичайно впливає безліч різних факторів. Серед багатьох методів виміру звукових коливань в останні десятиліття широке поширення при дослідженні речовини в газоподібному, рідкому й твердому станах придбали резонансні методи. Набір цих методів постійно поповнюється завдяки відкриттю всі нових видів резонансу. Особливо різноманітні види резонансу у твердих тілах.

**Аналіз публікацій.** Відомий пристрій для виміру звукових коливань, що складає із чутливого елемента, розміщеного в порожньому корпусі, підсилювача сигналу й детектора [1]. Як чутливий елемент у відомому пристрої використовують п'єзокераміку, конденсаторні пластини, електромеханічні елементи. Для виміру параметрів акустичного поля використовують також вільно підвішену пружну сферу. Для вивчення слабких коливань використовують оптичні пристрої, що дозволяють визначити параметри звукового коливання різної інтенсивності по зміні показника переломлення газів. У цьому випадку використовується джерело світлового випромінювання й фотоелементи, що аналізують. Недоліком пристрою є те, що воно може використовуватися для виміру хвильових процесів тільки в оптичних прозорих середовищах.

Відомо пристрій для виміру звукових коливань, опубліковане в роботі [2]. Даний пристрій використовується для визначення звукових збурювань у різних середовищах. Чутливим елементом у цьому пристрої є мембрана зі спіраллю, установлені у середині камери з магнітним полем. Це поле створюється постійним магнітом. Чутливий елемент (виводи спіралі) з'єднаний послідовно з підсилювачем потужності й вимірювальним пристроєм. Недоліками відомого пристрою є: недостатньо висока чутли-

вість пристрою, вплив зовнішніх перешкод електромагнітного характеру на точність виміру й погані частотно-вибірні властивості.

**Ціллю даної роботи** є розробка пристрою для виміру інтенсивності звукових коливань у суцільних середовищах з високою чутливістю.

### Виклад основного матеріалу

Нами пропонується пристрій для виміру інтенсивності звукових коливань у суцільних середовищах, структурна схема якого представлена на рис. 1. Пристрій складається з металевої мембрани, установлені в торці металевої камери, виконаної у вигляді циліндричного резонатора і встановленої в кріостаті. Приймальна антена для знімання коливань з'єднана за допомогою детектора з вимірювальним приладом. Збудлива антена з'єднана з НВЧ генератором.

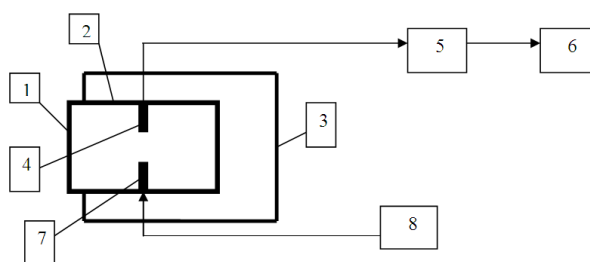


Рис. 1. Пристрій для виміру інтенсивності звукових коливань у суцільних середовищах:

- 1 – металева мембрана; 2 – циліндричний резонатор;
- 3 – кріостат; 4 – приймальна антена;
- 5 – детектор; 6 – вимірювальний прилад;
- 7 – збудлива антена; 8 – генератор НВЧ

Робота запропонованого пристрою відбувається в такий спосіб. При порушенні в середовищі поздовжніх звукових коливань металева мембрана робить змушені коливання. Зсув мембрани приводить до зміни електричних параметрів металевої камери,

виконаної у вигляді циліндричного резонатора і встановленого в кріостаті. При цьому, якщо добротність резонатора велика, те навіть при дуже малому зсуві мембрани (при малій інтенсивності звукових коливань) відбувається параметричне порушення електромагнітних коливань усередині резонатора. Цей знову збуджений електромагнітний сигнал реєструється приймальною антеною і подається через детектор на вимірювальний прилад. Для накачування резонатора, що проводять перед виміром, використовують збудливу антену для порушення електромагнітного поля, з'єднану з генератором НВЧ.

В основі методу виміру звукових коливань лежить механізм електромеханічної нестійкості високочастотних радіотехнічних елементів при великому рівні запасеної енергії. Із цією нестійкістю автори вперше зіткнулися при випробуванні елементів надпровідних прискорювачів. Було виявлено, що, починаючи з певного рівня високочастотної енергії, уведеної в систему, стінки резонатора, підвіски трубок дрейфу й інші елементи прискорювальної структури випробовували сильні механічні коливання. При цьому процес мав всі ознаки нестійкості, при якій енергія електромагнітного поля трансформувалася в енергію механічних коливань, незважаючи на величезне розходження характерних частот ( $10^9 \dots 10^{12}$  Гц). Має місце й зворотний процес - при механічних вібраціях резонатора, охолодженого до низьких температур (порядку 4К), спостерігається глибока модуляція запасеного в ньому електромагнітного поля. Оскільки механічна добротність резонатора невелика, модуляційний спектр може бути досить широким, що дозволяє для передачі інформації застосовувати як амплітудну, так і фазову модуляцію сигналу. Модульований сигнал приймається антеною, поміщеною усередині резонатора, і може бути надалі посилений і розшифрований звичайними методами.

Пояснимо природу електромеханічної нестійкості на прикладі пружного коливального контуру (рис. 2), поміщеного в зовнішнє змінне магнітне поле, потік якого через перетин контуру дорівнює електрорушійній силі (ЕРС), індукованої в контурі

$$\varepsilon = -\frac{1}{C} \frac{d\phi}{dt},$$

де  $C$  – ємність конденсатора контуру.

Нехай незаштрихована пластина конденсатора вільна й має можливість переміщатися в напрямку  $\xi$  під дією сил пружності й електростатичного притягання індукованих на пластинках конденсатора зарядів. Будемо вважати ці переміщення малими й не приходять до помітної зміни індуктивності петлі  $Z$ . Зміна ємності конденсатора при таких коливаннях знайдемо за допомогою формули Кирхгофа:

$$C = \frac{a^2}{4\xi} + \frac{a}{4\pi} \left( \ln\left(\frac{16\pi a}{\xi}\right) - 1 \right). \quad (1)$$

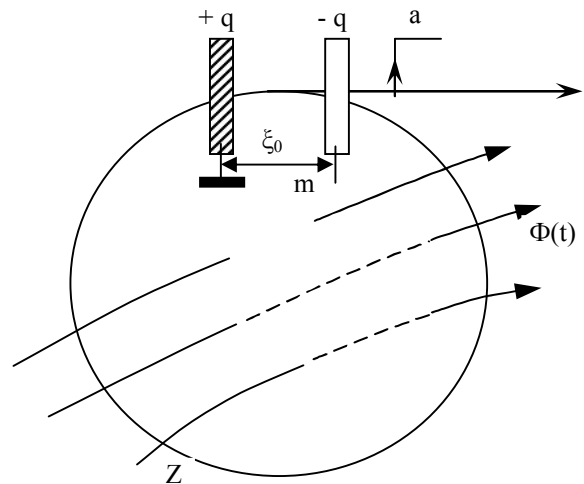


Рис. 2. Пружний коливальний контур

Якщо переміщення пластини в напрямку  $\xi$  мале ( $\xi \ll a$ ;  $x \ll \frac{\psi^4 Q^3}{m\omega_m^2 C_0} \frac{C^4 \varepsilon_0^2}{z^2 \omega_0^4}$ ) вираження (1)

можна переписати в такий спосіб:

$$C = C_0(\xi) - \frac{a}{4\pi} \left( 1 + \frac{\pi a}{\xi_0} \right) \frac{x}{\xi_0}. \quad (2)$$

У цьому наближенні заряди, індуковані на конденсаторі, задовольняють рівнянню [3 Сидоренко]

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 (1 + 2\psi x) q = \frac{C\varepsilon}{2} - \frac{C^2 R}{z} \frac{dq}{dt}, \quad (3)$$

де  $\psi^2 = \frac{a}{8\pi C_0 \xi_0} \left( 1 + \frac{\pi a}{\xi_0} \right)$ ,

де  $R$  – активний опір петлі.

Центр ваги пластини переміщується відповідно до вираження

$$\ddot{x} + \omega_m^2 x = -2\gamma_m \dot{x} - \frac{\psi^2}{C_0 m} q, \quad (4)$$

де  $\gamma_m$  – декримент механічних коливань,  $\omega_m = \sqrt{K/m}$  – частота механічних коливань,  $K$  – твердість петлі,  $m$  – маса пластини.

Вирішимо рівняння (3), вважаючи, що  $x$  змінюється повільно ( $\omega_m \ll \omega_0$ ). Представляючи ЕДС у вигляді  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$ , знаходимо

$$q = b \sin(\omega t + V), \quad (5)$$

де:  $\operatorname{tg} V = \frac{\omega}{2\omega_0 Q(\Delta - \psi^2 x)}$ ;  $(6)$

$$\operatorname{tg} V = \frac{\omega}{2\omega_0 Q(\Delta - \psi x)}, \quad (7)$$

де  $Q = \frac{\omega_0 z}{C^2 R}$  – добротність контуру;  $\Delta = \left( \frac{\omega}{\omega_0} - 1 \right)$  – розлад контуру.

У цьому наближенні стаціонарне (усереднене по швидким осциляціям) положення пластини конденсатора визначається співвідношенням

$$x = -\frac{\psi^2}{2C_0 m \omega_m^2} \quad (8)$$

Підставляючи (8) у формулу (6), знаходимо рівняння настроювальної кривої контуру

$$y = \frac{1}{\sqrt{1 + (\delta + \mu^2 y^2)^2}} \quad (9)$$

де  $\delta = 2Q\Delta$ ;  $y = \frac{2\omega_0^2 b}{C^2 \epsilon_0 Q}$ ;

$$\mu^2 = \frac{\psi^4 Q^3}{m \omega_m^2 C_0} \frac{C^4 \epsilon_0^2}{z^2 \omega_0^4}$$

Залежність безрозмірної амплітуди високочастотних коливань у від розладу контуру  $\delta$  при  $\mu > \mu_{кр}$  представлена на рис. 3. Галузь інтегральної кривої АВ нестійка.

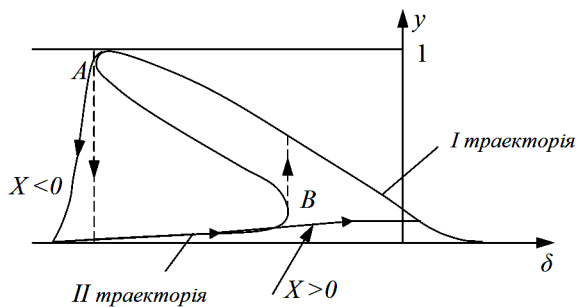


Рис. 3. Залежність безрозмірної амплітуди високочастотних коливань у від розладу контуру

Таким чином, при надкритичному значенні ЕРС вплив електромеханічної сили на пластини конденсатора здобувають виражену асиметрію: при їхньому зближенні (I траєкторія) пластина одержує імпульс у напрямку руху, тобто енергія від високочастотного електромагнітного поля перетвориться в кінетичну енергію пластини. При русі у зворотному напрямку зустрічний імпульс ( $Q \gg 1$ ) виявляється нехтує малим.

Цей механізм приводить до резонансного посилення механічних коливань і може бути використаний як вимірник електроакустичного каналу зв'язку (як підсилювальний елемент). У цьому випадку роль пластини конденсатора грає прийомна мембрана. Надкритичний рівень енергії системи (або її добротності) визначається нерівністю:

$$\frac{\psi^4 Q^3}{m \omega_m^2 C_0} \frac{C^4 \epsilon_0^2}{z^2 \omega_0^4} > \frac{8}{3\sqrt{3}} \quad (10)$$

### УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

Г.Ф. Коняхин, В.Л. Верещагин, Р.А. Яценко

Предложено техническое решение для реализации метода измерения звуковых колебаний, в основе которого лежит механизм электромеханической неустойчивости высокодобротных радиотехнических элементов при большом уровне запасенной энергии.

**Ключевые слова:** звуковые колебания, резонатор, электромеханическая неустойчивость, амплитудная модуляция, детектирование, возбуждающая и приемная антенны.

Порушення й знімання енергії з резонатора за допомогою збудливої й приймальної антен виробляється звичайними методами [5]. Стінка, розташована напроти мембрани, може переміщатися усередину резонатора, що в радіотехніці використовується для зміни резонансної частоти. У резонатор зовнішнє поле не проникає, тому перешкоди відсутні. Резонатор має дуже високу добротність (особливо із криогенним охолодженням), що дозволяє реєструвати малі вхідні сигнали, тобто пристрій має високу чутливість [6]. Частота в резонаторі  $\omega_0 \gg \omega_{сигн}$ , тому антена реєструє АМ коливання, які потім детектуються [7].

### Висновки

Резонансні методи дослідження речовини можна віднести до числа найбільш інформативних і точних. З їхньою допомогою можна вивчати хімічний склад, симетрію, структуру, енергетичний спектр речовини, електричні, спин-орбітальні, магнітні, надтонкі й супернадтонкі взаємодії в ньому. Ці методи можуть вдало доповнювати один одного. Вони знайшли широке застосування у фізики, хімії, біології й медицині.

### Список літератури

1. Шахмаев Н.М. Физика. Ч. 2: Колебания и волны. Оптика. Строение атома / Н.М. Шахмаев. – М.: Высш. шк., 1977. – 230 с.
2. Альтигулер С.А. Электронный парамагнитный резонанс / С.А. Альтигулер, Б.М. Козырев. – М.: Наука, 1972. – 222 с.
3. Пейк Дж. Парамагнитный резонанс / Дж. Пейк. – М.: Мир, 1965. – 185 с.
4. Лоу В. Парамагнитный резонанс в твердых телах / В. Лоу. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 248 с.
5. Электрические эффекты в радиоспектроскопии / под ред. М.Ф. Дейгена. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
6. Феер Дж. Электронная структура доноров в кремнии, определенная с помощью метода ДЭЯР / Дж. Феер. – Электронный спиновый резонанс в полупроводниках. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 362 с.
7. Элементарный учебник физики. Т. 2: Электричество и магнетизм / под ред. Г.С. Ланосберга. – М.: Наука, 1971. – 484 с.
8. Вертхейм Г. Эффект Мессбауэра / Г. Вертхейм. – М.: Мир, 1966. – 160 с.

Надійшла до редколегії 16.07.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.М.Сотніков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## THE DEVICE FOR MEASUREMENT OF INTENSITY OF SOUND FLUCTUATIONS IN CONTINUOUS ENVIRONMENTS

G.F. Konyakhin, V.L. Vereshchagin, R.A. Yatsenko

*The technical solution for realization of a method of measurement of sound fluctuations at the heart of which the mechanism of electromechanical instability of high-sound radio engineering elements lies at big level of the reserved energy is proposed.*

**Keywords:** *sound fluctuations, resonator, electromechanical instability, amplitude modulation, detecting, exciting and reception antennas.*