

*Г.М. СУЧКОВ*, проф. д-р техн. наук, НТУ «ХП»

*Л.В. ГЛЄБОВА*, магістрант, НТУ «ХП»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЗБУДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ ЄМНІСНИМ МЕТОДОМ

Приведены результаты экспериментальных исследований преобразователей ёмкостного типа для возбуждения ультразвуковых импульсов. Показана возможность возбуждения акустических импульсов с чувствительностью, достаточной для выполнения неразрушающего контроля и измерений.

The results of an experimental research of capacity transformers for excitation of ultrasonic impulses are presented. The possibility of acoustic impulses excitation with sensitiveness sufficient for implementation of non-destructive control and measuring is shown.

**Вступ.** Підвищення вимог до якості промислової продукції зумовило інтенсивний розвиток засобів ультразвукового контролю матеріалів і виробів [1]. Їх основу складають прилади, що реалізують контактний метод ультразвукового контролю [2]. Значний досвід практичного використання цього методу дозволив встановити області, в яких він не є ефективним [3]. Це ультразвуковий контроль виробів із забрудненою поверхнею, уражених корозією, або з покриттями (фарба, полімерні плівки і інші ізоляційні покриття), дефектоскопія гарячих і холодних виробів, високошвидкісний контроль, контроль з низькими експлуатаційними витратами та ін. Заповнити існуючу нішу можливо за рахунок приладів, які не потребують використання для своєї роботи контактної рідини [2]. Перспективними серед таких приладів можуть бути засоби, створені на основі конденсаторного способу (КС) збудження і прийому ультразвукових коливань [2]. КС зародився на стику декількох наукових напрямків, що мають різне фізичне ество. Тому для його опису потрібне використання апаратів електродинаміки і термодинаміки, теорії пружності, акустики, матеріалознавства. Потенціальна перспективність ємнісних перетворювачів (ЄП) при використанні для дефектоскопії, товщинометрії, визначення фізико-механічних властивостей матеріалів, вимірювань різного призначення, з однієї сторони, та недостатня чутливість, з другої, призвели до появи важливої для промисловості наукової задачі. Її суть полягає в розвитку теорії і практики створення нових приладів на основі ЄП, які забезпечать виявлення дефектів, вимірювання товщини і визначення структурних параметрів електропровідних виробів широкого сортаменту. Багатогранність і обсяг необхідних наукових і технічних рішень створили значні труднощі при розробці приладів на основі КС, основною з яких є надзвичайно мала чутливість. Отже, вирішення задачі з використання КС для цілей неруйнівного контролю є актуальним і своєчасним.

**Основна частина.** Акустичні коливання можливо приймати з металу за рахунок появи змінної електричної напруги на конденсаторному перетворювачі при зміні відстані між його обкладками, одна із яких – об'єкт контролю (ОК). Згідно з даними роботи [2] чутливість збуджуючого ємнісного перетворювача (ЄП) в 30000 разів менше ніж п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП). Для перевірки цих даних створено макет для досліджень ємнісного способу, рис. 1. Експериментальна перевірка теоретичних розрахунків виконана з допомогою 2-х ПЕП і збуджуючого ЄП на зразку з алюмінію діаметром 30 мм висотою 90 мм. ЄП мав діаметр 26 мм виготовлений з електропровідної плівки товщиною 30 мкм. Ізолююча прокладка ЄП – 0,2 мм з лавсанової плівки. Режим вимірювання – тінювий з використанням атенуатора серійного дефектоскопа УД2-12. Тінювий сигнал двох ПЕП склав 44 дБ. Тоді як сигнал прийнятий ПЕП від ЄП – 24 дБ. Аналіз отриманих експериментальних досліджень показує, що чутливість ЄП менше ніж стандартного ПЕП, з урахуванням завад акустичного характеру в 4 рази. Ці дані говорять про те, що відомі результати не в повній мірі відображають фізичну суть процесів перетворення акустичних полів в електричні. Тому для використання КС в неруйнівному ультразвуковому контролі слід виконати дослідження і знайти наукові і технічні рішення направлені, в першу чергу, на підвищення чутливості конденсаторного способу збудження ультразвукових імпульсів.

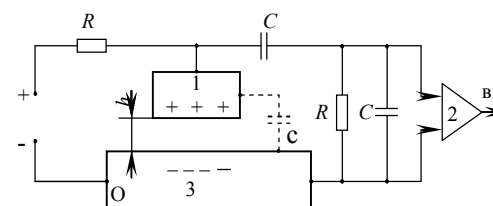


Рис. 1. Макет для оцінки коефіцієнту перетворення при конденсаторному збудженні акустичних коливань в ОК:

- 1 – робоча обкладка (електрод) ЄП;
- 2 – підсилювач;
- 3 – ОК (друга обкладка ЄП);

Для знаходження шляхів підвищення коефіцієнта перетворення використаємо відому формулу для ємності конденсатора. Вона залежить від відстані до ОК, діелектричної проникності прошарку між електродами і металом, площі електродів. Окрім того, очевидно, що коефіцієнт перетворення акустичної енергії в електричну буде залежати від величини постійної напруги, прикладеної до ЄП. З погляду максимального коефіцієнта передачі, бажано мати максимальну ємність  $C_0$  ЄП. Однак збільшення ємності за рахунок зменшення прошарку  $h$  вимагає зниження поляризуючої напруги  $U_*$ . Окрім того, при проведенні неруйнівного контролю прошарок між електродами та виробом повинен бути більше кількох десятків часток міліметра. Збільшувати площу ЄП більше 20...30 мм не доцільно з точки зору забезпечення технології контролю [2]. Тому наявність цих двох суперечливих умов приводить до того, що оптимальний діаметр обкладки ЄП повинен бути не більше 25 – 30 мм.

Іншим шляхом підвищення чутливості ЄП є використання проміжних шарів матеріалу з високим значенням величини відносної діелектричної про проникності. Такий висновок підтверджується експериментальними даними, отриманими при дослідженні матеріалів з різною діелектричною проникністю, табл. 1.

Таблиця 1- Залежність величини А співвідношення амплітуд ультразвукового імпульсу і завад при збудженні ЄП та прийомі ПЕП, на частоті 2,5 МГц, h = 1 мм

Матеріал прошарку ЄП	Повітря	Лавсан	Папір (80 г/м <sup>2</sup> )	Спечений двоокис алюмінію	Гетинакс
А, дБ,	14	20	28	31	39

Очевидно, що вибір матеріалу прошарку має принципове значення. Амплітуду корисного сигналу можливо підвищити в багато разів. При цьому проміжний матеріал повинен грати роль захисної плівки, оскільки ЄП може бути пошкоджений під час сканування поверхні виробу, який контролюється. Тому при проведенні експериментів була використана лавсанова плівка товщиною 0,2 мм, яка одночасно грає роль стійкого до зносу прошарку. Однак, під час експериментальних досліджень встановлено, що чутливість таких ЄП істотно змінюється у часі, рис. 2 (поляризуюча напруга 900 В, прошарок між електродом і виробом – лавсанова плівка товщиною 0,2 мм,  $\epsilon = 3,2$  [5]).

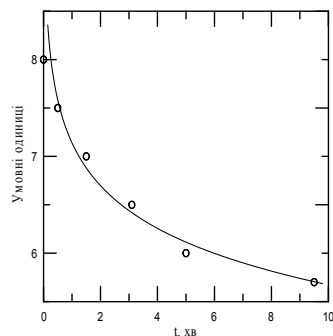


Рис. 2. Залежність збудженого ЄП сигналу від часу вимірювання (прошарок лавсанова плівка товщиною 0,2 мм)

проникністю, запропоновано постійне поляризуюче поле замінити на імпульсне – зі зміною полярності кожного наступного поляризуючого

імпульсу, рис 3.

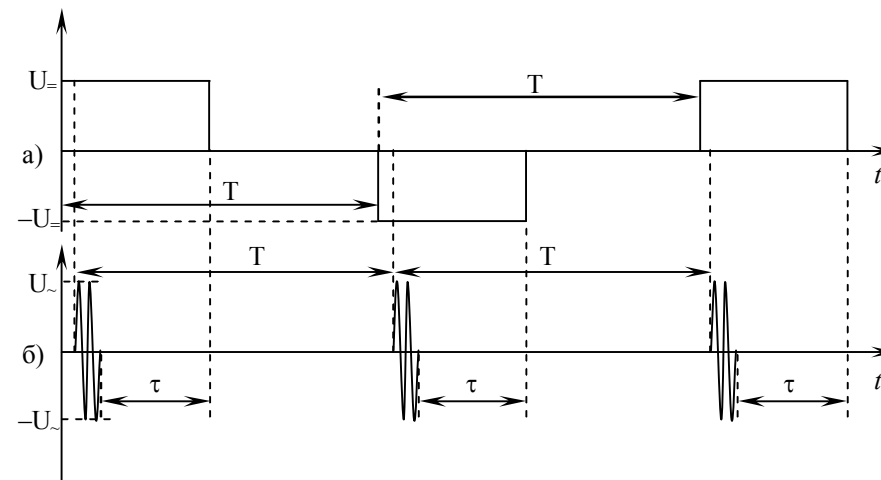


Рис.3. Форма поляризуючих імпульсів (а) та високочастотних імпульсів збудження (б) ефективного ЄП: T – період зондування ОК;

Результати експериментальної перевірки підтвердили, що при переключенні полярності поляризуючих імпульсів, амплітуда прийнятих інформаційних сигналів залишається стабільною. При цьому, амплітуда сигналів на алюмінієвих зразках в відношенні до завад складає не менше 100 разів. Це достатня величина для проведення ультразвукової дефектоскопії і товщинометрії.

Окрім того, короткі (близько кількох сотень мікросекунд і частоти посилення (зондування виробу) таких імпульсів не більше 100 разів на секунду) імпульси високої напруги не мають такої небезпечної дії на обслуговуючий персонал, як постійна напруга. З точки зору техніки безпеки це значна перевага.

Важливою перевагою такого способу живлення ЄП є також те, що короткі поляризуючі імпульси по амплітуді можуть перевищувати постійну поляризуючу напругу без пробою захисної діелектричної плівки. Це дає можливість підвищити чутливість ЄП за рахунок її збільшення.

Оскільки для прийнятних діелектричних плівок напруга пробою складає близько 30 В/мкм, то елементарні розрахунки показують, що чутливість ЄП буде дорівнювати  $\approx 10^8$  В/м. Ця величина відрізняється від аналогічної для ПЕП на суттєво меншу величину, ніж визначену в [2], що говорить про необхідність виконання подальших досліджень, в тому числі теоретичних.

Для визначення впливу факторів, що визначають результати ультразвукового контролю емнісним способом було розроблено стенд для досліджень ЄП в режимі збудження, рис. 4. Стенд за рис.4 дозволяє виконувати дослідження так. Серійний ультразвуковий дефектоскоп 1 (УД2-12) синхронізує роботу генератора 2 поляризуючої напруги з послідовною зміною полярності імпульсів (див. рис. 4) і генератора 3 височастотних імпульсів. Імпульси генераторів 2 і 3 живлять ЄП 4 з діелектричною захисною плівкою 5. Перетворювач 4 збуджує в об'єкті контролю 6 акустичні імпульси. З протилежної сторони ОК 6 акустичні імпульси приймаються ПЕП 7 і поступають на дефектоскоп 1. Характеристики прийнятих сигналів оцінювали з допомогою атенюатора, цифрового індикатора і шкал електронно-променевої трубки дефектоскопа 1.

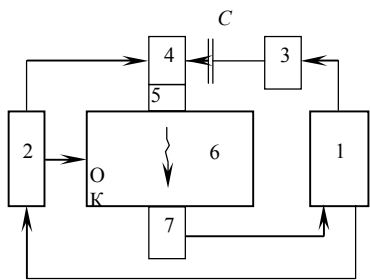


Рис. 4. Стенд для досліджень ЄП в режимі збудження акустичних імпульсів

Дослідження впливу зазору  $h$  на амплітуду збуджених ультразвукових імпульсів, які приймалися ПЕП, при комбінованому зазорі з повітря ( $\approx 6 \times 5$  мкм) і лавсанової плівки (5x 0,2 мм), зображено на рис. 5.

При цьому відношення повітряного зазору і діелектричного прошарку повинно бути на користь діелектричної плівки. Це підтверджується

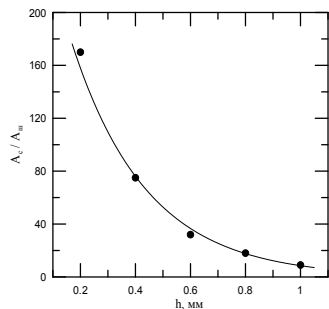


Рис. 5. Вплив величини лавсанового прошарку між збуджуючим ЄП і виробом на зміну амплітуди інформаційного імпульсу, прийнятого ПЕП

експериментальними результатами (див. табл. 1).

Аналіз отриманих результатів показує, що при реальному контролі

необхідно мінімізувати коливання повітряного прошарку між ЄП і виробом.

На рис. 6 приведено результати впливу поляризуючої напруги на амплітуду збуджених ультразвукових імпульсів (частота 2,5 МГц).

Таким чином, для підвищення коефіцієнту перетворення ЄП, поляризуючу напругу необхідно збільшувати. Як видно з приведених результатів її величина може досягати 1000 В і більше, особливо при імпульсному живленні різнополярними імпульсами. Окрім того, можна зробити висновок про можливість впливу на інформаційний імпульс безпосередньо під час проведення ультразвукового контролю. Механічне сканування виробу при ручному контролі виконується з набагато меншою швидкістю, ніж електронне регулювання величини поляризуючої напруги. Тому вплив шкідливих факторів, наприклад випадкової зміни технологічного повітряного зазору, можна повністю компенсувати за рахунок зміни величини поляризуючої напруги.

Особливе значення для отримання прийнятної величини збуджених ультразвукових імпульсів має величина відносної діелектричної проникності захисної плівки ЄП. Дані, приведені в табл. 1, показують, що вплив різних матеріалів на корисний сигнал різний. Було додатково проведено вимірювання ємності ЄП з однаковими параметрами обкладинок для кожного діелектричного матеріалу прошарку з однаковою товщиною. З допомогою відомої формули для ємності плоского конденсатора отримаємо (товщина прошарку матеріалу  $h_i$  і повітря  $h_p$  відрізняється)

$$\frac{C_i h_i}{C_p h_p} = \varepsilon_i \quad (1)$$

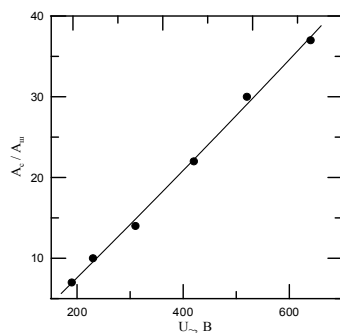


Рис. 6. Вплив величини змінної напруги на амплітуду збуджених ультразвукових імпульсів.

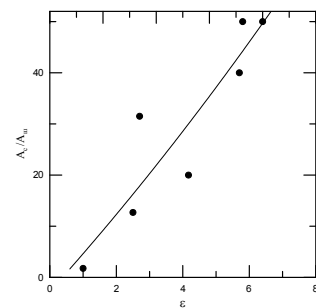


Рис. 7. Залежність амплітуди збуджених ЄП інформаційних імпульсів від відносної діелектричної проникності захисного прошарку

де  $C_i$  і  $C_p$  – ємності ЄП для вибраного діелектричного прошарку і повітря відповідно;  $\varepsilon_i$  і  $\varepsilon_p$  – значення відносної діелектричної проникності діелектричного прошарку і повітря відповідно ( $\varepsilon_p = 1$ ).

Таким чином можливо оцінити вплив діелектричної проникності на амплітуду корисних сигналів, тобто його посилення. Залежність амплітуди збуджених інформаційних імпульсів від відносної діелектричної проникності захисної плівки ЄП приведено на рис. 7. Лінія тренду на графіку виконана з використанням програмного забезпечення типу Excel та Grapher.

Аналіз приведених даних показує, що збільшення відносної діелектричної проникності захисної підсилюючої плівки ЄП веде до

збільшення амплітуди інформаційних імпульсів за законом, близьким до лінійного. Але слід відзначити, що одночасно захисна плівка повинна бути суттєво зносостійкою.

Таблиця 2 - Діелектричні проникності матеріалів, величини яких розраховані за формулою (1)

Матеріал прошарку ЄП	Повітря	Лавсан	Папір (80 г/м <sup>2</sup> )	Спечений двоокис алюмінію	Гетинакс
$\epsilon$	1	2,5	2,7	5,7	6,4

Такі суперечливі умови вимагають пошуків матеріалів для захисної плівки перетворювача. Одним з прийнятних варіантів може бути плівка зі спеченого двоокису алюмінію, який має доволі значну величину відносної діелектричної проникності – до 7,6 [5] і дуже високу зносостійкість. Проте промисловість випускає такі плівки товщиною 1 мм і більше, що знижує ефективність емнісного перетворювача. При контролі виробів з гладкою поверхнею можливе використання захисного прошарку з менш стійкого матеріалу, наприклад з гетинаксу (див. табл. 1). Враховуючи незначну вартість такої плівки, її можливо замінювати частіше без зниження характеристик перетворювача. З викладеного випливає необхідність проведення більш широких досліджень матеріалів з можливістю їх використання в якості стійкого захисного прошарку ЄП при одночасній високій чутливості.

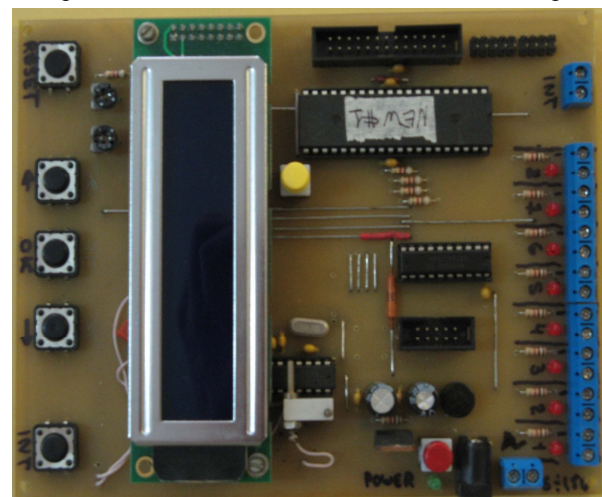


Рис. 8. Формувач синхронізуючого, поляризуючих, високочастотних і керуючих імпульсів на базі мікропроцесора ATMEGA 32 для приладів неруйнівного контролю

Виконані дослідження стали основою для розробки елементів пристрою для ефективного збудження ультразвукових імпульсів мегагерцового діапазону, який широко використовується для дефектоскопії і товщинометрії.

Для вирішення визначених задач необхідно розробити блоки і вузли дефектоскопів, товщиномірів і приладів для визначення фізико-механічних

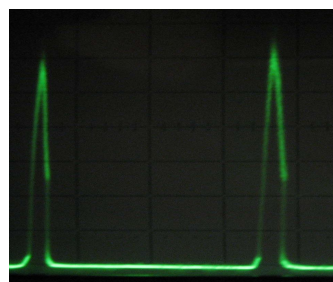


Рис. 9. Фото реалізацій з сигналами, отриманими з алюмінієвого зразка на частоті 2,5 МГц при збудженні ЄП та прийомі ПЕП

характеристик матеріалів. Перша з них – розробка джерела живлення ЄП поляризуючими імпульсами з послідовною зміною їх полярності (див. рис. 3). Дослідження показали, що її слід вирішувати в два етапи. Перший – розробка формувача необхідних для роботи приладу імпульсів: синхронізуючого, поляризуючих і високочастотних. Такий формувач розроблено на базі мікропроцесора ATMEGA 32 [4], рис. 8.

Для забезпечення високої напруги поляризуючих імпульсів розроблено макет на базі польових транзисторів типу IRF 540 які дозволили отримати регульовану величину напруги на рівні 1000 В. Використання

пристрою дало можливість експериментально підтвердити, що емнісний метод за своїми характеристиками, в першу чергу за чутливістю при збудженні, може бути використаний при створенні приладів для ультразвукового контролю, рис. 9 (зразок з алюмінію, частота ультразвукових коливань – 2,5 МГц). Як випливає з приведених реалізацій, відношення амплітуд збудження імпульсу і завад різного характеру є достатнім для використання для неруйнівного контролю.

**Висновки:** 1. Розроблені концептуальні положення створення нового класу ефективних приладів для ультразвукового контролю виробів з використанням конденсаторного способу збудження акустичних сигналів. Суть положень полягає у формуванні поляризуючої напруги в вигляді імпульсів заданої часової протяжності зі зміною їх полярності. 2. Порівняльний аналіз характеристик емнісного датчика з п'єзоелектричним приймачем дозволяють стверджувати, що емнісний перетворювач є унікальним датчиком, для якого є своя ніша в об'ємі робіт з неруйнівного контролю металовиробів. 3. Досліджено фактори, які визначають ефективність конденсаторних приладів неруйнівного контролю при збудженні акустичних імпульсів. Показано необхідність витримувати стабільну товщину прошарку між ЄП і виробом, величину поляризуючої напруги і відносної діелектричної проникності захисної (підсилюючої) плівки перетворювача.

**Список літератури:** 1. Нерушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. 864 с. 2. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. 240 с. 3. Сучков Г.М., Глоба С.Н., Глебова Л.В. Возможность приема ультразвуковых импульсов преобразователями емкостного типа. – Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ», 2007, № 35, – С. 29–32. 4. Анотації доповідей XVI міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіти, здоров'я"-ЧІ- Харків: НТУ "ХПІ". - 2008. – С.433.