

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Ігоря Сікорського”

ІВІЦЬКА ДАР’Я КОСТЯНТИНІВНА

УДК 620.179.148:620.192

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ДЛЯ
ДЕФЕКТОСКОПІЇ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Баженів Віктор Григорович,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",
доцент кафедри приладів та систем неруйнівного контролю

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сучков Григорій Михайлович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики

кандидат технічних наук, доцент
Монченко Олена Володимирівна,
Національний авіаційний університет,
доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини

Захист відбудеться "19" березня 2019 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "___" лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18



Н. І. Бура

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У всьому світі протягом останніх десятирічь спостерігається високий попит на новітні композиційні матеріали, перш за все, на інноваційні полімерні композиційні матеріали (ПКМ), зокрема, на наномодифіковані інтелектуальні ПКМ (НМПКМ) та вироби з них. НМПКМ виготовляються з використанням наномодифікаторів, сплавів з магнітними властивостями та різних типів датчиків, зокрема волоконно-оптичних і п'єзоелектричних тощо, які дозволяють контролювати дію зовнішніх факторів, зокрема, тиску, температури, деформацій тощо. Введення у вироби з полімерних композиційних матеріалів інтелектуальних датчиків дозволяє проводити дистанційну діагностику та моніторинг цих виробів безпосередньо під час їх експлуатації.

При виготовленні виробів з НМПКМ виникають ряд проблем, пов'язаних перш за все з тим, що такі матеріали змінюють діелектричну проникність та провідність в залежності від концентрації наповнювача, в якості якого використовуються вуглецеві нанотрубки (ВНТ). Найбільш актуальними проблемами при виробництві НМПКМ є:

1. Необхідність точкового вимірювання діелектричної проникності матеріалу у режимі реального часу для контролю рівномірності розподілення ВНТ у полімерній матриці. Незважаючи на використання сучасних змішувачів та гомогенізаторів, ВНТ мають схильність до утворення агломератів, які призводять до значного погіршення властивостей виробу та неможливості його використання.

2. Необхідність контролю глибини розташування інтелектуальних датчиків (ІД) у розплав полімерного матеріалу у реальному часі для можливості коригування технологічних параметрів переробного обладнання.

3. Можливість лише одностороннього доступу до порожнистих виробів складної конфігурації.

Таким чином, при виготовленні виробів з НМПКМ необхідно застосування методу неруйнівного контролю (НК), який дозволяє здійснювати одночасний точковий контроль діелектричної проникності матеріалу та контроль глибини розташування ІД, при цьому необхідно забезпечити можливість контролю як провідників, так і діелектриків.

Комплексу таких вимог найбільш повно задовольняє електроємнісний метод НК, який фактично може забезпечити вимірювання як діелектричної проникності так і глибини розташування дефекту або датчика, при цьому метод не потребує спеціальної підготовки поверхні, використання рідини і може бути безконтактним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках державної науково-дослідної роботи «Розроблення інноваційної технології та устаткування для формування виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів» (№ ДР 0116U003693), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення електроємнісного методу неруйнівного контролю матеріалів за рахунок підвищення його чутливості та швидкодії.

Для реалізації поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів контролю НМПКМ та обґрунтувати шляхи їх вдосконалення.

2. Визначити раціональні параметри та режими роботи сенсору для забезпечення максимальної чутливості вимірювальної схеми шляхом математичного моделювання.

3. Дослідити вплив геометричної форми та розмірів сенсору на його чутливість шляхом математичного моделювання.

4. Розробити структуру системи для підвищення чутливості сенсору та швидкодії приладу.

5. Провести експериментальні дослідження процесу контролю з метою підтвердження працездатності методу.

6. Впровадити результати досліджень та розробок в практику використання для виробничих та навчальних задач.

Об'єкт дослідження – процес електроємнісного контролю наномодифікованих інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – методи та засоби підвищення чутливості та швидкодії електроємнісного контролю матеріалів.

Методи дослідження. Поставлені в роботі задачі вирішувались на основі методів математичного моделювання процесів, технічної діагностики та неруйнівного контролю, експериментальних досліджень, сучасних методів числового моделювання з використанням методу скінченних елементів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Набув подальшого розвитку електроємнісний метод неруйнівного контролю на основі вдосконалення математичної моделі та використання амплітудно-фазового методу вимірювання сигналу для підвищення завадостійкості та розширення функціональних можливостей методу.

2. Вперше отримані залежності чутливості електроємнісного сенсору від електричних параметрів сенсора, що дозволило визначити оптимальний частотний діапазон для досягнення максимальної чутливості.

3. Обґрунтовано новий підхід до визначення оптимальної геометричної форми та розмірів сенсора за рахунок математичного моделювання розподілу параметрів електричного поля сенсора у просторі.

4. Розроблено інформаційну модель завадостійкої системи електроємнісного контролю, яка містить блоки одночасної реєстрації зміни фазового зсуву та амплітуди вимірювального сигналу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено нову форму електроємнісного сенсору з підвищеною чутливістю, що включає дві пари випромінюючих та приймаючих електродів.

2. Розроблено завадостійкий електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю з підвищеною чутливістю сенсору та швидкодією.

3. Визначено межі застосування методу для зразків за допомогою дослідження параметрів процесу контролю, що дало змогу розробити рекомендації по застосуванню методу.

4. Обґрунтовано можливість контролю діелектричної проникності у локальній точці з високою швидкістю.

5. Створено лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено в КПІ ім. Ігоря Сікорського при виконанні науково-дослідної роботи та в навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю, а також в дослідницьку та виробничу діяльність ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» (м.Київ).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи одержані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, особисто автором виконано: [13, 18] – аналіз застосування електроємнісного методу неруйнівного контролю для матеріалів різної структури; [12, 14, 22] – числове моделювання та отримано рекомендації для визначення оптимальних параметрів та характеристик роботи системи і сенсора; [2, 3] – моделювання контролю матеріалів зі змінними провідними властивостями, зокрема наномодифікованих полімерних композитів; [16, 17, 21] – дослідження параметрів процесу контролю та меж застосування методу для провідних та непровідних зразків, здійснено моделювання контролю дефектів та параметрів сенсора, запропоновано конструкцію сенсора, яка демонструє найвищу чутливість; [5, 6, 7, 8, 9, 10] – розроблено спосіб підвищення завадостійкості, що дозволяє реєструвати з великою точністю зміну не тільки фазового зсуву вимірювального сигналу, але і зміну амплітуди вимірювального сигналу; [1, 11, 15] – обґрунтовано застосування методу для збільшення завадостійкості; [4, 19, 20] – проведено експериментальні дослідження, які підтвердили працездатність методу.

Апробація результатів дисертації проводилась на таких науково-технічних конференціях і семінарах: IV науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2013); Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2015» (Минск, 2015); Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 2016); Національна науково-технічної конференція та виставка «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (Київ, 2016); Науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2016); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» (Харків, 2016); Науково-практична конференція молодих вчених «Новітні технології пакування» (Київ, 2017); Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 2017); XVI Міжнародної

науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2017); Міжнародна конференція «NDT DAYS» (Созополь, 2017).

Публікації. За темою дисертаційних досліджень опубліковано 22 наукові праці, з яких 4 у фахових виданнях України (в тому числі 2, що входять до наукометричної бази Scopus), 3 патенти України на винахід, 3 патенти України на корисну модель, 2 статті в наукових виданнях України, 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації представлена на 132 сторінках і містить 70 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 180 сторінок, у тому числі 3 додатки на 11 сторінках і список використаних джерел зі 150 найменувань на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи, описано об'єкт, предмет та методи дослідження. Окреслено наукову новизну і практичне значення результатів дослідження, визначено особистий внесок автора, наведено зв'язок роботи з науковими програмами. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** здійснено огляд існуючих методів електричного неруйнівного контролю при виробництві НМІПКМ та аналіз методів, які можуть забезпечити необхідність точкового вимірювання діелектричної проникності матеріалу, необхідність контролю глибини розташування інтелектуальних датчиків у розплав полімерного матеріалу у режимі реального часу та можливість лише одностороннього доступу до об'єкту контролю (ОК).

В результаті аналізу визначено, що ультразвуковий метод НК не повністю задовольняє поставлені задачі, так як може контролювати лише глибину включень у виробі, але не може здійснювати контроль діелектричної проникності.

Серед електричних методів НК для вирішення поставленої задачі електроємнісний метод є одним з найбільш інформативних та зручних для використання, за його допомогою можливо вирішити всі задачі дослідження. Електроємнісний метод базується на введенні ОК або його ділянки в електростатичне поле, джерелом якого є електричний конденсатор.

Проте, до цього часу електроємнісний метод застосовувався тільки для інтегральної оцінки діелектричної проникності об'єкту контролю. Використання методу для локального контролю обмежено значним часом контролю, що обумовлено використанням мостових схем для вимірювання малих значень ємності з високою точністю, які потребують багатоступеневих алгоритмів, що призводить до значних затрат часу на вимірювання. При скануванні ОК в багатьох точках затрати часу стають неприпустимо великими.

Крім того, для цього методу не існує аналітичних способів знаходження ємності для несиметричних сенсорів та сенсорів складної форми, що потребує

використання комп'ютерних методів для знаходження ємності. Також, відкритим є питання боротьби з електромагнітними завадами. Розглянутий стан проблем дозволив сформулювати мету і завдання даних дисертаційних досліджень.

Другий розділ присвячено теоретичному обґрунтуванню системи «ємнісний сенсор - ОК» для електроємнісного методу контролю.

В зв'язку з необхідністю вимірювання малих значень ємності з високою точністю можливе використання мостових схем вимірювання ємності, які мають високу чутливість, велику точність, широкий діапазон вимірюваних значень ємності. Але, зрівноваження мостів при вимірюванні потребує складних багатоступінчастих алгоритмів, що ускладнює апаратне виконання та значно збільшує час вимірювання. Крім того, існують обмеження використання мостових схем для знаходження локальних дефектів в об'єкті контролю, а час пошуку одного дефекту є завеликим, що робить практично неможливим діагностику ОК на предмет наявності дефектів.

Запропоновано вимірювальний перетворювач представити у вигляді еквівалентної схеми (рис. 1) і визначати ємність через визначення комплексного коефіцієнту перетворення.

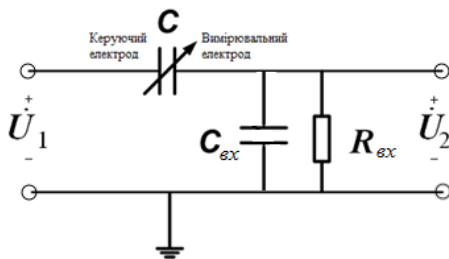


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема вимірювального перетворювача

Коефіцієнт передачі в алгебраїчній формі

$$\dot{K} = \frac{\dot{Z}_{ex}}{\dot{Z} + \dot{Z}_{ex}} = \frac{C\omega^2 R_{ex}^2 (C + C_{ex})}{1 + \omega^2 R_{ex}^2 (C + C_{ex})^2} + \frac{C\omega R_{ex}}{1 + \omega^2 R_{ex}^2 (C + C_{ex})^2} j$$

Після переведення коефіцієнту передачі у показову форму

$$\dot{K} = \sqrt{\frac{C^2 \omega^2 R_{ex}^2}{C^2 \omega^2 R_{ex}^2 + 2C\omega^2 C_{ex} R_{ex}^2 + \omega^2 C_{ex}^2 R_{ex}^2 + 1}} e^{\text{atan}\left(\frac{1}{\omega R_{ex} (C + C_{ex})}\right)}$$

Так як для даного перетворювача пропонується вхідний підсилювач вбудувати безпосередньо в сенсор, то приймається $C_{вх} = 0,5$ пФ (типове значення вхідної ємності для підсилювача заряду, наприклад для AD4422). Вхідний опір підсилювача заряду по постійному струму $R_{вх}$ приймається рівним 100 МОм.

На рис. 2 зображено амплітудно-частотну характеристику схеми при різних значеннях ємності сенсора, а на рис. 3 – фазо-частотну характеристику схеми.

Для знаходження робочої частоти максимальної чутливості схеми за амплітудою знаходиться третя похідна функцій АЧХ та ФЧХ.

Коефіцієнт передачі перетворювача визначається

$$\dot{K} = \frac{\dot{Z}_{ex}}{\dot{Z} + \dot{Z}_{ex}},$$

де $\dot{Z} = -j/\omega C$ – опір ємнісного перетворювача;

$\dot{Z}_{ex} = \dot{Z}_C R_{ex} / (\dot{Z}_C + R_{ex})$ – вхідний опір підсилювача; $\dot{Z}_C = -j/\omega C_{ex}$.

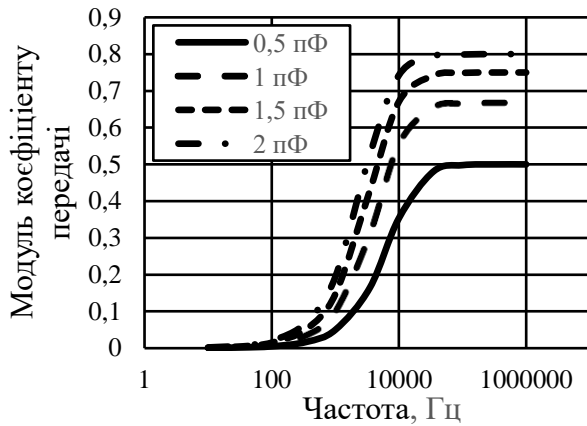


Рис. 2. АЧХ схеми

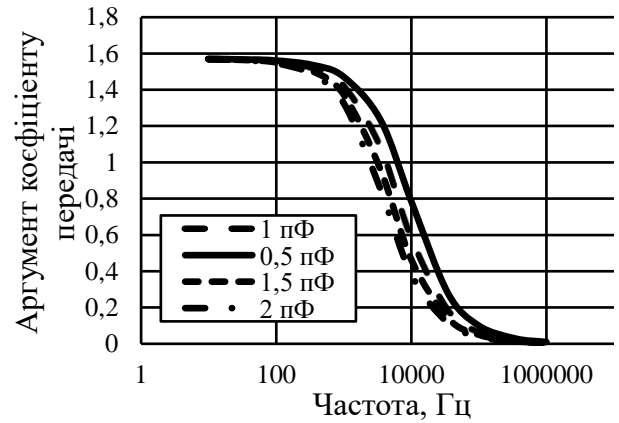


Рис. 3. ФЧХ схеми

Графік третьої похідної функції АЧХ при різних значеннях ємності сенсора зображено на рис. 4, а третьої похідної функції ФЧХ на рис. 5.

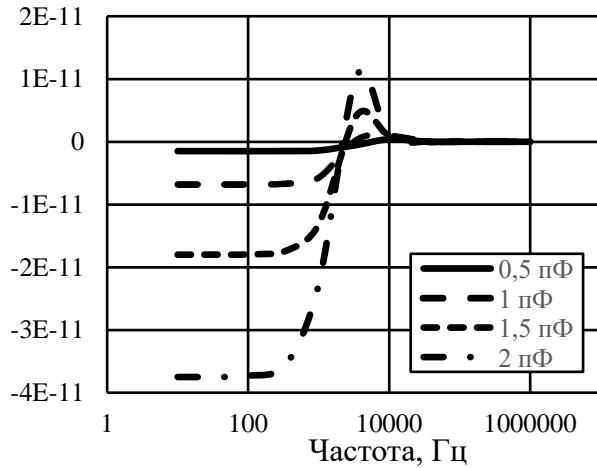


Рис. 4. Залежність третьої похідної АЧХ від частоти

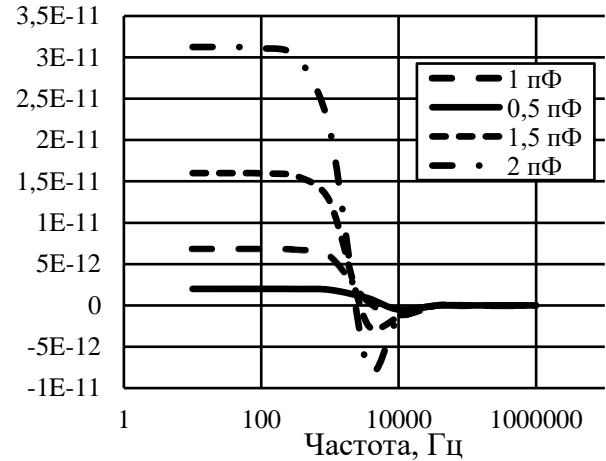


Рис. 5. Залежність третьої похідної ФЧХ від частоти

Прирівнявши $\frac{d^3}{d\omega^3} K(AЧХ) = 0$ та $\frac{d^3}{d\omega^3} K(\PhiЧХ) = 0$ знайдемо частоти, за

якими чутливість схеми максимальна, наведені на рис. 6 та рис. 7.

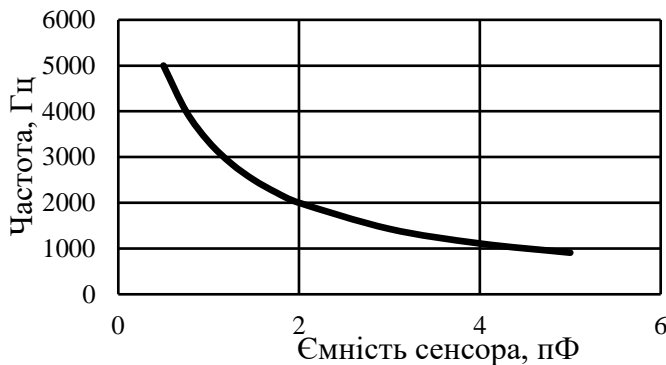


Рис. 6. Залежність частоти максимальної чутливості схеми за амплітудою від початкової ємності сенсора

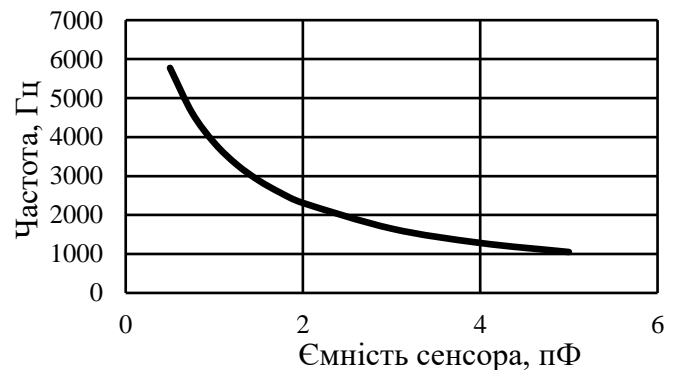


Рис. 7. Залежність частоти максимальної чутливості схеми за фазою від початкової ємності сенсора

В роботі визначено залежності чутливості електроємнісного сенсору від електричних параметрів, наведених на рис. 6 та рис. 7, для АЧХ

$$\omega_{max}(АЧХ) = 3247,5 \cdot C^{-0,75} \text{ Гц/пФ},$$

де C – ємність сенсора [пФ], при величині достовірності апроксимації $R^2 = 0,99$.

Та для ФЧХ

$$\omega_{max}(ФЧХ) = 3750,1 \cdot C^{-0,75} \text{ Гц/пФ},$$

при величині достовірності апроксимації $R^2 = 0,99$.

Отримані залежності дозволяють визначати частоту, за якої чутливість схеми є максимальною без проведення моделювання або натурального експерименту.

Для визначення чутливості схеми за амплітудою було досліджено залежність напруги на виході від ємності вимірювального сенсора, що зображено на рис. 8, за фазою – на рис. 9.

Варто зазначити, що в більшості практичних задач важливо вимірювати не абсолютне значення ємності, а приріст ΔC .



Рис. 8. Залежність напруги від ємності вимірювального сенсора

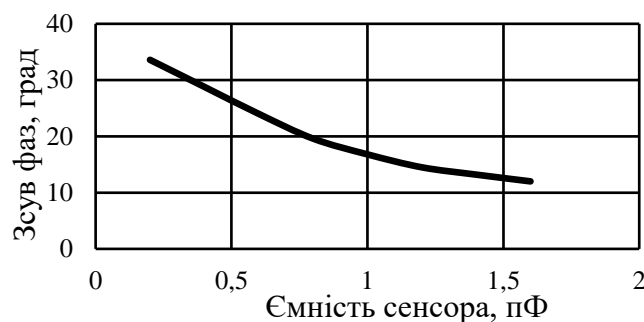


Рис. 9. Залежність фазового зсуву від ємності вимірювального сенсора

З рис. 8 визначено чутливість системи за амплітудою, що склала

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta C} = 3,4 \frac{мВ}{пФ}.$$

З урахуванням мінімально можливої роздільної здатності вимірювального приладу, наприклад $\Delta U = 1 мВ$, за допомогою схеми є можливість вимірювання зміни ємності у $\Delta C = 0,3 пФ$.

З рис. 9 визначено чутливість системи за фазою, що склала

$$S_\varphi = \frac{\Delta \varphi}{\Delta C} = 1,55 \frac{град}{пФ}.$$

З урахуванням мінімально можливої чутливості вимірювального приладу, наприклад $\Delta \varphi = 0,3^\circ$, є можливість вимірювання зміни ємності у $\Delta C = 0,2 пФ$.

Таким чином, можна зробити висновок, що чутливість за фазою є вищою.

Для знаходження мінімально можливого розміру електроду необхідно визначити ємність електродів при різних геометричних розмірах і конфігураціях. Визначити значення ємності розгорнутого плоского конденсатора неможливо

здійснити аналітичним шляхом. Тому, для визначення абсолютної величини електричної ємності сенсору було побудовано 3D модель.

Для проведення контролю електроємнісним методом необхідно використовувати електроди, розміри яких співставляються з розміром дефекту. Проте, можливості вимірювання надмалих значень електричної ємності обмежені. Для визначення мінімально можливих розмірів електродів було проведено дослідження з розмірами електродів від 5х5 мм до 35х35 мм, результати дослідження зображено на рис. 10.

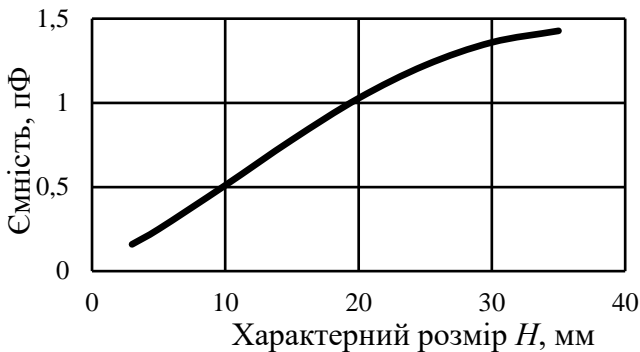


Рис. 10. Залежність ємності від характерного розміру електроду

Таким чином, враховуючи мінімально можливу зміну ємності, яка може бути виміряна за амплітудою $\Delta C = 0,3n\Phi$, з рис. 10 можливо знайти мінімальний розмір електроду, що становить 6х6 мм. Враховуючи мінімально можливу зміну ємності, яка може бути виміряна за фазою $\Delta C = 0,2n\Phi$, мінімальний розмір електроду становить 4х4 мм.

Третій розділ присвячено моделюванню процесів формування інформаційних сигналів для електроємнісної дефектоскопії.

Математична модель процесу базується на рівнянні Максвелла-Ампера

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}. \quad (1)$$

Для усунення напруженості магнітного поля H , розбіжність обох сторін рівняння (1) береться, як

$$\nabla \cdot \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) = 0. \quad (2)$$

Частоти, що використовуються в ємнісних сенсорах, як правило, лежать в області між 1 кГц і 1 МГц. На таких частотах індуктивними явищами можна знехтувати і електромагнітне поле можна розглядати як квазістатичне електричне поле. Можна припустити, що похідною за часом щільності магнітного потоку B можна знехтувати, і згідно закону Фарадея електричне поле E є вільним для звертання

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

На основі рівняння (3), електричне поле E можна описати за допомогою електричного скалярного розподілу потенціалу $\varphi(x, y, z)$, так що розподіл електричного потенціалу $\varphi(x, y, z)$, може бути представлений як

$$\bar{E} = -\nabla\varphi(x, y, z),$$

використовуючи конститутивні співвідношення

$$\bar{J} = \sigma(x, y, z)\bar{E},$$

$$\bar{D} = \varepsilon(x, y, z)\bar{E}.$$

Вираз (2) набуває виду

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] + \nabla \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] \right\} = 0, \quad (4)$$

де $\sigma(x, y, z)$ – розподіл провідності; $\varepsilon(x, y, z)$ – розподіл діелектричної проникності.

Для моделювання застосовувався комерційний пакет COMSOL Multiphysics. COMSOL обробляє загальні, статичні та квазістатичні електромагнітні поля структури 2D і 3D, і забезпечує зручне підключення до MATLAB для подальшого і гнучкішого аналізу.

За допомогою числового моделювання було визначено вплив товщини ОК на процес контролю. Крім того, для непровідних зразків заземлена підкладка значно впливатиме на результати. Відносне значення діелектричної проникності зразка, яке використовували для дослідження впливу товщини і заземленої підкладки становило 4, а робочий зазор було встановлено на рівні $0.3H$ для всіх типів товщини, де H – відносний геометричний розмір.

Досліджувався вплив товщини (від $1H$ до $15H$) для зразків з заземленою підкладкою та без нею. Результати моделювання представлено на рис.11, де відносна ємність розраховується за формулою

$$C^* = \frac{C_x}{C_0},$$

де C_x – ємність в конкретному досліді; C_0 – максимальна ємність при моделюванні.

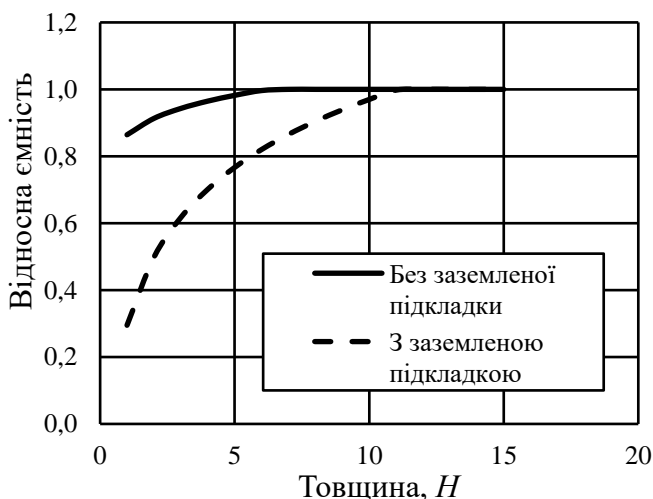


Рис. 11. Залежність відносної ємності від товщини зразка

Враховуючи мінімальну різницю у ємності 3%, при проведенні контролю з заземленою підкладкою максимально можлива товщина ОК, за якої можливе виявлення дефекту, становить $11H$. При контролі без заземленої підкладки максимальна товщина ОК є значно меншою та становить $5H$. Крім того, отримані залежності демонструють, що метод дозволяє визначати товщину ОК, співвідносячи отримані електричні ємності при проведенні одночасного дослідження ОК з заземленою підкладкою та без неї.

Для провідних зразків, як показало моделювання, сенсор нечутливий до товщини.

Крім того, досліджено вплив робочого зазору на процес контролю. Не завжди можливо досягти мінімального робочого зазору, тому необхідно дослідити вплив робочого зазору. При збільшенні робочого зазору зразок може бути за межами діапазону поля.

Щоб дослідити вплив робочого зазору товщина зразка становила $20H$, товщина значно більша, ніж критична товщина для обох випадків відповідно до результатів, отриманих при дослідженні товщини зразка. Таким чином, товщина не матиме ніякого впливу на реакцію сенсора в моделях. У цьому випадку було досліджено непровідний зразок із значенням діелектричної проникності 4 і провідний зразок із заземленою поверхнею. Результати наведені на рис. 12.

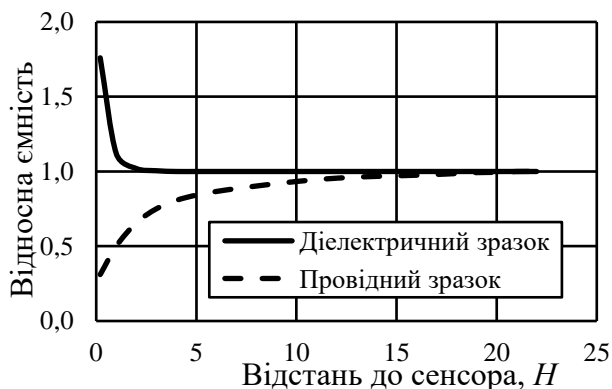


Рис. 12. Залежність відносної ємності від робочого зазору

Враховуючи мінімальну різницю у ємності 3%, при проведенні контролю діелектричного зразка, максимальний робочий зазор, за якого можливе виявлення дефекту, становить $3H$. При контролі провідного зразка максимальний зазор становить $18H$. Окрім того, за малого робочого зазору можливе здійснення контролю нерівності поверхні ОК, що є додатковою можливістю застосування методу.

Додатково досліджено вплив значень діелектричної проникності. Якщо зразок знаходиться в безпосередньому контакті з електродами, ємність буде пропорційна величині діелектричної проникності.

Тим не менш, це зустрічається рідко, адже завжди буде повітряний зазор між зразком і електродами. Моделі були побудовані таким чином, щоб з'ясувати зв'язок між ємністю сенсора і відносною діелектричною проникністю зразка з повітряним зазором.

Непровідний зразок, розглянутий у даному випадку, був товщиною $20H$ і з робочим зазором $0.3H$. Величина діелектричної проникності змінювалася від 1 до 80. На рис. 13 зображено результати моделювання без заземленої підкладки та з нею.

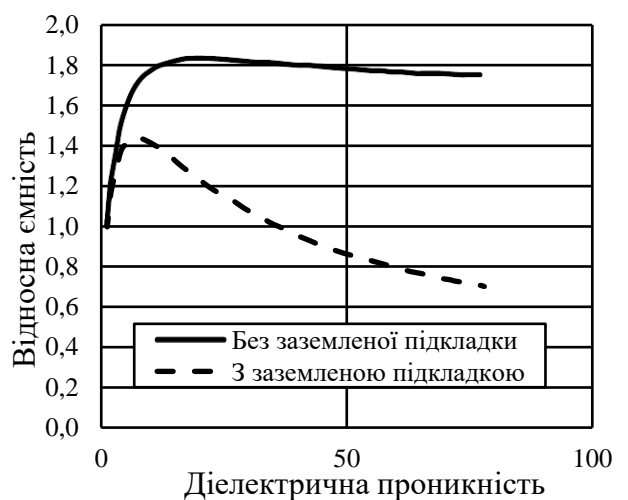


Рис. 13. Залежність відносної ємності від діелектричної проникності

Враховуючи мінімальну різницю у ємності 3%, при проведенні контролю непровідних зразків можна виділити 3 випадки:

- $\epsilon < 5$, відсутність заземленої підкладки дозволяє отримати більш високу чутливість, ніж її наявність;

- $5 \leq \varepsilon \leq 6$, контроль можливий лише без заземленої підкладки, так як при наявності підкладки спостерігається зона нечутливості;
- $\varepsilon > 6$, наявність заземленої підкладки дозволяє отримати більш високу чутливість, ніж її відсутність.

З метою визначення параметрів системи при контролі дефектів у зразках було здійснено моделювання наявності дефектів різних типів: виступ, жолобок шириною $7H$ і жолобок шириною $3H$. Зазначені дефекти досліджувалися для діелектричного та провідного зразку. Для діелектричних зразків однорідність та ізотропність вважалися ідеальними. Провідний зразок був заземлений. Передбачалося, що всі порожнечі будуть заповнені повітрям ($\varepsilon_0=1$). Проведене моделювання дозволило обґрунтувати застосування методу для контролю дефектів у матеріалах.

Обґрунтовано новий підхід до визначення оптимальної конфігурації електродів ємнісного сенсора на основі моделювання розподілу чутливості сенсора. Дослідження параметрів ємнісних сенсорів здійснювалося для різної геометричної конфігурації (рис. 14).

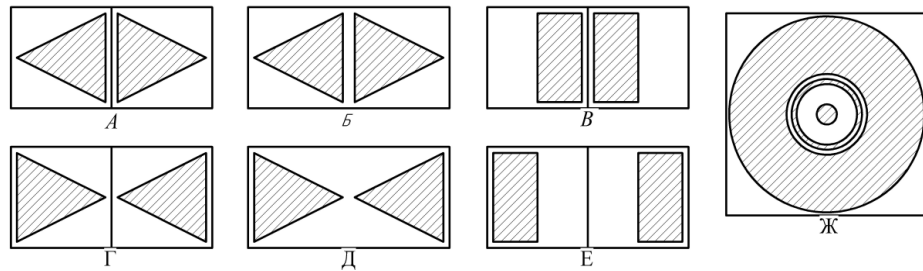


Рис. 14. Конфігурації досліджуваних ємнісних сенсорів різних типів

Для прикладу наведено розподіли чутливості сенсорів *A* (рис. 15) та *Ж* (рис. 16). Отримані розподіли параметрів електричного поля у просторі експортуються в MATLAB для розрахунку.

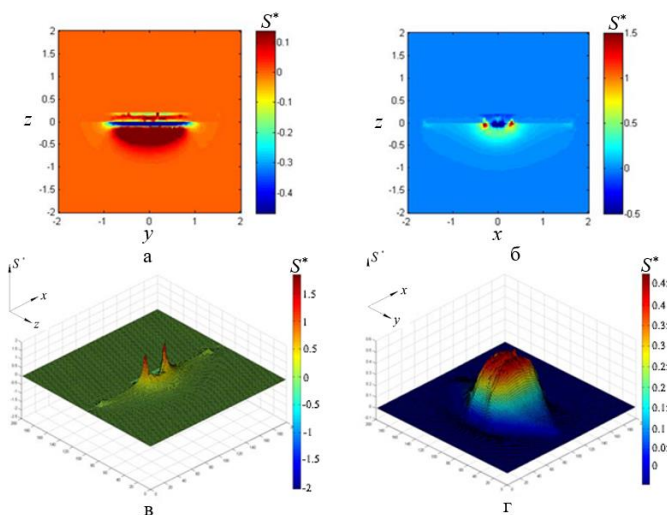


Рис. 15. Розподіл чутливості сенсора *A* у просторі: а – площина $x=0$; б – площина $y=0$; в – просторове представлення у площині $y=0$; г – просторове представлення у площині $z=0,2$.

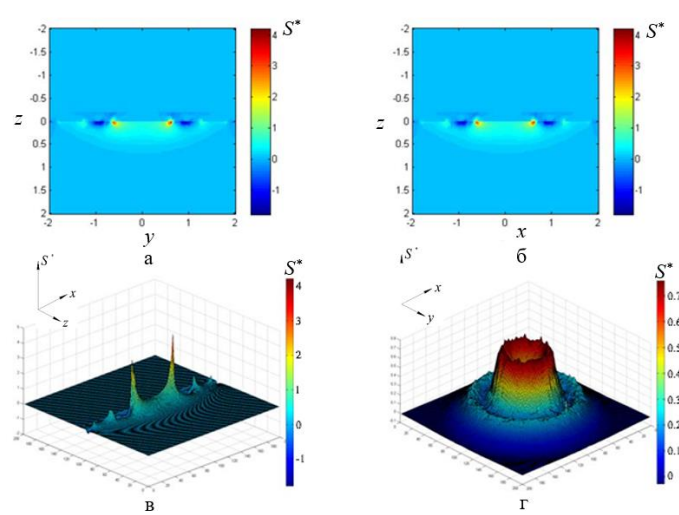


Рис. 16. Розподіл чутливості сенсора *Ж* у просторі: а – площина $x=0$; б – площина $y=0$; в – просторове представлення у площині $y=0$; г – просторове представлення у площині $z=0,2$.

Як видно з рис. 16 максимальна чутливість сенсора \mathcal{J} знаходиться на периферії між випромінюючим та приймаючим електродами. Для точної локалізації дефектів при НК важливо, щоб максимальна чутливість була у центрі сенсора. В зв'язку з цим сенсор \mathcal{J} є небажаним для використання у НК.

Розподіл чутливості можна використати в якості корисного інструменту для характеристики сенсора і перевірки принципів конструювання, адже він забезпечує панорамний вид на чутливість сенсора.

Досліджено вплив взаємного розташування електродів на основі отриманих розподілів чутливості сенсорів B та E з прямокутними електродами з відстанню між електродами: 6 мм у сенсорі B та 28 мм у сенсорі E .

Як показав аналіз результатів, глибина проникнення сигналу сенсора E на 80% більша, ніж у сенсора B . Але, на невеликій глибині (до $1H$) рівень сигналу сенсора B на 133% вищий. На основі порівняння, можна зробити висновок, що менша відстань між електродами призводить до збільшення рівня сигналу, але зменшує глибину проникнення.

Досліджено оптимальні конструктивні параметри трикутних сенсорів на основі отриманих розподілів чутливості сенсорів A та Γ .

Як показав аналіз результатів, глибина проникнення сигналу сенсора Γ на 45% більша, ніж у сенсора A . Але, на невеликій глибині (до $1H$) рівень сигналу сенсора A на 10% вищий. На основі порівняння, можна зробити висновок, що розташування трикутних електродів вершинами назустріч демонструє кращі результати.

Крім того, порівняння показує, що розподіл чутливості сенсора A аналогічний розподілу чутливості сенсора B , але має більшу глибину проникнення на 240%. Розподіл чутливості сенсору Γ також схожий на сенсор E , але має сильніший сигнал. Таким чином, можна зробити висновок, що трикутні пари електродів мають переваги над прямокутними сенсорами.

Досліджено вплив захисних елементів на сенсорі на основі отриманих розподілів чутливості трикутних сенсорів A , B та D , у яких електроди мають захисні елементи (сенсор A) та захисні елементи відсутні (сенсори B та D), крім того, модель сенсора D має більш тонку діелектричну підкладку.

Порівняння сенсорів показує що сенсор A має більшу глибину проникнення, ніж сенсор B на 30% через наявність захисного елементу, а глибина проникнення сенсора D додатково збільшується на 40% за рахунок зменшення товщини діелектричної підкладки.

З метою усунення недоліків сенсорів B та E та поєднання позитивних характеристик сенсорів A та Γ було запропоновано сенсор, геометрія якого наведена на рис. 17. Пропонований сенсор має значну глибину контролю, як у випадку з сенсором Γ , але більшу на 50%, та високу чутливість, як у випадку з сенсором A , але більшу на 63%.

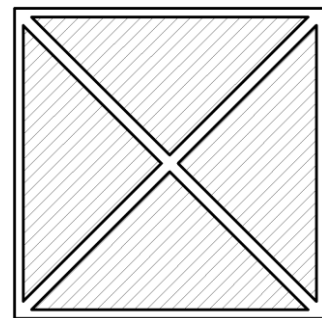


Рис. 17. Пропонована геометрія сенсора

Таким чином, запропонований сенсор поєднує у собі переваги досліджених раніше сенсорів та є найкращим для застосування у НК.

Визначено можливості застосування методу для знаходження дефектів у матеріалах зі змінними електропровідними властивостями на основі моделювання контролю наномодифікованих полімерних композиційних матеріалів (НМПКМ), що змінюють діелектричну проникність та провідність в залежності від концентрації наповнювача (табл. 1).

Табл. 1. Електричні властивості НМПКМ

Концентрація ВНТ	Діелектрична проникність	Питома провідність
0 % мас.	0,25	0 См/м
1 % мас.	12	0,01 См/м
3 % мас.	133	0,08 См/м
5 % мас.	539	0,1 См/м
10 % мас.	779	0,1 См/м

В результаті моделювання отримано розподіл електричного потенціалу по поверхні моделі при різних концентрації ВНТ. При моделюванні використовувався дефект типу порожнина з розмірами $1H$ на $1H$.

На рис. 18 наведено узагальнені результати моделювання. З метою визначення меж можливого застосування методу для кожної з досліджуваних концентрацій ВНТ було отримане значення максимальної глибини залягання дефекту, яка визначається з урахуванням порогового значення чутливості приладу у 1 % за умови $dC/dH \cdot 100 \% \geq 1 \%$. Отримані результати зображено на рис. 19 у вигляді функції $H(P\%)$, де $P\%$ – масова концентрація ВНТ, для $dC/dH = 0,01$.

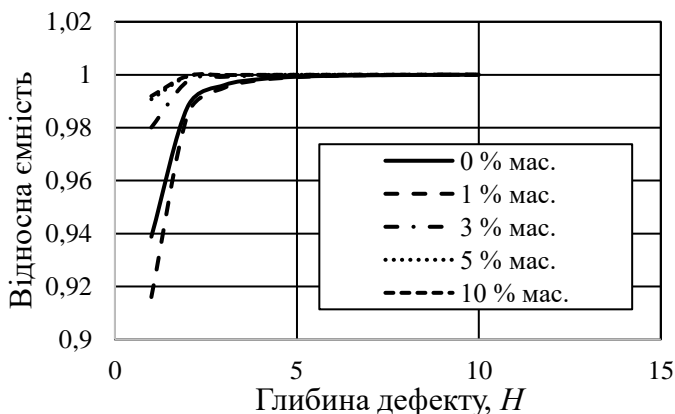


Рис. 18. Залежність відносної ємності від глибини залягання дефекту при різних концентрації ВНТ

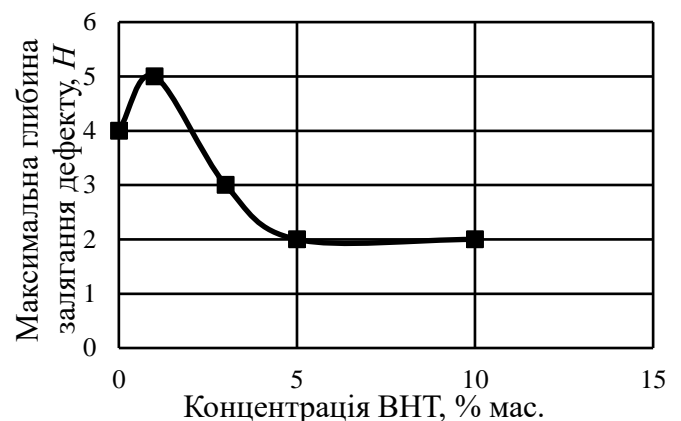


Рис. 19. Залежність максимальної глибини залягання дефекту від концентрації ВНТ

Апроксимація залежності, зображеної на рис. 19, при величині достовірності апроксимації $R^2=0,99$ в діапазоні концентрації ВНТ від 0 % мас. до 10 % мас.

$$H = \begin{cases} 0,16x^3 - 1,3x^2 + 2,1417x + 4, & \text{при конц. ВНТ} \leq 5 \% \text{ мас.} \\ 2, & \text{при конц. ВНТ} > 5 \% \text{ мас.} \end{cases}$$

Як видно з рис. 19, при концентрації ВНТ 1 % мас. чутливість системи найбільша та дозволяє виявляти дефекти на глибині до $5H$; при збільшенні концентрації, максимальна глибина залягання дефекту зменшується до $2H$.

Контроль виробів з НМПКМ не завжди можливий зі збереженням мінімального робочого зазору. Для визначення впливу робочого зазору було

проведено ряд моделювань з відстанню від $0,03H$ до $0,5H$ при різних значеннях концентрації ВНТ у ПЕНГ.

На рис. 20 наведено узагальнені результати моделювання. Як видно, відносна електрична ємність сенсора прямує до усталеного значення в залежності від концентрації ВНТ.

З метою визначення меж можливого застосування методу, для кожної з досліджуваних концентрацій ВНТ було отримане граничне значення робочого зазору. Отримані результати зображено на рис. 21.

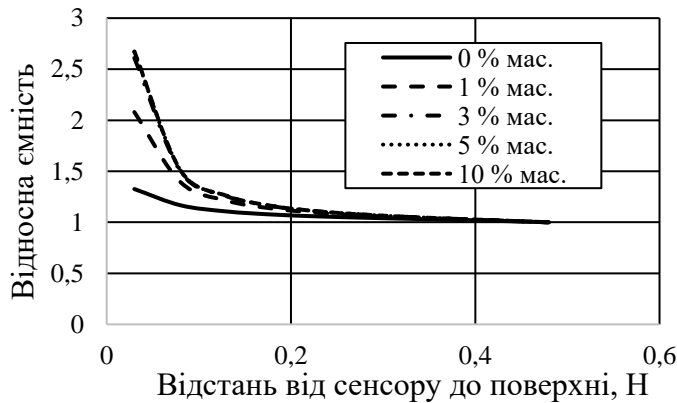


Рис. 20. Залежність відносної ємності сенсора від робочого зазору при різних концентрації ВНТ

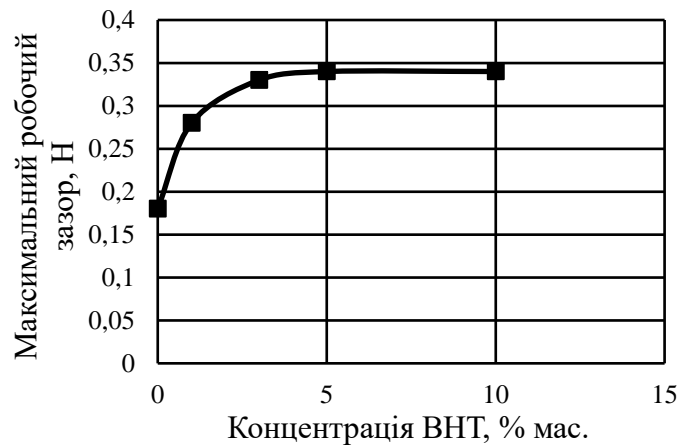


Рис. 21. Залежність максимального робочого зазору від концентрації ВНТ

Апроксимація залежності, зображеної на рис. 21, при величині достовірності апроксимації $R^2=0,98$ в діапазоні концентрації ВНТ від 0 % мас. до 10 % мас.

$$H = \begin{cases} 1,1 \cdot 10^{-3} x^3 - 0,02x^2 + 0,101x + 0,19, & \text{при конц. ВНТ} \leq 5 \% \text{ мас.} \\ 0,34, & \text{при конц. ВНТ} > 5 \% \text{ мас.} \end{cases}$$

Як видно з рис. 21, чутливість системи збільшується при збільшенні концентрації ВНТ, набуваючи свого максимального усталеного $0,33H$ значення при концентрації ВНТ 5 % мас.

Проведене дослідження продемонструвало певні обмеження щодо контролю дефектів у НМПКМ електроємнісним методом неруйнівного контролю. Зокрема, можливість виявляти дефекти на глибині залягання не більше $5H$ при концентрації ВНТ 1 % мас. При цьому максимальний робочий зазор становить $0,33H$ при концентраціях ВНТ більше 5 % мас.

Також, було здійснено моделювання процесу контролю глибини розташування інтелектуального датчика у ПКМ. При моделюванні використовувалися електроди у формі прямокутників з нульовою товщиною. Передбачалося, що довжина прямокутного електрода набагато більша, ніж ширина, таким чином розподіл електричного поля уздовж довжини можна вважати постійним і він не буде залежати від кінцевих полів. Виходячи з цього, 3D-геометрія задачі може бути зведена до 2D моделі, яка може бути використана для відображення задачі. В зв'язку з цим моделювання проводилося у двовимірній планарній постановці.

На рис. 22 наведено узагальнені результати моделювання у вигляді залежності відносної електричної ємності між електродами від глибини розташування інтелектуального датчика.

Як видно з рис. 22 відносна електрична ємність прямує до свого установленого значення нелінійно. Тому, з метою оцінки чутливості електродів до інтелектуального датчика, було побудовано графік залежності розбіжності відносних електричних ємностей від глибини розташування датчика, що зображено на рис. 23.

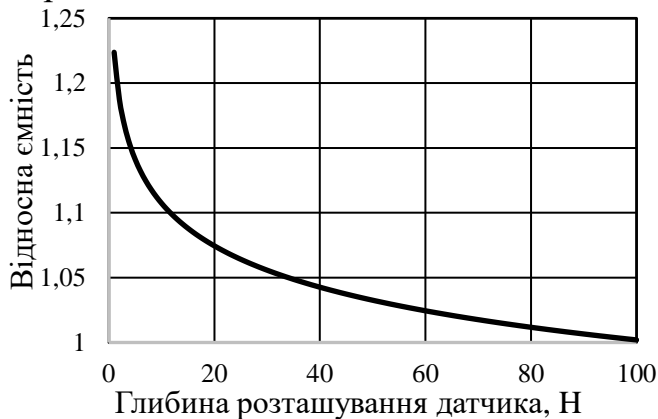


Рис. 22. Узагальнені результати моделювання глибини розташування датчика

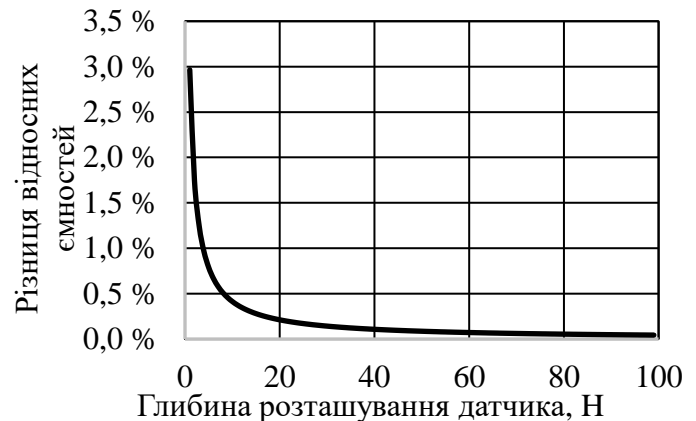


Рис. 23. Залежність розбіжності відносних електричних ємностей від глибини розташування датчика

Як видно з рис. 23, при глибині розташування датчика більше 40Н його ідентифікація буде практично не можлива.

Проведене дослідження продемонструвало певні обмеження щодо створення інтелектуальних ПКМ з боку їх геометричних розмірів та глибини розташування датчиків, враховуючи необхідність отримання сигналів з них.

У **четвертому розділі** подано практичне використання результатів роботи. Наведено результати експериментальних досліджень електроємнісного методу контролю матеріалів. Експериментальні дослідження проводились на лабораторній базі кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського. При проведенні досліджень макет виявився працездатним. Амплітуда сигналу була пропорційна зміні потенціалів. А зміна фази вказувала на зміну напрямку градієнту електричного поля. Даний результат можна повторити, сигнал є прогнозованим.

В результаті дослідження створено експериментальну установку для реалізації електроємнісного методу неруйнівного контролю для визначення наявності дефектів у полімерних композиційних матеріалах, розроблено метод проведення контролю, що забезпечує найкраще знаходження дефектів, проведено експериментальні дослідження, здійснено обробку результатів та їх верифікацію.

Чутливість до вимірювання зміни ємності розглянутої вище схеми тим вища, чим більший вхідний опір вимірюючого підсилювача.

Проте, внаслідок підвищення вхідного опору, схема стає дуже чутливою до навколишніх мережевих завад частотою 50 Гц в приміщеннях з електропроводкою. Наприклад, при зазначених вище значеннях параметрів вимірюючого підсилювача

($R_{вх} = 100 \text{ МОм}$) навіть невелика паразитна ємність між входом вимірюючого підсилювача та шинами живлення (рис. 1) може призвести до суттєвих завад.

Розрахована паразитна ємність між входом вимірюючого підсилювача та шинами мережевого живлення становила $0,012 \text{ пФ}$. Як показує практика, паразитні ємності ще більші, в цьому можна пересвідчитись при підключенні щупа до входу звичайного осцилографа з вхідним опором 1 МОм .

Це явище є недопустимим, так як сигнал перешкоди перевищує корисний та унеможливорює подібні вимірювання. Для зменшення його впливу в лабораторних умовах необхідно використовувати спеціальні екрановані приміщення та заходи.

Для заглушення завади мережі з частотою 50 Гц можна використовувати фільтри верхніх частот. Але, якщо врахувати, що робочий діапазон частот знаходиться в діапазоні 10 кГц , то для пригнічення завади мережі хоча б на 60 дБ при заданій частоті зрізу фільтра 10 кГц необхідно використання фільтра вище, ніж 3-го порядку. Реалізація активного фільтра на такій частоті з такими характеристиками викликає певні складності, а реалізація пасивного фільтра взагалі неможлива.

В запропонованому методі для пригнічення сигналів завад які знаходяться на значній відстані від вимірювальних електродів використовують два вимірювальних електроди замість одного. Завади з частотою 50 Гц , та навіть до 10 кГц , відповідно довжина хвилі для яких знаходиться в діапазоні від 30 км і вище, при невеликій різниці відстані між електродами будуть індукувати заряди в обох електродах з однаковою фазою та амплітудою. Значення величин зарядів, що індукують в двох вимірювальних електродах електричного поля від дефекту буде різним, і ця різниця буде пропорційною розміру дефекту. Тому при передачі цих сигналів до диференційного підсилювача завада буде компенсована.

Розроблено інформаційну модель завадостійкої системи електроємнісного контролю, структурну схему якої наведено на рис. 24.

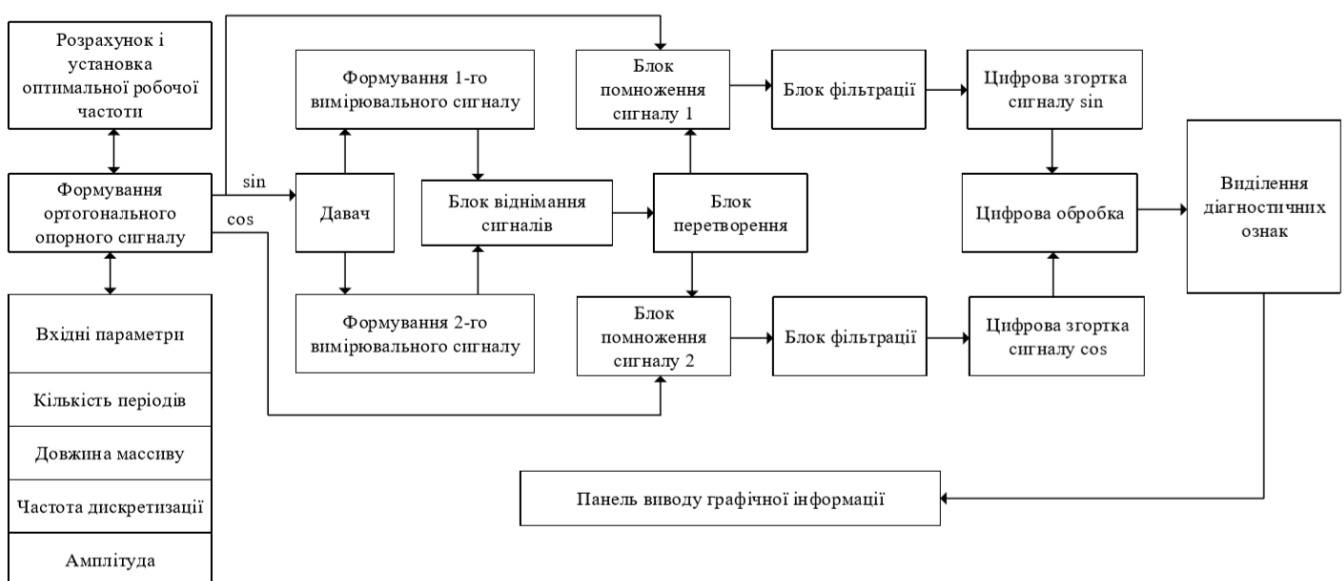


Рис. 24. Інформаційна модель завадостійкої системи електроємнісного контролю

Логіка роботи зображеної на рис. 24 інформаційної моделі завадостійкої системи електроємнісного контролю наступна. Після розрахунку оптимальної робочої частоти за розробленою методикою формується ортогональний опорний сигнал з урахуванням вхідних параметрів: кількість періодів, довжина масиву, частота дискретизації, амплітуда. Сигнал подається на давач, за допомогою якого здійснюється вплив на ОК і на виходах з давача отримується два інформаційних сигнали, параметри яких будуть залежати від місцезнаходження та розмірів дефекту і не будуть залежати від рівня завад та їх місцезнаходження. Таким чином, при відніманні сформованих вищезазначених вимірювальних сигналів відбувається повна компенсація завад. При цьому, інформація про положення та розмір дефекту не спотворюється. Після чого визначається інформація про проекції вимірювального сигналу, для цього відбувається перемноження цих сигналів відповідно з опорними сигналами \sin та \cos . На виході помножувача отримується постійна складова, що пропорційна сигналам \sin та \cos , та складова з подвоєною частотою, яка відфільтровується за допомогою блоків фільтрації. Отримані постійні складові кодуються та подаються на блок цифрової обробки, де розраховується амплітуда та фаза вимірювального сигналу. Блок виділення діагностичних ознак відповідає за розрахунок діелектричної проникності в точці, глибини залягання та розмірів дефекту.

Шляхом математичного моделювання проаналізовано вплив різних чинників на випадкову похибку вимірювання, що дало змогу встановити оптимальні параметри схеми. Зокрема встановлено, що похибка набуває найменших значень за початкового фазового зсуву сигналів 45° , при цьому доцільно використовувати 8-розрядні АЦП з частотою дискретизації не менше, ніж 1 Мвіб/с.

На базі розробленої інформаційної моделі створено та запатентовано схеми систем для контролю електроємнісним методом зі способом компенсації електромагнітних завад низької частоти.

У **додатках** наведено програмний код моделі для розрахунку похибки вимірювальної схеми у програмному комплексі MATLAB та акти впровадження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі в результаті проведення теоретичних і експериментальних досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу удосконалення електроємнісного методу неруйнівного контролю матеріалів за рахунок підвищення його чутливості та швидкодії. Найбільш значимими науковими та практичними результатами роботи є такі.

1. Встановлено, що електроємнісний метод неруйнівного контролю може бути застосований при виробництві виробів з НМІПКМ. Відзначено, що на даний час швидкодія методу не дозволяє здійснювати локальний контроль в реальному часі через низьку швидкість існуючих засобів вимірювання. Крім того, для цього методу не існує аналітичних способів знаходження ємності для сенсорів складної форми.

2. Здійснено математичне моделювання, в результаті якого визначено раціональні параметри та режими роботи сенсору для забезпечення максимальної чутливості вимірювальної схеми. Зокрема, отримані вирази для визначення оптимальних робочих частот для застосування електроємнісного методу та запропоновано методику визначення цих частот при зміні параметрів схеми.

3. Розроблено математичну модель процесу електроємнісного контролю дефектів у виробах на основі рівнянь Максвелла-Ампера, що дозволило дослідити параметри процесу контролю та межі застосування методу для провідних та непровідних зразків, зокрема: товщина об'єкту контролю, робочий зазор, діелектрична проникність. Здійснено моделювання контролю дефектів різних типів.

4. Розроблено новий підхід до визначення оптимальної геометричної форми та розмірів сенсора за рахунок математичного моделювання розподілу параметрів електричного поля сенсора у просторі. Здійснено моделювання розподілу чутливості ємнісного сенсора, що дозволило порівняти сенсори різної геометричної форми та визначити оптимальні конструктивні параметри. Запропоновано конструкцію сенсора, яка має найвищу чутливість та глибину проникнення, що дозволило збільшити глибину проникнення на 50%, а чутливість на 63%.

5. Здійснено моделювання процесу контролю матеріалів зі змінними провідними властивостями НМІПКМ, що підтвердило можливість застосування методу для такого класу матеріалів при контролі діелектричної проникності у локальній точці з високою швидкістю.

6. Розроблено інформаційну модель завадостійкої системи електроємнісного контролю, яка дає можливість одночасно реєструвати зміну фазового зсуву та амплітуди вимірювального сигналу. Запропоновані завадостійкі структури систем контролю з підвищеною чутливістю сенсору та швидкодією. На розроблені структури отримано патенти України на винахід.

7. Створено лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень, розроблено методику та проведено дослідження, які підтвердили працездатність електроємнісного методу для контролю дефектів.

8. Проаналізовано вплив різних чинників на випадкову похибку вимірювання, що дало змогу встановити оптимальні параметри схеми. Зокрема встановлено, що доцільно використовувати 8-розрядні АЦП з частотою дискретизації не менше, ніж 1 Мвиб/с.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також в дослідницьку та виробничу діяльність ТОВ «НВФ Діагностичні прилади» (м. Київ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Баженов В. Г. Удосконалений електростатичний метод неруйнівного контролю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька, С. В. Грузін // Методи та прилади контролю

якості. — 2013. — №2(31). — С. 26—28. *Здобувачем проведено моделювання методу в середовищі COMSOL Multiphysics.*

2. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material / I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 1. — №5(85). — Р. 4—9. (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»). *Здобувачем проведено математичне моделювання контролю глибини введення інтелектуальних датчиків.*

3. Simulation of nanomodified polymers testing by the electric capacitive method / V. Bazhenov, A. Protasov, I. Ivitskiy, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2017. — Vol. 4. — №5(88). — Р. 4—9. (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»). *Здобувачем проведено математичне моделювання контролю дефектів у наномодифікованих полімерних матеріалах.*

4. Баженов В. Г. Експериментальне дослідження електростатичного методу неруйнівного контролю дефектів у полімерних матеріалах / В. Г. Баженов, І. І. Івіцький, Д. К. Івіцька // Вісник НТУ «ХП». — 2017. — №16. — С. 34—39. *Здобувачем здійснено експериментальні дослідження.*

5. Пат. на винахід 107893 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315068; заявл. 23.12.13; опубл. 25.02.15, Бюл. №4. *Здобувачем запропоновано визначати вимірювальний сигнал як різницю вихідних сигналів двох пар електродів.*

6. Пат. на винахід 109357 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/22. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404947; заявл. 12.05.14; опубл. 10.08.15, Бюл. №15. *Здобувачем запропоновано одночасне виконання перемноження вимірювального сигналу з двома складовими ортогонального опорного сигналу.*

7. Пат. на винахід 112917 Україна, МПК G 01 B 7/00, G 01 B 7/287, G 01 N 27/22. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201502540; заявл. 20.03.15; опубл. 10.11.16, Бюл. №21. *Здобувачем запропоновано визначення значення фазового зсуву в кожній точці контролю по коду зміни початкової фази опорного сигналу, при якому буде мінімум амплітуди постійної складової.*

8. Пат. на корисну модель 90117 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201315066; заявл. 23.12.13; опубл. 12.05.14, Бюл. №9. *Здобувачем запропоновано визначати вимірювальний сигнал як різницю вихідних сигналів однієї та другої пар електродів.*

9. Пат. на корисну модель 93032 Україна, МПК G 01 B 7/00. Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Муненко В. Л.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201404948; заявл. 12.05.14; опубл. 10.09.14, Бюл. №17. *Здобувачем запропоновано*

одночасне виконання перемноження вимірювального сигналу з двома складовими ортогонального опорного сигналу.

10. Пат. на корисну модель 101625 Україна, МПК G 01 В 7/00. Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю / Баженов В. Г., Івіцька Д. К., Овчарук С. А., Грузін С. В.; заявник та власник Баженов В. Г. — №201502542; заявл. 20.03.15; опубл. 25.09.15, Бюл. №18. *Здобувачем запропоновано визначення значення фазового зсуву в кожній точці контролю по коду зміни початкової фази опорного сигналу, при якому буде мінімум амплітуди постійної складової.*

11. Івіцька Д. К. Розробка електростатичного методу неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / Д. К. Івіцька // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — №3(19). — С. 44—47. (входить до міжнародних наукометричних баз «Index Copernicus», «РИНЦ», «Ulrich's Periodicals Directory», «DRIVER», «BASE», «ResearchBib», «DOAJ», «WorldCat»).

12. Bazhenov V. G. Mathematical Model Electro Capacitive Methods of Nondestructive Testing / V. G. Bazhenov, I. I. Ivitskiy, D. K. Ivitska // SWorld Journal. — 2017. — Issue 13. — P. 185—189. *Здобувачем обґрунтовано застосування математичної моделі.*

13. Електростатичний метод неруйнівного контролю матеріалів / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // Матеріали IV науково-практичної конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. — С. 60—61. *Здобувачем обґрунтовано доцільність використання методу для контролю промислового обладнання.*

14. Первичные преобразователи для реализации электростатического метода неразрушающего контроля изделий / В.Г.Баженов, Д. К. Ивицкая // Материалы 8-й Международной научно-технической конференции “Приборостроение - 2015”. — 2015. — С. 47 - 48. *Здобувачем розраховані чутливості метода для різних типів дефектів.*

15. Електростатичний амплітудно-фазовий метод неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. — Київ, 2016. *Здобувачем доведено підвищення завадостійкості при використанні методу.*

16. Комп’ютерне моделювання ємнісного давача для неруйнівного контролю / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем». — 2016. — С. 35—38. *Здобувачем проведено комп’ютерне моделювання.*

17. Моделювання ємнісного давача складної форми / В.Г. Баженов, Д.К. Івіцька // Матеріали 3-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції “Актуальні проблеми автоматики та приладобудування”. — 2016. — С. 92—93. *Здобувачем проведено комп’ютерне моделювання.*

18. Аналіз електростатичного методу неруйнівного контролю для різних типів структур матеріалів / Д.К. Івіцька, В.Г. Баженов // Матеріали 5-ї науково-технічної

конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”. — 2016. — С. 210 – 211. *Здобувачем обґрунтовано можливість контролю матеріалів різної структури.*

19. Контроль товщини пакувальної плівки електростатичним методом / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов, І. І. Івіцький // Матеріали доповідей XVI Науково-практичної конференції молодих вчених «Новітні технології пакування». — К.: НУХТ, 2017. — С. 7—9. *Здобувачем обґрунтовано необхідність застосування методу при контролі товщини плівки.*

20. Електростатичний контроль глибини введення металевих елементів у діелектричні матеріали / Д. К. Івіцька, В. Г. Баженов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». — Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2017. — С. 87—88. *Здобувачем отримано розподіли електричного поля для різної глибини введення металевих елементів.*

21. Transducers for realization of the electrostatic method of non-destructive testing of functional polymers / V. Bazhenov, D. Ivitska, I. I. Ivitskiy // NDT DAYS 2017. — Sozopol, 2017. — P. 128—129. *Здобувачем проведено математичне моделювання сенсорів різної форми.*

22. Особливості реалізації електростатичного амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю / В. Г. Баженов, Д. К. Івіцька // Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”. — Київ: НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. — С. 135. *Здобувачем запропоновано реалізацію амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю.*

АНОТАЦІЯ

Івіцька Д. К. Вдосконалення електроємнісного методу контролю для дефектоскопії матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

У роботі здійснено математичне моделювання, яке дозволило визначити раціональні параметри та режими роботи сенсору для забезпечення максимальної чутливості схеми. Досліджено параметри процесу контролю та межі застосування методу. Здійснено моделювання контролю дефектів різних типів.

Здійснено моделювання розподілу чутливості ємнісного сенсора, що дозволило порівняти сенсори різної геометричної форми та визначити оптимальні конструктивні параметри. Запропоновано конструкцію сенсора, яка має найвищу чутливість та глибину проникнення. Здійснено моделювання процесу контролю матеріалів зі змінними провідними властивостями, що підтвердило можливість застосування методу для такого класу матеріалів.

Розроблено спосіб підвищення завадостійкості та швидкодії методу. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили працездатність електроємнісного методу для контролю дефектів. Шляхом математичного моделювання проаналізовано вплив різних чинників на випадкову похибку вимірювання.

Ключові слова: електроємнісний контроль, діелектрична проникність, дефектоскопія матеріалів.

АННОТАЦИЯ

Ивицкая Д. К. Усовершенствование электроемностного метода контроля для дефектоскопии материалов. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2019.

В работе проведено математическое моделирование, которое позволило определить рациональные параметры и режимы работы сенсора для обеспечения максимальной чувствительности схемы. Исследованы параметры процесса контроля и пределы применения метода. Осуществлено моделирование контроля дефектов различных типов.

Осуществлено моделирование распределения чувствительности емкостного сенсора, что позволило сравнить сенсоры различной геометрической формы и определить оптимальные конструктивные параметры. Предложена конструкция сенсора, которая имеет самую высокую чувствительность и глубину проникновения. Осуществлено моделирование процесса контроля материалов с переменными проводящими свойствами, что подтвердило возможность применения метода для такого класса материалов.

Разработан способ повышения помехоустойчивости и быстродействия метода. Проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили работоспособность электроемностного метода для контроля дефектов. Путем математического моделирования проанализировано влияние различных факторов на случайную погрешность измерения.

Ключевые слова: электроемностной контроль, диэлектрическая проницаемость, дефектоскопия материалов.

ANNOTATION

Ivitska D. K. Improvement of the electric capacitance method of control for materials defectoscopy. - Manuscript.

Dissertation for scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.11.13 "Devices and Methods for Testing and Materials Structure Determination" -

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical task of improving the electroneutric method of non-destructive testing of materials through the development of systems structures for increasing the sensor sensitivity and speed of the device. It is also devoted for studying the parameters and operating modes of the sensor to ensure the maximum sensitivity of the measuring scheme, the influence of the geometric shape and dimensions of the sensor on its sensitivity.

In this work it was made an overview of the problem of electrical non-destructive testing in the manufacture of nanomodified intelligent polymer composite materials, taking into account the need for point measurement of dielectric material permeability and control of the depth of intelligent sensors introduction in the melt of polymer material in real time with the possibility of only one-way access to the object of control.

It is established that the ultrasonic method of non-destructive testing does not completely satisfy the task, since it allows to control only the geometric characteristics of the inclusions in the product, but can not control the permittivity at the local point.

The electric capacitance method is one of the most versatile and easy to use. Be this method it is possible to solve a significant range of research tasks. However, by this time, the electric capacitance method was used only for the integral evaluation of the parameters of the object of control. Using the method for point control is limited by a significant control time, which is due to the use of Wheatstone bridge schemes for measuring small capacitance values with high accuracy. This is explained by the fact that such schemes require multi-step algorithms, which leads to a significant increase in the measurement time. When scanning object of control in many points the time consuming becomes unacceptably large. Besides, for this method there are no analytical methods for finding capacitance of the asymmetric sensors and sensors of complex form requiring the use of computer methods for calculating capacitance. Also, the issue of combating electromagnetic interference is still unresolved.

The theoretical substantiation of the electric capacitance method and object of control is carried out. The method of measurement and criteria for estimating the sensor operation is proposed. The recommendations for determining an optimal parameters of the work and minimum possible dimensions of the sensor for the implementation of the defectoscopy are obtained.

The optimal frequencies are determined for the application of the method and a method for determining these frequencies when changing the parameters of the scheme is proposed. With the help of simulation, the dependence of the sensor capacity on the characteristic size of the electrode was determined, which allowed setting the minimum possible value of the electrode, which is may be measuring the change in capacitance, that was 6x6 mm.

The mathematical model of the electric capacitance control process of defects in products is developed on the basis of Maxwell-Ampere equations. The mathematical model was applied to dimensionless geometries (planar 2D and 3D). It was finding the optimal parameters of the physical model.

It was investigated the parameters of control process and the limits of method application for conducting and non-conducting samples, in particular: thickness of the control object, working gap, relative permittivity of the sample.

Simulation of sensor parameters, namely the distribution of sensitivity, allowed to compare sensors of different geometric shapes and to determine the optimal design parameters for the sensitivity criterion. The design of the capacitive sensor is proposed, which ensures achievement of the highest sensitivity. The proposed sensor has a 50% greater control depth and 63% greater sensitivity than with standard sensors. Thus, the proposed sensor combines the advantages of previously studied sensors and is best for use in nondestructive testing.

Simulation of the control process with variable conductive properties in particular nano-modified polymer composites, confirmed the possibility of using the developed method for such a class of materials. The study demonstrated certain limitations on the control of defects in nanomodified polymer materials by the electrical capacitance method of nondestructive testing. In particular, to detect defects at a depth of not more than $5H$ at a concentration of carbon nanotubes of 1% by weight. And the maximum working gap is $0.33H$ at concentrations of carbon nanotubes of more than 5% by weight. The results of the study can be used in the design of technological regulations of production, as well as the creation of integrated devices for non-destructive testing.

The method of increasing noise immunity is developed, which allows to register with high accuracy the change not only of the phase shift of the measuring signal, but also the change in the amplitude of the measuring signal, which provides an increase in the accuracy of the measurement. On the developed method were obtained the Ukrainian patents for the invention.

Experimental studies have been carried out, which confirmed the efficiency of the method for solving defectoscopy problems. The measurement error of the amplitude and phase of the signal, which is acceptable for control, is calculated.

The hardware error has been determined, and the simulation in the MATLAB software complex has been carried out in order to determine the random error when measuring the developed scheme.

Keywords: electric capacitance non-destructive control, capacitive sensor, dielectric permittivity, noise immunity of control.