

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-9>

УДК 621.38

ОСАДЧУК Ярослав

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>

e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

ОСАДЧУК Олександр

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>

e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ОСАДЧУК Володимир

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3142-3642>

e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

МІКРОЕЛЕКТРОННІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ ПРИБАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ МАТЕРІАЛІВ

Запропоновано і досліджено основні характеристики приладів вимірювання товщини матеріалів з частотним вихідним сигналом, конструкція яких будується на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором. В якості первинних перетворювачів вимірювання товщини виступають конденсатори з прямокутними та круглими обкладинками, які є пасивними елементами автогенераторів, що спрощує конструкцію приладів вимірювання товщини. Розроблено математичні моделі приладів на основі принципу перетворення енергії постійного електричного поля в енергію змінного електричного поля, що дозволило розрахувати функції перетворення і чутливості приладів без використання складного методу отримання рівнянь Кірхгофа з еквівалентних схем перетворювачів та їх розрахунку чисельними методами на сучасних комп'ютерах. Показано, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна товщини вимірювального матеріалу, що викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференціального опору в коливальній системі автогенераторів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту приладів. Чутливість приладів вимірювання товщини змінюється від 0,4 кГц/мкм до 1,775 кГц/мкм в діапазоні товщин від 0 до 500 мкм. Розраховані аналітичні вирази функцій перетворення і чутливості наочно демонструють вплив кожного елемента первинних перетворювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту приладів. Прилади для вимірювання товщини з частотним виходом не потребують аналого-цифрових перетворювачів і підсилювальних пристроїв при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру. При роботі приладів у надвисоких частотах можлива передача інформації на відстань.

Ключові слова: товщина, перетворювач, конденсатор, частота, автогенератор.

OSADCHUK Iaroslav, OSADCHUK Oleksandr, OSADCHUK Volodymyr

Vinnitsia National Technical University

MICROELECTRONIC AUTOGENERATOR DEVICES FOR MEASURING THE THICKNESS OF MATERIALS

The main characteristics of devices for measuring the thickness of materials with a frequency output signal, the design of which is built on the basis of transistor structures with negative differential resistance, are proposed and investigated. Capacitors with rectangular and round covers act as the primary transducers for thickness measurement, which are passive elements of autogenerators, which simplifies the design of thickness measurement devices. Mathematical models of devices were developed based on the principle of converting the energy of a constant electric field into the energy of an alternating electric field, which made it possible to calculate the conversion functions and sensitivity of the devices without using the complex method of obtaining Kirchhoff equations from the equivalent circuits of transducers and their calculation by numerical methods on modern computers. It is shown that the main contribution to the change in the conversion functions and sensitivity is made by the change in the thickness of the measuring material, which causes a change in the equivalent capacity and negative differential resistance in the oscillating system of autogenerators, which, in turn, changes the output frequency of the devices. The sensitivity of thickness measuring devices varies from 0.4 kHz/ μm to 1.775 kHz/ μm in the thickness range from 0 to 500 μm . The calculated analytical expressions of the conversion and sensitivity functions clearly demonstrate the influence of each element of the primary transducers and autogenerator elements on the output frequency of the devices. Devices for measuring thickness with a frequency output do not require analog-digital transducers and amplifiers for further processing of information signals, which makes the information and measurement equipment cheaper. When the devices work at ultra-high frequencies, it is possible to transmit information over a distance.

Keywords: thickness, transducer, capacitor, frequency, autogenerator.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний етап науки і техніки потребує подальшого розвитку точного та інструментального приладобудування для різноманітних систем прямого і опосередкованого вимірювання, перетворення, кодування, передачі та захисту метрологічної інформації. Використання нових фізичних явищ і принципів

реалізації дозволяє розробляти прилади для вимірювання товщини для різноманітних галузей промисловості, таких як хімічна промисловість, мікроелектронна та наноелектронна технології [1, 2, 3, 4, 5].

На теперішній час існують різноманітні види перетворювачів для визначення товщини матеріалів, що використовуються як в науці, так і на виробництві. Проте, більшість з них мають малу роздільну здатність, високий поріг чутливості та значні похибки при вимірюванні малих товщин матеріалу [6, 7].

Прилади, що створені спеціально для визначення малих та надмалих розмірів плівки, таких як радіаційні, рентгенографічні, хоча і мають високі метрологічні параметри, проте є складними і небезпечними для здоров'я людини, яка працює з ними [8, 9].

Усунути вищеперераховані недоліки можливо на основі мікроелектронних автогенераторних перетворювачів, що працюють в режимі перетворення «товщина-частота», що значно покращує їх метрологічні показники [10, 11].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним з перспективних напрямків у створенні перетворювачів для визначення товщини є дослідження на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, що дозволяє створювати прилади з частотним вихідним сигналом. Мікроелектронні автогенераторні прилади для визначення товщини поєднують простоту, універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують прилади з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення "товщина-частота" на основі мікроелектронних автогенераторних перетворювачів суттєво зменшує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масогабаритні показники, підвищити точність і чутливість перетворення інформаційного сигналу у частоту [12-15].

Постановка завдання

Метою роботи є створення та дослідження перетворювачів для вимірювання товщини матеріалів на основі мікроелектронних транзисторних структур, в яких первинними перетворювачами виступають ємнісні товщиночутливі структури з прямокутними і круглими металічними обкладинками, які також є елементами автогенераторів. Втрати енергії в коливальній системі автогенераторів компенсуються енергією від'ємного диференціального опору що дозволяє перетворювати інформаційний сигнал про товщину у частоту. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати використання мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором для побудови перетворювачів для визначення товщини матеріалів;
- 2) розробити математичні моделі товщиночутливих перетворювачів, в яких враховано залежність параметрів автогенераторів і товщиночутливих елементів від зміни товщини матеріалів та їх вплив на вихідну частоту приладів;
- 3) отримати аналітичні вирази параметричної залежності функції перетворення і чутливості від товщини матеріалу;
- 4) розробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі перетворювачів для виміру товщини

Прилад для виміру товщини матеріалів з частотним вихідним сигналом будується на основі мікроелектронної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якій чутливим до зміни товщини первинним елементом виступає конденсатор з прямокутними електродами C1. На рис. 1 подано схему мікроелектронного перетворювача.

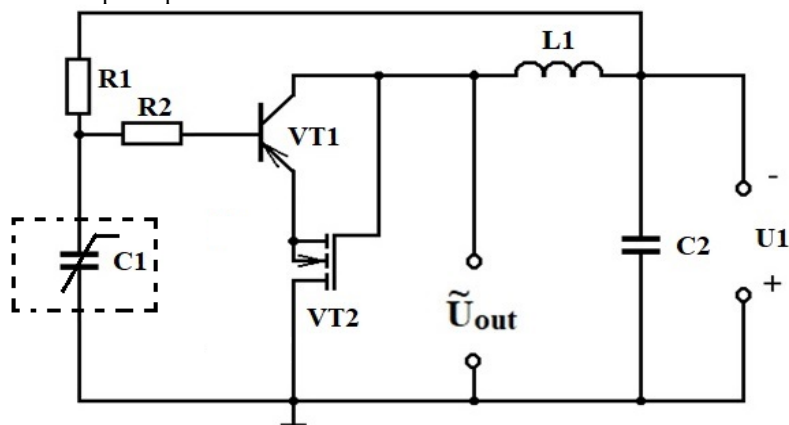


Рис. 1. Електрична схема приладу для вимірювання товщини

Вона складається з біполярного транзистора VT1 і польового транзистора VT2 з індукованим каналом з різними типами провідності базової області і каналу, що утворює спадну ділянку на вольт-амперній характеристиці на вихідних клеммах перетворювача. Спадній ділянці відповідає від'ємний диференційний опір. Перетворювач живиться від джерела постійної напруги U1 через резистори R1-R2. Ємність C2 здійснює блокувальну роль, тобто захищає джерело постійної напруги U1 від дії змінного струму. Коливальний контур приладу утворений пасивною індуктивністю L1 і ємністю повного опору, що існує на електродах колектор-стік транзисторів VT1 і VT2. При зміні товщини плівки матеріалу, що розташована в міжелектродному просторі конденсатора C1, здійснюється зміна активної і реактивної складових повного опору на електродах колектор-стік транзисторів VT1 і VT2, що приводить до зміни вихідної частоти перетворювача [13, 15]. Чутливість до зміни товщини матеріалів виступає площинний конденсатор з прямокутними металічними електродами, між якими розташовано вимірюваний матеріал. На величину ємності конденсатора впливає товщина діелектрика, його діелектрична проникність та площа металічних контактів. З врахуванням крайових ефектів емпіричним шляхом формула ємності конденсатора з прямокутною формою електродів описується виразом [16]

$$C_n = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\alpha}{\pi} \ln\left(\frac{4d}{b} + \frac{b}{2d}\right), \quad b \leq \frac{d}{2}, \quad (1)$$

$$C_n = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \alpha \left(\frac{b}{d} + 1,21 - \frac{0,11d}{b} + 0,5 \left(1 - \frac{d}{2b}\right)^6 \right), \quad b \geq \frac{d}{2}, \quad (2)$$

де ε – відносна діелектрична стала вимірюваного матеріалу при повному заповненні ним простору між електродами, ε_0 – діелектрична стала вакууму, α – довжина, b – ширина прямокутних обкладок, d – відстань між ними. Оскільки в міжелектродному просторі, окрім вимірюваного матеріалу, є шар повітря, то вплив цього шару на загальну відносну діелектричну сталу перетворювача, можна отримати враховуючи формулу Ліхтенеккера [17]. З врахуванням цього, загальна відносна діелектрична стала первинного перетворювача приймає вигляд [17, 18]

$$\varepsilon = \frac{d\varepsilon_n\varepsilon_m}{\varepsilon_n h_m + d(d - h_m)}, \quad (3)$$

де ε_n – відносна діелектрична стала повітря, ε_m – відносна діелектрична стала вимірюваного матеріалу, h_m – товщина вимірюваного матеріалу. Підставивши у формулу (1) і (2) формулу (3), отримуємо залежність повної ємності первинного перетворювача з прямокутними електродами від вимірюваної товщини матеріалу [11, 19]

$$C_n(h_m) = \left(\frac{d\varepsilon_n\varepsilon_m}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m(d - h_m)} \right) \varepsilon_0 \frac{\alpha}{\pi} \ln\left(\frac{4d}{b} + \frac{b}{2d}\right), \quad b \leq \frac{d}{2}, \quad (4)$$

$$C_n(h_m) = \frac{d\varepsilon_n\varepsilon_m\varepsilon_0\alpha}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m(d - h_m)} \left(\frac{b}{d} + 1,21 - \frac{0,11}{d} + 0,5 \left(1 - \frac{d}{2b}\right)^6 \right), \quad b > \frac{d}{2}. \quad (5)$$

Згідно з формули (4), визначимо зміну повної ємності первинного перетворювача від товщини вимірювального матеріалу.

В загальному вигляді вона описується виразами

$$\Delta C_n(h_m) = \frac{\partial C_n(h_m)}{\partial d} \Delta d(h_m) + \frac{\partial C_n(h_m)}{\partial \varepsilon_m} \Delta \varepsilon_m(h_m), \quad (6)$$

Виконавши диференціювання у формулі (6), отримуємо вираз

$$\Delta C_n(h_m) = \varepsilon_0 \frac{a}{\pi} \left[\frac{\varepsilon_n \varepsilon_m \ln\left(\frac{8d^2 + b^2}{2bd}\right)}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m)} - \frac{d \varepsilon_n \varepsilon_m^2 \ln\left(\frac{8d^2 + b^2}{2bd}\right)}{(\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m))^2} + \frac{(2d - \sqrt{8d^2 + b^2}) \varepsilon_n \varepsilon_m}{\sqrt{8d^2 + b^2} (\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m))} \right] \Delta d(h_m) + \ln\left(\frac{4d}{b} + \frac{b}{2d}\right) \times \left[\frac{\varepsilon_n d}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m)} - \frac{d^2 \varepsilon_n \varepsilon_m}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m)} \right] \Delta \varepsilon_m(h_m). \quad (7)$$

Аналогічну операцію проведемо згідно формули (5), при цьому отримуємо формулу

$$\Delta C_n(h_m) = \varepsilon_0 a \left\{ \left[\frac{\varepsilon_n \varepsilon_m}{\varepsilon_n + \varepsilon_m (d - h_m)} - \frac{d \varepsilon_n \varepsilon_m^2}{(\varepsilon_n + \varepsilon_m (d - h_m))^2} \right] \times \left[\frac{b}{d} - 1, 21 - \frac{0,11d}{b} + 0,5 \left(1 - \frac{d}{2b}\right)^6 \right] \Delta d(h_m) \right\} + \left[\frac{d \varepsilon_n \varepsilon_m}{\varepsilon_n + \varepsilon_m (d - h_m)} \times \left[-\frac{b}{d^2} - \frac{0,11}{b} + 3 \left(1 - \frac{d}{2b}\right)^5 \frac{1}{2b} \right] \Delta d(h_m) + \left[\frac{d \varepsilon_n}{\varepsilon_n + \varepsilon_m (d - h_m)} - \frac{d^2 \varepsilon_n \varepsilon_m}{(\varepsilon_n + \varepsilon_m (d - h_m))^2} \right] \times \left[\frac{b}{d} + 1, 21 - \frac{0,11d}{b} + 0,5 \left(1 - \frac{d}{2b}\right)^6 \right] \Delta \varepsilon_m(h_m) \right\}. \quad (8)$$

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти перетворювача від параметрів чутливості до зміни товщини матеріалу ємності і параметрів автогенератора. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення зміни енергії постійного електричного поля у первинній вимірювальній ємності при зміні товщини матеріалу у енергію змінного електричного поля на виході приладу. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії приладу. Спочатку зміна товщини матеріалу перетворюється в енергію постійного електричного поля у вимірювальному конденсаторі, яка є вхідною енергією для автогенератора. В подальшому енергія постійного електричного поля конденсатора перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру автогенератора. Коефіцієнт корисної дії приладу має вигляд

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (9)$$

Вихідна потужність описується виразом

$$P_{\text{вих}} = \frac{C_{\text{екв}} U_{\text{в}}^2}{2t_1}, \quad (10)$$

де $C_{\text{екв}}$ – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, $U_{\text{в}}$ – вихідна змінна напруга, t_1 – період коливань змінної вихідної напруг. Вхідна потужність описується формулою

$$P_{\text{вх}} = \frac{C_n(h_m) U_{\text{в}}^2}{2t_2}, \quad (11)$$

де $U_{\text{в}}$ – постійна напруга на вимірювальному конденсаторі, t_2 – час зміни товщини вимірювального матеріалу. Отже, коефіцієнт корисної дії приладу приймає вигляд

$$\eta = \frac{C_{\text{екв}} U_{\text{в}}^2 t_2}{t_1 C_n(h_m) U_{\text{в}}^2}, \quad (12)$$

З формули (12) визначається $C_{екв}$, яке описується виразом

$$C_{екв} = \frac{\eta t_1 C_n(h_m) U_{\pm}^2}{U_{\pm}^2 t_2}, \quad (13)$$

З другого боку, еквівалентну ємність можливо визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [13, 15]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \sqrt{\frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1}, \quad (14)$$

де R_g – від’ємний диференційний опір у коливальному контурі, L – індуктивність контуру. З виразу (14) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначимо $C_{екв}$

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0. \quad (15)$$

Введемо позначення

$$n_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (16)$$

$$n_2 = R_g^2, \quad (17)$$

$$n_3 = L, \quad (18)$$

$$n_4 = C_{екв} = \frac{\eta t_1 C_n(h_m) U_{\pm}^2}{U_{\pm}^2 t_2}. \quad (19)$$

тоді $C_{екв}$ з рівняння (15) дорівнює

$$C_{екв} = \frac{n_2 \pm \sqrt{n_2^2 - 4n_1 n_3}}{2n_1}. \quad (20)$$

Прирівнявши вираз (20) до виразу (13), отримуємо рівняння для визначення F_0 , яке має вигляд

$$n_1 = \frac{n_2}{n_4} - \frac{n_3}{n_4^2}. \quad (21)$$

Підставивши значення виразів (16)-(19) у формулу (21), отримуємо рівняння

$$4\pi^2 R_g^2 L F_0^2 = \frac{R_g^2 U_{\pm}^2 t_2}{\eta t_1 C_n(h_m) U_{\pm}^2} - \frac{U_{\pm}^4 t_2^2 L}{\eta^2 C_n^2(h_m) U_{\pm}^4 t_1^2 R_g^2}. \quad (22)$$

З рівняння (22) визначаємо параметричну залежність вихідної частоти приладу від параметрів первинного перетворювача і параметрів автогенератора, де величина F_0 є функція перетворення приладу, отже

$$F_0(h_m) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\pm}^2 t_2}{\eta t_1 C_n(h_m) U_{\pm}^2 L} - \frac{U_{\pm}^4 t_2^2}{\eta^2 C_n^2(h_m) U_{\pm}^4 t_1^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (23)$$

Отримана формула (23) показує простий шлях розрахунку функції перетворення приладу у порівнянні з методом розрахунку на основі еквівалентної схеми, який є значно складним і потребує розв’язку рівнянь Кірхгофа чисельним методом на комп’ютері.

На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення приладу.

Як видно з рис. 2, при зміні товщини матеріалу від 0 до 500 мкм вихідна частота приладу змінювалась від 775,750 МГц до 775,400 МГц.

Чутливість приладу визначається похідної функції (23) за параметром товщини h_m . Як показують експериментальні дослідження постійна напруга U_{\pm} , а також вихідна напруга U_{\pm} також залежить від товщини h_m , що необхідно врахувати при визначенні чутливості. З врахування цих зауважень, функція (23) приймає вигляд

$$F_0(h_m) = \frac{1}{2\pi} \left[U_{\pm}^2(h_m) C_n^{-1}(h_m) U_{\pm}^{-2}(h_m) n_5 - U_{\pm}^4(h_m) C_n^{-2}(h_m) U_{\pm}^{-4}(h_m) n_6 \right]^{1/2}. \quad (24)$$

де

$$n_5 = \frac{t_2}{\eta t_1 L}, \quad (25)$$

$$n_6 = \frac{t_2^2}{\eta^2 t_1^2 R_g^2}, \quad (26)$$

тоді з врахуванням (24)-(26) функція чутливості приладу описується формулою

$$S_{F_0}(h_m) = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(h_m) C_n^{-1}(h_m) U_{\sim}^{-2}(h_m) n_5 - U_{\sim}^4(h_m) C_n^{-2}(h_m) U_{\sim}^{-4}(h_m) n_6 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times \left\{ \left[2U_{\sim}(h_m) \frac{dU_{\sim}(h_m)}{dh_m} C_n^{-1}(h_m) + U_{\sim}^2(h_m) \left(-C_n^{-2}(h_m) \frac{dC_n(h_m)}{dh_m} U_{\sim}^{-2}(h_m) - 2U_{\sim}^{-3}(h_m) \frac{dU_{\sim}(h_m)}{dh_m} C_n^{-1}(h_m) \right) \right] n_5 - \right. \quad (27)$$

$$\left. - \left[U_{\sim}^4(h_m) \left(-2C_n^{-3}(h_m) \frac{dC_n(h_m)}{dh_m} U_{\sim}^{-4}(h_m) - 4U_{\sim}^{-5}(h_m) \frac{dU_{\sim}(h_m)}{dh_m} C_n^{-2}(h_m) \right) + 4U_{\sim}^3(h_m) \frac{dU_{\sim}(h_m)}{dh_m} C_n^{-2}(h_m) U_{\sim}^{-4}(h_m) \right] n_6 \right\}.$$

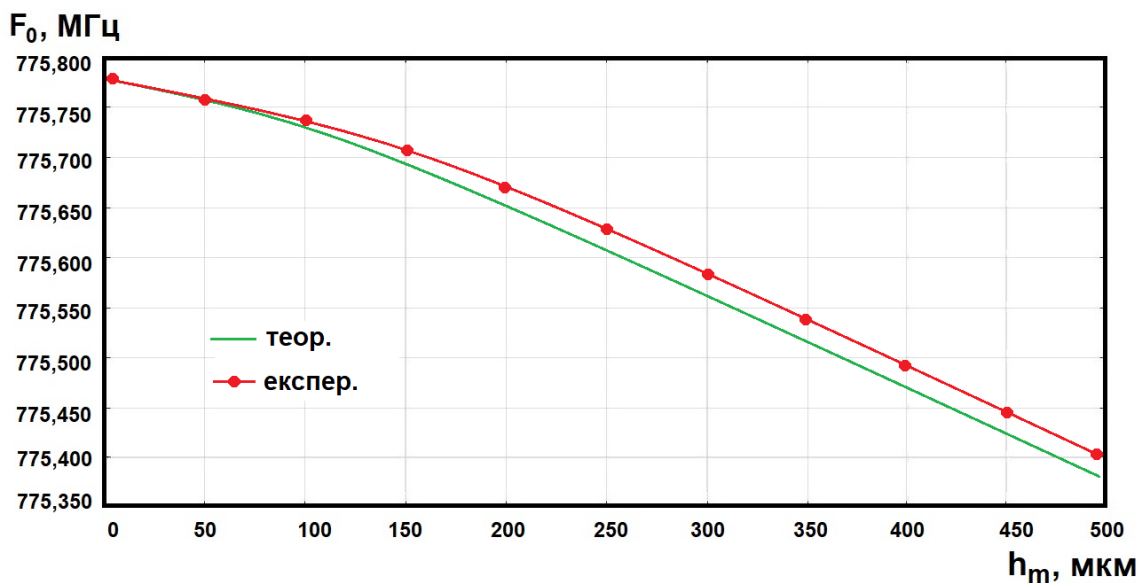


Рис. 2. Залежність функції перетворення приладу від товщини вимірюваного матеріалу

Графік чутливості від зміни товщини подано на рис.3.

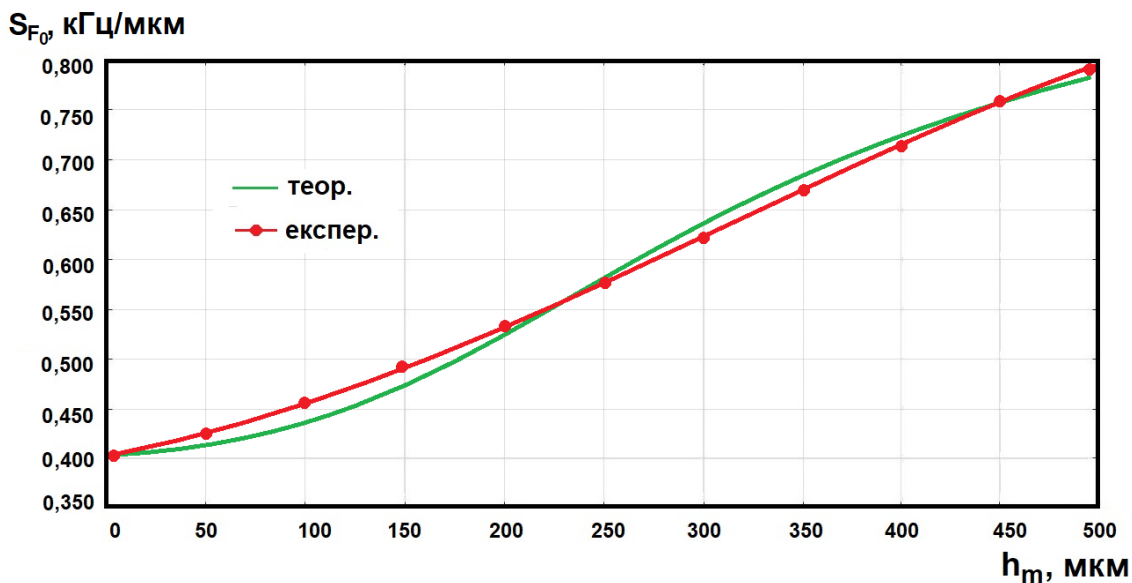


Рис. 3. Залежність функції чутливості приладу від товщини вимірюваного матеріалу

Як видно з графіка (рис.3), чутливість приладу змінювалась від 0,4 кГц/мкм до 0,8 кГц/мкм в діапазоні товщини від 0 до 500 мкм.

Перейдемо до розгляду параметрів приладу визначення товщини матеріалу на основі мікроелектронної автогенераторної структури з використанням в якості первинного перетворювача конденсатора з круглими обкладинками. Електрична схема приладу подано на рис.4.

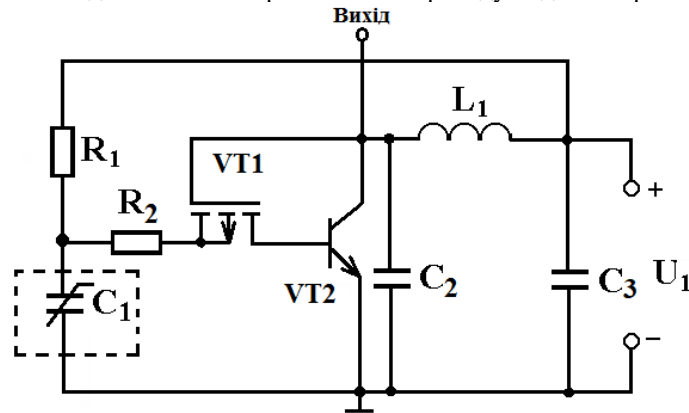


Рис. 4. Електрична схема приладу для вимірювання товщини

Принцип роботи приладу, поданого на рис.4, такий же самий, як і схеми на рис.1, окрім того, що земляна клемма з'єднана з від'ємним знаком джерела постійної напруги U1, що спрощує подальшу обробку інформаційного сигналу. Ємність конденсатора з круглими обкладинками описується виразом [20]

$$C_k(h_m) = \varepsilon_0 R \left[\frac{d \varepsilon_n \varepsilon_m}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m)} \right] \left[\frac{\pi R}{d} + \left(\ln \frac{16 \pi R}{d} - 1 \right) \right], \quad (28)$$

де R – радіус круглих обкладинок. Зміна ємності при зміні товщини вимірюваного матеріалу у загальному виді описується формулою

$$\Delta C_k(h_m) = \frac{\partial C_k(h_m)}{\partial d} \Delta d(h_m) + \frac{\partial C_k(h_m)}{\partial \varepsilon_m}, \quad (29)$$

Після проведення диференціювання у формулі (29) отримуємо вираз

$$\begin{aligned} \Delta C_k(h_m) = \varepsilon_0 R \left\{ \left[\frac{\varepsilon_n \varepsilon_m}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m)} - \frac{\varepsilon_n \varepsilon_m^2 d}{(\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m))^2} \right] \left[\frac{\pi R}{d} + \left(\ln \frac{16 \pi R}{d} - 1 \right) \right] + \right. \\ \left. + \left(-\frac{\pi R}{d^2} + \frac{1}{d} \right) \left(\frac{d \varepsilon_n \varepsilon_m}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m)} \right) \right] \Delta d(h_m) + \left[\left(\frac{d \varepsilon_n}{\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m)} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\varepsilon_n \varepsilon_m d (d - h_m)}{(\varepsilon_n h_m + \varepsilon_m (d - h_m))^2} \left(\frac{\pi R}{d} + \left(\ln \frac{16 \pi R}{d} - 1 \right) \right) \right) \right] \Delta \varepsilon_m(h_m) \right\}. \quad (30) \end{aligned}$$

Функція перетворення для приладу, який подано на рис.4, визначається аналітичним чином як і для попереднього випадку, розглянутого вище. Її формула описується виразом

$$F_0(h_m) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim 2}^2 t_2}{\eta C_k(h_m) U_{\sim 1}^2 t_1 L} - \frac{U_{\sim 2}^4 t_2^2}{\eta^2 C_k^2(h_m) U_{\sim 1}^4 t_1^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (31)$$

На рис.5 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функції перетворення приладу.

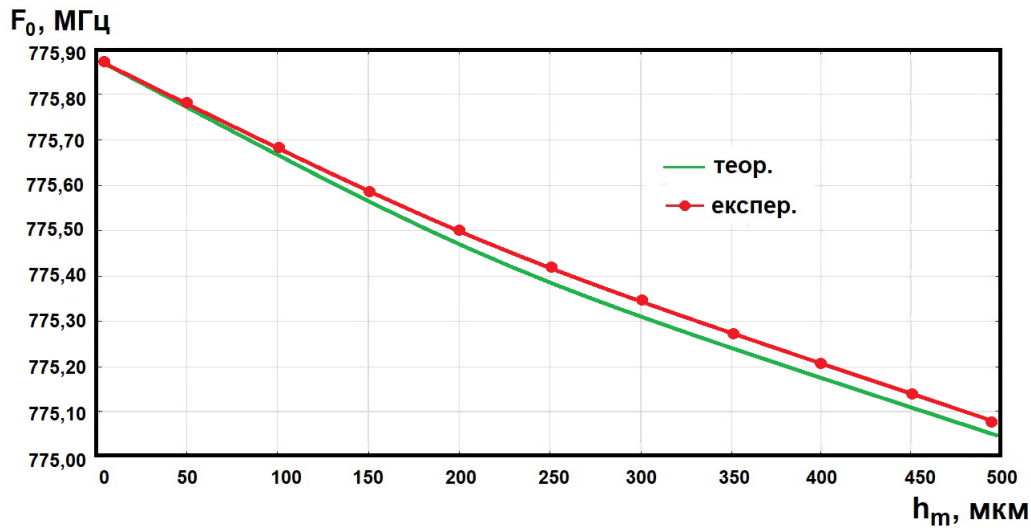


Рис. 5. Залежність функції перетворення від товщини вимірюваного матеріалу

Як видно з рис.5, при зміні товщини матеріалу від 0 до 500 мкм вихідна частота змінювалась від 775,88 МГц до 775,08 МГц.

Чутливість приладу визначається похідною за параметром h_m функції (31). При цьому необхідно врахувати залежність вихідної напруги $U_~$, постійної напруги на конденсаторі $U_ =$ від параметру h_m додатково до основної залежності ємності конденсатора C_k . Таким чином, функція перетворення (31) набуває вигляду

$$F_0(h_m) = \frac{1}{2\pi} \left[U_~^2(h_m) C_k^{-1}(h_m) U_ =^{-2}(h_m) n_5 - U_~^4(h_m) C_k^{-2}(h_m) U_ =^{-4}(h_m) n_6 \right]^{1/2}. \quad (32)$$

Тоді чутливість приладу згідно функції (32) описується виразом

$$S_{F_0}(h_m) = \frac{1}{4\pi} \left[U_~^2(h_m) C_k^{-1}(h_m) U_ =^{-2}(h_m) n_5 - U_~^4(h_m) C_k^{-2}(h_m) U_ =^{-4}(h_m) n_6 \right]^{-1/2} \times \left\{ \left[2U_~(h_m) \frac{dU_~(h_m)}{dh_m} C_k^{-1}(h_m) + U_~^2(h_m) \left(-C_k^{-2}(h_m) \frac{dC_k(h_m)}{dh_m} U_ =^{-2}(h_m) - 2U_ =^{-3}(h_m) \frac{dU_ = (h_m)}{dh_m} C_k^{-1}(h_m) \right) \right] n_5 - \left[U_~^4(h_m) \left(-2C_k^{-3}(h_m) \frac{dC_k(h_m)}{dh_m} U_ =^{-4}(h_m) - 4U_ =^{-5}(h_m) \frac{dU_ = (h_m)}{dh_m} C_k^{-2}(h_m) \right) + 4U_~^3(h_m) \frac{dU_~(h_m)}{dh_m} C_k^{-2}(h_m) U_ =^{-4}(h_m) \right] n_6 \right\}. \quad (33)$$

Графік чутливості від зміни товщини подано на рис.6.

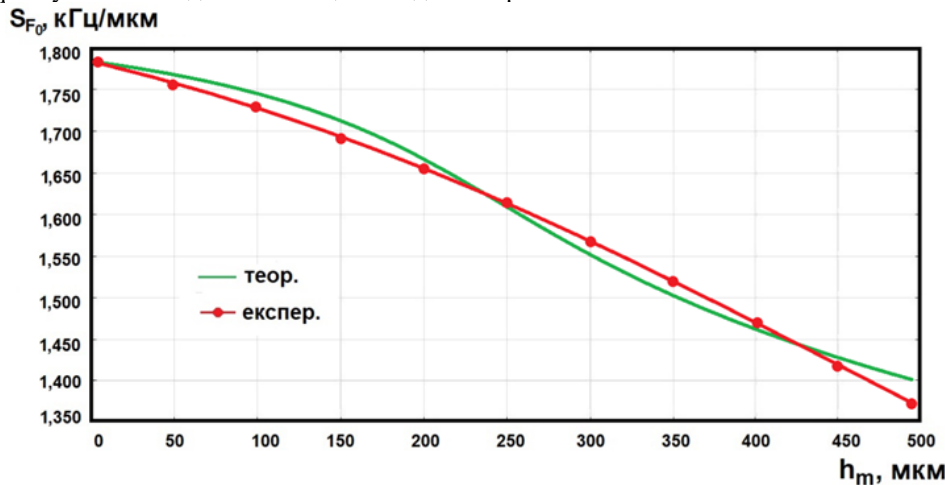


Рис. 6. Залежність функції чутливості приладу від товщини вимірюваного матеріалу

Як видно з графіка (рис.6), чутливість приладу складала від 0 до 500 мкм в діапазоні товщини від 1,375 кГц/мкм до 1,775 кГц/мкм.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Запропоновано і досліджено основні характеристики приладів вимірювання товщини матеріалів з частотним вихідним сигналом, конструкція яких будується на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором. В якості первинних елементів вимірювання товщини виступають конденсатори з прямокутними та круглими обкладинками, які є пасивними елементами автогенератора, що спрощує конструкцію приладів вимірювання товщини матеріалів.

2. Розроблено математичні моделі приладів на основі принципу перетворення енергії постійного електричного поля в енергію змінного електричного поля, що дозволило отримати функції перетворення і чутливості приладів без використання складного методу отримання рівнянь Кірхгофа з еквівалентних схем перетворювачів та їх розрахунку чисельними методами на сучасних комп'ютерах. Показано, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна товщини вимірювального матеріалу, що викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору коливальної системи автогенераторів, що, у свою чергу, приводить до зміни вихідної частоти приладів. Чутливість приладів вимірювання товщини змінюється від 0,4 кГц/мкм до 1,775 кГц/мкм в діапазоні товщин від 0 до 500 мкм.

3. Розраховані аналітичні вирази функцій перетворення і чутливості наочно демонструють вплив кожного елемента первинних перетворювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту приладів. Прилади вимірювання товщини з частотним виходом не потребують аналого-цифрових перетворювачів і підсилювальних пристроїв при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру. При роботі приладів у надвисоких частотах можлива передача інформації на відстань.

Література

1. Giurlani Walter, Berretti Enrico, Lavacchi Alessandro. Measuring the Thickness of Metal Coatings: A Review of the Methods // *Coatings*. 2020, 10. 10.3390/coatings10121211.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: в 3 т. / Вуйцік Вальдемар, Готра Зенон Юрійович, Григор'єв Віталій Вікторович, Каліта Владзімеж, Мельник Олег Миронович, Потенцік Єжи; за ред. З. Ю. Готри; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка", Т.І. 2002. – 475 с.
3. Lei Hang, Wenquan Jin, Hyeon Sik Yoon, Yong Geun Hong and Do Hyeun Kim. Design and Implementation of a Sensor-Cloud Platform for Physical Sensor Management on CoT Environments // *Electronics*, 2018, 7, 140; –P.1-25. doi:10.3390/electronics7080140
4. Борисов О.В., Яганов П.О. Мікроелектронні сенсори на основі кремнієвих р-п переходів. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. –174 с.
5. Damdam A.N., Ozay L.O., Ozcan C.K., Alzahrani A., Helabi R., Salama K.N. IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring and Spoilage Detection // *Foods*, 2023, 12(11): 2227. <https://doi.org/10.3390/foods12112227>
6. Sensors and actuators: technology and applications / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. –268 p.
7. Sait S., Abbas Y., Boubenider F. Estimation of thin metal sheets thickness using piezoelectric generated ultrasound // *Appl. Acoust.*, 2015, vol. 99, –P. 85–91.
8. Zipf Mark E. Radiation Transmission-based Thickness Measurement Systems - Theory and Applications to Flat Rolled Strip Products, *Advances in Measurement Systems*. –Milind Kr Sharma (Ed.), USA, 2010. –592 p.
9. Bozydar Knyziak A., Rzedkiewicz W., Kaczorowska E., Derlacinski M. New X-ray testing methods of aerosol products for industrial radiography // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, Vol. 844, no. November 2016. –P. 141–146.
10. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Криночкін Р.В. Радіовимірювальні перетворювачі для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від'ємним опором. – Вінниця : ВНТУ, 2013. –136 с.
11. Осадчук О.В. Криночкін Р.В. Пристрій вимірювального контролю товщини металевих і полімерних плівок // *Вісник ВПІ*, 2010, №4, –С. 90–93.
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of the Generator on the Basis of Transistor Structure with the Negative Differential Resistance // *Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. Paper 33.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. – Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. – 275 p.
14. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. Scientific journal. ISSN 2077-6772. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp) (2021) DOI: 10.21272/jnep.13(4).04001 https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2021/4/articles/jnep_04001.pdf

15. Осадчук Я.О., Осадчук О.В., Осадчук В.С. Дослідження автогенераторних параметричних сенсорів температури // Вісник Хмельницького національного університету, №1, 2022 (305) – С.172-180. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-172-180
16. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.– 344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.
17. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали). Підручник. – К.: "Дельта", 2008. –516 с.
18. Minkin V.I., Osipov O.A., Zhdanov Y.A., Vaughan W.E. Basic Principles of the Theory of Dielectrics. In: Vaughan, W.E. (eds) Dipole Moments in Organic Chemistry. Physical Methods in Organic Chemistry. Springer, Boston, MA. 1970. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1770-8_1
19. Електротехнічні матеріали: Частина 1. Діелектричні матеріали / В.М. Кириленко, К.В. Кириленко. В.М. Головка. – Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.
20. Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. –701 p.

References

1. Giurlani Walter, Berretti Enrico, Lavacchi Alessandro. Measuring the Thickness of Metal Coatings: A Review of the Methods // Coatings. 2020, 10. 10.3390/coatings10121211.
2. Microelectronic sensors of physical quantities: in 3 volumes / Vuytsik Valdemar, Gotra Zenon Yuriyovych, Grigoriev Vitaly Viktorovych, Kalita Vlodzimezh, Melnyk Oleg Myronovych, Potentski Yezhi; under the editorship Z. Yu. Gotry; Ministry of Education and Science of Ukraine, National Lviv Polytechnic University, T.I. 2002. – 475 p.
3. Lei Hang, Wenquan Jin, Hyeon Sik Yoon, Yong Geun Hong and Do Hyeun Kim. Design and Implementation of a Sensor-Cloud Platform for Physical Sensor Management on CoT Environments // Electronics, 2018, 7, 140; –P.1-25. doi:10.3390/electronics7080140
4. Borysov O.V., Yaganov P.O. Microelectronic sensors based on silicon p-n junctions. - Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2017. –174 p.
5. Damdam A.N., Ozay L.O., Ozcan C.K., Alzahrani A., Helabi R., Salama K.N. IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring and Spoilage Detection // Foods, 2023, 12(11): 2227. <https://doi.org/10.3390/foods12112227>
6. Sensors and actuators: technology and applications / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. –268 p.
7. Sait S., Abbas Y., Boubenider F. Estimation of thin metal sheets thickness using piezoelectric generated ultrasound // Appl. Acoust., 2015, vol. 99, –P.85–91.
8. Zipf Mark E. Radiation Transmission-based Thickness Measurement Systems - Theory and Applications to Flat Rolled Strip Products, Advances in Measurement Systems. –Milind Kr Sharma (Ed.), USA, 2010. –592 p.
9. Bozydar Knyziak A., Rzedkiewicz W., Kaczorowska E., Derlacinski M. New X-ray testing methods of aerosol products for industrial radiography // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., Vol. 844, no. November 2016. –P.141–146.
10. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Krynochkin R.V. Radio measuring transducers for determining the thickness of films based on devices with negative resistance. – Vinnytsia: VNTU, 2013. – 136 p.
11. Osadchuk O.V. Krynochkin R.V. Device for measuring and controlling the thickness of metal and polymer films // Visnyk VPI, 2010, No. 4, –P.90–93.
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of the Generator on the Basis of Transistor Structure with the Negative Differential Resistance // Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. Paper 33.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. – Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. – 275 p.
14. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance // Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal. ISSN 2077-6772. Vol. 13 No 4, 04001(6 p.) (2021) DOI: 10.21272/jnep.13(4).04001 https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2021/4/articles/jnep_04001.pdf
15. Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S. Research of self-generating parametric temperature sensors // Bulletin of the Khmelnytskyi National University, No. 1, 2022 (305) – P.172-180. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-172-180
16. Structural and functional materials / V.P. Babak, D.F. Baisa, V.M. Rizak, S.F. Filonenko. In two parts. - K.: Technology. – Part 1, 2003. – 344 p.; part 2, 2004. – 368 p.
17. Kolesov S.M., Kolesov I.S. Electrical materials science (Electrotechnical materials). Textbook. - K.: "Delta", 2008. –516 p.
18. Minkin V.I., Osipov O.A., Zhdanov Y.A., Vaughan W.E. Basic Principles of the Theory of Dielectrics. In: Vaughan, W.E. (eds) Dipole Moments in Organic Chemistry. Physical Methods in Organic Chemistry. Springer, Boston, MA. 1970. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1770-8_1
19. Electrotechnical materials: Part 1. Dielectric materials / V.M. Kirylenko, K.V. Kirylenko. V.M. Golovko - Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2021. – 224 p.
20. Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. –701 p.