

УДК 621.317

К.В.Овчинников

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
кафедра метрології та промислової автоматики
e-mail: k_ovchinnikov@mail.ru

СТАТИЧНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТОВЩИНИ З ІНДУКТИВНО-РЕЗОНАНСНИМ ВИМІРЮВАЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Анотація

Овчинников К.В. Статичні метрологічні характеристики вимірювального каналу товщини з індуктивно-резонансним вимірювальним перетворювачем. Отримано рівняння перетворення вимірювального каналу товщини з індуктивно-резонансним вимірювальним перетворювачем, знайдені теоретичні вирази для оцінювання його статичних метрологічних характеристик.

Ключові слова: статичні метрологічні характеристики, індуктивно-резонансний, вимірювальний перетворювач, вимірювальний канал, товщина.

Вступ. Магістральним напрямком в галузі дослідження та розробки засобів вимірювань неелектричних величин є розроблення та вдосконалення пристроїв, принципи роботи яких засновані на простих, добре вивчених фізичних явищах, інваріантних за своєю природою до впливних величин, таких, що легко піддаються розрахунку та відтворенню, в тому числі при масовому і серійному виробництві. До числа таких перспективних пристроїв, які придатні вирішувати достатньо широке коло задач вимірювання неелектричних величин можна віднести резонансні вимірювальні перетворювачі з часовим представленням вимірювальної інформації [1,2].

Постановка задачі дослідження. Метою даної роботи отримання рівняння перетворення вимірювального каналу товщини діелектричних покриттів металевих поверхонь з індуктивно-резонансним вимірювальним перетворювачем та оцінка його статичних метрологічних характеристик.

Принципи побудови вимірювального каналу товщини. На рисунку 1 наведено структурну схему вимірювального каналу товщини діелектричних покриттів металевих поверхонь, первинним вимірювальним перетворювачем в якій є індуктивно-резонансний вимірювальний перетворювач U_2 .

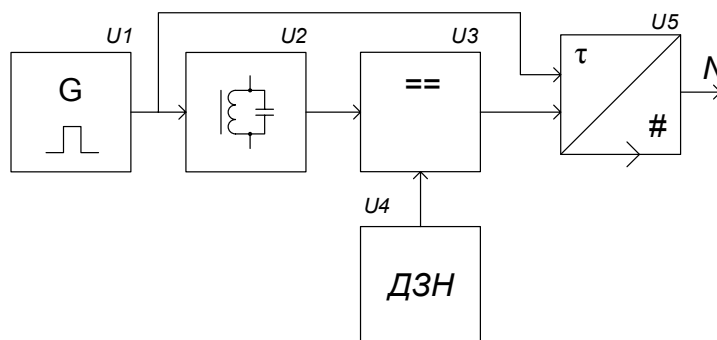


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювального каналу

Індуктивно-резонансний вимірювальний перетворювач $U2$, який представляє собою коливальний LC контур, періодично збуджується імпульсами, які поступають від генератора імпульсів $U1$. Відповідно до зовнішніх умов та взаємного розташування осердя котушки вимірювального перетворювача відповідно до об'єкту вимірювання буде змінюватись час згасання вільних коливань збуджених в такому коливальному контурі. На виході вимірювального перетворювача формується огибаючий сигнал, який поступає на компаратор $U3$. На інший вхід компаратора подається зразковий рівень напруги з джерела зразкової напруги ($ДЗН$) $U4$. На виході компаратора формується імпульс визначеної тривалості, який подається на вхід час-цифрового перетворювача $U5$ де перетворюється в цифровий код.

Чутливим елементом первинного вимірювального перетворювача є котушка індуктивності, що має властивості змінювати повний опір відповідно до розташування відносно її відкритого торця електропровідного матеріалу. Рівняння повного опору втрат котушки індуктивності в такому випадку запишеться як:

$$Z_{em} = Z_0 + Z_{en} = Z_0 + 2\pi f M \Psi(\beta, \gamma), \quad (1)$$

де Z_{em} - повний опір втрат, Z_0 - повний опір котушки при відсутності в її полі електропровідного матеріалу, Z_{en} - додатковий опір (внесений), який виникає при появі в полі котушки електропровідного матеріалу, M - коефіцієнт взаємодії котушки індуктивності та електропровідного матеріалу, $\Psi(\beta, \gamma)$ - функція, що характеризує розміри, провідність, орієнтацію та інші параметри електропровідного матеріалу.

Проведені власні експериментальні дослідження та дослідження описані в [3] показали, що коефіцієнт взаємоіндукції M котушки індуктивності і електропровідного матеріалу є експоненційною функцією залежності від відстані ℓ між торцем осердя котушки і поверхнею електропровідного матеріалу.

$$M = M_0 e^{-\frac{6\ell}{d_e}}, \quad (2)$$

де M_0 - коефіцієнт взаємоіндукції між котушкою індуктивності та її дзеркальним відображенням при нульовому зазорі між торцями їх осердь (визначається експериментально), d_e - еквівалентний діаметр котушки індуктивності (зручним для розрахунків є значення еквівалентного діаметру рівне середньому діаметру котушки). Для не ферромагнітної плоскої електропровідної пластини функція $\Psi(\beta, \gamma)$ має вигляд:

$$\Psi(\beta, \gamma) = -j \frac{2\beta^2 + th \frac{\gamma}{4} \sqrt{9 + j4\beta^2}}{3\sqrt{9 + j4\beta^2} + (9 + j2\beta^2) th \frac{\gamma}{4} \sqrt{9 + j4\beta^2}}, \quad (3)$$

де $\beta = \frac{d_e}{2} \sqrt{2\pi f \mu \sigma}$, $\gamma = \frac{4h}{d_e}$, μ - магнітна провідність пластини, σ - питома

електропровідність матеріалу пластини, h - товщина пластини.

Активна та реактивна складові внесеного в контур опору визначаються за формулами:

$$R_{en} = 2\pi f M_0 e^{-\frac{6\ell}{d_e}} \Re(\Psi(\beta, \gamma)), \quad X_{en} = 2\pi f M_0 e^{-\frac{6\ell}{d_e}} \Im(\Psi(\beta, \gamma)), \quad (4)$$

де $\Re(\Psi(\beta, \gamma))$ - дійсна складова функції $\Psi(\beta, \gamma)$, $\Im(\Psi(\beta, \gamma))$ - уявна складова функції $\Psi(\beta, \gamma)$.

Оскільки контур працює в резонансному режимі, то реактивною складовою внесеного опору можна знехтувати, а враховуючи вище наведені формули вираз для обчислення постійної часу процесу затухання коливань в контурі перепишеться наступним чином:

$$\tau_k = \frac{2L}{R_L} = \frac{2L}{Z_{em}} = \frac{2L}{Z_0 + Z_{en}}, \quad (5)$$

де τ_k - швидкість згасання вільних коливань в контурі.

Перепишемо рівняння (5) з урахуванням вище наведених співвідношень (4), (3), (2) та (1) та отримаємо функцію, яка описує залежність часу згасання вільних коливань від відстані до поверхні металевого об'єкту індуктивно-резонансного вимірювального перетворювача.

$$\tau_k = \frac{-2L \frac{K}{Z_0} (9 + 54P + 81P^2 + 4\beta^4 P^2)}{(-9K - 54KP - 81KP^2 - 4K\beta^4 P^2 + 4Y\beta^2 P^2 \frac{K}{Z_0} + 6Y\beta^2 \sqrt{\frac{2K}{Z_0} - 18} + 4Y\beta^4 P \sqrt{\frac{2K}{Z_0} + 18} + 18\beta^2 P \sqrt{\frac{2K}{Z_0} - 18})}, \quad (6)$$

де $K = Z_0 \sqrt{81 + 16\beta^4}$, $P = th\left(\frac{1}{4}\gamma\right)$, $Y = \pi f M_0 e^{\frac{6l}{d_e}}$.

На виході вимірювального каналу отримаємо цифровий код який є пропорційним до часу згасання коливань та визначається з рівняння:

$$N = k_p \tau_k, \quad (7)$$

де k_p - коефіцієнт пропорційності.

З використанням пакету символьної математики Maple 7, та основних параметрів резонансного контуру експериментального зразка ($L = 355 \mu H$, $C = 0.22 \mu F$) було виконано математичне моделювання розробленого сенсора. Графічне зображення результатів моделювання, що відображають функцію перетворення вимірювального каналу наведено на рисунку 2.

Для оцінки статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу використаємо розклад функції перетворення в ряд Тейлора.

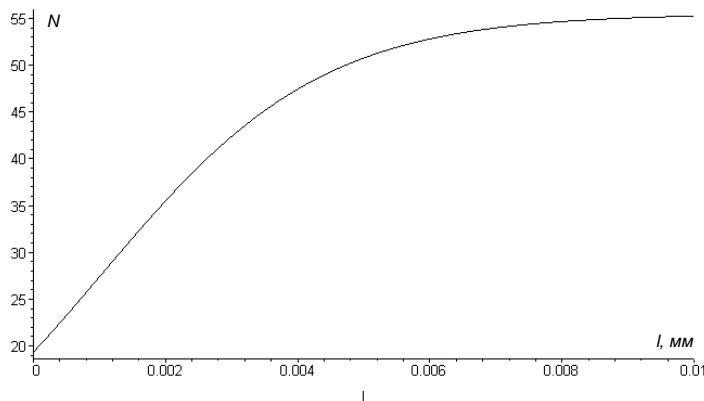


Рисунок 2 – Графік функції перетворення вимірювального каналу

В загальному вигляді функція перетворення вимірювального каналу на який діє впливна величина Δf має такий вигляд:

$$y = y(x, \Delta f). \tag{8}$$

Розклавши (8) в ряд Тейлора отримаємо:

$$y = y_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_0 x + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)_0 x^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right)_0 x^3 + \dots + \left(\frac{\partial^2 x}{\partial x \partial f}\right)_0 x \Delta f + \left(\frac{\partial y}{\partial f}\right)_0 \Delta f + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial f^2}\right)_0 \Delta f^2 + \dots \tag{9}$$

Доданки рівняння (9) мають наступний зміст:

y_0 – вільний член розкладу, який дорівнює значенню y при $x=0$ і $\Delta f=0$; $\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_0 = S_0$ – номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість; $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)_0 = S_0'$ і $\frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right)_0 = S_0''$ – зміна чутливості по діапазону перетворення; $\left(\frac{\partial y}{\partial f}\right)_0 = \beta_0$ і $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial f^2}\right)_0 = \beta_0'$ – коефіцієнти впливу впливної величини на вихідний параметр y вимірювального каналу; $\left(\frac{\partial^2 x}{\partial x \partial f}\right)_0 = \alpha_0$ – коефіцієнт впливу впливної величини на номінальну чутливість S_0 вимірювального каналу.

З урахуванням прийнятих позначень перепишемо вираз (9) у вигляді:

$$y = y_0 + S_0 x + S_0' x^2 + S_0'' x^3 + \dots + \alpha_0 x \Delta f + \beta_0 \Delta f + \beta_0' \Delta f^2 + \dots, \tag{10}$$

де $S_0' x^2 + S_0'' x^3 = \Delta y_n$ – похибка нелінійності номінальної функції перетворення;

$\alpha_0 x \Delta f = \Delta y_m$ – мультиплікативна похибка перетворення; $\beta_0 \Delta f + \beta_0' \Delta f^2 = \Delta y_a$ – адитивна похибка перетворення.

Аналітично визначимо основні статичні метрологічні характеристики досліджуваного вимірювального каналу. Для цього необхідно здійснити розклад функції перетворення (7) в

ряд Тейлора в околицях визначеної точки, що знаходиться на лінійній ділянці області її зміни. Чутливість вимірювального каналу є складовою ряду і визначається співвідношенням:

$$S_0 = \frac{\partial \tau_k}{\partial l} = \frac{2LK(9+54P+81P^2+4\beta^4P^2) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{48Y\beta^2P^2K}{d_e Z_0} - \frac{72Y\beta^2 \sqrt{\frac{2K}{Z_0}-18}}{d_e} \\ \frac{48Y\beta^4P \sqrt{\frac{2K}{Z_0}+18}}{d_e} \end{array} \right)}{Z_0 \left(\begin{array}{c} -9K-54KP-81KP^2- \\ -4K\beta^4P^2 + \frac{8Y\beta^2P^2K}{Z_0} + \\ +12Y\beta^2 \sqrt{\frac{2K}{Z_0}-18} + \\ +8Y\beta^4P \sqrt{\frac{2K}{Z_0}+18} + \\ +18\beta^2P \sqrt{\frac{2K}{Z_0}-18} \end{array} \right)^2}. \quad (11)$$

Зміна чутливості по діапазону такого вимірювального каналу визначається з співвідношення:

$$S'_0 = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \tau_k}{\partial l^2} = \frac{144LK(9+54P+81P^2+4\beta^4P^2)Y\beta^2 \cdot \left(\begin{array}{c} (2KP^2+3X+2\beta^2PX) \cdot \\ \left(\begin{array}{c} -8Y\beta^2P^2K-12Y\beta^2X- \\ -8Y\beta^4PX-9KZ_0- \\ -54KPZ_0-81KP^2Z_0- \\ -4K\beta^4P^2Z_0+18\beta^2PX \end{array} \right) \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} (-9KZ_0-54KPZ_0- \\ -81KP^2Z_0-4K\beta^4P^2Z_0+ \\ +8Y\beta^2P^2K+12Y\beta^2X+ \\ +8Y\beta^4PX+18\beta^2PX \end{array} \right)^3 d_e^2}. \quad (12)$$

де $X = \sqrt{2} \sqrt{\frac{K-9Z_0}{Z_0}} Z_0$.

Похибка не лінійності номінальної функції перетворення визначатиметься як:

$$\Delta N_n = S'_0 l^2 + S''_0 l^3. \quad (13)$$

На рисунку 3 наведено графік чутливості вимірювального каналу від відстані до електропровідної основи об'єкту, товщини діелектричного покриття.

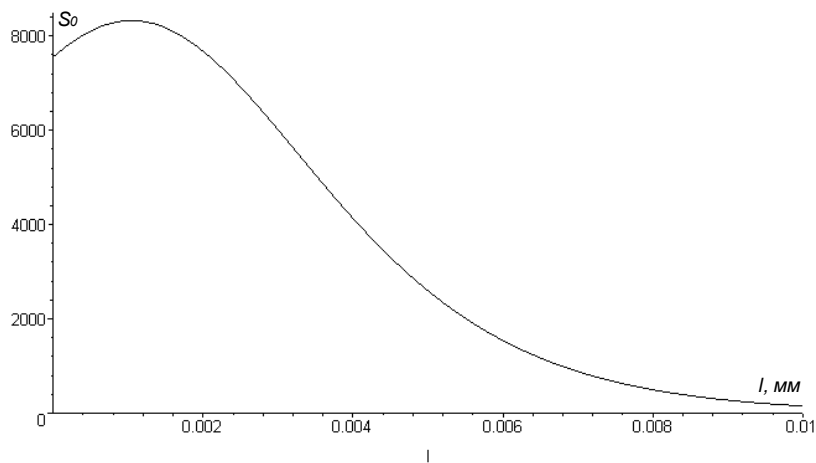


Рисунок 3 – Графік функції чутливості вимірювального каналу

З графіка зміни чутливості вимірювального каналу видно, що максимальна чутливість досягається при зміні відстані до електропровідної основи в діапазоні від нуля до 0.004 мм.

На рисунку 4 наведено графіки зміни чутливості вимірювального перетворювача по діапазону від відстані до електропровідної основи дослідного об'єкту.

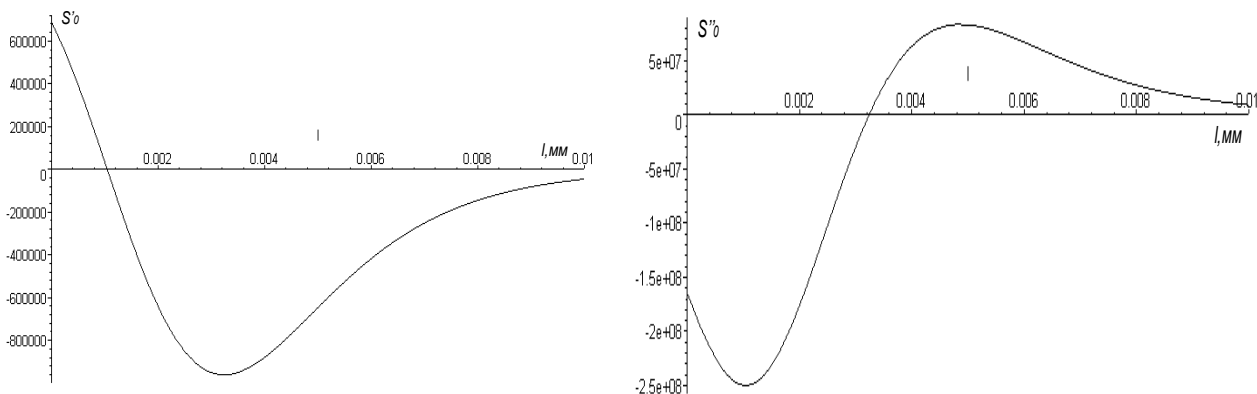


Рисунок 4 – Графіки функцій зміна чутливості вимірювального каналу по діапазону

На рисунку 5 наведений графік зміни похибки не лінійності вимірювального каналу від відстані до вимірювального об'єкту.

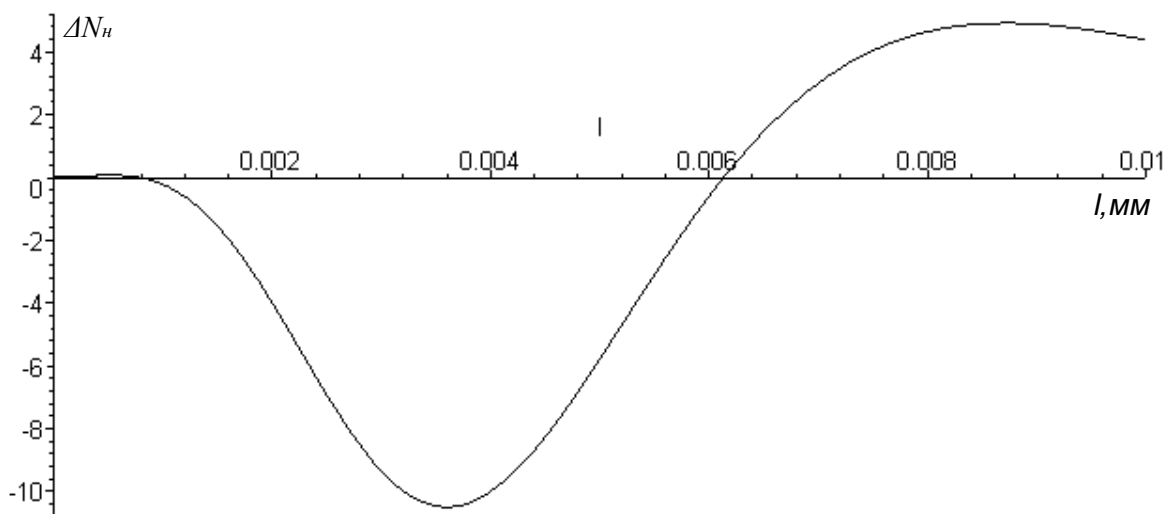


Рисунок 5 – Графік функції зміни похибки нелінійності

З наведених вище співвідношень та їх графічних відображень можна зробити висновок про те, що функція перетворення запропонованого вимірювального каналу є суттєво нелінійною але в діапазоні зміни відстані від 0 до 0.004 мм має незначну нелінійність, яка не впливає суттєво на загальну похибку. З графіку чутливості вимірювального каналу видно, що максимальна чутливість вимірювального каналу із вказаними параметрами досягається в діапазоні зміни відстані від нуля до 0.003 мм. З графіків зміни чутливості по діапазону можна зробити висновок про те, що максимальна зміна чутливості відбувається в діапазоні зміни відстані вимірювального перетворювача від вимірювального об'єкту від 0.002 до 0.004 мм. З графіку зміни похибки нелінійності від

відстані видно, що мінімальна похибка нелінійності досягається в діапазоні від нуля до 0.006 мм.

Отже запропонований вимірювальний канал має обмеження по діапазону вимірювання, а товщини які можна вимірювати таким сенсором лежать в межах від 0 до 0,006 мм. Таким чином даний вимірювальний перетворювач придатний для вимірювання товщин діелектричних покриттів, зокрема лакових покриттів електропровідної основи товщина яких коливається в межах від 10 до 50 мкм.

Висновки.

1. Запропоновано структуру вимірювального каналу товщини діелектричних покриттів металевих поверхонь з індуктивно-резонансним вимірювальним перетворювачем яка побудована за принципом перетворення вимірювальної величини в часовий інтервал.

2. Отримано теоретично рівняння перетворення вимірювального каналу, що дозволило теоретично оцінити основні статичні метрологічні характеристики такого вимірювального каналу.

3. На основі аналізу отриманих співвідношень та графічних залежностей зроблено висновок про можливість застосування такого вимірювального каналу в для вимірювання товщини шару діелектричного покриття на металевій основі.

Література

1. Вимірювальний перетворювач фізичних величин в інтервал часу: Патент на корисну модель №5783 Україна, МКИ G01R27/00/ Ю.В.Шабатура. Заявлено 21.08.04; опубліковано 15.03.05 Бюл. №3.
2. Вимірювальний перетворювач з часовим представленням інформації: патент на корисну модель №5086 Україна, МКИ G01B9/02/ Ю.В.Шабатура. Заявлено 01.07.04; опубліковано 15.02.05 Бюл. №2.
3. Абдуллаев А.А., Набиев И.А., Гусейнов М.Ш., Исаев Д.Г. Дискретные средства преобразования и сбора измерительной информации. – М.: Машиностроение, 1982. – 144 с.

Аннотация

Овчинников К.В. Статические метрологические характеристики измерительного канала толщины с индуктивно-резонансным измерительным преобразователем.

Получено уравнение преобразования измерительного канала толщины с индуктивно-резонансным измерительным преобразователем, найдены теоретические выражения для оценки его статических метрологических характеристик.

Ключевые слова: статические метрологические характеристики, индуктивно-резонансный, измерительный преобразователь, измерительный канал, толщина.

Abstract

Ovchinnikov K.V. Static metrological characteristics of thickness channel with inductive-resonance measurement transformer. *The transformation equation of thickness measurement channel with inductive-resonance measurement transformer was derived. The theoretical expressions for estimation of static metrological characteristics were derived.*

Keywords: static metrological characteristic, inductive-resonance measurement transformer, measurement channel, thickness.

Здано в редакцію:
10.04.2010р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н., проф., Зорі А.А.