

ELECTRICAL ENGINEERING

СТАТИЧНІ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТРЬОХЕЛЕКТРОДНИХ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ЄМНІСНИХ ДАТЧИКІВ

Семенець Д.А.

*Навчально-науковий професійно-педагогічний
інститут УІПА (м. Бахмут)
кандидат технічних наук, доцент
м. Харків, Україна*

STATIC CONVERSION FUNCTIONS OF THREE-ELECTRODE DIFFERENTIAL CAPACITIVE SENSORS

Semenets D.

*ESPPI UEPA, (Bahmut)
Ph.D., Associate Professor
Kharkiv, Ukraine*

Анотація

В роботі розглянуті конструкції трьохелектродних диференційних ємнісних датчиків для використання у вимірювальних перетворювачах переміщення. Для трьох найбільш поширених та простих конструкцій сенсорів визначені функції перетворення за умов вмикання датчиків в RC-коло максимального типу та вимірювальну мостову схему Віна-Робінсона. Функції перетворення визначені за умов певної частоти живлення вимірювальної схеми та інформаційного вихідного сигналу у вигляді напруги.

Abstract

The paper considers the designs of three-electrode differential capacitive sensors for use in displacement transducers. For the three simplest designs, the transformation functions are determined when sensors are included in the RC circuit of the maximum type and the Wien-Robinson measuring bridge circuit. The conversion functions are defined at a certain power frequency of the measuring circuit and an information output signal in the form of voltage.

Ключові слова: ємнісний вимірювальний перетворювач, диференційний ємнісний датчик, RC-коло максимального типу, вимірювальна мостова схема Віна-Робінсона.

Keywords: capacitive measuring transducer, differential capacitive sensor, maximum type RC circuit, Wien-Robinson measuring bridge circuit.

Одними з найпоширеніших типів вимірювальних перетворювачів є ємнісні, по деяким оцінкам – їх виробництво складає приблизно 10% від загального виробництва сучасних сенсорів. Такі датчики характеризуються високою надійністю, незначною споживаною потужністю, широкою функціональністю вимірювань, доброю відтворюваністю. Чутливий елемент ємнісного сенсора – звичайний електричний конденсатор, ємність якого знаходиться у відомій функціональній залежності від вимірюваної величини (внаслідок зміни головних параметрів конденсатора – геометричних розмірів або діелектричної проникності) [1].

Ємнісні датчики переміщення мають широку сферу застосування. Їх можливо використовувати як окремий автономний вимірювальний перетворювач, так і інтегрувати у склад більш складних датчиків для визначення комплексних показників об'єктів або процесів. Окрім традиційних однополярних ємнісних датчиків, які містять тільки один конденсатор, зараз використовують різні типи диференційних (два конденсатора) або мостових (чотири конденсатори і більше) датчиків. В цьому ви-

падку один або два конденсатора можуть бути постійними, або змінними, ввімкненими назустріч друг другу.

Диференціальні ємнісні датчики переміщень призначені для перетворення однієї фізичної величини, ємності в іншу, наприклад, в напругу. Вони є вхідною частиною різноманітних вимірювальних та мікромеханічних пристроїв: акселерометрів, датчиків тиску, різних сенсорів, ємнісних мікрофонів, тобто. пристроїв, в яких використовується ємнісний пристрій отримання інформації.

Великою перевагою ємнісних датчиків є широкі можливості комбінування елементів конструкції датчиків і розташування електродів, що надає можливість варіювати діапазоном вимірюваних величин та формувати бажану функцію перетворення.

Ємнісні датчики переміщення виконуються, як правило, у вигляді конденсаторів з плоскими паралельними електродами. Робочим параметром є або площа перекриття електродів (в цьому випадку іноді використовують коаксіальну конструкцію), або повітряний зазор між ними. Оптимальний варіант - використання двохелементних датчиків у ви-

гляді диференціального або напівдиференціального конденсатора, коли обидві порівнювані ємності знаходяться поряд, в однакових умовах зовнішніх дій (окрім дії вимірюваного параметра) [2, 3].

Питанням розробки первинних вимірювальних ємнісних перетворювачів нових типів, їх вдосконаленню, покращенню їх параметрів та метрологічних характеристик в дійсних час приділяється достатньо багато уваги [4, 5, 6, 7]. У випадку використання особливих конструкцій ємнісних датчиків, які поєднують в собі декілька складових різних типів устрою конденсаторів, визначення статичних характеристик перетворення проводиться у відповідності з відомими методиками розрахунку електричної ємності.

В більшості існуючих досліджень ємнісні датчики розглядаються з точки зору використання у вузькому діапазоні вимірювальних величин, для потреб розширення діапазону вимірювання найчастіше пропонуються додаткові перетворювальні елементи – механічного або електричного типу. Для розробки вимірювальних перетворювачів слід враховувати відомі рекомендації до підвищення якості вимірювального перетворення. Конструювання мініатюрних ємнісних датчиків вимагає вирішення цілого комплексу технічних завдань. Тип чутливого елемента повинен оптимально відповідати вимогам та характеристикам датчика, забезпечувати достатньо високе відношення сигнал – шум; характеристики чутливого елемента повинні повністю узгоджуватись з характеристиками пружного елемента з метою раціональної конструктивної схеми за чутливістю. Матеріали основних елементів датчика – пружний елемент, робоча камера, корпус, електроди тощо, повинні бути підібрані так, щоб забезпечувати мінімальний гістерезис, старіння та температурну чутливість. Також необхідно передбачити в конструкції датчика можливість використання сучасних методів створення герметичних та вакуумно-ущільнюючих нероз'ємних з'єднань між металевими та неметалевими деталями. Технологія виготовлення деталей не повинна включати операції, основані на обробленні матеріалів методом різання; захисні покриття повинні максимально відповідати умовам довготривалої експлуатації. Після попередньої розробки конструкції слід виконати комп'ютерне моделювання процесів для всіх можливих режимів експлуатації датчика. Все це в свою

чергу вимагає наявності чітко визначених статичних і динамічних характеристик первинних ємнісних датчиків.

В роботі розглянуті основні конструкції трьохелектродних ємнісних диференційних ємнісних датчиків та визначені їх статичні функції перетворення за умов вмикання датчиків в найпростіші вимірювальні схеми з метою отримання вихідного сигналу – змінної напруги певної частоти.

На рисунках 1а - 1в показані базові конструкції диференційних трьохелектродних ємнісних датчиків, на яких позначені нерухомі електроди НЕ1, НЕ2 та рухомий електрод РЕ. Фізичний вплив на рухомий електрод та пов'язане з цим його переміщення – позначене змінною x .

Перша конструкція (рис. 1а) – традиційна, складена з двох плоских конденсаторів. Ємність кожного визначається співвідношенням:

$$C_1 = \frac{k_S}{(d_{01} + x)}, C_2 = \frac{k_S}{(d_{02} - x)}, \quad (1)$$

де конструктивна константа $k_S = \epsilon \epsilon_0 S$ визначається через діелектричну константу ϵ_0 , відносну діелектричну проникність ϵ та площу електродів S (вважаємо їх однаковими для обох електродів), d_{01} , d_{02} - початкові зазори у першому та другому конденсаторах.

Друга конструкція (рис. 1б) – диференційний ємнісний датчик, який складається з двох коаксіальних (циліндричних) конденсаторів. Ємність кожного визначається співвідношенням:

$$C_1 = k_K (l_{01} - x), C_2 = k_K (l_{02} + x), \quad (2)$$

де конструктивна константа $k_K = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln(D_2/D_1)}$, визначається через діелектричну константу ϵ_0 , відносну діелектричну проникність ϵ та діаметри електродів D_2, D_1 , l_{01} , l_{02} - початкові заглиблення у першому та другому конденсаторах.

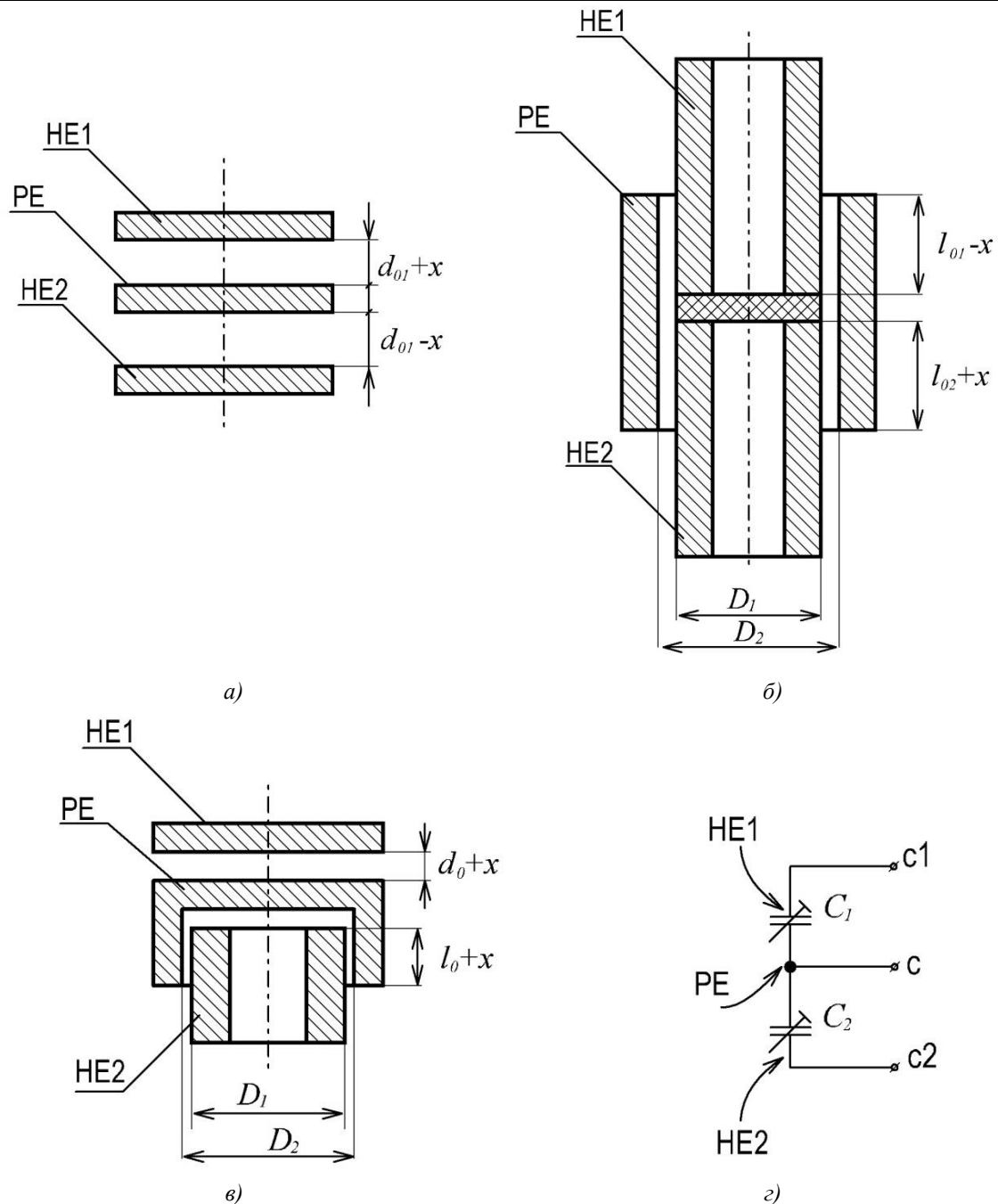


Рис. 1 Устрій трьохелектродних диференційних ємнісних датчиків та їх еквівалентна електрична схема

Третя конструкція (рис. 1в) – диференційний ємнісний датчик, який складається з плоского та коаксіального конденсаторів. Ємність кожного визначається співвідношенням:

$$C_1 = \frac{k_s}{(d_0 + x)}, C_2 = k_K (l_0 + x), \quad (3)$$

де конструктивні константи та геометричні розміри такі ж, як і у попередніх випадках.

Зрозуміло, що трьохелектродний диференційний ємнісний датчик має електричну еквівалентну схему, показану на рис. 1г. Слід зауважити, що у всіх розглянутих конструкціях збільшення контрольованого параметру x призводить до зменшення першої ємності C_1 та збільшення другої C_2 .

Важливим фактором при розробці вимірювального перетворювача на базі ємнісних датчиків є вимірювальна схема, в яку буде ввімкнутий датчик, та яка буде формувати вихідний сигнал з інформативним електричним параметром. У переважній більшості випадків ємнісний перетворювач включається в активне плече чотирьохплічної вимірювальної мостової схеми. Такі варіанти достатньо часто використовуються на практиці і детально розглянуті в літературі. В роботі розглянути варіанти вмикання диференційних ємнісних датчиків у послідовно паралельне RC-коло максимального типу (рис. 2а) та у вимірювальну мостову схему Віна-Робінсона (рис. 2б), з використанням яких можливо отримати достатньо якісні статичні характеристики перетворення.

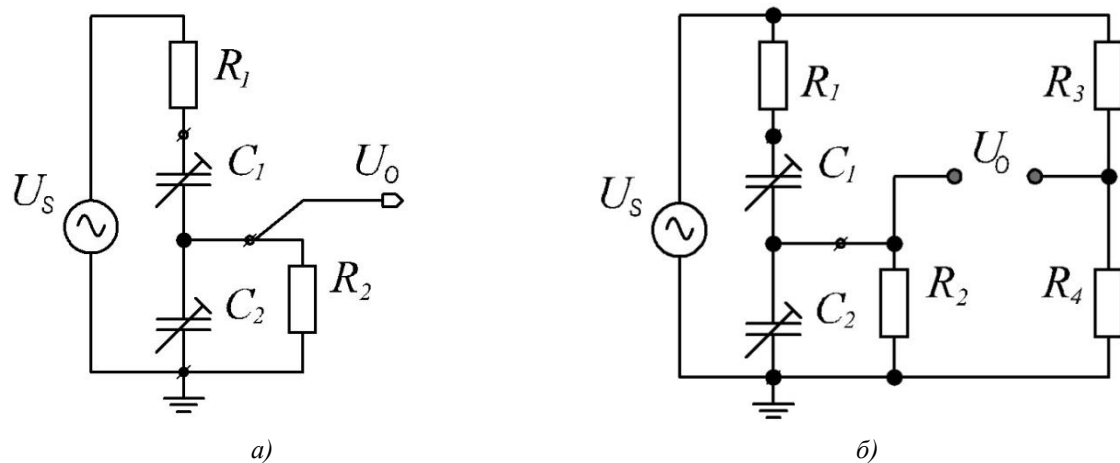


Рис. 2 – Вимірювальні схеми для вмикання трьохелектродних диференційних ємнісних датчиків

Живлення таких схем здійснюється від генераторів змінної синусоїдальної напруги з частотою не нижче 10 кГц. Враховуючи на широку номенклатуру сучасних електронних компонентів генерації електричних сигналів оптимальний вибір частотного діапазону та величини напруги живлення не викликає утруднень.

В загальному вигляді вихідна напруга вимірювальної схеми U_o визначається рівнянням:

$$U_o(x) = U_s \cdot N(\omega), \quad (4)$$

де $N(\omega)$ - коефіцієнт перетворення, залежний як від частоти так і від вимірюваного параметру x . З іншого боку – це рівняння амплітудно-частотної характеристики вимірювальної схеми.

Для вимірювальної схеми рис. 2а для першого типу диференційного ємнісного датчика, складеного з двох плоских конденсаторів коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням:

$$N_{SS}(x) = \frac{k_s R \omega}{(d_0 + x) \sqrt{\left(1 - R^2 \omega^2 \frac{k_s^2}{d_0^2 - x^2}\right)^2 + \left(R \omega k_s \frac{3d_0 - x}{d_0^2 - x^2}\right)^2}}, \quad (5)$$

рівняння записане за умов рівності початкових зазорів конденсаторів $d_0 = d_{01} = d_{02}$ та рівності опорів у вимірювальній схемі $R = R_1 = R_2$.

Для вимірювальної схеми рис. 2а для другого типу диференційного ємнісного датчика, складеного з двох коаксіальних конденсаторів коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням:

$$N_{KK}(x) = \frac{R \omega k_K (l_0 - x)}{\sqrt{\left(1 - (R \omega k_K)^2 (l_0^2 - x^2)\right)^2 + (R \omega k_K (3l_0 - x))^2}}, \quad (6)$$

рівняння записане за умов рівності початкових занурень конденсаторів $l_0 = l_{01} = l_{02}$ та рівності опорів у вимірювальній схемі $R = R_1 = R_2$.

Для вимірювальної схеми рис. 2а для третього типу диференційного ємнісного датчика, складеного з плоского та коаксіального конденсаторів коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням:

$$N_{SK}(x) = \frac{R \omega k_s}{(d_0 + x) \sqrt{\left(1 - R^2 \omega^2 \frac{k_s k_K (l_0 + x)}{(d_0 + x)}\right)^2 + \left(R \omega \frac{2k_s + k_K (l_0 + x)(d_0 + x)}{(d_0 + x)}\right)^2}}, \quad (7)$$

рівняння записане за умов рівності опорів у вимірювальній схемі $R = R_1 = R_2$.

За тих же умов отримані рівняння коефіцієнтів перетворення для вимірювальної мостової схеми Віна-Робінсона (рис. 2б). Схему рекомендується налаштувати згідно умов:

$$R_1 = R_2 = R, R_3 = 2R_4, \omega = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{C_{20} C_{10}}}, \quad (8)$$

де C_{10}, C_{20} - початкові ємності конденсаторів за умови відсутності переміщення $x = 0$.

Для першого типу диференційного ємнісного датчика, складеного з двох плоских конденсаторів коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням:

$$N_{MSS}(x) = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{R^2 \omega^2 k_s^2}{d_0^2 - x^2} - 1\right)^2 + \left(2R\omega k_s \frac{x}{x^2 - d_0^2}\right)^2}{\left(1 - \frac{R^2 \omega^2 k_s^2}{d_0^2 - x^2}\right)^2 + \left(R\omega k_s \frac{(3d_0 - x)}{d_0^2 - x^2}\right)^2}}. \quad (9)$$

Для другого типу диференційного ємнісного датчика, складеного з двох коаксіальних конденсаторів коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням:

$$N_{MKK}(x) = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{\left((R\omega k_K)^2 (l_0^2 - x^2) - 1\right)^2 + (2R\omega k_K x)^2}{\left(1 - (R\omega k_K)^2 (l_0^2 - x^2)\right)^2 + (R\omega k_K (3l_0 - x))^2}}. \quad (10)$$

Для третього типу диференційного ємнісного датчика, складеного з плоского та коаксіального конденсаторів коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням:

$$N_{MSK}(x) = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{\left(R^2 \omega^2 \frac{k_s k_K (l_0 + x)}{(d_0 + x)} - 1\right)^2 + \left(R\omega \frac{k_s - k_K (l_0 + x)(d_0 + x)}{(d_0 + x)}\right)^2}{\left(1 - R^2 \omega^2 \frac{k_s k_K (l_0 + x)}{(d_0 + x)}\right)^2 + \left(R\omega \frac{2k_s + k_K (l_0 + x)(d_0 + x)}{(d_0 + x)}\right)^2}}. \quad (11)$$

Отримані рівняння коефіцієнтів перетворення дають можливість аналізувати вимірювальні властивості датчиків, визначати функції перетворення ємнісних вимірювальних перетворювачів за заданими параметрами, визначати параметри вимірювальних схем та конструкційні параметри таких перетворювачів.

Список літератури

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Гриневич Ф.Б. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками / Ф.Б. Гриневич, А.И. Новик. - Киев: Наукова думка. - 1987. - 112 с.
3. Тарас Б.І. Первинне вимірювальне перетворення параметрів механічних величин / Б.І. Тарас, В.Т. Михалевич // Перспективні технології та прилади. – 2012. – №2(33). - С.255 - 262

4. Михалевич В.Т. Застосування ємнісних чутливих елементів у первинних вимірювальних перетворювачах / В.Т. Михалевич, О.П. Бігун // Перспективні технології та прилади. – 2013. – 2 (33). - С.94 - 98

5. Базіло К.В. Визначення статичної характеристики ємнісних датчиків рівня з перпендикулярними дисковим та циліндричним електродами / К.В. Базіло // Оптична і квантова електроніка в комп'ютерних та інтелектуальних технологіях. – 2019. – №1(26). - С. 141-144

6. Кондратенко Ю.П. Математична модель ємнісного датчика з кінчною конфігурацією чутливого елементу / Ю.П. Кондратенко, І.Л. Назарова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011 №11(186). – С. 186-191

7. Гордієнко В.І. Поліелектродні ємнісні датчики рівня / В.І. Гордієнко // Вісник Хмельницького національного університету, №6, 2014 (219). – С. 196-198