

## ЛЕКЦІЯ

## ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

## План:

1. Принцип роботи ємнісного перетворювача (ЄП). Вхідні та вихідні сигнали.
2. Чутливість ЄП.
3. Застосування ЄП.
4. Електричні схеми увімкнення ЄП у вимірювальне коло.

Ємнісний перетворювач (ЄП) являє собою конденсатор, електрична ємність якого змінюється залежно від змін вхідного сигналу.

Ємність конденсатора змінюється залежно від відстані  $\delta$  між пластинами конденсатора, площі  $S$  взаємного перекриття пластин або діелектричної постійної  $\epsilon$  середовища між пластинами, рис.1 а,б,в), згідно виразу:

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{\delta}, \quad (1)$$

де  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$  - діелектрична постійна вакууму;  $\epsilon$  - відносна діелектрична постійна середовища між електродами;  $S$  - площа перекриття електродів;  $\delta$  - відстань між електродами.

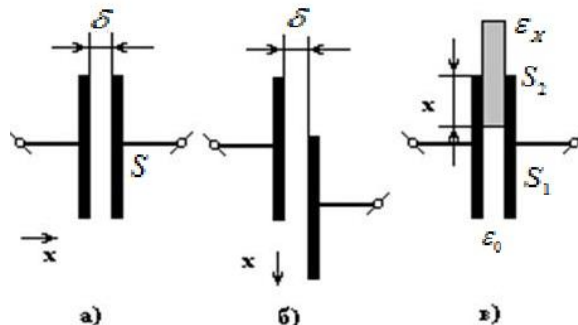


Рис.1 а,б,в). Схеми плоско паралельного ємнісного перетворювача.

Формула (1) стосується перетворювачів, у яких вхідним сигналом є переміщення – а) або зміна площі взаємного перекриття електродів – б), а вихідним сигналом – зміна ємності -  $C$ . Даний вираз являється функцією перетворення перетворювача.

Коли ж вхідною величиною є рівень перекриття електродів досліджуваною речовиною з відносною діелектричною постійною  $\epsilon_x$ , рис.1 в), то функція перетворення наступна :

$$C = \epsilon_0 (\epsilon S_1 + \epsilon_x S_2) \cdot \frac{1}{\delta}, \quad (2)$$

де  $S_1, S_2$  - площа взаємного перекриття частин електродів в зоні повітря між електродами та зони з досліджуваним середовищем.

Відповідні функціям перетворення графіки ( у загальному вигляді ) зображено на рис.2 а,б,в).

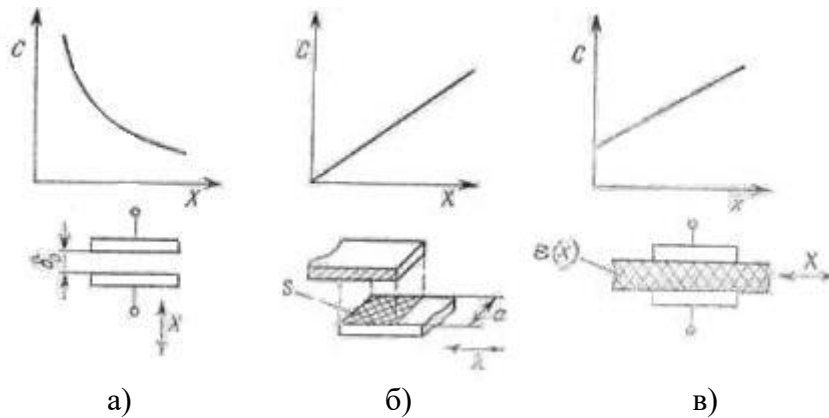


Рис.2 а,б,в).

Очевидно, що функція перетворення конденсатора, при зміні відстані між обкладинками, є нелінійною, а у решті випадків - лінійною.

Користуючись виразом (1) нескладно підрахувати, що при величині площі кожної пластини  $10 \text{ см}^2$  і відстані між пластинами 1 мм величина ємності конденсатора буде всього 8.85 пФ. А якщо відстань між пластинами збільшити до 10 мм, то ємність стане меншою за 1 пФ. Такі малі ємності сумірні з ємністю проводів та з ємністю між пластинами і близько розташованими частинами деталями. Все це знижуватиме точність вимірювання ємності такого конденсатора, а значить і точність визначення переміщень.

Для коаксіальних ємнісних перетворювачів, рис.3, величина ємності визначається згідно виразу:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(1 + \frac{d}{R_1}\right)} \quad (3)$$

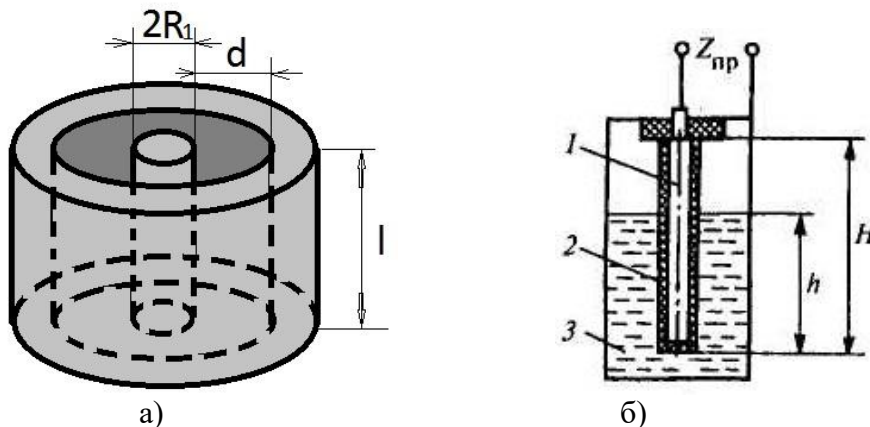


Рис.3 а,б). а) - схема коаксіального конденсатора :  $2R_1$  – діаметр внутрішнього електрода ;  $d$  – відстань між внутрішнім та зовнішнім електродами:  $l$  – висота електродів.  
б) – схема ємнісного перетворювача для вимірювання рівня рідини –  $h$ .

Вхідним сигналом у випадку б) можуть бути рівень рідини або зміна її діелектричної постійної, а вихідним сигналом – зміна ємності перетворювача.

Такий конденсатор може мати достатню ємність при значній його довжині та за суттєво більшої, ніж у повітря, діелектричної проникності. Найчастіше такий перетворювач використовують у ємнісних рівнемірах, наприклад, для вимірювання рівню бензину у високих баках.

Зовнішній вигляд деяких приладів із застосуванням ЄП наведено на рис.4 а,б,в).

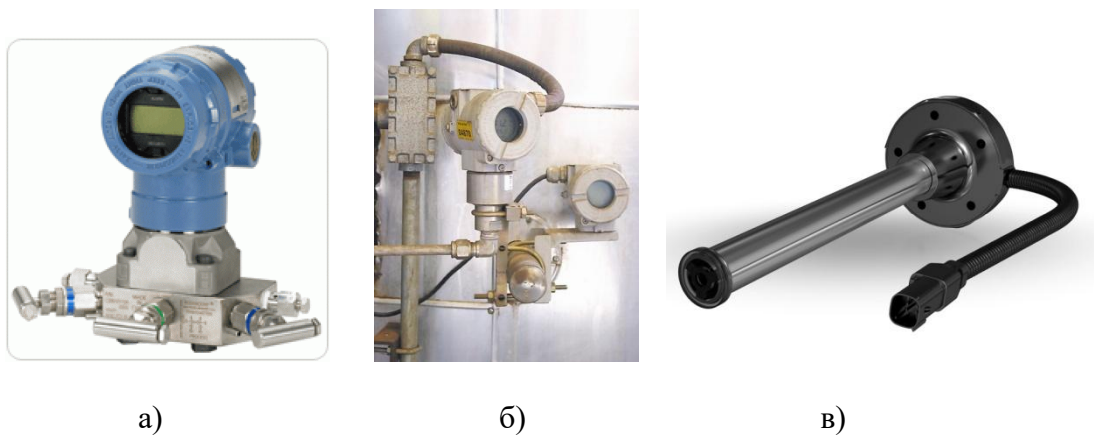


Рис. 2 а,б,в). Прилади з використанням ємнісних перетворювачів для контролю тиску – а,б) та рівня рідини – в).

ЄП застосовують як складову частину ємнісних манометрів, динамометрів, акселерометрів, віброметрів, перетворювачів переміщень, рівнів рідини, вологості, і т.д.

*Для одинарних ємнісних перетворювачів з нелінійною функцією перетворення відносна зміна відповідного параметра ( $\varepsilon$ ,  $\delta$ ,  $S$ ) не повинна перевищувати 10 – 15 %. В такому випадку функцією перетворення вважають практично лінійною.*

*Для більших величин відносних змін параметрів (до 40%) необхідно використовувати диференційні ємнісні перетворювачі.*

Диференційний ємнісний перетворювач, рис. 5 а) , складається із двох нерухомих

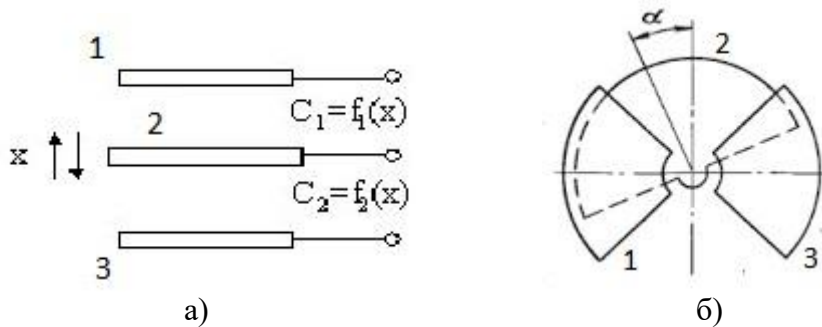


Рис.5 а,б) . Схеми диференційних ємнісних перетворювачів для лінійних - а) та кутових – б) переміщень.

електродів 1, 3 та одного рухомого електрода 2, закріпленого на пружинах. При переміщенні рухомого електрода 2 ємність між однією парою електродів зростає, а між іншою зменшується. При ввімкненні такого перетворювача у вимірювальне коло зростає його чутливість та зменшується нелінійність функції перетворення, також зменшується залежність її від зовнішніх факторів (вологість повітря ).

**Визначимо чутливість перетворювача** у залежності від виду вхідного сигналу (переміщення, зміна площі, зміна діелектричної сталості). Під чутливістю  $S$  будемо розуміти відношення відносної зміни ємності до відносної зміни вхідного сигналу. Тобто

$$\bar{S}_\delta = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta / \delta_0} - \text{чутливість ЄП до переміщення}; \quad (4)$$

$$\bar{S}_S = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta S / S_0} - \text{чутливість ЄП до зміни площі перекриття електродів}; \quad (5)$$

$$\bar{S}_\varepsilon = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \varepsilon / \varepsilon_0} - \text{чутливість до зміни діелектричної постійної}. \quad (6)$$

Для визначення значень приросту ємності  $\Delta C$  від  $\delta$ ,  $S$ ,  $\varepsilon$  візьмемо повний диференціал від виразу (1)

$$dC = \frac{\partial C}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial C}{\partial S} dS + \frac{\partial C}{\partial \delta} d\delta. \quad (7)$$

Оскільки  $dC \approx \Delta C$ , то можливо перейти до кінцевих приростів

$$\Delta C = \frac{S_0}{\varepsilon_0} \Delta \varepsilon + \frac{\varepsilon_0}{\delta_0} \Delta S - \frac{\varepsilon_0 S_0}{(\delta_0 + \Delta \delta)^2} \Delta \delta \quad (8)$$

Враховуючи, що

$$(\delta_0 + \Delta \delta)^2 = \left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2 \delta_0^2, \quad (9)$$

відносна зміна ємності

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{\varepsilon_0 S_0 \Delta \delta \cdot \delta_0}{\left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2 \delta_0 \varepsilon_0 S_0} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2} \frac{\Delta \delta}{\delta_0}. \quad (10)$$

Підставляючи (10) в (4,5,6), отримуємо:

$$\bar{S}_\delta = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta / \delta_0} = - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2}. \quad (11)$$

**Тобто, чутливість ЄП є нелінійною функцією від зміни відстані між електродами.**

$$\bar{S}_S = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta S / S_0} = 1, \quad (12)$$

$$\bar{S}_\varepsilon = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \varepsilon / \varepsilon_0} = 1. \quad (13)$$

**В той же час чутливість ЄП являється лінійною функцією від зміни активної площі електродів та діелектричної постійної, вирази (12, 13).**

У якості вихідного сигналу ємнісного перетворювача використовують також зміну його реактивного опору  $X_C$ :

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (14)$$

Отримаємо вирази для чутливості перетворювача у разі реактивного опору як вихідного сигналу. Для отримання значень приростів реактивного опору при змінах переміщень електродів, площі їх перекриття та зміни діелектричної постійної візьмемо повний диференціал від виразу (14).

$$dX_c = \frac{\partial X_c}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial X_c}{\partial S} dS + \frac{\partial X_c}{\partial \delta} d\delta \quad (15)$$

Перейшовши до кінцевих приростів зможемо отримати вирази для відносних чутливостей:

$$S_\delta^* = \frac{\Delta X_c / X_{c_0}}{\Delta \delta / \delta_0} = 1, \quad (16)$$

$$S_\varepsilon^* = \frac{\Delta X_c / X_{c_0}}{\Delta \varepsilon / \varepsilon_0} = - \frac{1}{\left[1 + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0}\right]^2}, \quad (17)$$

$$S_S^* = \frac{\Delta X_c / X_{c_0}}{\Delta S / S_0} = - \frac{1}{\left[1 + \frac{\Delta S}{S_0}\right]^2}. \quad (18)$$

Із виразів (16 – 18) видно, що у даному разі чутливість перетворювача є лінійною до зміни відстані між електродами та нелінійною функцією відносно змін активної площі та діелектричної постійної.

## Застосування ємнісних перетворювачів

### Ємнісні перетворювачі тиску

Чутливими елементами ЄП тиску є мембрани та діаграми, які перетворюють вимірюємий тиск у переміщення. Одночасно вони є рухомими електродами ЄП, рис. 6.

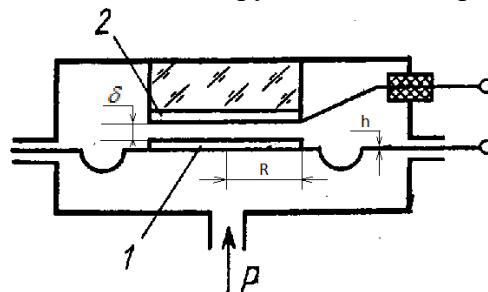


Рис.6 . Схема ємнісного перетворювача тиску.

Вимірюємий тиск  $P$  сприймається металевою діафрагмою, яка являється рухомих електродом 1 ЄП. Нерухомий електрод 2 ізолюється від корпусу ЄП кварцевим ізолятором.

Співвідношення між відносною зміною ємності та вимірюємим тиском  $P$  має наступний вид :

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{1}{16} \cdot \frac{(1 - \mu^2) R^4}{E \delta h^3} \cdot P, \quad (19)$$

$R$  – радіус мембрани ;  $h$  – товщина мембрани;  $\mu$  - коефіцієнт Пуасона;  $\delta$  відстань між мембранами при відсутності тиску. Із (1) слідує, що відносна зміна ємності ЄП пропорційна вимірюємому тиску і значною мірою залежить від параметрів мембрани. Такого типу ЄП застосовують для вимірювань тиску до 120 Мпа. Чутливість ЄП складає 0.5 – 1 пФ/Па при початковій ємності 10 – 20 пФ. Похибки вимірювань складають 1 – 2 %.

### Ємнісні перетворювачі рівнів

У рівнемірах даного типу використовують залежність електричної ємності перетворювача від рівня рідини або сипучих продуктів (зерно). Конструктивно їх виконують у виді коаксіально розміщених циліндричних або паралельно розміщених плоских електродів, рис.6 а,б).

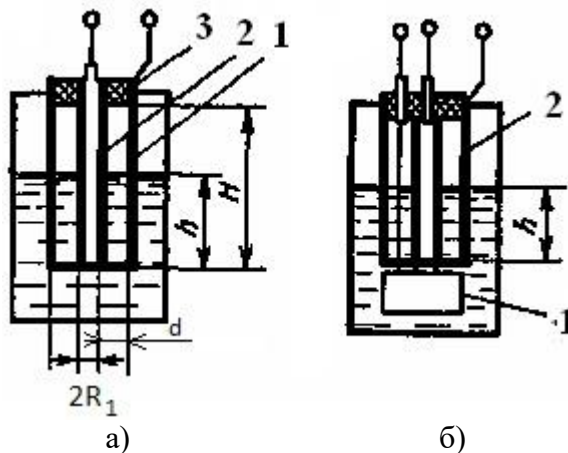


Рис.6 а,б). Рівнеміри без компенсації змін температури рідини – а) та з компенсацією змін температури – б).

Чутливий елемент ЄП складається із двох коаксіально розміщених електродів 1, 2, які частково занурені у рідину. Електроди створюють циліндричний конденсатор, між електродний простір якого заповнений контрольованою рідиною до висоти  $h$ , а простір  $H-h$  – сумішшю випарів рідини та повітря. Для фіксування електродів передбачено ізолятор 3.

Для такого ємнісного перетворювача повна ємність  $C_{\Pi}$  визначається виразом:

$$C_{\Pi} = C_0 + C_1 + C_2 \quad (20)$$

де  $C_0$  - ємність в зоні ізолятора 3 ;  $C_1$  – ємність міжелектродного простору, заповненого випарами рідини та повітря ;  $C_2$  – ємність міжелектродного простору, заповненого рідиною. З врахуванням виразу (3), що визначає ємність такого перетворювача, отримуємо :

$$C_{II} = \frac{2\pi\varepsilon_{i3}\varepsilon_0 l_0}{\ln(1 + \frac{d}{R_1})} + \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_0(H-h)}{\ln(1 + \frac{d}{R_1})} + \frac{2\pi\varepsilon_2\varepsilon_0 h}{\ln(1 + \frac{d}{R_1})} = C_0 + \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(1 + \frac{d}{R_1})} [\varepsilon_1 H - h(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)] \quad (21)$$

Наведене рівняння являє собою функцію перетворення ємнісного перетворювача для неелектропровідних середовищ. Величини  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  являються функціями температури, тому для виключення їх впливу на результат вимірювань застосовують компенсаційний конденсатор 1, рис.6 б). Такий конденсатор розміщують нижче ємнісного чутливого елемента і повністю занурюють в рідину.

Мінімальний діапазон вимірювань ємнісних рівнемірів складає 0 – 0.4 метри, а максимальний 0 – 20 метрів ; тиск робочого середовища 2.5 – 10 Мпа. Діапазон температур контрольованого середовища -60 - +250°C.

### Ємнісний перетворювач для вимірювання товщини плівки

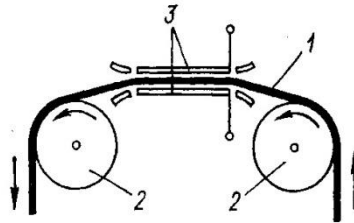


Рис.7.

Для вимірювання товщини  $x$  плівки 1 із діелектрика  $\varepsilon_x$  її протягують між електродами 3, відстань між якими  $\delta$ . Ємність перетворювача задовольняє виразу:

$$C = \frac{S}{\frac{\delta - x}{\varepsilon_0} + \frac{x}{\varepsilon_x}} \quad (22)$$

### Електричні вимірювальні кола ємнісних перетворювачів

Ємнісні перетворювачі вмикають в електричні вимірювальні кола, у яких зміна ємності перетворюється у зміну напруги, струму або частоти струму.

Одна із найпростіших схем зображена на рис. 8.

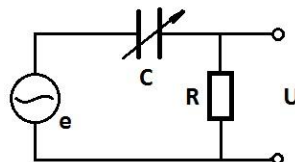


Рис.8. e – джерело живлення; C – ємнісний перетворювач; R – опір навантаження; U – вихідна напруга.

При зміні ємності C перетворювача відповідно змінюється величина струму в електричному колі, а значить і величина падіння напруги на опорі навантаження R.

Недолік такої схеми вимірювання полягає у залежності вихідної напруги  $U$  від стабільності напруги джерела живлення. При зміні напруги або частоти джерела живлення відбуваються зміни вихідної напруги та частоти на опорі навантаження, що приводить до похибок вимірювання.

На рис.9 показана схема вимірювального кола, побудованого за принципом дільника напруги.

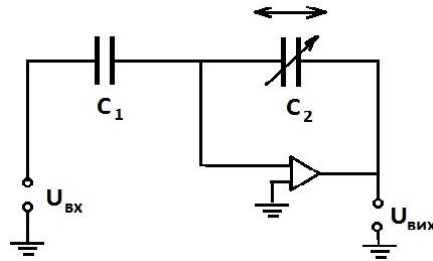


Рис.9

Такі вимірювальні кола застосовують у перетворювачах лінійних переміщень, що викликають зміну проміжку  $\delta$  між обкладками змінного конденсатора  $C_2$ . У даному разі вихідна напруга є лінійною функцією величини проміжку:

$$U_{вих} = U_{вх} C_1 \frac{\delta_2}{\epsilon_2 S_2} \quad (23)$$

Оскільки ємності більшості перетворювачів дуже малі (десятки пікофарад) то для забезпечення необхідної потужності вихідного сигналу схему живлять від генератора високої частоти та застосовують високочутливий підсилювач.

Для одинарних ємнісних перетворювачів можливе застосування резонансного електричного кола, рис.10.

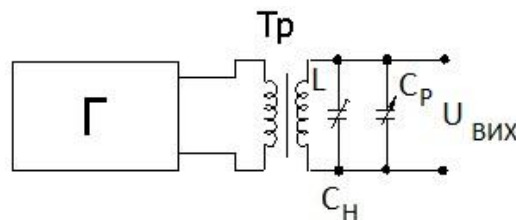


Рис.10. Резонансне вимірювальне коло.

Через роздільний трансформатор  $Tr$  генератор  $\Gamma$  живить резонансний LC контур. Ємність контура складається із змінної ємності самого перетворювача  $C_p$  та ємності допоміжного настроєчного конденсатора  $C_n$ .

У разі зміни ємності перетворювача напруга у контурі змінюється по резонансній кривій, рис.11.

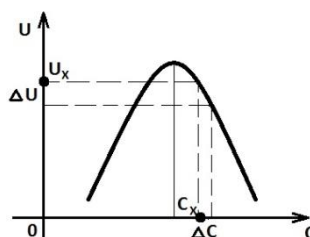


Рис.11 . Резонансна крива.



Так при зміні ємності на деяку величину  $\Delta C$  напруга у контурі зміниться на  $\Delta U$  (вихідний сигнал).

Диференційні ємнісні перетворювачі вмикають звичайно у мостові вимірювальні кола, рис.12 .

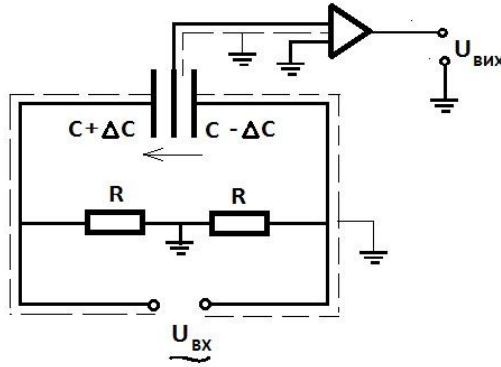


Рис.12.

У даному разі зростає чутливість ємнісного перетворювача, зменшується нелінійність функції перетворення та залежність від зовнішніх факторів ( наприклад, зміна вологості повітря ).

До недоліків слід віднести необхідність роботи на високій частоті джерела напруги ( біля 400 Гц) та необхідність екранувати провідники від зовнішнього електромагнітного поля. Окрім того зміна температури навколишнього середовища приводить до зміни відстані між електродами, що приводить до температурної похибки.

### Переваги застосування ємнісних перетворювачів.

1. Конструкція ЄПП досить проста, має малу масу та розміри;
2. ЄПП можливо виконати з заданою лінійністю або не лінійністю функції перетворення. Для цього достатньо змінити форму електродів;
3. Мала сила притягання електродів.

### Недоліки ЄПП.

1. Мала ємність перетворювачів;
2. Результати вимірювань залежать від зміни параметрів кабеля.

### Похибки ЄПП.

1. Зміни навколишньої температури приводять до зміни відстані між електродами , що приводить до температурних похибок;
2. Оскільки повна ємність ЄПП міняється у присутності по сторонніх металевих предметів, то сам перетворювач,, а також електричні кабелі слід екранувати. Ємність може також змінюватись під впливом зміни вологості повітря , вібрації.