# Лекція 11

# Розділ 6. ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ЄП)

## 6.1. Загальна характеристика ЄП

Ємнісні вимірювальні перетворювачі використовуються для перетворення лінійних або кутових переміщень, тисків, вібрацій, прискорень, рівнів рідини в електричний сигнал [1, 3, 15 – 17, 30, 43, 45, 46, 51, 67]. ЄП застосовують для контролю швидкозмінних процесів, пульсуючих тисків, вібрацій, як перетворювачі непогодження, а також у випадках, коли потрібне мінімальне навантаження переміщуваних деталей або мають бути відсутні механічні зв'язки. В авіаційній техніці широко використовуються ємнісні паливоміри.

ЄП являє собою конденсатор, що складається з двох чи більше пластин, відокремлених одна від одної шаром повітря чи іншим діелектриком.

Основні переваги ЄП:

– висока чутливість;

– невеликі маса та габаритні розміри;

– мале значення зворотної дії.

Недоліки ЄП [51, 67]:

– високий внутрішній опір, що робить його малопотужним, а головне, дуже сприйнятливим до впливу завад і наводок;

– відносно невисока стабільність крутості характеристики в зв'язку із зміною геометричних розмірів ЄП при дії температури, а діелектричної проникності – при дії вологості;

– значний вплив паразитних ємностей, зокрема ємності екранованого проводу (екранування обов'язкове в зв'язку з великим впливом завад і наводок), який з'єднує ЄП з іншими елементами схеми;

– необхідність роботи на порівняно високій частоті (від одиниць кілогерц і вище), яка змушує застосовувати спеціальне джерело живлення ЄП, стабілізоване за напругою й частотою;

– для зняття сигналу з ЄП потрібно мати високочутливий вторинний перетворювач з великим вхідним опором.

Практично ЄП – це конденсатор змінної ємності, керований вхідною величиною (звичайно переміщенням).

## 6.2. Основні конструктивні різновиди ЄП

Ємність будь-якого конденсатора у фарадах залежить від трьох основних параметрів: площі пластин *S*, відстані *δ* між пластинами і діелектричної проникності середовища *ε* між пластинами конденсатора:



Із наведеної формули бачимо, що зміни ємності можна досягти, змінивши значення однієї з величин *δ*, *S* або *ε.* Прологарифмуємо вираз для *С*:



Продиференціювавши і перейшовши до запису в частинних приростах, дістанемо



Якщо



то маємо варіант конструкції ЄП із змінним зазором, або із змінною відстанню між пластинами (рис. 6.1, а, б):





Рис. 6.1. Ємнісний перетворювач із змінним зазором:   
а – конструкція; б – характеристика

Якщо



то можна дістати варіант конструкції ЄП із змінною площею взаємного перекриття пластин (рис. 6.2, а, б):





Рис. 6.2. Ємнісний перетворювач із змінною площею:   
а – конструкція; б – характеристика

Якщо



то можна дістати варіант конструкції ЄП із змінною діелектричною проникністю (рис. 6.3, а, б):





Рис. 6.3. Ємнісний перетворювач із змінною діелектричною   
проникністю середовища: а – конструкція; б – характеристика

Ємнісні перетворювачі зі змінною діелектричною проникністю застосовуються значно рідше за інші.

На рис. 6.1, а показано схему ЄП зі змінним зазором *δ.* Характеристика цього датчика *С*=*f*(*δ*) при сталих значеннях *ε* та *S* змінюється за гіперболічним законом (див. рис. 6.1, б).

На рис. 6.2, а зображено схему ЄП із змінною площею взаємного перекриття пластин. Його характеристика *С*=*f*(*S*) змінюється майже лінійно (див. рис. 6.2,6).

На рис. 6.3, а показано схему ЄП із змінною діелектричною проникністю. Його характеристика *С* = *f*(*ε*) при сталих значеннях *δ* і *S* також змінюється лінійно (див. рис. 6.3, б).

Щоб збільшити чутливість ЄП, застосовують диференціальні конструкції з рухомою середньою пластиною і змінним зазором (рис. 6.4). Під час переміщення середньої пластини ємність однієї половини такого перетворювача зростає, а другої половини зменшується, тобто чутливість такого диференціального ЄП порівняно з простим перетворювачем збільшується.



Рис. 6.4. Диференціальний ємнісний перетворювач із   
змінним зазором

Для диференціального ЄП ємність кожної з його половин



Щоб збільшити потужність вихідного сигналу, відстань *δ*0 між пластинами потрібно вибирати мінімальною. Проте при цьому зменшується і можливе переміщення рухомої пластини.

На рис. 6.5 зображено диференціальний ЄП із змінною площею взаємного перекриття пластин. Ємність кожної з його половин



де *Ψ* – кут повороту середньої пластини, що переміщується в межах ±*π*/2.



Рис. 6.5. Диференціальний ємнісний перетворювач із змінною площею

## 6.3. Основні схеми ввімкнення ЄП

Для перетворення зміни ємності у відповідні зміни сили струму, напруги або частоти найчастіше застосовують мостову або резонансну схему вмикання ЄП.

Мостову схему ввімкнення зображено на рис. 6.6. За середнього положення рухомої пластини, коли *С*12=*С*13, тобто приріст Δ=0, міст збалансований і напруга на його виході дорівнює нулю.



Рис. 6.6. Мостова схема ввімкнення ЄП

У разі зміщення пластини *С*12=*С*0+Δ*С*; *С*13=*С*0–Δ*С*. На виході мосту виникне напруга *U*вих.

Визначимо залежність вихідної напруги від зміщення рухомої пластини за припущення, що міст навантажено на опір, який дорівнює нескінченності, тобто *R*н=∝. Практично це відповідає випадку, коли вихідна напруга *U*вих подається на вхід підсилювача. При цьому величина *U*вих визначається за виразом (тут маємо справу з комплексним значенням вихідної напруги)



або згідно із схемою на рис. 6.6



де *ω*0*–* кутова частота напруги живлення.

Підставивши сюди значення С12 і С13, дістанемо



Припускаємо, що зміна ємності Δ*С* в разі переміщення середньої пластини невелика, тобто Δ*С*<<*С*0*.* Отже, в знаменнику доданком, що містить Δ*С*2, можна знехтувати, і тоді наближено вихідна напруга



У тому разі, коли ЄП виконано як перетворювач кутового переміщення, маємо



Згідно з цим вираз вихідної напруги набирає вигляду



Після нескладних перетворень можна знайти модуль вихідної напруги



або



Щоб визначити умови максимальної крутості характеристики, розв'язуємо рівняння *dU*вих/*dR* =0; маємо



Прирівнюючи здобутий вираз до нуля і розв'язуючи відносно *R,* маємо умову максимальної крутості характеристики схеми *R*=1/(*ω*0*C*0), за якої формула для визначення вихідної напруги набирає вигляду



Резонансну схему вмикання ЄП показано на рис. 6.7. У такій схемі ЄП – елемент резонансного контуру, і зміна ємності ЄП спричиняє зміну резонансної частоти, що, у свою чергу, приводить до зміни амплітуди струму, який протікає по контуру.



Рис. 6.7. Резонансна схема ввімкнення ЄП

Генератор 1 високої частоти живить індуктивне пов'язаний з ним контур, що складається із індуктивності *L,* змінного конденсатора підстроювання *С* і ЄП *Сx* Напруга *Ux*, що знімається з контуру, підсилюється підсилювачем 2 і вимірюється гальванометром 3. За допомогою конденсатора підстроювання *С* контур за середнього положення рухомої пластини ЄП настроюється на частоту, близьку до резонансної з частотою генератора. При цьому домагаються такого настроювання, щоб напруга, яка знімається з контуру, дорівнювала приблизно половині напруги при резонансі *U*р*.* У цьому разі робоча точка *N* характеристики схеми, показаної на рис. 6.8, розміщена на лінійній частині половини резонансної кривої. Цим забезпечується лінійна залежність і однозначність показів гальванометра як функції від зміни ємності ΔС*x*. ЄП під час переміщення його рухомої пластини і, крім того, досягається стійкість роботи схеми. Із цих міркувань положення робочої точки у точці *N* вигідніше, ніж у точці *М*, хоча напруга на виході схеми і буде вдвічі меншою.

Роботою на резонансній ділянці характеристики досягається висока чутливість схеми. Невелика зміна положення рухомої пластини ЄП спричиняє різку зміну вихідної напруги, що знімається зі схеми.

Якщо відома ємність *Сx* ЄП і знехтувати значенням активного опору, то можна легко вибрати параметри контура *L, С,* з умови резонансу



де *ω*0 – частота резонансного контуру, що дорівнює частоті генератора, який живить схему.



Рис. 6.8. Вихідна характеристика резонансної схеми   
ввімкнення ЄП

Недолік резонансної схеми – необхідність стабілізувати частоту напруги живлення.

Величина зворотного впливу ЄП визначається силою електростатичного притягання між пластинами, Н або Гн,



де *W*е – енергія електростатичного поля, Дж; *δ –* зазор, м; *С* – ємність, ф; *U*0 – напруга джерела живлення, В.

Середня за період величина сили дорівнює половині її амплітудного значення. Для диференціального датчика потрібно визначати різницю сил взаємодії рухомої пластини з двома нерухомими.

Використовувати ЄП на промисловій частоті практично неможливо. Справді, ємність основного типу змінного (повітряного) конденсатора без значного збільшення його габаритних розмірів не перевищує 100...200 пФ. Опір ЄП з ємністю *С*=100 пФ=100⋅10-12 Ф на промисловій частоті *f* =50 Гц визначається як



Таке велике значення опору ЄП виключає можливість його практичного застосування для вимірювальних цілей через сильний вплив паразитних параметрів (витікання тощо).

Потужність, що споживається при цьому ЄП,



де *U –* напруга живлення, взята такою, що дорівнює 100 В.

Природно, що потужність, яка віддається ЄП у колі навантаження, має бути ще меншою.

З підвищенням частоти живлення ЄП недоліки, проілюстровані прикладом, згладжуються. Проте вони лишаються істотними, коли взяти до уваги, що на практиці уникають використовувати частоту живлення понад 50...60 кГц, оскільки з підвищенням частоти все важче діставати суворо пропорційне зусилля та перетворювати сигнал. В авіаційній техніці, як уже зазначалося, великого поширення набули ємнісні паливоміри [3], в основу цих приладів покладено ЄП, що грунтуються на зміні діелектричної проникності. Такий ЄП являє собою циліндричний конденсатор з внутрішнім електродом, зовнішнім та ізоляційним шарами. Між ізоляційним шаром і зовнішнім електродом міститься шар рідини, рівень якої потрібно виміряти. Ємність змінюється в результаті зміни діелектричної проникності конденсатора, якщо змінюється рівень рідини палива.

Ємнісні паливоміри використовують для вимірювання кількості всіх видів палива, але вони майже незамінні при вимірюванні кількості хімічно активних рідин, що застосовуються як паливні компоненти в двигунах. Істотні переваги мають ємнісні паливоміри порівняно з поплавковими: відсутність у чутливому елементі (яким є ЄП) рухомих частин, менші похибки під час кренів і прискорень літака.

До ЄП ставлять такі вимоги:

– всі елементи мають бути ізольовані один від одного;

– геометричні розміри не повинні змінюватися від температури, вологості, часу, динамічних навантажень.

Звичайно ЄП вмикають в мостову схему. Оскільки внутрішній опір їх великий, а власна ємність невелика, потрібно ретельно екранувати всі підвідні проводи, щоб уникнути наводок, усувати паразитні витікання, що шунтують робочу ємність; вторинний перетворювач, підключений до вимірювальної діагоналі мосту, має споживати незначну потужність, тобто мати великий вхідний опір.

Щоб збільшити ємність, іноді вдаються до паралельного з'єднання ЄП з однойменно зарядженими обкладками



де *Сi* – ємність *і*-го ЄП.

Для зменшення ємності іноді вдаються до послідовного з'єднання ЄП з різнойменно зарядженими обкладками:

