

## Лекция №12.

### Ёмкостные преобразователи

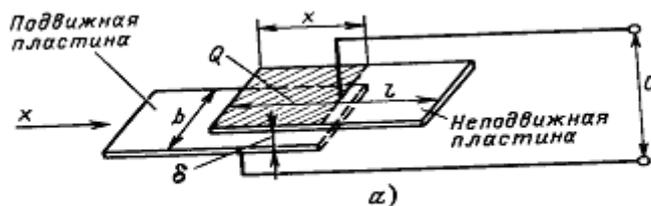
Ёмкостный преобразователь представляет собой конденсатор, электрические параметры которого изменяются под действием входной величины. Конденсатор состоит из двух электродов, к которым подсоединены выводные концы. Пространство между электродами может быть заполнено диэлектриком. При изменении взаимного положения электродов или при изменении диэлектрической проницаемости среды, заполняющей межэлектродное пространство, изменяется ёмкость конденсатора.

В качестве ёмкостного преобразователя часто используют плоский конденсатор. Его ёмкость определяется выражением:

$$C_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_0}{\delta}, \quad (12.1)$$

где  $\delta$  — расстояние между электродами;  $S_0$  — их площадь;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon$  — относительная проницаемость диэлектрика.

Изменение любого из трёх параметров ( $\delta$ ,  $S_0$ ,  $\varepsilon$ ) изменяет ёмкость конденсатора. У преобразователя с прямоугольными электродами площадью  $S_0 = bx$  имеется некоторый диапазон перемещения пластин  $x$ , в котором ёмкость линейно зависит от  $x$ :  $C = \varepsilon\varepsilon_0 bx/\delta$ . Искривлением линейной зависимости вследствие краевого эффекта пренебрежём.



В области линейной зависимости чувствительность такого преобразователя постоянна и увеличивается с уменьшением расстояния между электродами  $\delta$ :

$$S = dC/dx = \varepsilon\varepsilon_0 b/\delta. \quad (12.2)$$

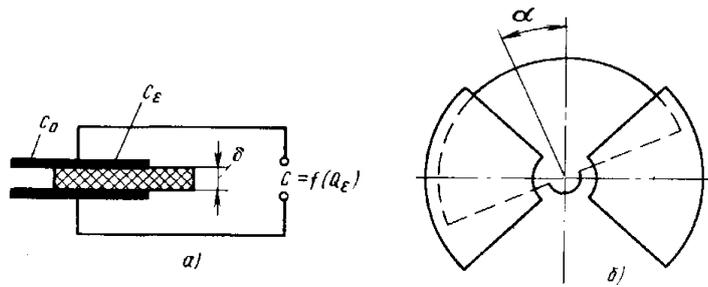
Обычно этот тип датчика реализуется в виде поворотного конденсатора для измерения угловых смещений, а не в виде варианта со сдвигом, приведённого на рисунке.

Если изменяется расстояние  $\delta$  между электродами, функция преобразования  $C = f(\delta)$  — не линейна и представляет собой гиперболическую характеристику. Чувствительность такого преобразователя:

$$S = \left| \frac{dC}{d\delta} \right| = \varepsilon\varepsilon_0 S_0 / \delta^2 = C_0 / \delta \quad (12.3)$$

сильнее, чем в предыдущем случае, зависит от расстояния между пластинами  $\delta$ . Для увеличения чувствительности целесообразно уменьшение  $\delta$ , т. к. чувствительность возрастает как  $1/\delta^2$ . Предельное значение  $\delta$  определяется технологическими параметрами и приложенным напряжением. Следует учесть, что при большой напряжённости поля возможен электрический пробой воздушного промежутка.

Если перемещать диэлектрическую пластину в зазоре плоского конденсатора (см. рисунок *a*), то можно получить преобразователь с переменной диэлектрической проницаемостью.



Ёмкость такого преобразователя определяется как ёмкость двух параллельно включённых конденсаторов. Один из них  $C_\epsilon$  образован частью электродов и диэлектрической пластиной, другой  $C_1$  — оставшейся частью электродов с межэлектродным пространством, не заполненным пластинкой. Если пластинка с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  имеет толщину  $\delta$ , равную расстоянию между электродами, то функция преобразования преобразователя описывается выражением:

$$C_0 = C_1 + C_\epsilon = \frac{\epsilon_0 S_1}{\delta} + \frac{\epsilon \epsilon_0 S_\epsilon}{\delta} = \frac{\epsilon_0}{\delta} (S_1 + \epsilon S_\epsilon) = \frac{\epsilon_0}{\delta} [S_0 + (\epsilon - 1) S_\epsilon] \quad (12.4)$$

где  $S_0$  — площадь электродов;  $S_\epsilon$  — часть площади диэлектрической пластины, находящаяся между электродами;  $S_1 = S_0 - S_\epsilon$ ;  $S_\epsilon = bx$ .

Чувствительность такого датчика постоянна и равна:

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{\partial C}{\partial S_\epsilon} \cdot \frac{\partial S_\epsilon}{\partial x} = (\epsilon - 1) \cdot b \cdot \frac{\epsilon_0}{\delta}. \quad (12.5)$$

Датчик с диэлектриком может быть реализован в другой модификации. Например, в форме двух concentric cylinders, и использован для измерения уровня жидкости в резервуаре. Непроводящая жидкость играет роль диэлектрика.

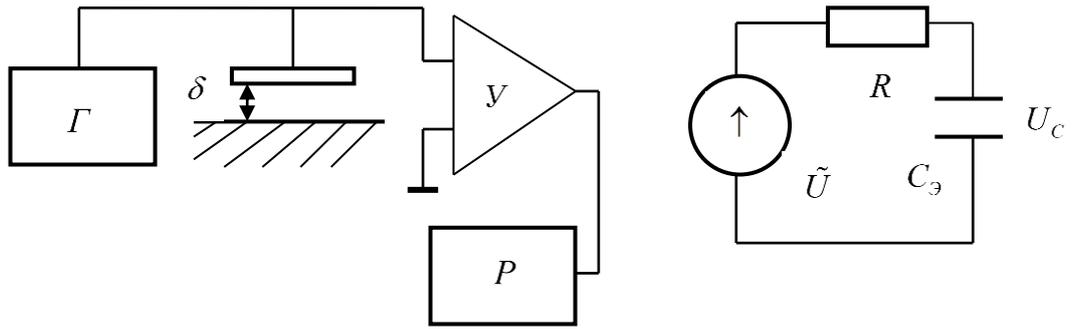
Ёмкостные преобразователи могут выполняться по дифференциальной схеме. Схема дифференциального преобразователя углового перемещения  $\alpha$  с переменной площадью электродов приведена на рисунке б). В таких преобразователях средний подвижный электрод обычно соединяется с экранной обмоткой кабеля.

## Схемы включения

Для ёмкостных преобразователей применяют два принципиально различных вида измерительных схем — амплитудные и частотные. Первые обеспечивают преобразование ёмкости в амплитуду выходного переменного напряжения. Вторые представляют собой колебательный контур, входящий в состав измерительного генератора, и преобразуют изменение ёмкости в изменение частоты выходного напряжения.

Обычно ёмкостные датчики питают переменным током высокой частоты  $\omega = 2\pi f$ , которая должна значительно превышать наибольшую частоту  $\Omega$  изменения ёмкости под действием измеряемой величины. Ёмкости большинства преобразователей составляют 10–100 пФ, и поэтому даже при относительно высоких частотах питающего напряжения ( $f = 10^5 - 10^7$  Гц) их выходные сопротивления велики и равны  $|Z_c| = \frac{1}{\omega C} \approx 10^3 - 10^6$  Ом. Выходные мощности ёмкостных преобразователей, напротив, невелики, и в измерительных цепях необходимо применение усилителей. Допустимые значения напряжения питания ёмкостных преобразователей достаточно велики, и напряжение питания, как правило, ограничивается не возможностями преобразователя, а условиями реализации измерительной цепи.

Оценим параметры простейшего преобразователя малых перемещений, схематическая конструкция которого и эквивалентная схема показаны на рисунке.



Здесь  $\tilde{U} = U_0 e^{j\omega t}$  — напряжение питающего генератора;  $C_з = C_0 + C_n + C_y^{вх}$ ;  $C_0$  — собственная ёмкость преобразователя;  $C_n$  — паразитные ёмкости монтажа и электрического кабеля;  $C_y^{вх}$  — входная ёмкость усилителя;  $R$  — выходное сопротивление генератора (значениями сопротивления изоляции кабеля, сопротивления утечки между электродами и входного сопротивления усилителя пренебрежём).

Очевидно, отношение напряжения на электродах датчика  $\tilde{U}_c$  к питающему напряжению  $\tilde{U}$  определяет частотный коэффициент передачи, равный:

$$\frac{\tilde{U}_c}{\tilde{U}} = K(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC_з}. \quad (12.6)$$

С учётом формулы ёмкости плоского конденсатора (13.1) получим, что чувствительность датчика по напряжению будет зависеть от частоты следующим образом:

$$S = \left| \frac{dU}{d\delta} \right| = \left| \frac{\partial U}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial \delta} \right| = \frac{U_0}{\delta} \frac{\omega RC}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)}. \quad (12.7)$$

Определим частоту питания датчика, соответствующую максимуму чувствительности, из условия:  $dS/d\omega = 0$ . Отсюда получаем:  $\omega RC = 1$ , или  $\omega = 1/RC$ .

Для датчика с параметрами: воздушный зазор  $\delta = 0,1$  мм, площадь пластины  $S_0 = 1$  см<sup>2</sup>,  $R \square Z = 10^4$  Ом, получим частоту питания  $\omega = 10^7$  1/с. При напряжении питания  $U_0 = 100$  В ей будет соответствовать чувствительность датчика, равная  $S = U_0 / 2\delta = 500$  В/мм.

На практике достижение такой высокой чувствительности затруднено рядом причин: необходимостью обеспечения равномерности малого зазора в диапазоне единиц и десятков мкм, возможным изменением межэлектродного зазора вследствие линейного расширения под действием температуры, наличием паразитных ёмкостей, тоже зависящих от температуры, наконец, необходимостью защиты измерительных цепей от наводок. Для уменьшения погрешностей измерительные цепи, включая усилитель сигналов, располагают вблизи датчика.

Для включения недифференциального ёмкостного преобразователя может использоваться резонансная цепь. Генератор через разделительный трансформатор питает резонансный  $LC$  — контур, ёмкость которого состоит из ёмкости преобразователя  $C_{пр}$  и ёмкости подстроечного конденсатора  $C^*$ . При изменении ёмкости напряжение на контуре изменяется по резонансной кривой. Изменение ёмкости датчика на  $\Delta C$  изменяет напряжение на контуре на  $\Delta U$ . Подстроечный конденсатор обеспечивает настройку контура так, чтобы чувствительность измерительной цепи  $S = \Delta U / \Delta C$  была

максимальной. Чувствительность резонансной цепи довольно высока и увеличивается с увеличением добротности контура.

Дифференциальные ёмкостные датчики включают преимущественно в мостовые измерительные цепи, позволяющие уменьшить аддитивные составляющие температурных погрешностей и получить линейную характеристику в достаточно большом диапазоне перемещений при увеличении чувствительности вдвое.

Достоинства ёмкостных датчиков — простота конструкции, малые размеры и масса, высокая чувствительность, возможность измерения быстропеременных величин в широком интервале частот делают их незаменимым инструментом в научных исследованиях. Однако особенности их использования в сложных условиях измерений (высокие и низкие температуры, ионизирующие излучения) требуют высокой квалификации персонала.