

Лабораторная работа № 2.
Моделирование емкостных датчиков.

Часть 1. Теоретические сведения о работе емкостных датчиков.

Емкостные датчики являются одними из самых распространенных датчиков в силу своей технологичности и высокой чувствительности. Чувствительным элементом емкостных датчиков являются конденсаторы. Для плоских конденсаторов (рис. 1а, б) емкость

$$C = \varepsilon \cdot S / d \quad (1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды (табл.1), S и d - площадь перекрытия пластин и расстояние между пластинами. Если какой-либо параметр конденсатора (например, площадь перекрытия пластин) зависит от внешнего воздействия, то на основе конденсатора можно построить емкостной сенсор.

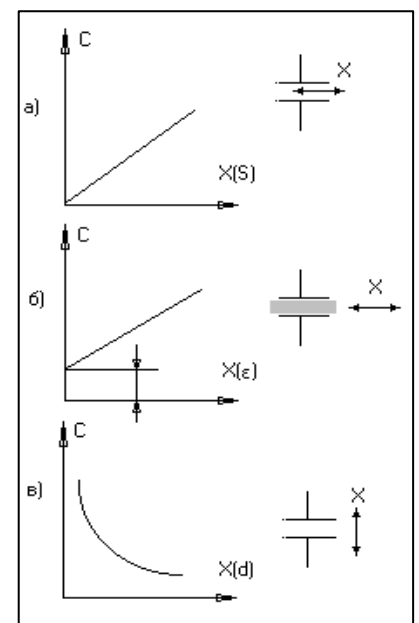
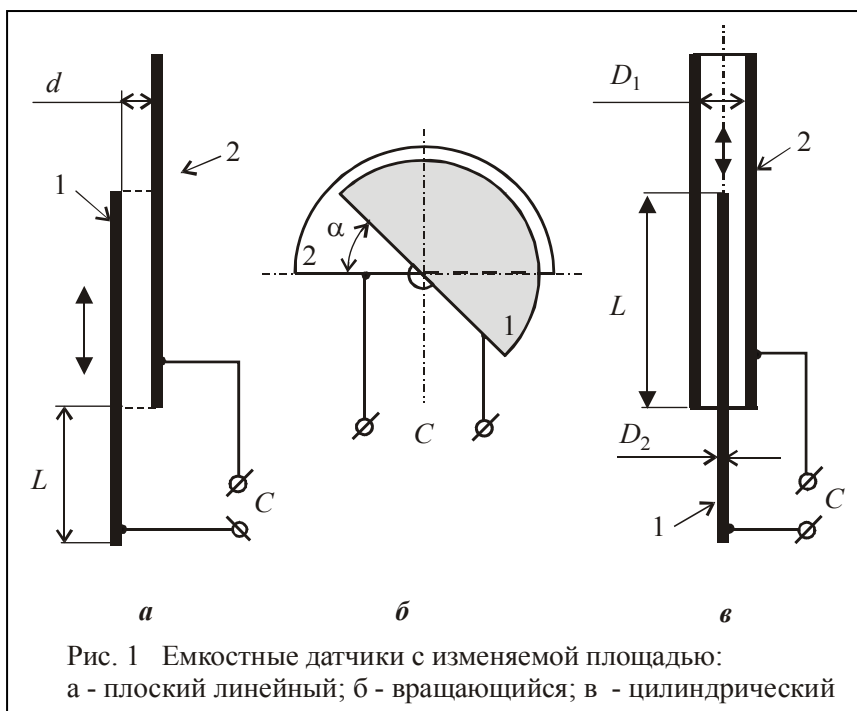


Рис.2 Характер изменения емкости от входного воздействия:
а) для датчиков с параметром S ;
б) для датчиков с параметром ε ;
в) для датчиков с параметром d .

Относительное изменение емкости плоского конденсатора, т.е. чувствительность емкостного сенсора, определяется выражением:

$$\gamma_C = \gamma_\varepsilon + \gamma_S - \gamma_d$$

где $\gamma_\varepsilon, \gamma_S, \gamma_d$ - относительные изменения диэлектрической проницаемости, площади, зазора. Необходимо учитывать, что величина диэлектрической проницаемости материала в значительной степени зависит от температуры и влажности. Наиболее стабильными диэлектриками являются воздух ($\gamma_\varepsilon(T) = 10^{-6} K^{-1}$), кварц ($\gamma_\varepsilon(T) = 5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), стекло. Напротив, диэлектрическая проницаемость других материалов, в т.ч. и керамических материалов, в сильной степени зависит от температуры, гидростатического давления и напряженности электрического поля.

Емкостные сенсоры могут быть однополярными (с одним конденсатором), дифференциальными и мостовыми. Однополярные емкостные сенсоры проще, но два последних типа сенсоров позволяют получить более высокие технические характеристики.

Наряду с плоскими конденсаторами для измерения перемещений широко используются цилиндрические конденсаторы (рис.1в), которые состоят из двух коаксиальных цилиндров с диаметрами D_1, D_2 . Емкость такого конденсатора зависит от взаимного расположения внешнего и внутреннего цилиндров

$$C = \frac{2\pi\varepsilon L}{\ln(D_1 / D_2)} \quad (2)$$

где L -зона перекрытия цилиндров. Если внутренний цилиндр может вдвигаться и выдвигаться относительно внешнего, то на основе такой конструкции можно построить датчик линейных перемещений с линейной передаточной характеристикой. Достоинством цилиндрического датчика является технологичность, высокие жесткость, чувствительность и независимость емкости от поперечного смещения цилиндров.

На однополярных емкостных сенсорах реализуются разнообразные бесконтактные датчики приближения, присутствия, движения и т.д. Принцип работы

этих датчиков заключается в измерении емкости или электростатических полей между опорным электродом (пластиной) и объектом, который играет роль второго электрода.

Для измерения малых перемещений (10^{-3} –1) мм используются датчики с переменным зазором (рис.3а). Т.к. в плоском конденсаторе чувствительность к зазору

$$\gamma_d = \frac{\varepsilon \cdot S}{d^2},$$

то для повышения чувствительности целесообразно уменьшать зазор. . Например, для воздушного конденсатора с $S=100 \text{ мм}^2$ и зазором в 10 мкм $\gamma_d \approx 10 \text{ пФ/мкм}$. Минимальная величина зазора ограничивается пробивным напряжением (для сухого воздуха напряженность поля в зазоре не должна превосходить 50-100 В/мкм) и может составлять величины порядка единиц микрона

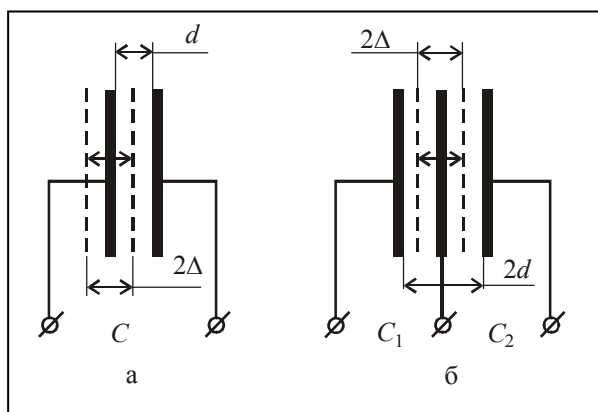


Рис.3 Емкостный датчик с переменным зазором:

а - однополярный; б-дифференциальный.

Более высокими характеристиками обладают дифференциальные емкостные датчики с переменным зазором (рис.3б) и переменной площадью (рис.4). При включении дифференциальных датчиков в измерительную цепь

$$U_{\text{вых}} = E \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} E \cdot \left(1 + \frac{\Delta y}{d} \right) \quad (3)$$

и выходной сигнал не зависит от диэлектрической проницаемости среды.

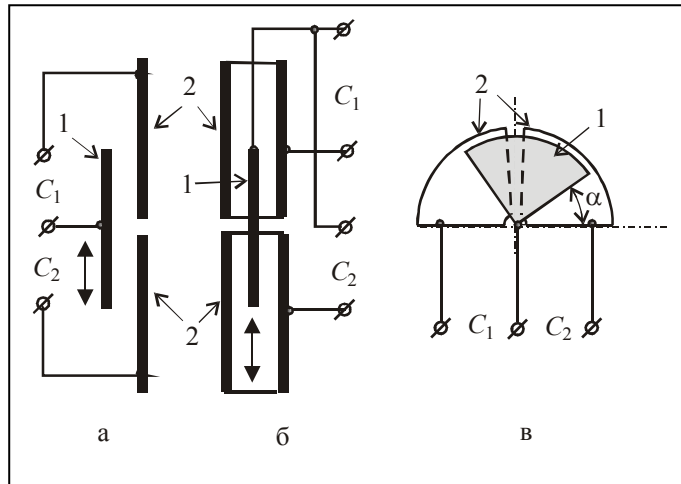


Рис.4 Дифференциальные емкостный датчик с переменной площадью и постоянным зазором: а – плоский; б - цилиндрический; в – вращающийся

Т.к. емкости сенсоров сравнительно невелики (10-100 пФ), то их выходной импеданс даже при высокочастотной запитке (10^6 - 10^7 Гц) достаточно высок (10^5 - 10^7 Ом). Основная трудность построения измерительных цепей емкостных сенсоров при указанных условиях заключается в их защите от наводок и помех с помощью экранов. Однако экранирующие провода имеют погонную емкость порядка $C_3 = 50$ пФ/м, которая при неудачном заземлении может оказаться включенной параллельно емкости сенсора и вследствие своей нестабильности, исказить результат измерения на величину

$$\delta = \frac{\Delta C_0}{C_0} - \frac{\Delta C_0}{C_0 + C_3}$$

На рис.5 приведена схема емкостного делителя на ОУ с передаточной функцией

$$W = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{pR_2C_1}{1 + pR_2C_2}$$

В схеме R_2 – организует ОС по постоянному току, а емкости экранированных проводов практически не оказывают влияния на передаточную характеристику (C_{31} , C_{33} – включены параллельно низкоимпедансным источникам, а на C_{32} – напряжение близко к нулю). Т.к. в рабочей полосе частот $\omega \gg 1/R_2C_2$, то

$$W = -\frac{C_1}{C_2}$$

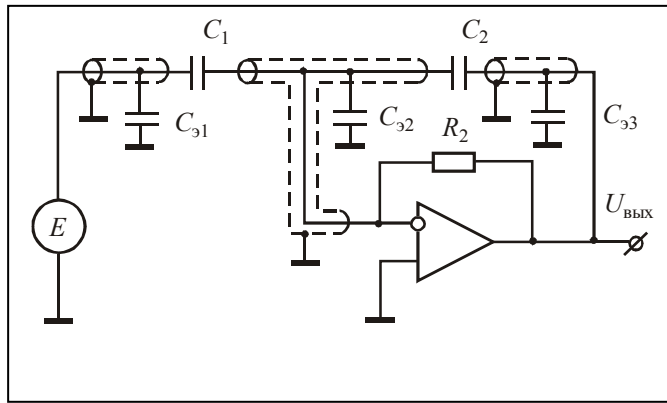


Рис.5. Подключения однополярного емкостного датчика.

Передаточная функция линейна к перемещению, если

- C_1 – конденсатор с изменяемой площадью, а $C_2 = \text{const}$,
- $C_1 = \text{const}$, а C_2 – конденсатор с переменным зазором.

Дифференциальные сенсоры включаются преимущественно в мостовые и потенциометрические измерительные схемы. Для потенциометрической схемы с трансформаторной запиткой (рис.6) емкости экранов не оказывают существенного влияния, т.к. C_{33} имеет потенциал виртуального нуля, а C_{31} и C_{32} включены параллельно обмоткам трансформатора с низким выходным импедансом.

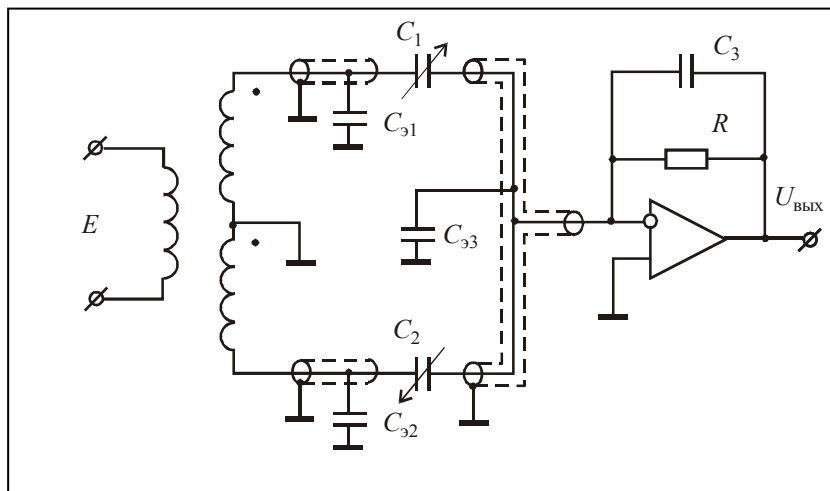


Рис.6. Схема подключения дифференциального емкостного датчика

В рабочей полосе частот

$$U_{\text{вых}} = E \frac{C_1 - C_2}{C_3} = 2E \cdot C_0 \frac{\delta C_0}{C_3} \quad (4)$$

где C_0 -номинальные значения емкости датчика, δC_0 -относительное изменение емкости датчика. Мостовые измерительные схемы достаточно просты и обеспечивают чувствительность на уровне (10^{-4} - 10^{-3}). Для более чувствительных измерений (до 10^{-6}) используются резонансные методы.

Емкостные сенсоры обладают рядом достоинств:

- технологичностью, малыми габаритами и весом,
- возможностью реализации функциональных зависимостей,
- малой инерционностью,
- высокой чувствительностью, связанной с принципиальным отсутствием тепловых шумов. Отсутствие тепловых шумов и саморазогрева позволяет довести порог чувствительности емкостных сенсоров к измерению малых перемещений до величин порядка (10^{-8} – 10^{-6}) мкм, что делает их наиболее чувствительными датчиками для научных исследований.

Наряду с этим емкостные датчики обладают и определенными недостатками:

- большими внутренними сопротивлениями.
- чувствительностью к высокочастотным наводкам,
- чувствительностью к температуре и влажности,
- влиянием неучтенных паразитных емкостей,
- более сложными измерительными схемами.

Некоторые из указанных недостатков удается компенсировать установкой предусилителей и применением дифференциальных датчиков.

Часть 2. Моделирование емкостных датчиков.

2.1 Моделирование однополярного емкостного датчика с усилителем заряда.

1. Открыть файл oed_1.ms8.

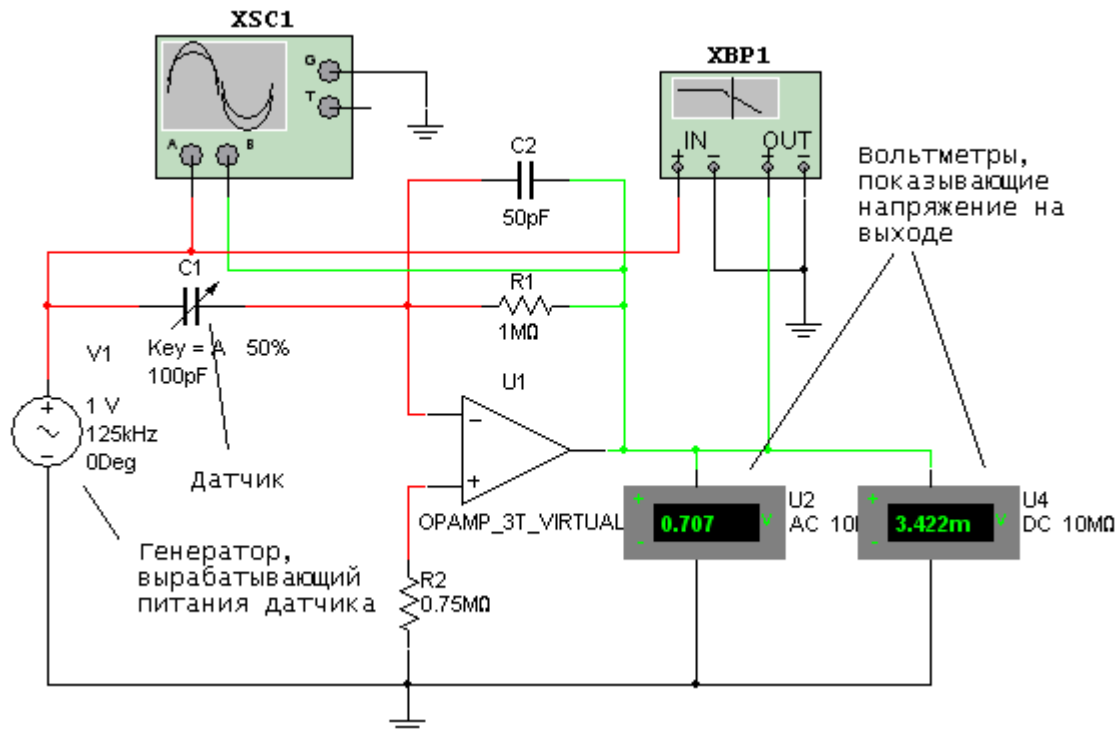


Рис.7. Схема моделирования однополярного емкостного датчика.

Пояснение к схеме:

На рис.7 представлена схема моделирования однополярного емкостного датчика. На данном рисунке роль сенсора играет переменный конденсатор C1, увеличение емкости происходит при нажатии клавиши, указанной в окне свойств элемента (в данном случае это латинская «А»), так же там указывается величина шага Уменьшение емкости – при нажатии Shift+«А». Окно свойств элемента вызывается двойным щелчком по изображению элемента.

Питание датчика вырабатывается источником напряжения V1. Схема усиления реализована на ОУ U1. Вольтметры U2, U4 предназначены для снятия напряжения на выходе схемы (U2 – переменного, U4 – постоянного). Плоттер Боде XBP1 предназначен для построения АЧХ, ФЧХ схемы., двухканальный осциллограф XSC1 используется для контроля напряжения на входе и выходе схемы.

Запустить моделирование и уяснить работу схемы.

АЧХ, ФЧХ, осциллограммы, параметры ОУ базового варианта приведены на рис.8-10 соответственно.

2. Рассчитать номинал емкости C_2 , в зависимости от номера варианта (Табл.1). Изменить параметры схемы и запомнить схему в файле oed_1.ms8 (ФИО).

Табл.1 Варианты заданий к пункту 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_{10}(\text{пФ})$	50	45	40	35	30	50	45	40	35	30
W	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
$E(\text{В})$	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6
$\delta C_1(\%)$	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$L(\text{м})$	0,5	0,75	1,0	1,2	1,3	0,6	0,8	0,9	1,1	1,4

3. Открыть окно свойств ОУ и записать значения параметров используемого ОУ.

4. Снять АЧХ и ФЧХ с помощью плоттера Боде.

5. Выставить частоту источника питания датчика (генератор V1) ориентировочно в середине рабочей полосы частот, на плоском участке ФЧХ. Запустить моделирование и зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов при номинальном значении емкости C_{10} .

6. Изменяя емкость датчика C_1 с шагом, указанном в вашем варианте, снимите передаточную характеристику по показаниям вольтметров на выходе схемы. Снять передаточную характеристику необходимо в 10-12 точках симметрично относительно C_{10} .

7. Оценить влияние паразитной емкости при номинальном значении C_{10} , для этого подсоединить дополнительный конденсатор $C_{31}-C_{33}$ согласно схеме, приведенной на рисунке 5, приняв погонную емкость кабеля равной 50 пФ/м.

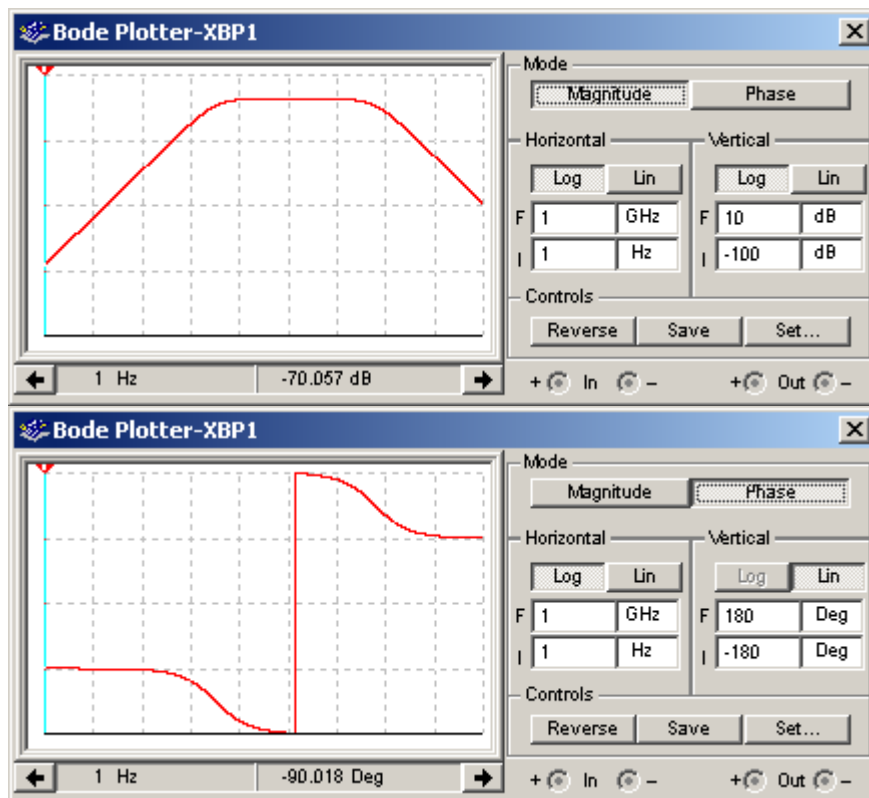


Рис.8. АЧХ и ФЧХ схемы, приведенной на рис.7.

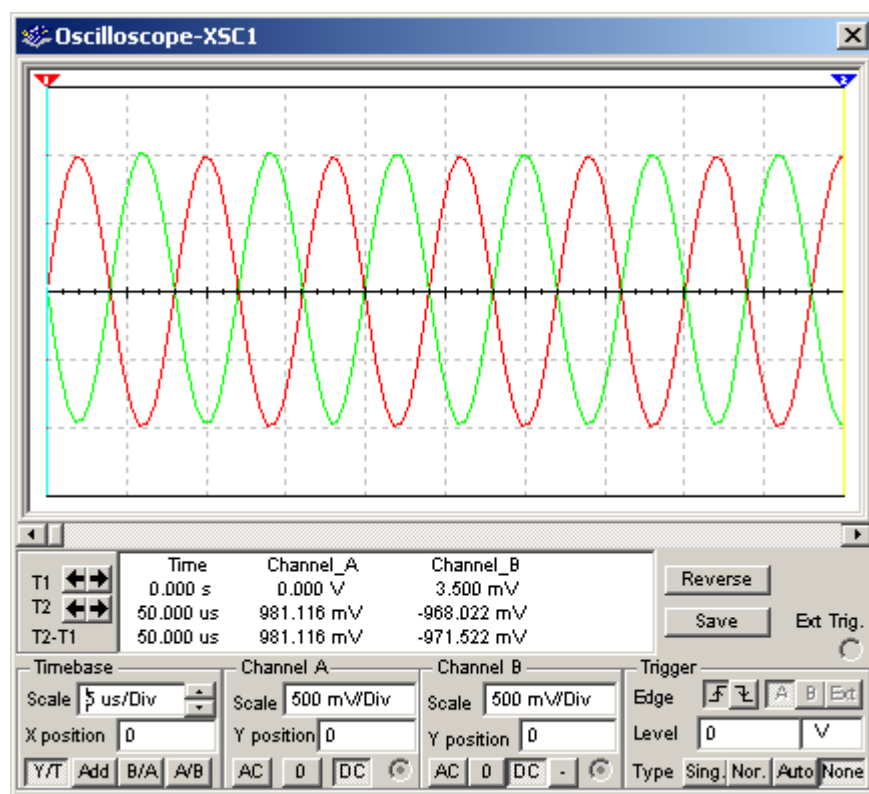


Рис.9. Осциллограммы схемы, приведенной на рис.7.

ANALOG_VIRTUAL [X]

Label Display Value Pins Variant

Open Loop Gain (A):	200	kV/V
Input Resistance (RI):	3	MOhm
Output Resistance (RO):	75	Ohm
Positive Voltage Swing (VSW+):	21	V
Negative Voltage Swing (VSW-):	-21	V
Input Offset Voltage (VOS):	1	mV
Input Bias Current (IBS):	80	nA
Input Offset Current (IOS):	20	nA
Slew Rate (SR):	5	MV/sec
Unity-Gain Bandwidth (FU):	15	MHz
Compensation Capacitance (CC):	10	pF

Replace OK Отмена Info Справка

Рис.10. Параметры ОУ, приведенного на рис.7.

2.2 Моделирование дифференциального емкостного датчика с усилителем заряда.

1. Открыть схему из файла «dfed.ms8».

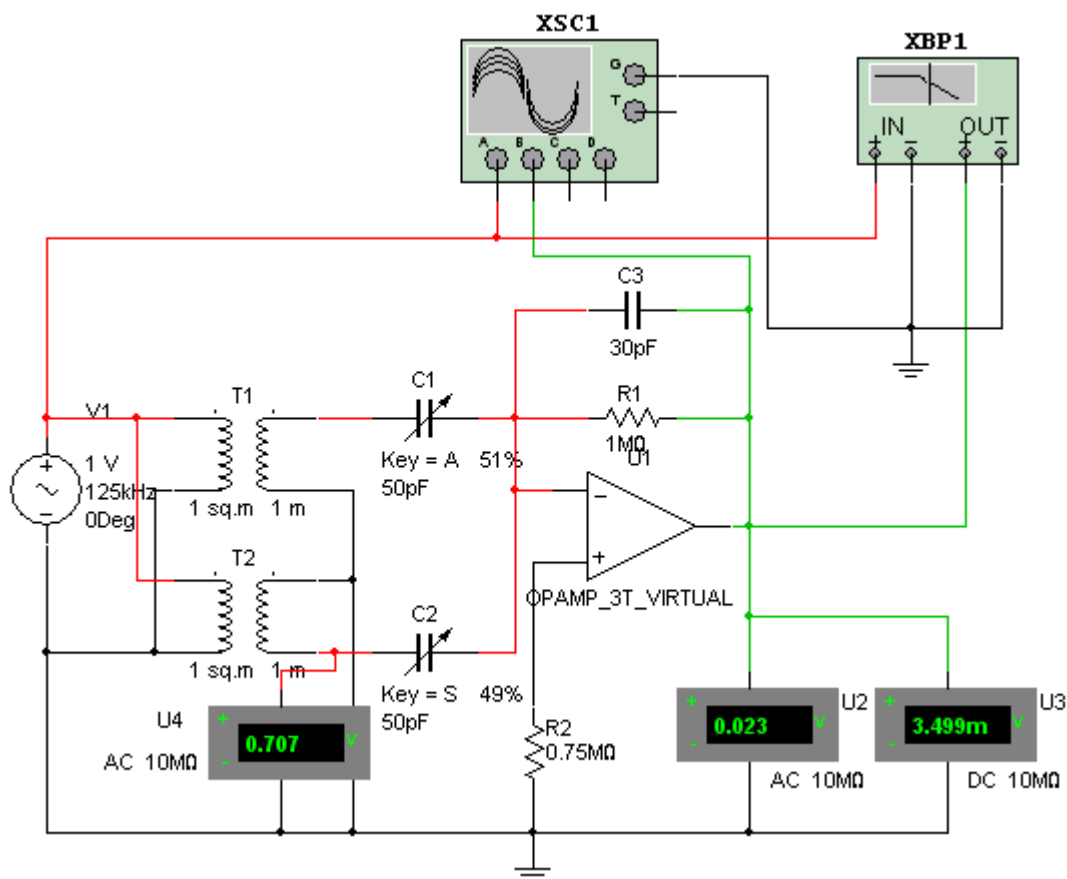


Рис.11. Схема включения дифференциального емкостного датчика.

Пояснение к схеме:

На рис.8 представлена схема включения дифференциального емкостного датчика с трансформаторной запиткой и усилителем заряда на ОУ U_1 . Датчик построен с помощью 2-х дифференциальных конденсаторов переменной емкости C_1 - C_2 , номиналы которых устанавливаются с помощью клавиш «A» и «S» соответственно (латинская раскладка). Трансформаторы T_1 , T_2 (в дифференциальном включении) предназначены для организации питания датчика. Остальные опции интуитивно понятны и соответствуют разделу 2.1.

Запустить моделирование и уяснить работу схемы.

2. Изменить параметры схемы в соответствии с заданным вариантом (Табл. 2) и запомнить схему в файле «dfed.ms8 ФИО»

Табл. 2. Варианты заданий к пункту 2.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_{10}=C_{20}$ (пФ)	10	15	20	25	30	12	18	22	27	32
C_3 (пФ)	10	15	30	25	20	10	15	25	20	30
E (В)	2	3	4	5	6	6	5	4	3	2
L (м)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,15	0,25	0,35	0,45	0,2	0,3
δN (%)	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Продолжение 1 табл.2.2 (к разделу 2.3)

$W(OU)$	2,0	2,5	2,5	2,25	2,75	2,0	2,5	2,0	2,75	2,25
$R3(Мом)$	2	2.5	3	2	2.5	3	2	2.5	3	2.5

Продолжение 2 табл.2.2 (к разделу 2.4)

$W(МВ/пФ)$	10,0	35,5	25,0	12,5	15,0	17,5	25,0	20,0	27,5	30,0
------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

3. Запустить моделирование файла «dfed.ms8 ФИО», снять АЧХ и ФЧХ с помощью плоттера Боде. После этого выставить частоту источника питания датчика (V1) ориентировочно в середине рабочей полосы частот, на плоском участке АЧХ. Вновь запустить моделирование файла «dfed.ms8 ФИО» и оценить полученный результат.

4. Изменяя емкость датчика с шагом, равным $\pm \delta C_1$ (увеличение емкости переменного конденсатора производится нажатием клавиши, указанной в окне свойств данного элемента, уменьшение емкости – нажатием сочетания клавиш shift+клавиша), снимите передаточную характеристику датчика (по показаниям вольтметров на выходе схемы или маркерами осциллографа). Измерения необходимо произвести при 10-12 различных значениях емкости датчика симметрично относительно начальных номиналов $C_{10}-C_{20}$. Зарисовать осциллограмму входного и выходного сигналов при крайних значениях дифемкости C_1-C_2 .

5. Оценить влияние паразитной емкости кабеля при крайнем значении дифемкости C_1-C_2 , для чего подсоединить конденсатор $C_{31}-C_{33}$ согласно схеме, приведенной на рисунке 6, приняв погонную емкость кабеля равной 50 пФ/м.

6. Открыть окно свойств ОУ и записать значения параметров используемого ОУ.

2.3 Моделирование дифференциального емкостного датчика с усилителем напряжения.

1 Открыть схему из файла «dfed_b.ms8».

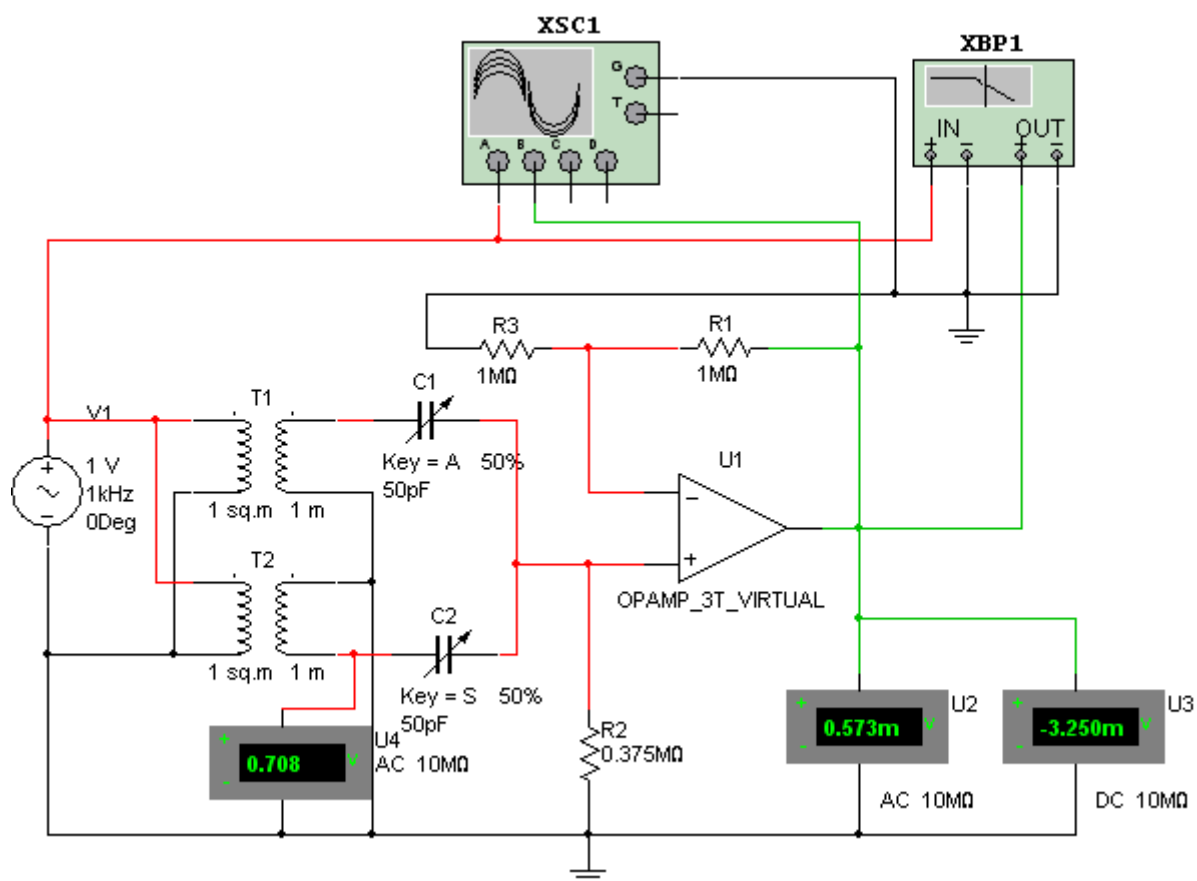


Рис.12. Схема включения дифференциального емкостного датчика, с усилителем напряжения.

Пояснение к схеме:

На рис.9 представлена схема включения дифференциального емкостного датчика с усилителем напряжения (ОУ U1) на выходе. Коэффициент передачи в данном случае определяется отношением резисторов R1 к R3. Остальные опции интуитивно понятны и соответствуют разделу 2.2.

Запустить моделирование и уяснить работу схемы.

2. Выставить номиналы емкостного дифдатчика и коэффициента передачи ОУ в соответствии с вариантом, указанным в Продолжении 1 табл. 2.2. и запомнить

схему в файле «dfed_b.ms8 ФИО». Изменение коэффициента передачи осуществлять резистором R1.

3. Снять АЧХ и ФЧХ схемы с помощью плоттера Боде. После этого выставить частоту источника питания датчика (V1) ориентировочно в середине рабочей полосы частот, на плоском участке АЧХ. Вновь запустить моделирование файла «dfed.ms8 ФИО» и оценить полученный результат.

4. Изменяя емкость датчика с шагом, равным δC_1 (увеличение емкости переменного конденсатора производится нажатием клавиши, указанной в окне свойств данного элемента, уменьшение емкости – нажатием сочетания клавиш shift+клавиша), снимите передаточную характеристику датчика (по показаниям вольтметров на выходе схемы или маркерами осциллографа). Измерения необходимо произвести при 10-12 различных значениях емкости датчика симметрично относительно начальных номиналов $C_{10}-C_{20}$ (табл. 2.2). Зарисовать осциллограмму входного и выходного сигналов при крайних значениях дифемкости C_1-C_2 .

5. Оценить влияние паразитной емкости кабеля при крайнем значении дифемкости C_1-C_2 , для чего подсоединить конденсатор $C_{33}=5-10$ пФ согласно схеме, приведенной на рисунке 6.

6. Открыть окно свойств ОУ и записать значения параметров используемого ОУ.

2.4 Моделирование дифференциального емкостного датчика с Т-мостом в цепи обратной связи.

1. Открыть схему из файла «dfed_t1.ms8».

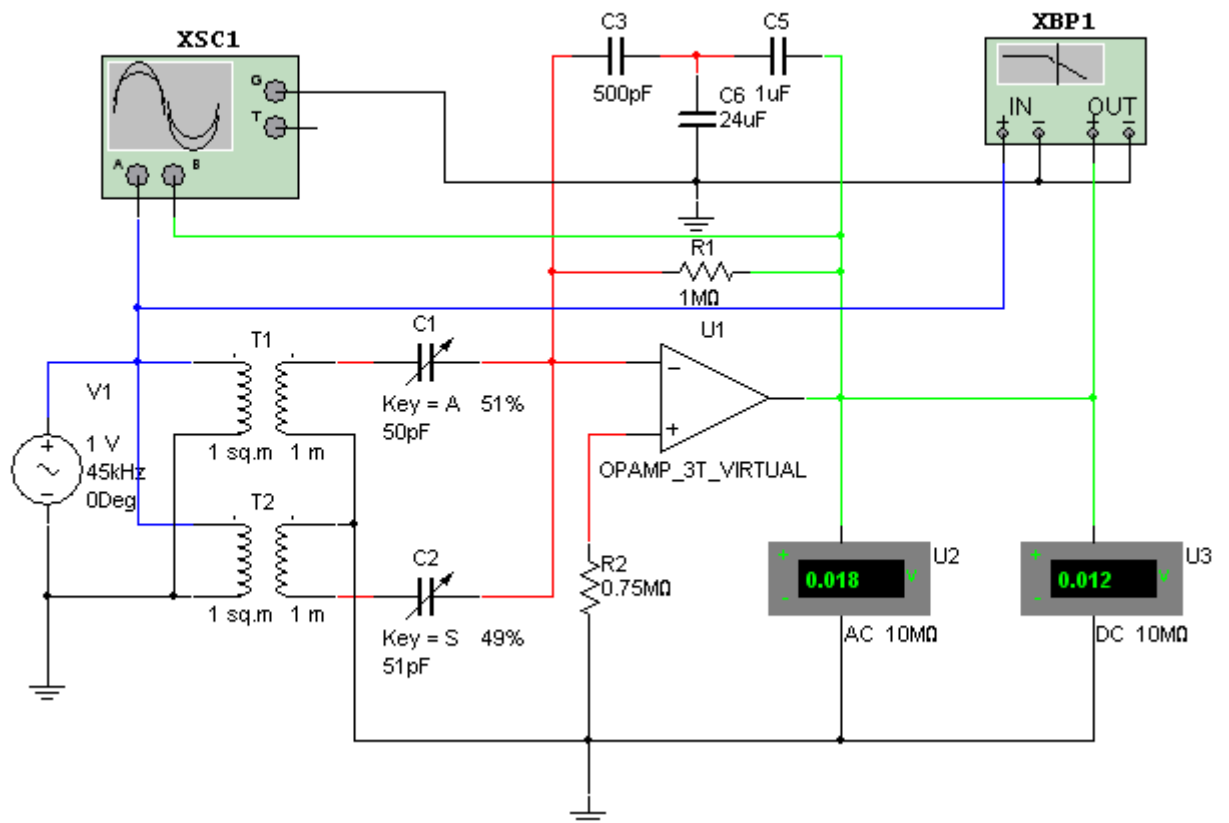


Рис.13 Использование Т-моста для увеличения коэффициента передачи.

Пояснение к схеме:

На рис.10 представлена схема включения дифференциального емкостного датчика с использованием усилителя заряда на ОУ U1 и емкостного Т-моста в цепи обратной связи. Т-мост используется для увеличения коэффициента передачи без чрезмерного уменьшения емкости конденсатора, стоящего в цепи обратной связи. Коэффициент передачи для емкостного моста равен:

$$W = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{C1 - C2} = E \frac{1}{C3} \left(1 + \frac{C3}{C5} + \frac{C6}{C5} \right)$$

Если $C5 \gg C3$, то

$$W = E \frac{1}{C3} (1 + \frac{C6}{C5})$$

АЧХ, ФЧХ, осциллограммы базового варианта приведены на рис.14, 15 соответственно.

2. Выставить номиналы емкостного дифдатчика и коэффициента передачи ОУ в соответствии с вариантом, указанным в Табл. 2 и Продолжении 2 Табл. 2 и запомнить схему в файле «dfed_t1.ms8 ФИО». Изменение коэффициента передачи осуществлять изменением емкости C_6 .

3. Снять АЧХ и ФЧХ с помощью плоттера Боде и выставить частоту источника питания датчика ориентировочно в середине рабочей полосы частот, на плоском участке АЧХ. Запустить моделирование и зарисовать осциллограмму входного и выходного сигналов при номинальном значении дифемкости $C_{10}-C_{20}$.

4. Изменяя дифемкость датчика с шагом, равным $\pm \Delta C_1$ (увеличение емкости переменного конденсатора производится нажатием клавиши, указанной в окне свойств данного элемента, уменьшение емкости – нажатием сочетания клавиш shift+клавиша), снимите передаточную характеристику датчика (по показаниям вольтметров на выходе схемы или маркерами осциллографа). Измерения необходимо произвести при 10-12 различных значениях емкости датчика симметрично относительно начальных номиналов $C_{10}-C_{20}$ (табл. 2.2). Зарисовать осциллограмму входного и выходного сигналов при крайних значениях дифемкости C_1-C_2 .

5. Оценить влияние паразитной емкости кабеля при крайнем значении дифемкости C_1-C_2 , для чего подсоединить конденсатор $C_{33}=5-10$ пФ согласно схеме, приведенной на рисунке 6.

6. Открыть окно свойств ОУ и записать значения параметров используемого ОУ.

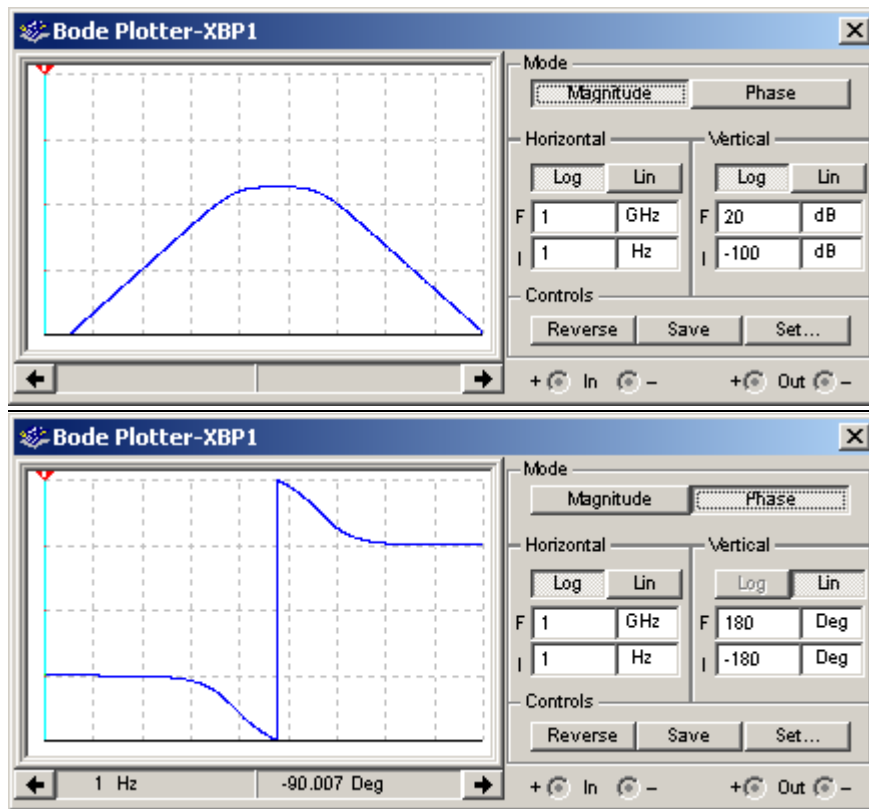


Рис.14. АЧХ и ФЧХ схемы, приведенной на рис.13.

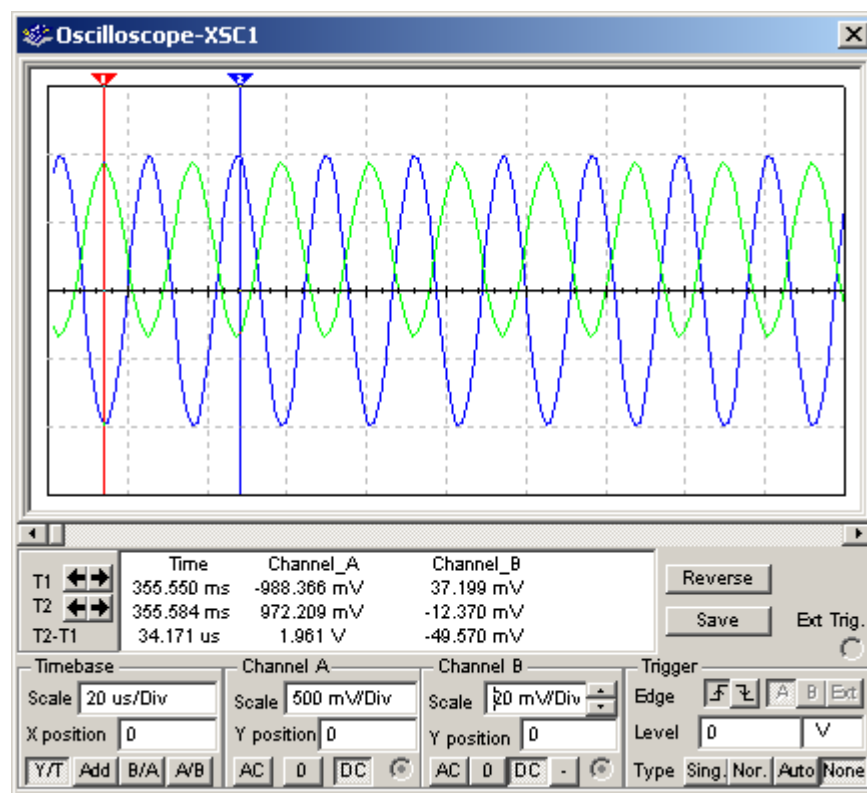


Рис.15. АЧХ и ФЧХ схемы, приведенной на рис.13.

Содержание отчета:

- исходные данные;
- схемы моделирования;
- расчет необходимых параметров схемы;
- диаграммы Бode с обозначенными частотами среза;
- осциллограммы сигналов;
- таблица результатов и графики передаточных характеристик;
- оценка и объяснение результатов моделирования;

Контрольные вопросы:

- 1) Принципы работы емкостных датчиков.
- 2) В чем заключается принципиальные отличия между однополярными емкостными датчиками при включении сенсоров в прямую цепь и цепь ОС?
- 3) Принципиальные отличия между однополярными и дифференциальными емкостными датчиками?
- 4) Методы снятия сигналов с емкостных сенсоров.
- 5) Отличия между емкостными датчиками с выходными усилителем напряжения и усилителем заряда?
- 6) Ограничения по увеличению чувствительности емкостных сенсоров.
- 7) Применение Т-мостов для увеличения чувствительности.
- 8) Метод организация выхода емкостного датчика на постоянном токе.