

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Исследование и расчет однозвенных фильтров с использованием операционных усилителей

Методические указания
к выполнению лабораторной работы

Севастополь
2007

УДК 621.396.6

Исследование и расчет однозвенных фильтров с использованием операционных усилителей

: Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Аналоговая схемотехника" для студентов дневной и заочной форм обучения специальности " " / .Тестоедов, Васин – Севастополь: СевНТУ, 2007.–12с.

Ц е л ь у к а з а н и й : Обеспечить студентам возможность самостоятельной подготовки к выполнению и защите лабораторной работы.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры электронной техники , протокол № от 2007 г.

Рецензент:
университета.

Севастопольского национального технического

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с методикой расчета и обеспечения оптимальных режимов работы однозвенных фильтров с использованием операционных усилителей в электронных устройствах. Экспериментально исследовать основные методы проектирования активных фильтров.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Активными фильтрами называются схемы, обладающие способностью изменять спектр сигнала, причем в отличие от пассивных амплитуда выходного сигнала может быть больше амплитуды входного. Такие фильтры строятся на RLC-элементах с обязательным использованием усилительных каскадов, в качестве которых часто применяют операционные усилители (ОУ). Выделяют фильтры нижних частот (ФНЧ), верхних частот (ФВЧ) полосовые (ПФ) и режекторные (РФ). Основными характеристиками фильтров являются: полоса пропускания, полоса подавления, крутизна в области подавления, а также амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазо-частотные характеристики (ФЧХ). Если коэффициент передачи фильтра равен единице, то полоса пропускания определяется частотным диапазоном, для которого коэффициент передачи больше 0.707. Амплитудно-частотные характеристики фильтров принято строить в полулогарифмическом масштабе. Частота в логарифмическом, а коэффициент передачи в линейном. Причем, коэффициент передачи часто пересчитывают в децибелы по формуле:

$$K_{дБ} = 20 * \log (U_{вых} / U_{вх}) \quad (1)$$

При коэффициенте передачи равном 0.707 $K_{дБ} = -3$ дБ. Таким образом, полоса пропускания фильтра может быть определена частотным диапазоном, в котором коэффициент передачи уменьшается на 3дБ. Эта частота называется частотой среза. Частотная область, в которой коэффициент передачи уменьшается больше, чем на 3дБ будет полосой подавления. Крутизна в области подавления определяется порядком фильтра и для однозвенных фильтров составляет – 6дБ на октаву, то есть при измерении частоты в два раза.

Фильтры нижних частот пропускают низкие частоты с коэффициентом передачи не меньше, чем 0.707, а на больших частотах коэффициентом передачи уменьшается более, чем на 3дБ. Фильтры верхних частот пропускают верхние частоты с коэффициентом передачи не меньше, чем 0.707, а на меньших частотах коэффициентом передачи уменьшается более, чем на 3дБ. Полосовые фильтры имеют определенную частотную область, в которой коэффициент передачи не меньше, чем 0.707, а за пределами этой области, как со стороны нижних, так и со стороны верхних частот коэффициент передачи уменьшается более, чем на 3дБ. В отличие от полосовых фильтров, режекторные фильтры имеют узкую частотную область (полосу подавления), в пределах которой коэффициент передачи уменьшается более, чем на 3дБ.

При изменении частоты фильтры могут влиять не только на коэффициент передачи, но и на фазу сигнала. Это влияние отражается фазо-частотной характеристикой.

Если не учитывать изменение фазы, то расчет фильтров можно свести к расчету коэффициента передачи схем на операционных усилителях с учетом частотной зависимости сопротивления элементов (например конденсаторов у которых сопротивление зависит от частоты).

Рассмотрим представленный на рис. 1 инвертирующий усилитель содержащий частотно зависимый элемент C1.

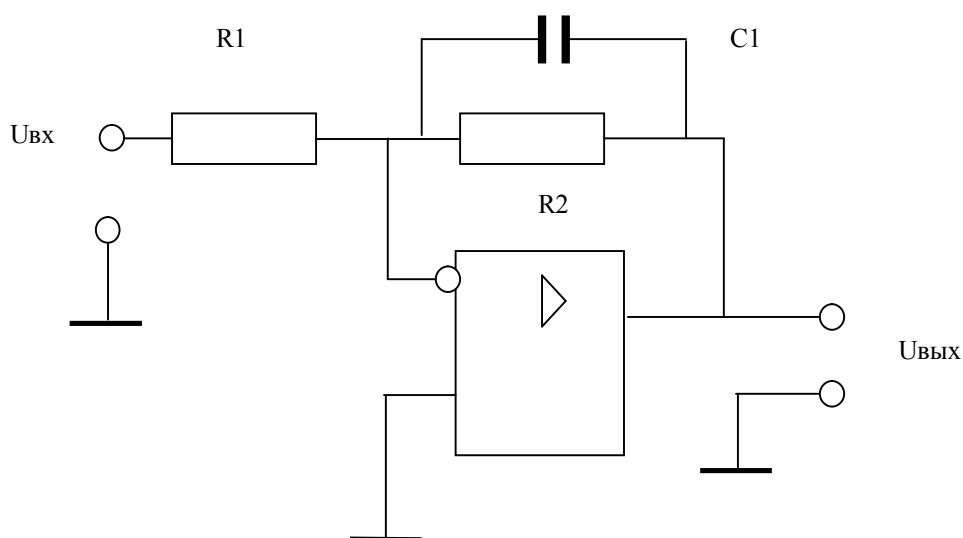


Рисунок 1. Фильтр низких частот на инвертирующем усилителе.

В этой схеме входной сигнал подается через резистор R1 на инвертирующий вход ОУ и на этот же вход с выхода через R2 и конденсатор C1 подается обратная связь. Неинвертирующий вход ОУ подсоединен к земле. Коэффициент усиления схемы по напряжению k равен отношению выходного напряжения Uвых ко входному Uвх

$$k = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} \quad (2)$$

Поскольку потенциалы на входах ОУ равны (идеальный ОУ с ООС), потенциал инверсного входа равен нулю. Следовательно, напряжение на выходе Uвых равно падению напряжения на резисторе R2 и параллельно подсоединенному конденсатору C1.

$$U_{\text{вых}} = I * (R2 \parallel Z_{c1}) \quad (3)$$

Через R1 и R2 || Zc1 протекает один и тот же ток, так как входное сопротивление ОУ бесконечно большое. Следовательно, ток I можно определить из входного напряжения Uвх и величины резистора R1

$$I = - U_{\text{вх}} / R1 \quad (4)$$

Подставив выражения (3) и (4) в (2) получим выражение для расчета коэффициента усиления для схемы инвертирующего усилителя, представленного на рис. 1.

$$k = - \frac{R2 \parallel Z_{c1}}{R1} = - \frac{R2 * Z_{c1}}{(R2 + Z_{c1}) * R1} = - \frac{R2}{R1} * \frac{Z_{c1}}{R2 + Z_{c1}} \quad (5)$$

Минус в выражении (5) означает инверсию входного сигнала. При отсутствии конденсатора C1, коэффициент передачи для схемы на рис.1 будет равен

$$k_0 = - R2/R1$$

Тогда

$$k = k_0 * \frac{Z_{c1}}{R2 + Z_{c1}}$$

Сопротивление конденсатора Zc1 зависит от частоты входного сигнала F и определяется выражением

$$Z_{c1} = \frac{1}{j * 2 * \pi * F * C1} \quad (6)$$

Следовательно,

$$k = k_0 * \frac{1}{j * 2 * \pi * F * R2 * C1 + 1} = k_0 * \frac{1}{j * 2 * \pi * F * \tau + 1} \quad (7)$$

где, $\tau = R2 * C1$ - постоянная времени частотно зависимого звена схемы.

$$j = \sqrt{-1}$$

Чтобы получить выражение для АЧХ без комплексного представления необходимо взять модуль k. Преобразуем выражение (7) в виде действительной и мнимой части путем домножения числителя и знаменателя на сопряженное знаменателю выражение.

$$k = k_0 * \frac{j * 2 * \pi * F * \tau - 1}{(j * 2 * \pi * F * \tau + 1) * (j * 2 * \pi * F * \tau - 1)} = k_0 * \frac{1 - j * 2 * \pi * F * \tau}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2 + 1}$$

$$k = k_0 * \left(\frac{1}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2 + 1} - j * \frac{2 * \pi * F * \tau}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2 + 1} \right) \quad (8)$$

Модуль k равен корню квадратному из суммы квадратов действительной и мнимой части

$$|k| = k_m = \frac{k_0}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2 + 1} * \sqrt{1 + 4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2}$$

$$k_m = \frac{k_0}{\sqrt{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2 + 1}} \quad (9)$$

На низких частотах $4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2 \ll 1$ и коэффициент передачи определяется отношением резисторов

$$k = k_0 = -R_2 / R_1$$

При повышении частоты сопротивление конденсатора $2 * \pi * F * C_1$ увеличивается и коэффициент передачи уменьшается. Следовательно, схема, приведенная на рис.1 является фильтром низких частот. Частота среза этого фильтра может быть рассчитана из выражения (9) при условии $k = k_0 / \sqrt{2} = 0.707 * k_0$. На частоте среза период круговой частоты $\omega_{cp} = 2 * \pi * F_{cp}$ равен τ , то есть $1 / (2 * \pi * F_{cp}) = \tau$ и

$$k_m = \frac{k_0}{\sqrt{2}} = 0.707 * k_0 \quad (10)$$

что примерно соответствует уменьшению коэффициента передачи на 3 дБ.

Для частоты среза F_{cp}

$$\sqrt{4 * \pi^2 * F_{cp}^2 * \tau^2 + 1} = \sqrt{2}$$

$$4 * \pi^2 * F_{cp}^2 * \tau^2 + 1 = 2$$

Тогда,

$$F_{cp} = \frac{1}{2 * \pi * \tau} = \frac{1}{2 * \pi * R_2 * C_1} = \frac{0.16}{\tau} \quad (11)$$

На рисунках 2а и 2б приведена амплитудно-частотная характеристика при разных частотных диапазонах фильтра низких частот с инвертирующим включением ОУ (см. рис. 1). Номиналы элементов $R_1 = R_2 = 1.2$ кОм и $C_1 = 0.1$ мкФ. Частота среза фильтра соответствует частоте, рассчитанной по формуле (11) и равна 1.33 кГц.

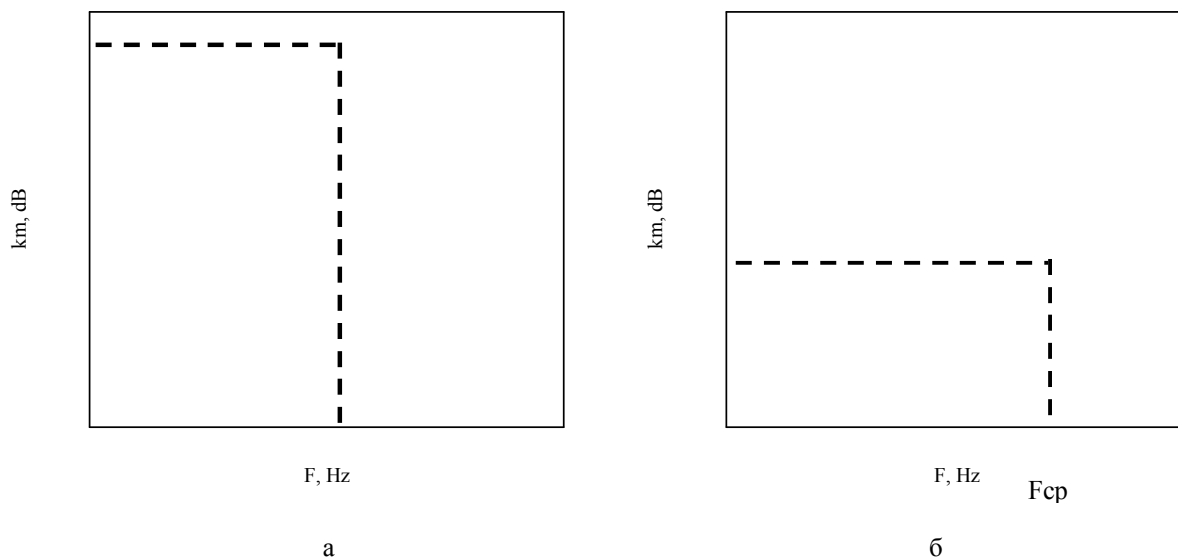


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика фильтра низких частот с инвертирующим усилителем.

Рассмотрим схему на инвертирующем усилителе представленную на рис. 3.

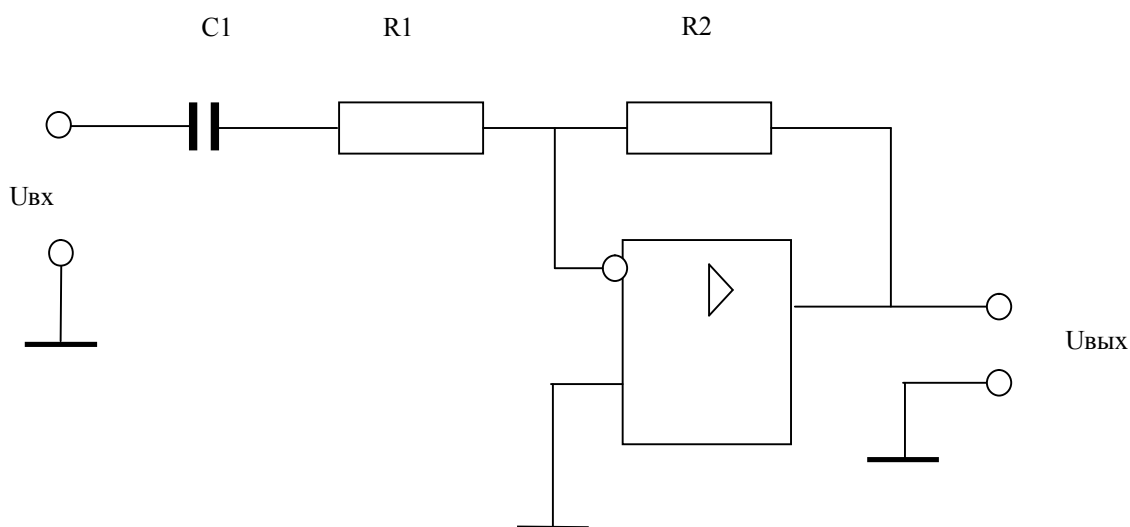


Рисунок 3. Фильтр верхних частот на инвертирующем усилителе.

В этой схеме частотно зависимый элемент $C1$ стоит последовательно с резистором $R1$, следовательно коэффициент передачи определяется выражением

$$k = -\frac{R2}{R1 + Z_{c1}} = -\frac{R2}{R1} * \frac{1}{1 + \frac{Z_{c1}}{R1}}$$

$$k = k0 * \frac{1}{1 + \frac{1}{j * 2 * \pi * F * C1 * R1}} = k0 * \frac{1}{1 + \frac{1}{j * 2 * \pi * F * \tau}} \quad (12)$$

Чтобы получить выражение для АЧХ без комплексного представления необходимо взять модуль k . Преобразуем выражение (12) в виде действительной и мнимой части путем домножения числителя и знаменателя на сопряженное знаменателю выражение. Модуль k равен корню квадратному из суммы квадратов действительной и мнимой части. После преобразований получим

$$k_m = \frac{k_0}{\sqrt{1 + \frac{1}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2}}} \quad (13)$$

При высоких частотах входного сигнала $\frac{1}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2} \ll 1$ и

$$k = k_0 = - R_2 / R_1$$

С уменьшением частоты коэффициент передачи уменьшается, поскольку $\frac{1}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2}$ растет. Таким образом, на рис.3 реализован фильтр верхних частот. Частота среза этого фильтра может быть рассчитана из выражения (13), при условии $k = k_0 / \sqrt{2} = 0.707 * k_0$.

Для частоты среза F_{cp}

$$\sqrt{\frac{1}{4 * \pi^2 * F_{cp}^2 * \tau^2} + 1} = \sqrt{2}$$

$$F_{cp} = \frac{1}{2 * \pi * \tau} = \frac{1}{2 * \pi * R_1 * C_1} = \frac{0.16}{\tau} \quad (14)$$

где, $\tau = R_1 * C_1$ - постоянная времени частотно зависимого звена схемы.

На рисунках 4а и 4б приведена амплитудно-частотная характеристика при разных частотных диапазонах фильтра верхних частот на инвертирующем усилителе (см. рис. 3). Номиналы элементов $R_1 = R_2 = 1.2$ кОм и $C_1 = 0.1$ мкФ. Частота среза фильтра соответствует частоте, рассчитанной по формуле (14) и равна 1.33 кГц.

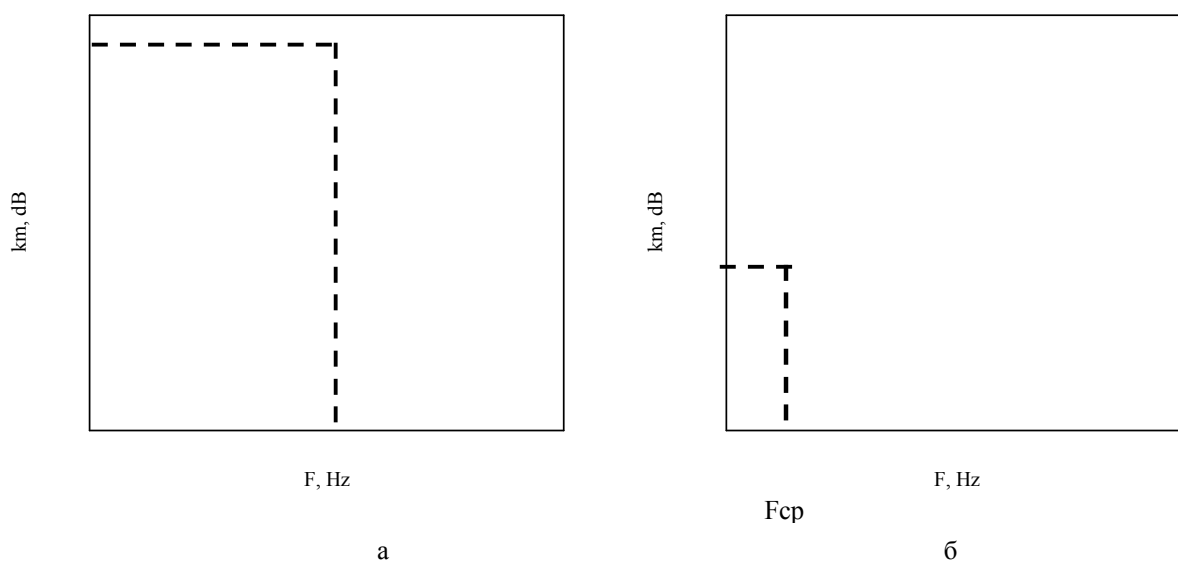


Рисунок 4. Амплитудно-частотная характеристика фильтра верхних частот на инвертирующем усилителе.

На основе схем рис.1 и рис. 3 можно получить полосовой фильтр.

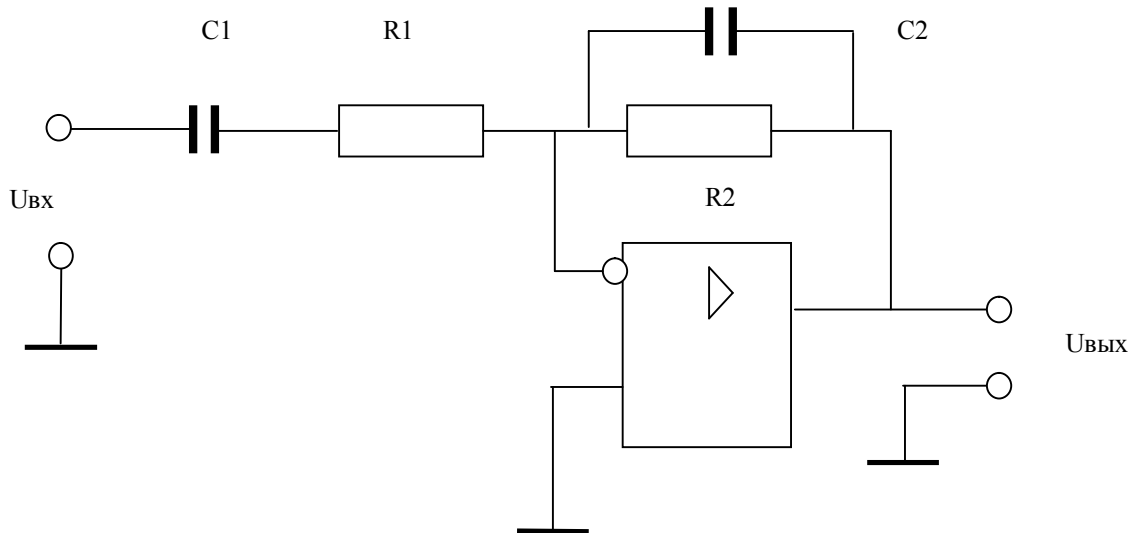


Рисунок 5. Полосовой фильтр на инвертирующем усилителе.

В схеме, приведенной на рис. 5 частотно зависимые элементы стоят как в цепи резистора R1 (конденсатор C1), так и в цепи обратной связи (конденсатор C2). Коэффициент передачи для этой схемы определяется выражением

$$k = -\frac{R2 \parallel Z_{C2}}{R1 + Z_{C1}} = -\frac{R2 * Z_{C2}}{R2 + Z_{C2}} * \frac{1}{R1 + Z_{C1}} = k0 * \frac{1}{(1 + j * 2 * \pi * F * R2 * C2) * \left(1 + \frac{1}{j * 2 * \pi * R1 * C1}\right)}$$

$$k_m = k0 * \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau_H^2} + 1\right) * (4 * \pi^2 * F^2 * \tau_L^2 + 1)}} \quad (15)$$

$\tau_L = R2 * C2$ - постоянная времени ФНЧ.

$\tau_H = R1 * C1$ - постоянная времени ФВЧ.

В полосе пропускания этого фильтра должны выполняться условия $4 * \pi^2 * F^2 * R2^2 * C2^2 \ll 1$ и $\frac{1}{4 * \pi^2 * F^2 * R1^2 * C1^2} \ll 1$. Такой фильтр имеет две частоты среза: со стороны нижних $F_{срН}$ и верхних $F_{срВ}$ частот, где коэффициент передачи падает на 3дБ относительно $k0$.

На частоте среза $F_{нч}$ должно выполняться условие $2 * \pi * F * C1 * R1 \gg 1$, то есть звено ФВЧ не должно влиять на коэффициент передачи. А на частоте среза $F_{вч}$ $2 * \pi * F * C2 * R2 \ll 1$, то есть звено ФНЧ не влияет на коэффициент передачи. Для такого полосового фильтра в полосе пропускания $k = k0$ хотя бы в узком частотном диапазоне. В этом случае соотношения между частотами среза и соответствующими постоянными RC аналогичны ранее приведенным. Если эти условия не выполняются, то есть полоса пропускания узкая, максимальный коэффициент передачи фильтра будет меньшим, чем $k0$. Эта ситуация показана на рис. 6. Здесь у полосового фильтра частоты среза $F_{нч}$ и $F_{вч}$ равны и составляют 1.33кГц ($R1=R2=1.2кОм$ и $C1=C2=0.1мкФ$). Максимум коэффициента передачи соответствует этой частоте и на 6 дБ ниже $k0$, поскольку каждый фильтр уменьшает $k0$ на 3 дБ.

На рисунках 7а и 7б приведена амплитудно-частотная характеристика при разных частотных диапазонах полосового фильтра на инвертирующем усилителе. Значения $R1= R2 = 1.2 кОм$, $C1 = 1 мкФ$, $C2 = 0.01 мкФ$. Частоты среза фильтра соответствуют частотам, рассчитанным по формулам (11),

(14) и равны 13.2 кГц и 133 кГц. Максимальный коэффициент передачи равен 0.99. Ширина полосы пропускания примерно равна 13 кГц.

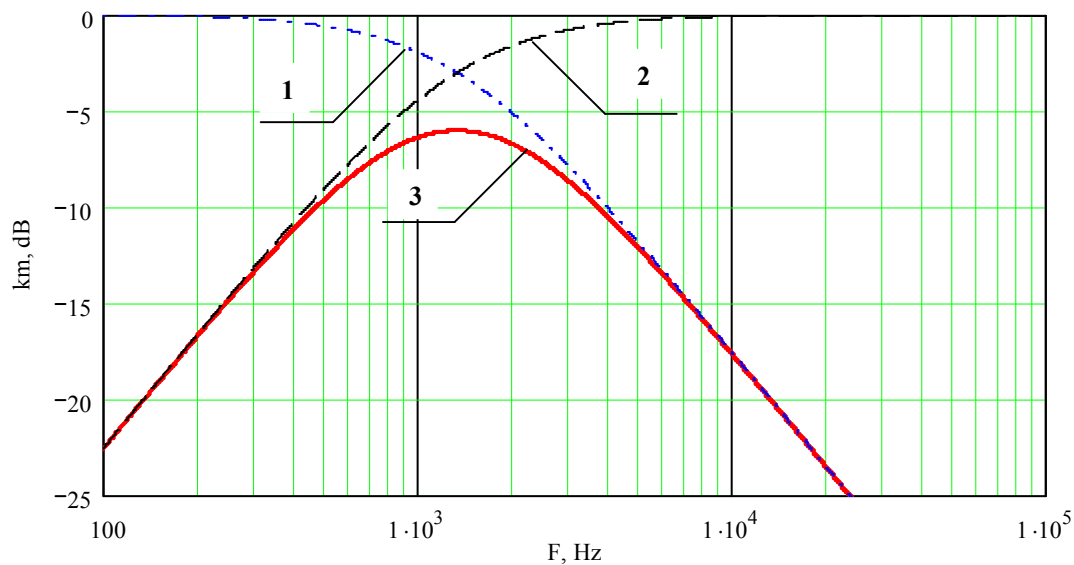
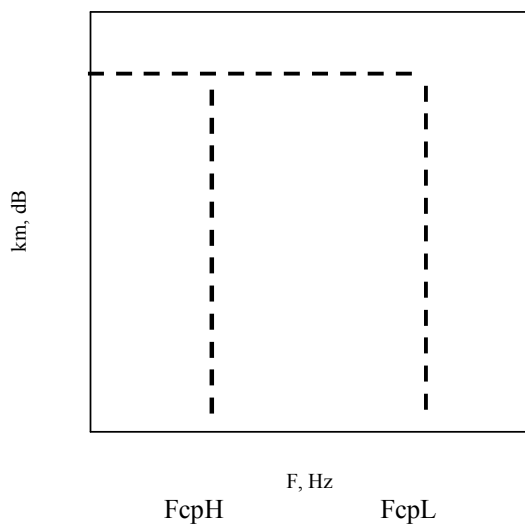
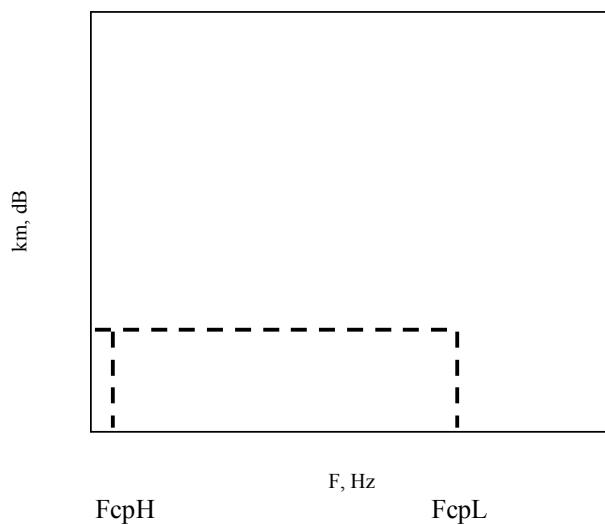


Рисунок 6. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра на инвертирующем усилителе. 1 – АЧХ фильтра низких частот, 2 – АЧХ фильтра высоких частот, 3 – АЧХ полосового фильтра при $R_1=R_2=1.2\text{ кОм}$ и $C_1=C_2=0.1\text{ мкФ}$.



а



б

Рисунок 7. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра на инвертирующем усилителе.

Использование схем с неинвертирующим включением операционного усилителя при проектировании фильтров менее эффективно, поскольку значение коэффициента передачи в этом случае не может быть меньше единицы. Рассмотрим ФНЧ с неинвертирующим включением операционного усилителя, представленный на рис. 7.

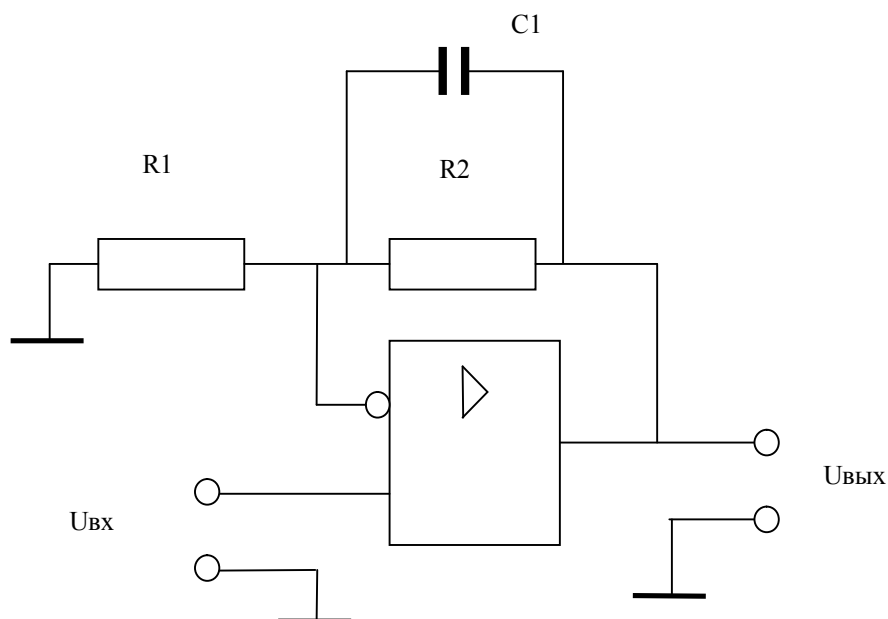


Рисунок 7. ФНЧ с неинвертирующим включением операционного усилителя.

В этой схеме входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Напряжение отрицательной обратной связи формируется резистивным делителем R1 и R2 с выхода ОУ. Коэффициент усиления схемы по напряжению равен

$$k = \frac{R2 \parallel Z_{C1}}{R1} + 1$$

$$k = \frac{R2}{R1} * \frac{Z_{C1}}{R2 + Z_{C1}} + 1 = k0 * \frac{1}{j * 2 * \pi * F * R2 * C1 + 1} + 1$$

$$km = \sqrt{\frac{k0^2 + 2 * k0}{4 * \pi^2 * F^2 * \tau^2 + 1}} + 1 \quad (16)$$

где, $\tau = R2 * C1$ - постоянная времени частотно зависимого звена схемы.

Выражение (16) качественно отличаются от выражения для коэффициента передачи при инвертирующем включении ОУ (9). Даже при больших частотах, когда первое слагаемое в выражении (16) стремится к нулю, коэффициента передачи стремится к единице. Следовательно, при построении фильтров не может быть эффективного уменьшения сигнала в полосе подавления. Чтобы получить эффективное подавление для такого фильтра необходимо увеличивать коэффициент усиления в полосе пропускания $k0$.

На рис.8 приведена АЧХ фильтра низких частот с использованием неинвертирующего включения ОУ (рис.7) при $k0 = 10$, $R2 = 1.2$ кОм, $C1 = 0.1$ мкФ. На рис.8а коэффициент передачи km приведен в децибелах, а на рис. 8б в абсолютных значениях. Частота среза фильтра 1.33 кГц. Видно, что при высоких частотах коэффициент передачи равен $km = 1$.

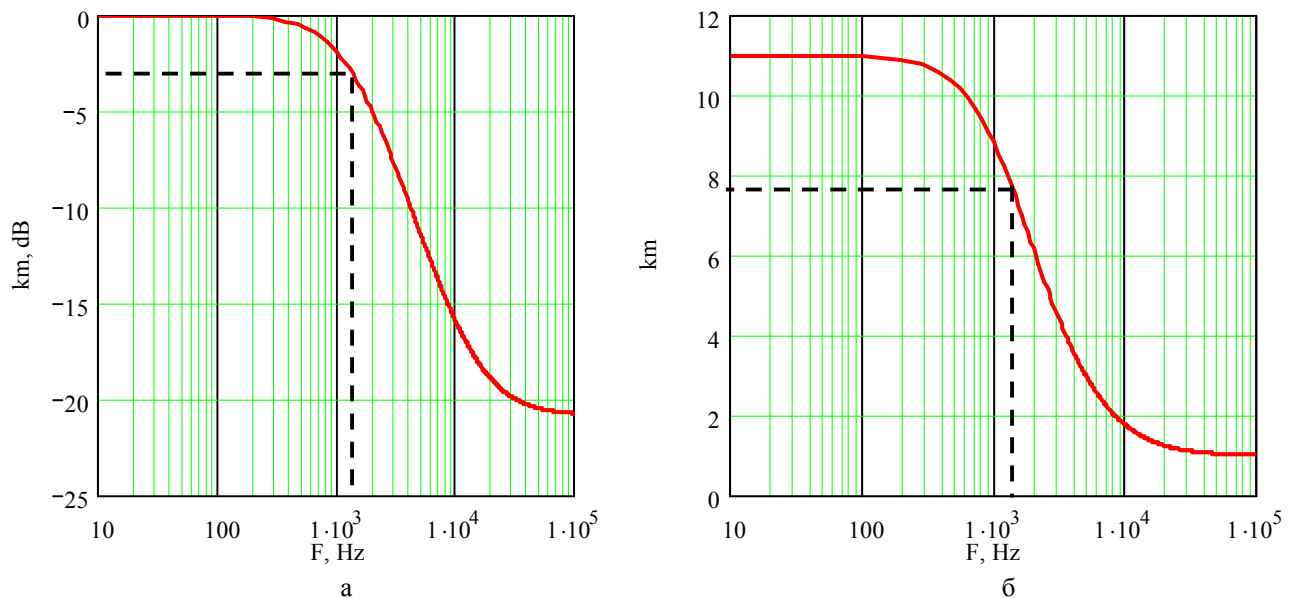


Рисунок 8. Амплитудно-частотная характеристика фильтра низких частот на неинвертирующем усилителе.

2. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

В лабораторной работе используются промышленные источники постоянного тока, генераторы переменного сигнала и осциллограф. Инструкцию по их эксплуатации необходимо тщательно изучить. Кроме того, студентам предоставляются монтажные платы, соединительные провода, полная номенклатура резисторов и конденсаторов и операционный усилитель.

Получив задание, студент должен рассчитать схему заданной конфигурации и проверить правильность расчета, смоделировав схему на компьютере. Для моделирования схемы можно использовать программные пакеты WORKBENCH или PROTEUS.

Расчет элементов схемы необходимо проводить, используя соотношения, приведенные в разделе 1. Первоначально рассчитываются номиналы частотонезависимых элементов (резисторов) в полосе пропускания. При этом коэффициент передачи фильтра равен коэффициенту, указанному в задании. Влияние конденсаторов не учитывается. Затем из полученных значений сопротивлений резисторов по тем же соотношениям (но с учетом сопротивления конденсаторов) на заданных частотах среза рассчитываются номиналы конденсаторов. Значение коэффициента передачи необходимо уменьшить в 0.707 раз.

Убедившись в правильности расчетов и выборе номиналов элементов, на монтажной плате собирается схема, к которой с соединительными проводами подключаются источник питания генератор и осциллограф. Перед включением схемы необходимо убедиться в наличии заземления у приборов. Также нужно тщательно проверить правильность подсоединения приборов к схеме, обратив особое внимание на подключение земли схемы и приборов.

Установив необходимые значения напряжений источника питания при различных значениях частоты входного сигнала с помощью осциллографа снять зависимость выходного напряжения от частоты, контролируя постоянство входного напряжения. По полученным данным рассчитать значения коэффициента передачи фильтра при каждой частоте. Пересчитать по формуле (1) значения коэффициента передачи в децибелах. Значения частоты входного сигнала следует выбирать так, чтобы было удобно строить амплитудно-частотную зависимость в логарифмическом масштабе (например: кратность частоты 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 ...). Диапазон частот должен охватывать полосу пропускания и полосу подавления до снижения коэффициента передачи не менее, чем на 20 дБ. По полученным данным построить амплитудно-частотную характеристику фильтра, на которой указать частоту среза, полосу пропускания и полосу подавления.

3.ЗАДАНИЯ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

Номер варианта	Тип фильтра	Частота среза НЧ, кГц	Частота среза ВЧ, кГц	Включение ОУ	Коэффициент передачи в полосе пропускания
1	ФНЧ	1		Инвертирующее	1
2	ФНЧ	2		Инвертирующее	4
3	ФНЧ	3		Инвертирующее	2
4	ФНЧ	4		Инвертирующее	10
5	ФНЧ	1		Неинвертирующее	40
6	ФНЧ	2		Неинвертирующее	80
7	ФНЧ	3		Неинвертирующее	100
8	ФНЧ	4		Неинвертирующее	200
9	ФВЧ		2	Инвертирующее	1
10	ФВЧ		4	Инвертирующее	2
11	ФВЧ		6	Инвертирующее	4
12	ФВЧ		8	Инвертирующее	8
13	ФВЧ		2	Неинвертирующее	20
14	ФВЧ		4	Неинвертирующее	40
15	ФВЧ		6	Неинвертирующее	60
16	ФВЧ		3	Неинвертирующее	80
17	ПФ	1	10	Инвертирующее	1
18	ПФ	2	20	Инвертирующее	2
19	ПФ	1	40	Инвертирующее	3
20	ПФ	2	40	Инвертирующее	4
21	ПФ	4	60	Инвертирующее	10
22	ПФ	2	60	Инвертирующее	20
23	ПФ	1	60	Инвертирующее	40
24	ПФ	2	60	Инвертирующее	80

4.ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист с указанием названия работы, группы и фамилий исполнителей;
- раздел «Постановка задач исследования», в котором кратко формулируются расчетные и экспериментальные задачи;
- раздел «Выбор схемы и расчет элементов», в котором приводятся схема фильтра, ее описание, назначение элементов и расчет номиналов;
- раздел «Результаты эксперимента», в котором в виде таблиц и графиков приводятся результаты непосредственных измерений ;
- раздел «Выводы», в котором оценивается степень согласия расчетных и экспериментальных результатов. Следует оценивать количественное и качественное согласие расчетных и экспериментальных данных.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что называется полосой пропускания, полосой подавления и частотой среза фильтра?
2. На сколько децибел изменится коэффициент передачи фильтра низких частот с частотой среза 1 кГц на частоте 4 кГц?
3. Какая минимальная полоса пропускания у однозвенного полосового фильтра с максимальным относительным коэффициентом передачи в полосе пропускания $0.9 \cdot k_0$?
4. Какая крутизна спада АЧХ у однозвенных и двухзвенных фильтров?
5. Какие фильтры имеют узкую полосу подавления?
6. Фильтрами каких частот являются однозвенные фильтры, приведенные в Приложении А?
7. Получите выражения для коэффициентов передачи фильтров, приведенных в Приложении А и проанализируйте их достоинства и недостатки.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Малахов В.П. Схемотехника аналоговых устройств: Учебник для втузов – Одесса.: АстоПринт,2000.– 212с.
2. Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. – М.: Энергоиздат, 1987. –320с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т2– М.: Мир, 1993. – 371с.
4. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров. – М.: Мир,1984.–248с.

Приложение А. Схемы однозвенных фильтров на ОУ

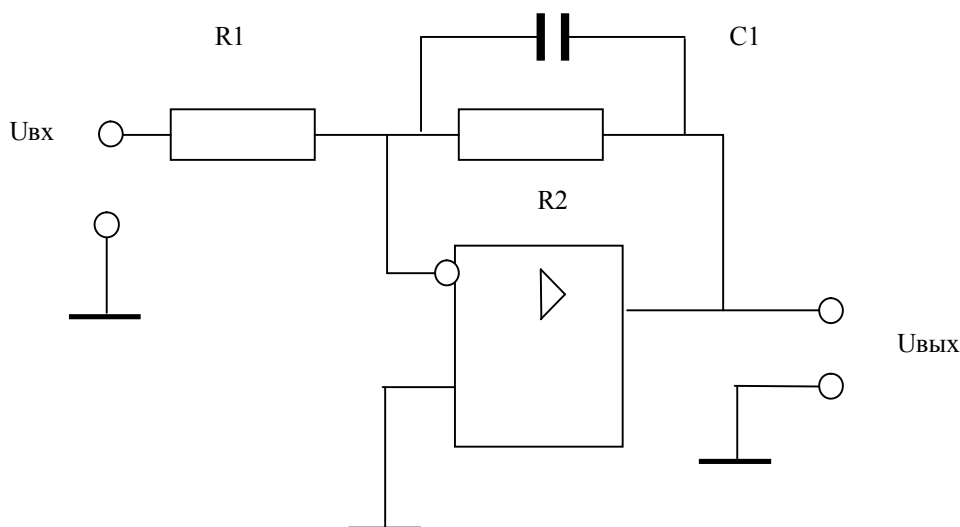


Рис. 1П. Схема 1.

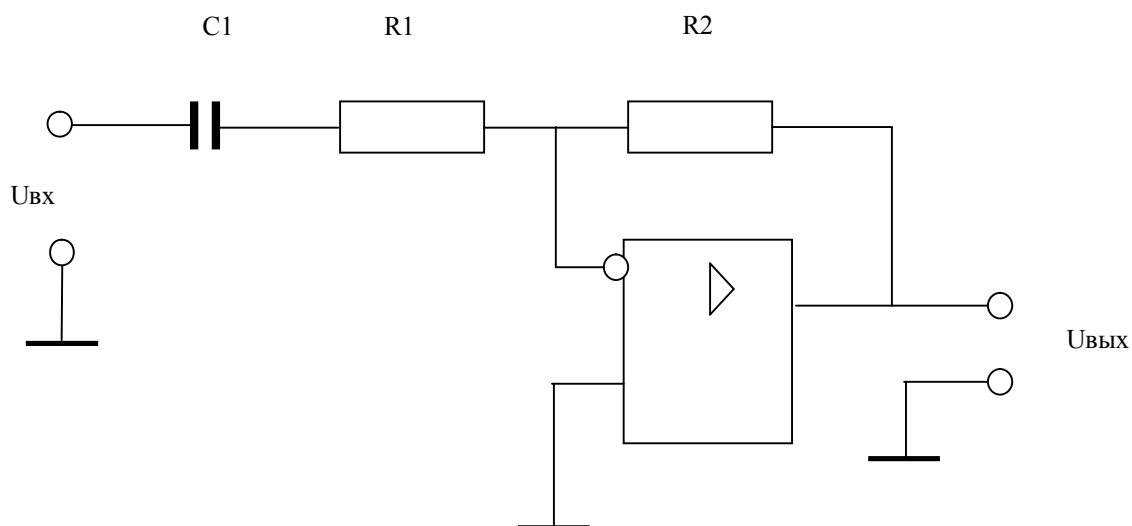


Рис. 2П. Схема 2.

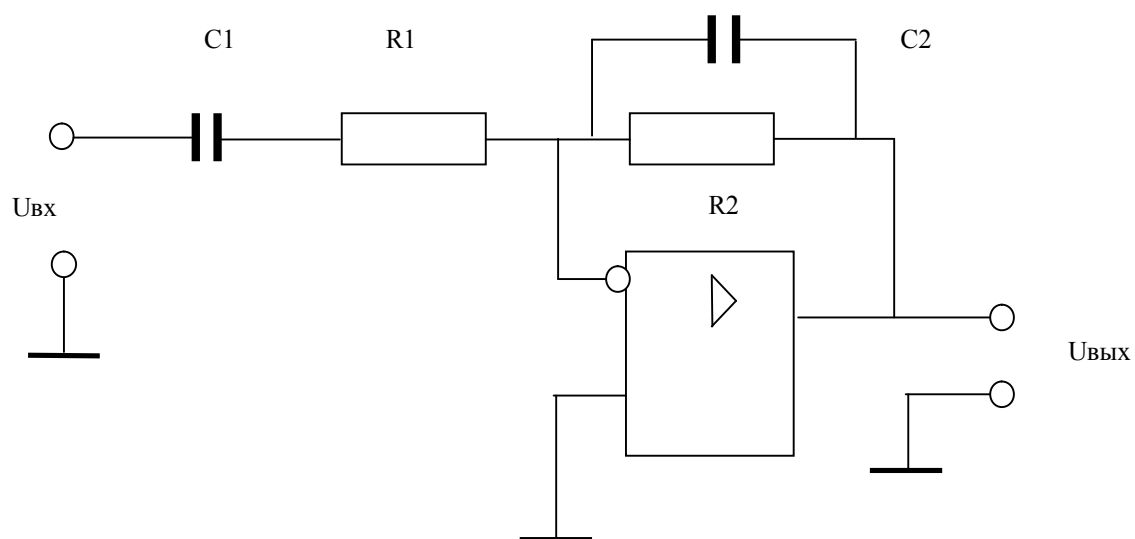


Рис. 3П. Схема 3.

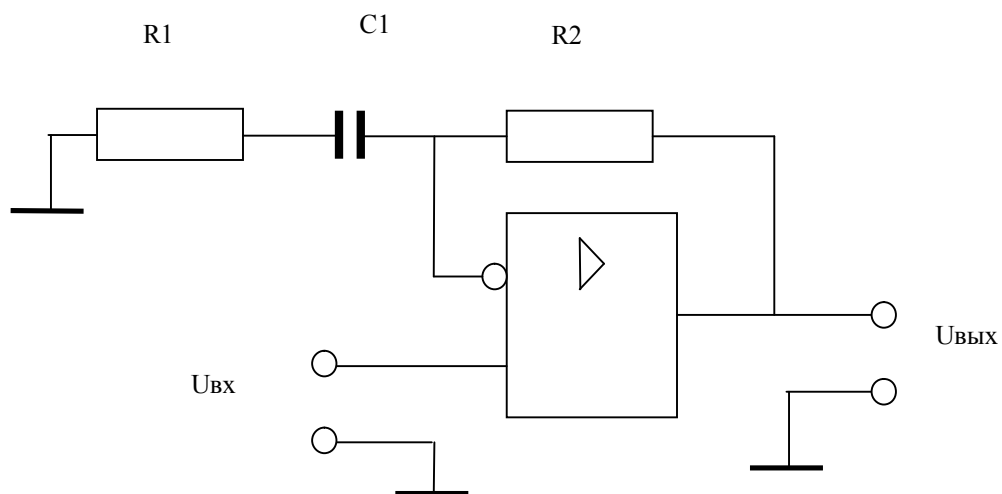


Рис. 4П. Схема 4.

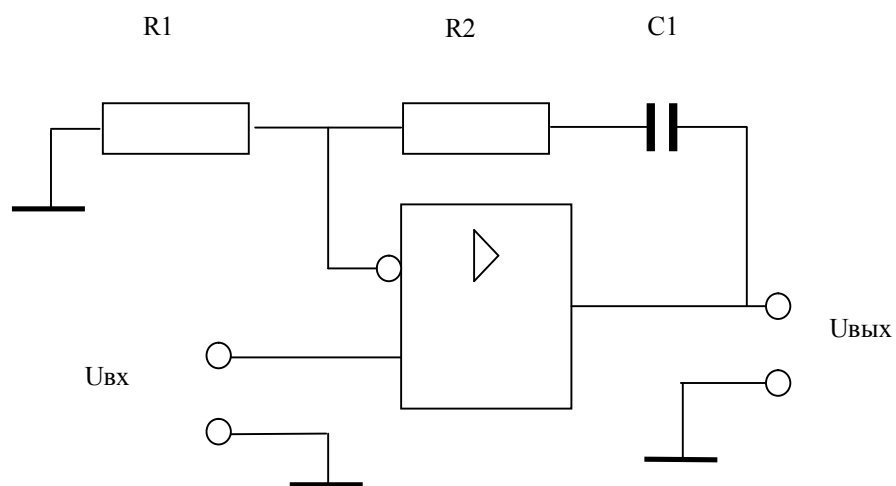


Рис. 5П. Схема 5.

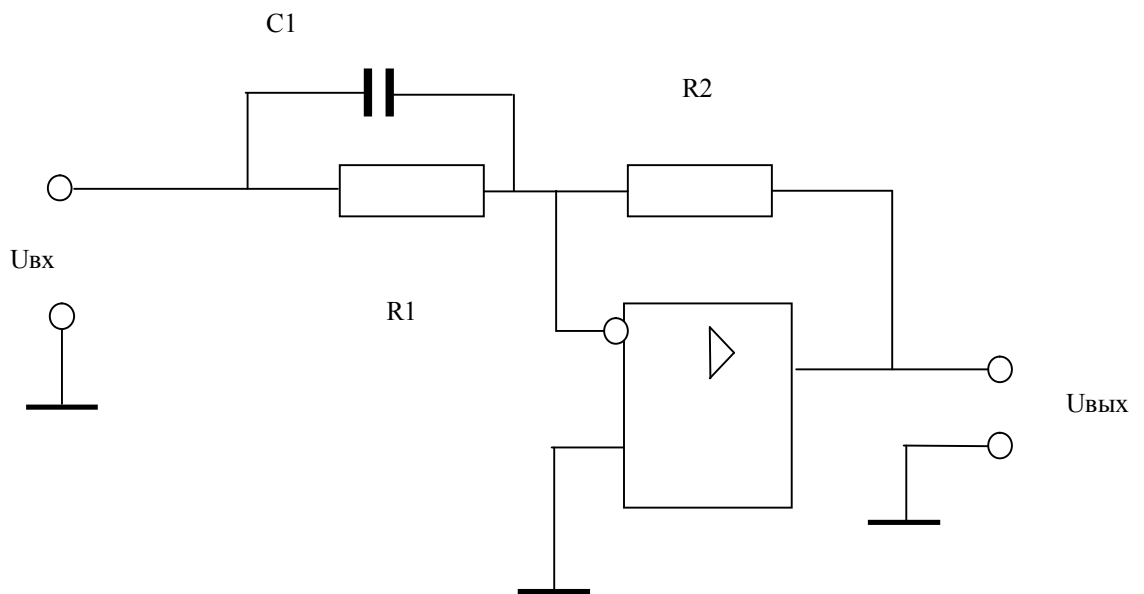


Рис. 6П. Схема 6.

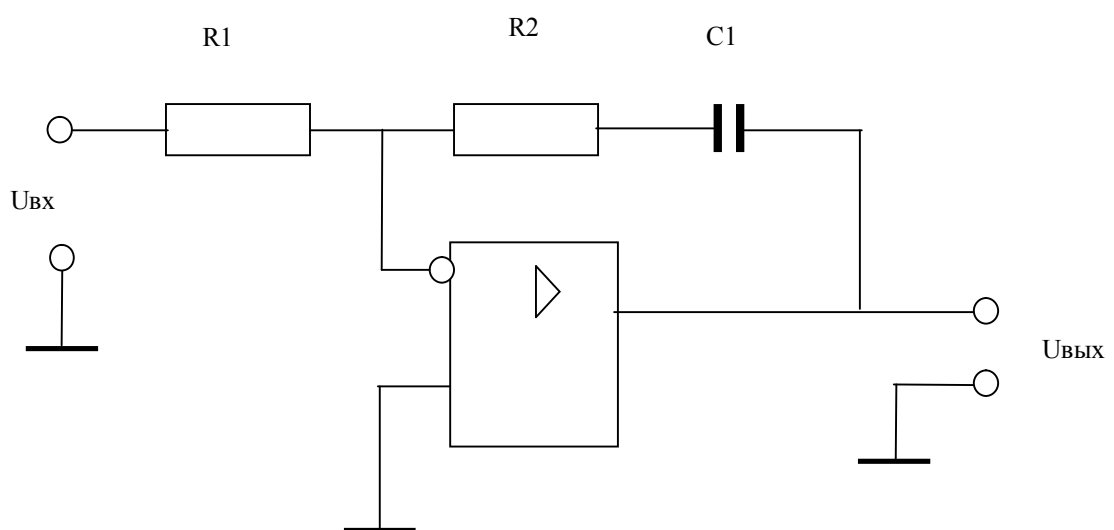


Рис. 7П. Схема 7.

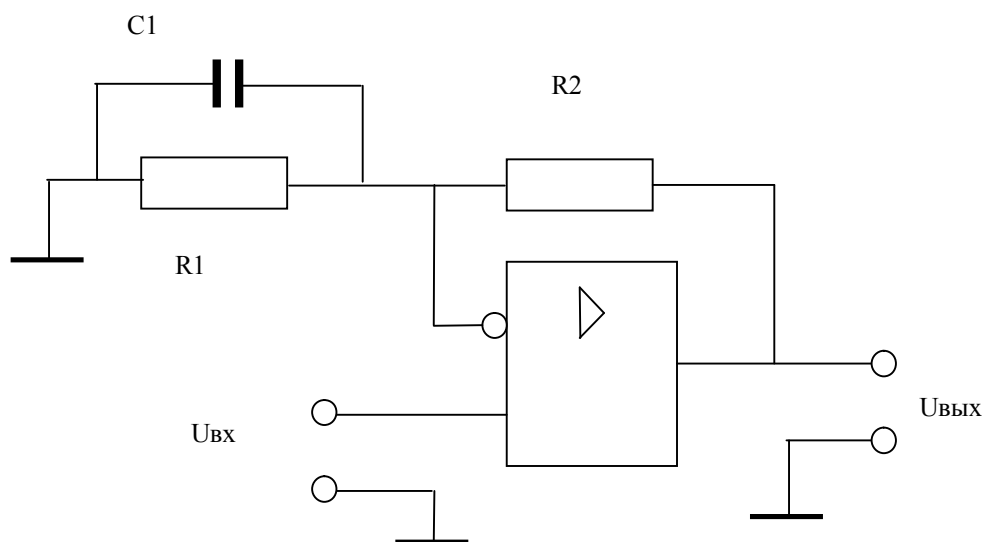


Рис. 8П. Схема 8.

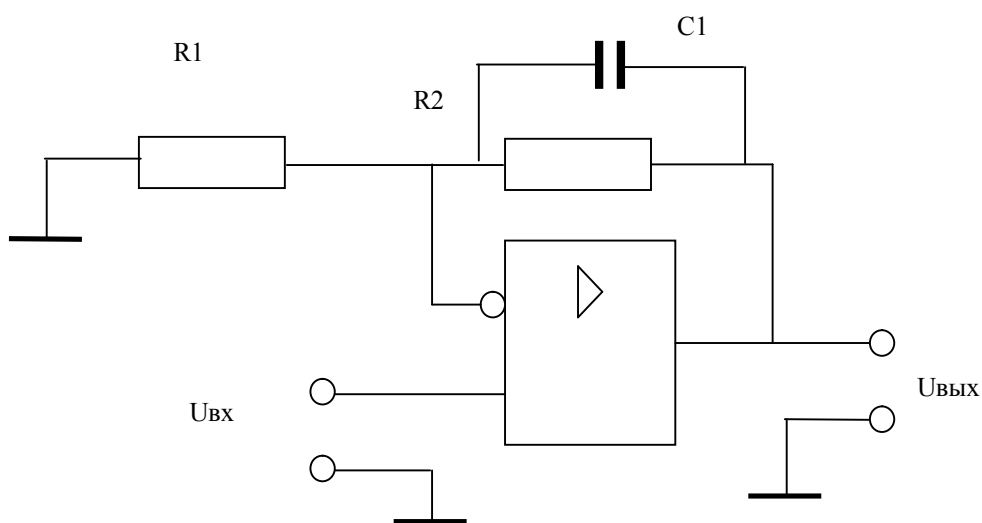


Рис. 9П. Схема 9.

