

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

М. П. Тиличенко, Л. Г. Чубриков, П. П. Изотов

АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Лабораторный практикум
по курсу «Электротехника и электроника»
для студентов неэлектротехнических специальностей

Гомель 2009

УДК 621.382.049.77(075.8)

ББК 32.852я73

Т40

*Рекомендовано научно-методическим советом
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 5 от 26.05.2008 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Н. И. Вяхирев*

Тиличенко, М. П.

Т40 Аналоговые устройства : лаборатор. практикум по курсу «Электротехника и электроника» для студентов неэлектротехн. специальностей / М. П. Тиличенко, Л. Г. Чубриков, П. П. Изотов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 79 с.

В лабораторных работах исследуются: аналоговые электронные устройства на полупроводниковых диодах и транзисторах, усилители электрических колебаний, генераторы электрических колебаний, генераторы линейно-изменяющегося напряжения и преобразователь напряжения в частоту, частотные электрические фильтры. Даны необходимые теоретические сведения, задания для самостоятельной домашней подготовки, лабораторные задания, контрольные вопросы и требования к оформлению отчета.

Для студентов неэлектротехнических специальностей.

УДК 621.382.049.77(075.8)

ББК 32.852я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

Введение

Электроника ныне охватывает и определяет все сферы деятельности человечества. Устройства сбора, обработки и передачи информации широко используются для управления, контроля технологических процессов. Устройства силовой электроники используются в электроприводе, электротермии, электротехнологии и т.д.

Усвоение базовой системы знаний в области электроники будущими инженерами неэлектротехнических специальностей расширяет научно-технический кругозор специалистов, положительно влияет на развитие логического образа мышления, позволяет быстрее адаптироваться на любом рабочем месте.

В формировании системы знаний, умений и навыков в области электроники решающую роль играют лабораторные практикумы .

Лабораторные практикумы по электронике:

- позволяют изучать принципы работы и характеристики наиболее часто применяемых электронных устройств;
- развивают способности к активному самостоятельному творчеству и накоплению навыков работы с приборами и оборудованием, в процессе монтажа электронных устройств на специальном стенде, и анализа результатов.

Данный цикл лабораторных работ по курсу «Электротехника и электроника» начинается с лабораторной работы № 2. Лабораторная работа № 1 является вводной при изучении аналоговых устройств.

Лабораторная работа № 2

Тема: Устройства на полупроводниковых диодах и транзисторах.

Цель работы:

- изучить назначение, устройство и принцип работы электронных ключей, ограничителей амплитуды и усилителей, реализуемых на полупроводниковых диодах и транзисторах;
- научиться правильно определять параметры элементов простейших электронных устройств, собирать эти устройства на монтажной панели стенда и экспериментально исследовать их работу с помощью измерительных приборов.

1. Краткие теоретические сведения

1.1 Диодные ключи

Применение диодов в качестве коммутирующих приборов в ключах обусловлено нелинейными свойствами диодов, определяемыми видом их ампер-вольтной характеристики рис. 2.1.

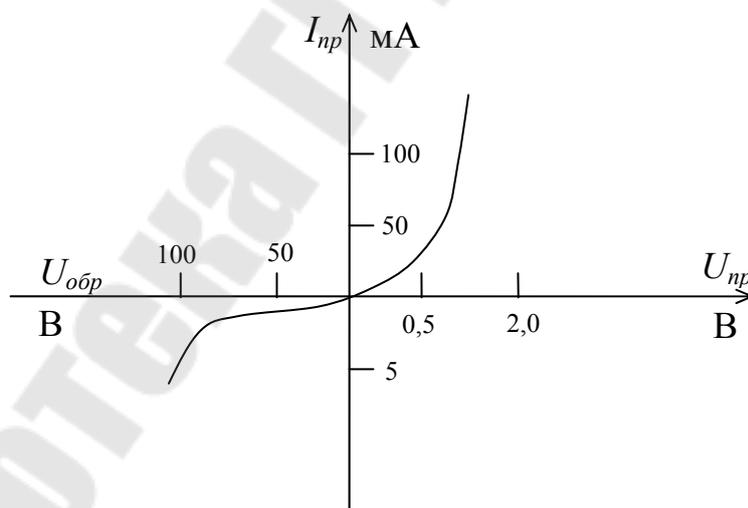


Рис 2.1. Ампер-вольтная характеристика полупроводникового диода

Вследствие того, что ток, протекающий через диод при его прямом включении I_{np} , во много раз превышает $I_{обр}$ при обратном включении, сопротивление p-n – перехода R_{np} в первом случае близ-

ко к нулю (мало), а во втором случае $R_{обр} \gg R_{np}$ (велико). В зависимости от способа подключения нагрузки различают схемы последовательного и параллельного ключей.

В схеме последовательного диодного ключа рис. 2.2а, резистор нагрузки R_n включается последовательно с диодом.

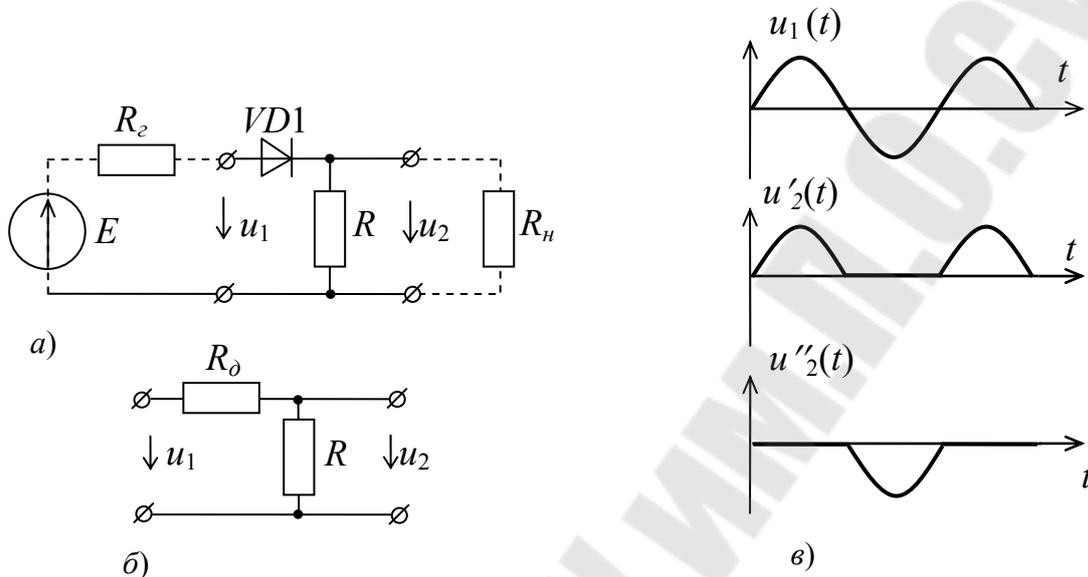


Рис. 2.2. Схема последовательного ключа (а) его эквивалентная схема (б) и временные синхронизированные диаграммы напряжений (в)

Свойства ключа без учета переходных процессов удобно отображать с помощью статической характеристики передачи $u_2 = f(u_1)$. Полагая, что внутреннее сопротивление источника входного напряжения равно нулю ($R_2 = 0$), а сопротивление нагрузки бесконечно большое ($R_n = \infty$), аппроксимируя АВХ диода линейноломанной линией и заменяя диод эквивалентным сопротивлением, приходим к эквивалентной схеме рис 2.2б, из которой следует

$$u_2(t) = \frac{u_1(t)}{R_\partial + R} \cdot R = \frac{1}{1 + \frac{R_\partial}{R}} \cdot u_1(t). \quad (2.1)$$

Из (2.1) следует, что если резистор R выбран так, что сопротивление $R_{\partial,обр} \gg R \gg R_{\partial,np}$, то при положительном напряжении на аноде, когда диод открыт ($R_\partial \rightarrow 0$), выходное напряжение u_2 близко к напряжению на входе ключа, т.е. $u_2 \approx u_1$. При смене полярности когда $u_1 < 0$, напряжение u_2 на выходе ключа будет стремиться к нулю ($u_2 \rightarrow 0$) и будет тем меньше, чем больше $R_{\partial,обр}$. Временные синхро-

низированные диаграммы напряжений на входе и выходе ключа приведены (для синусоидального входного напряжения) на рис. 2.2в. Напряжение $u_2''(t)$ отвечает обратному включению диода VD1 (диод повернут анодом вправо).

В схеме параллельного диодного ключа рис. 2.3а резистор нагрузки включается параллельно диоду.

Приняв, как и в предыдущем ключе $R_H = \infty$, $R_C = 0$, получаем эквивалентную схему рис. 2.3б, из которой следует выражение для статической характеристики передачи.

$$u_2(t) = \frac{u_1(t)}{R + R_\partial} \cdot R_\partial = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_\partial}} \cdot u_1(t). \quad (2.2)$$

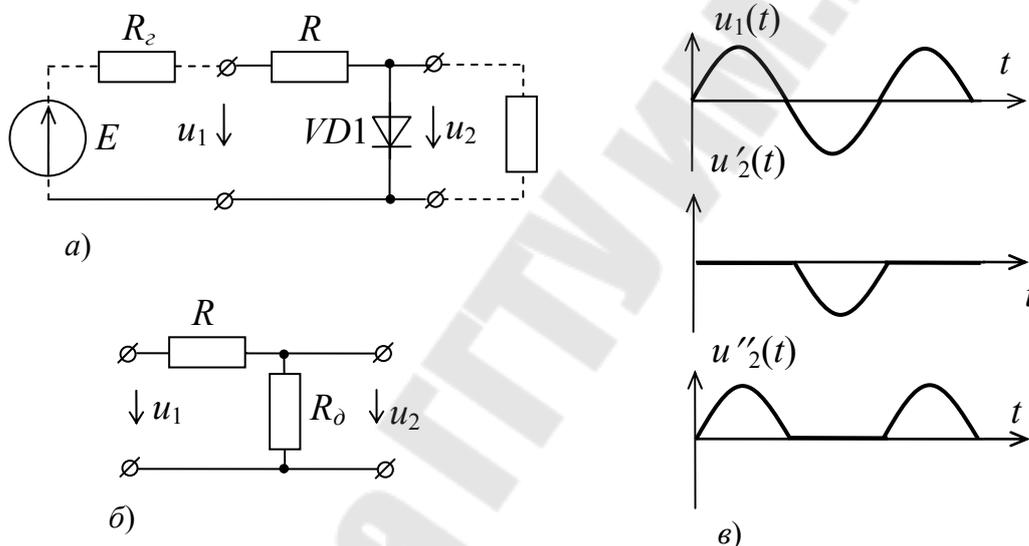


Рис. 2.3. Схема параллельного диодного ключа (а), его эквивалентная схема (б) и временные синхронизированные диаграммы напряжений (в)

Из (2.2) следует, что при положительном входном напряжении $u_2 > 0$ (при условии что $R_{\partial.обр} \gg R \gg R_{\partial.пр}$), диод VD1 открыт и $u_2'(t) = I_{пр} R_{\partial.пр} \rightarrow 0$. При смене полярности входного напряжения ($u_2 < 0$), диод VD1 закрывается, тогда $I_{обр} \cdot R \rightarrow 0$, а $u_2(t) \approx U_1(t)$. Диаграмма $u_2'(t)$ отвечает схеме рис. 1.3а, а диаграмма $U_2''(t)$ - обратному включению диода VD1 (диод повернут анодом вниз).

1.2. Транзисторные ключи

Транзисторы широко применяются в качестве переключающих устройств (бесконтактных реле), электронных ключей.

Транзисторные каскады, работающие в ключевом режиме, применяются в импульсных генераторах, логических элементах, триггерах, счетчиках импульсов и т.д.

На рис. 2.5а приведена схема транзисторного ключа. Для пояснения принципа его работы на рис. 2.4а приведена передаточная характеристика транзистора $I_k = f(I_\delta)$. Она снимается экспериментально при условии что $U_n = const$.

Ключ рис 2.5а работает следующим образом. При $u_1 = u_{ex} = 0$, ток $i_\delta = 0$ и, как следует из рис. 2.4а, $i_k = 0$. Тогда напряжение $u_2 = u_{вых}$ можно определить по второму закону Кирхгофа.

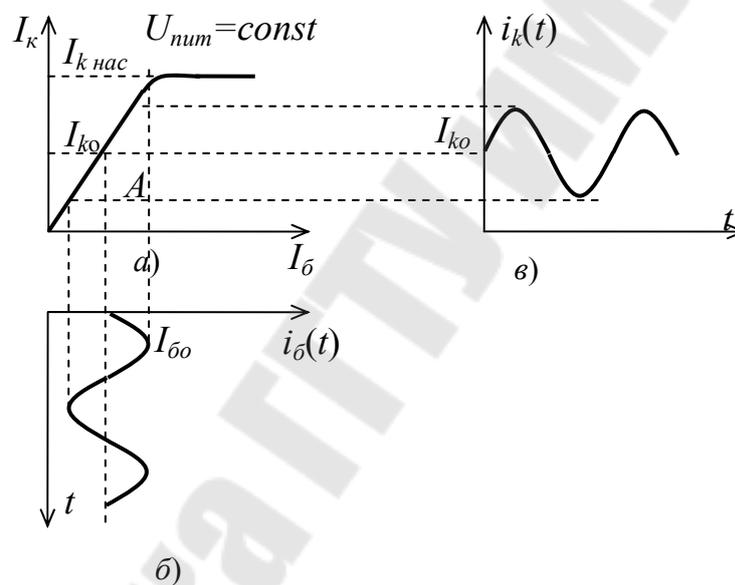


Рис. 2.4. а) - передаточная характеристика транзистора; б), в) – временные диаграммы тока базы $i_\delta = f_1(t)$ и коллектора $i_k = f_2(t)$

$$u_2 = U_n - i_k R_k = U_n, \quad (2.3)$$

Подадим на вход такое $u_1 = u_{ex}$, при котором $i_\delta > I_{\delta.nac}$ и, следовательно, $i_k = I_{k.nac}$. В этом случае транзистор полностью открывается, а

$$u_2 = u_{вых}(t) = U_n - I_{k.nac} R_k \approx 0. \quad (2.4)$$

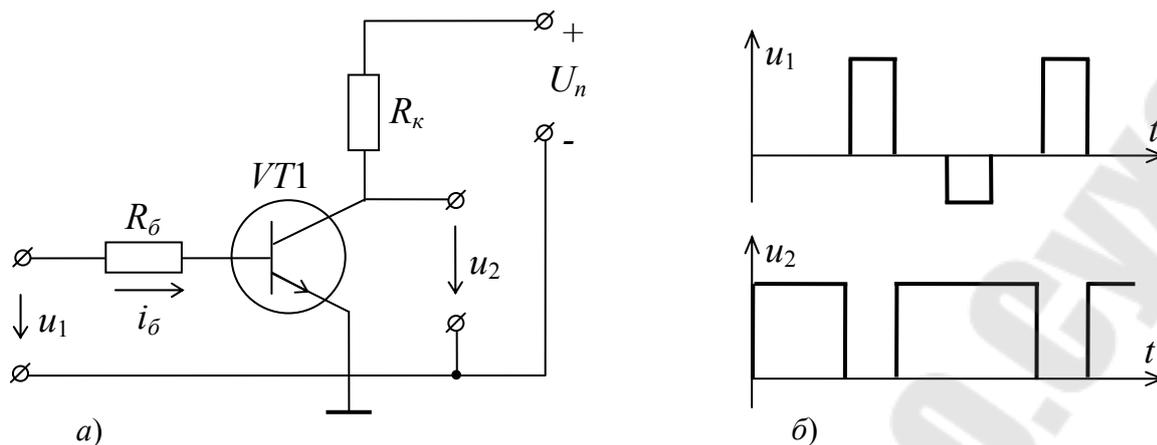


Рис 2.5. а) схема транзисторного каскада с общим эмиттером, работающего в режиме ключа; б) временные синхронизированные диаграммы напряжений на входах.
 $(U_n = 12 \text{ В}, R_k = 5,1 \div 10 \text{ кОм}, R_\delta = 1 \text{ кОм})$

1.3. Ограничители амплитуды

Под ограничителем понимается четырехполюсник рис. 2.6а, напряжение u_2 на выходе которого, повторяет форму входного напряжения u_1 , если это напряжение лежит в пределах некоторых уровней, и остается постоянным (неизменным во времени), если u_1 превышает эти уровни.

Как следует из диаграмм рис. 2.6б, пока $U'_{01} \geq u_1 \geq U''_{01}$, напряжение u_2 на выходе ограничителя изменяется по такому же закону, что и входные $u_1(t)$ (т.е. ограничение отсутствует). Если же величина u_1 превышает уровни U'_{01} и U''_{01} , то поступает на уровнях U'_{02} и U''_{02} соответственно.

Величины U'_{01} и U''_{01} называют уровнями ограничения входного напряжения, а значения U'_{02} и U''_{02} - уровнями выходного напряжения при ограничении.

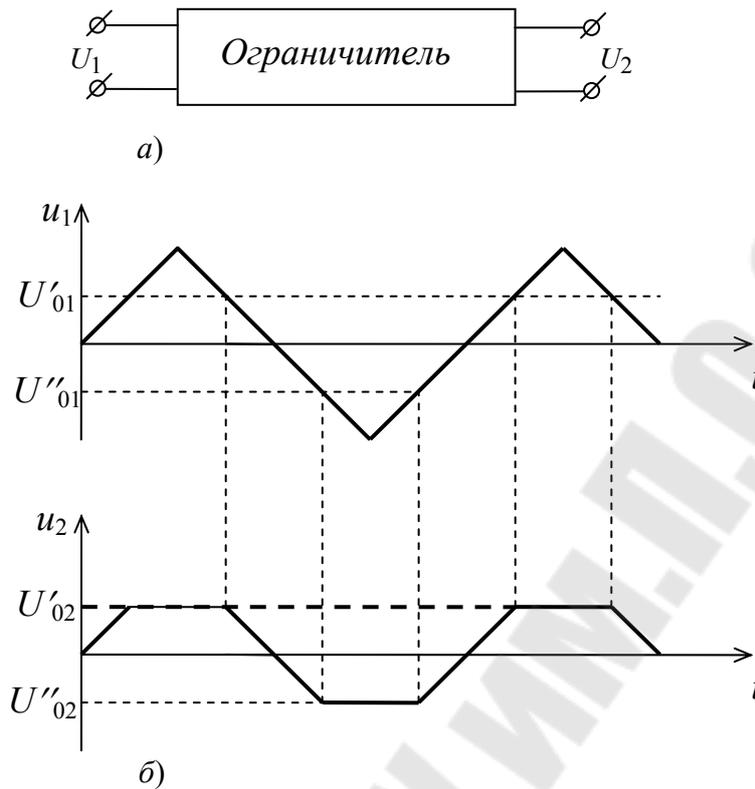


Рис. 2.6. Схема ограничителя в виде четырехполюсника (а) и временные синхронизированные диаграммы напряжений на входе и на выходе (б)

Наряду с двусторонними ограничителями или как их ещё называют, ограничителями сверху и снизу (по максимуму и по минимуму), применяются односторонние ограничители, ограничивающие входной сигнал только сверху (по максимуму), либо только снизу (по минимуму).

Рассмотренные ранее ключевые схемы могут применяться также в качестве ограничителей, но в этом случае они используются в качестве формирователей импульсов, а не для коммутации выходных напряжений или токов.

На рис 2.7а приведена схема одностороннего последовательного диодного ограничителя с регулируемым (изменением величины $U_{см}$) уравнением ограничения.

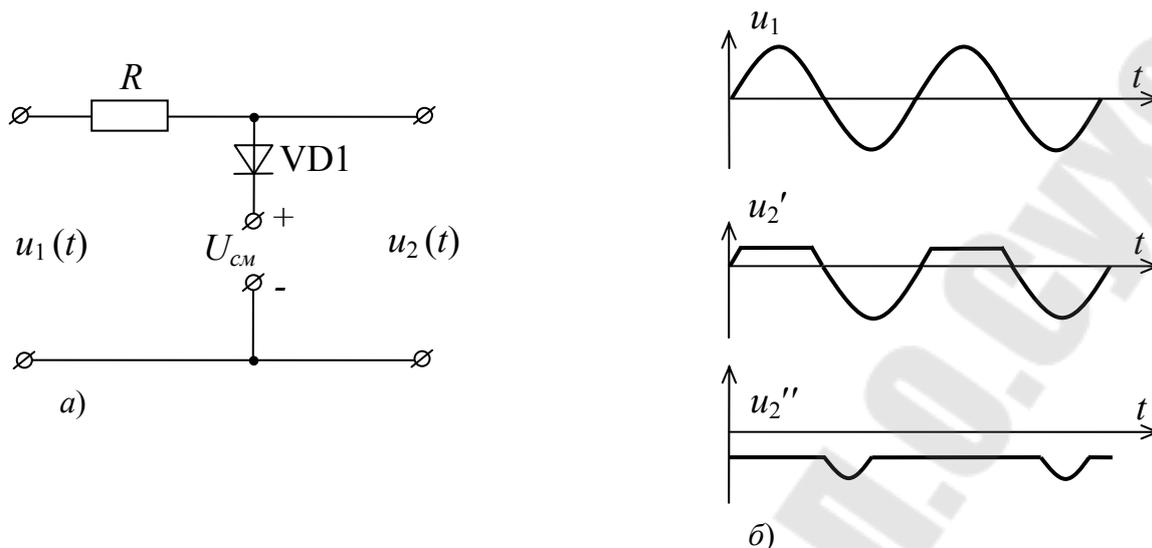


Рис. 2.7. Схема (а) и временные диаграммы напряжений на входе и выходе одностороннего ограничителя (VD1-КА522, $R = 5,1 \div 10$ кОм)

Можно показать, что выражение для статической характеристики передачи $u_2 = f(u_1)$ для схемы рис 2.7а имеет вид

$$u_2(t) = \frac{R_\delta}{R + R_\delta} u_1(t) + \frac{R}{R + R_\delta} U_{cm}. \quad (2.5)$$

Из (2.5) следует, что если $u_1(t) > 0$ и $u_1(t) \geq U_{cm}$, то диод VD1 – открыт ($R_\delta \rightarrow 0$) и потому $u_2(t) \approx U_{cm} = const$ а в случае, когда $u_1(t) < U_{cm}$ или $u_1(t) < 0$ диод VD1 закрывается, его сопротивление $R_\delta \rightarrow \infty$ и тогда $u_2(t) = u_1(t)$. Этому выражению соответствует линия $u_2'(t)$ на рис 2.7б. Если же поменять полярность U_{cm} , то напряжение на выходе ограничителя будет изменяться по закону $u_2''(t)$ рис. 2.7б.

На рис. 2.8а приведена схема двустороннего последовательного диодного ограничителя.

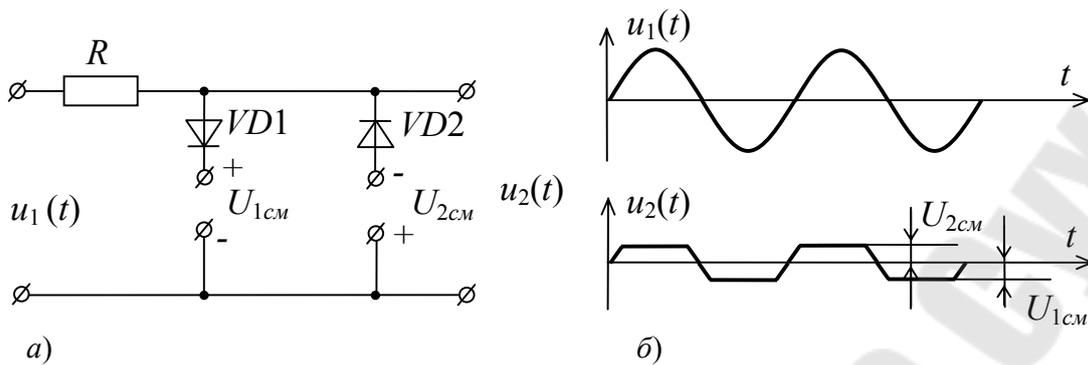


Рис. 2.8. Схема (а) и диаграммы напряжений двустороннего ограничителя

Схема простого двустороннего ограничителя амплитуды приведена на рис. 2.9а

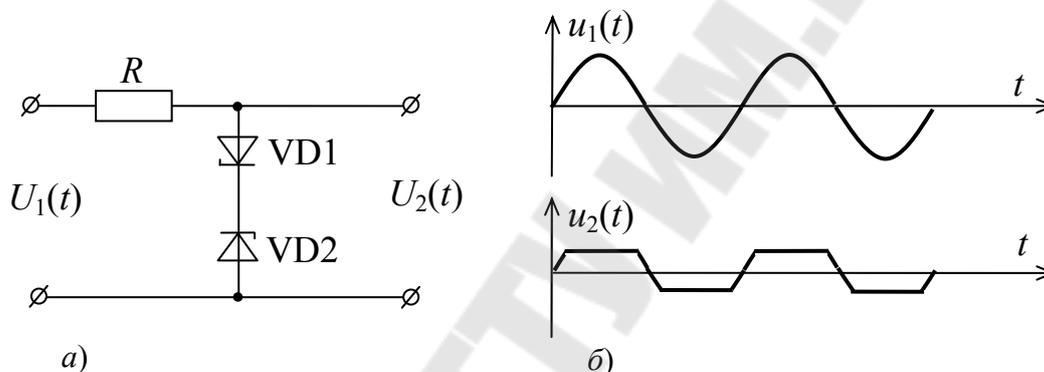


Рис. 2.9. Схема (а) и диаграмма напряжений (б) на входе и выходе двустороннего ограничителя на стабилитронах ($R = 1,0$ кОм, VD1, VD2-Д-814)

В каждый полупериод «работает» обратный смещенный стабилитрон, т.е. он ограничивает амплитуду этого полупериода синусоиды $u_{\text{вх}}$ на уровне $u_{\text{вых}} = U_{\text{см}}$, где $U_{\text{см}}$ - напряжение стабилизации.

1.4. Формирователь коротких импульсов

Ранее рассмотренные ограничители амплитуды широко используются для преобразования формы импульсов (треугольные на входе в трапециидальные на выходе, синусоидальные в прямоугольные и т.д.). Вторым, применяемым на практике, способом формирования импульсов является применение линейных цепей включаемых на выходе или на входе диодного ключа.

На рис. 2.10а приведена схема формирователя коротких импульсов из прямоугольных.

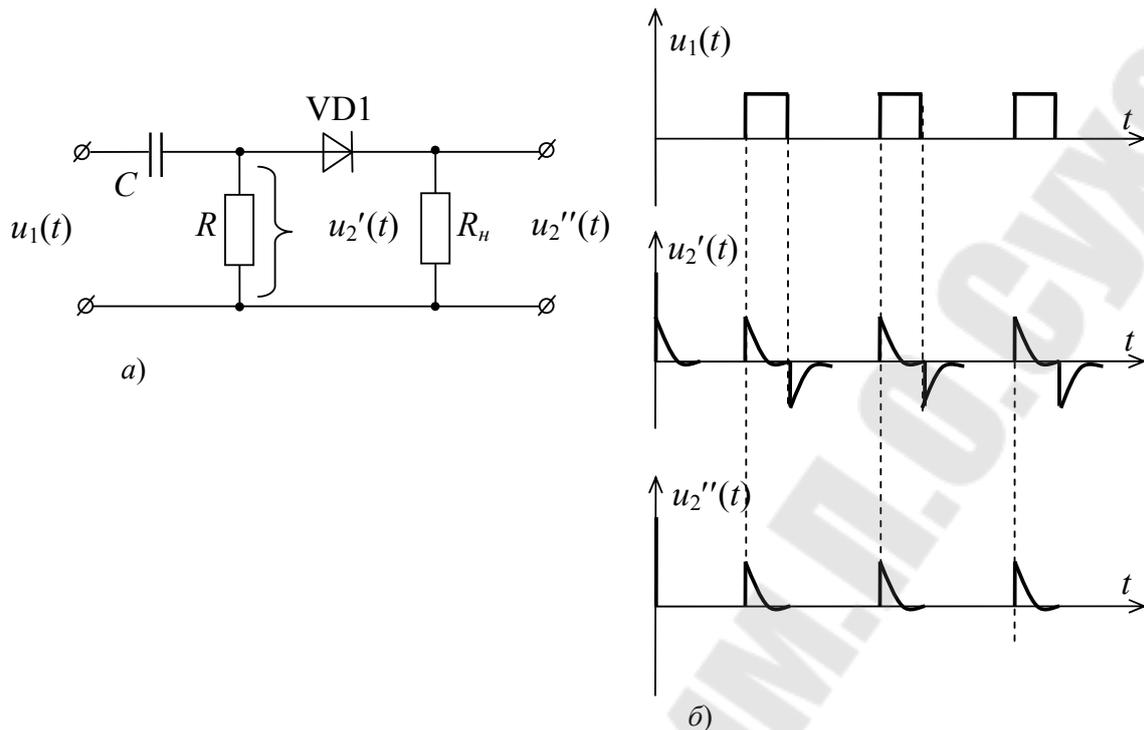


Рис. 2.10. Схема (а) и диаграмма напряжений на входах формирователя коротких импульсов (б)

Входная линейная RC -цепь представляет собой дифференцирующую цепь для которой

$$u_2'(t) = RC \frac{du_c(t)}{dt} \approx RC \frac{du_1(t)}{dt}, \quad (2.6)$$

т.е. $u_2'(t)$ зависит от скорости изменения входного напряжения.

Если на вход поданы прямоугольные импульсы напряжения $u_1(t)$, то в моменты скачкообразного изменения $u_1(t)$ (на фронтах прямоугольных импульсов) $\frac{du_1(t)}{dt}$ велико.

Из электротехники известно, что

$$u_2'(t) = U_0 e^{-t/RC}, \quad (2.7)$$

где U_0 - амплитуда входных импульсов.

Следовательно

$$u_2(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_\partial}{R_n}} U_0 e^{-t/RC}, \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что при открытом диоде (положительное напряжение $u_2'(t)$ на аноде)

$$u_2''(t) = U_0 e^{-t/RC}, \quad (2.9)$$

а при закрытом диоде ($R_D \rightarrow \infty$) $u_2''(t) = 0$.

Временные диаграммы напряжений, поясняющие работу формирователя, приведены на рис. 2.10б.

1.5. Однокаскадный транзисторный усилитель

На рис. 2.11а приведена схема RC-усилителя в которой биполярный транзистор n-p-n-типа включен по схеме с общим эмиттером.

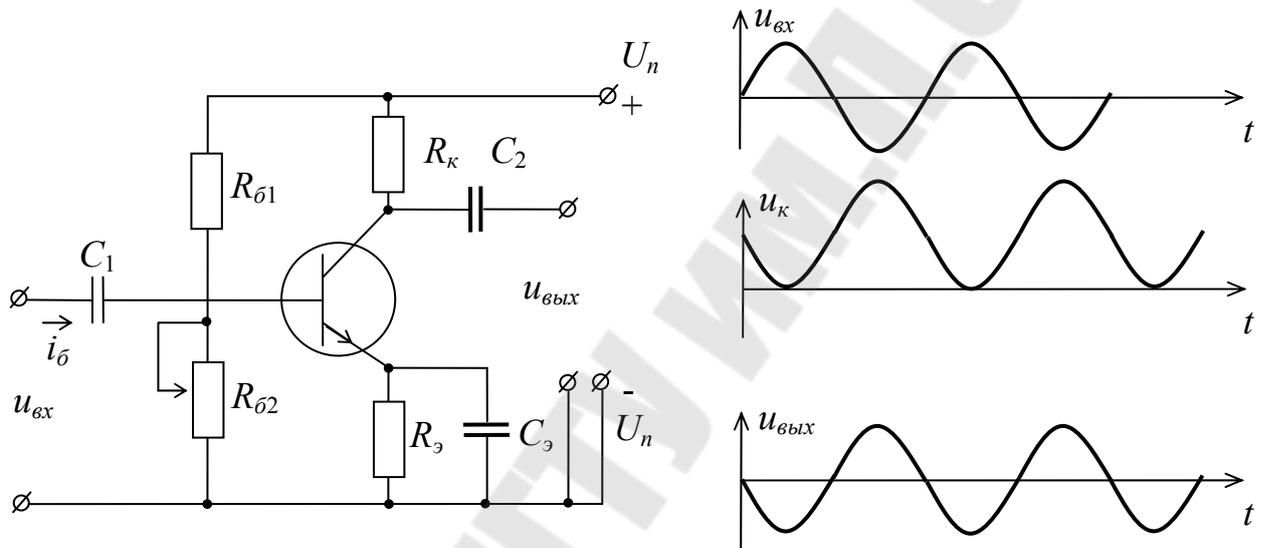


Рис. 2.11. Схема (а) и временные диаграммы напряжений на входах усилителя на транзисторе (б)

($R_{\delta 1} = 47 \text{ к}$; $R_{\delta 2} = 22 \text{ к}$; $C_1 = C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$; $R_3 = 0,2R_k$; $C_3 = 20 \text{ мкФ}$)

Для усиления переменного напряжения $u_{вх}(t)$ без существенных искажений формы, рабочую точку А рис. 2.4а на передаточной характеристике транзистора выбирают в середине линейного участка характеристики за счет изменения соотношения $R_{\delta 1}/R_{\delta 2}$ (регулировкой $R_{\delta 2}$). Если входной ток i_{δ} (вызываемый действием входного напряжения $u_{вх}$) не выходит за пределы линейной части передаточной характеристики, то ток i_k не достигает значения $I_{к.нас}$ и будет изменяться пропорционально $i_{вх}$, т.е. $i_k = \beta i_{\delta}$, где β - коэффициент усиления транзистора по току.

В этом случае напряжение на коллекторе транзистора равно

$$u_k(t) = U_n - I_{k0}R_k - i_k(t)R_k, \quad (2.10)$$

т.е. содержит постоянную составляющую

$$U_{k0} = U_n - I_{k0}R_k, \quad (2.11)$$

и синусоидальную (переменную во времени составляющую)

$$u_{\text{вых}}(t) = i_k(t)R_k = -R_k I_m \sin \omega t = -R_k \beta I_{m\delta} \sin \omega t, \quad (2.12)$$

Конденсатор C_1 - разделительный. Он препятствует связи по постоянному току источника усиленного сигнала $u_{\text{ex}}(t)$ с транзистором. Конденсатор C_2 также является разделительным. Благодаря нему на выход усилителя (после C_2) передается только переменное напряжение (2.12)

$$K_u = \frac{U_{\text{мвых}}}{U_{\text{мex}}} = \frac{\beta I_{m\delta} R_k}{Z_{\text{ex}} I_{m\delta}} = \beta \frac{R_k}{Z_{\text{ex}}}, \quad (2.13)$$

где Z_{ex} - полное входное сопротивление усилителя.

Для стабилизации рабочей точки А, т.е. для поддержания $I_{\delta 0} = \text{const}$ и, следовательно, $I_{k0} = \text{const}$ используется отрицательная обратная связь (ООС) по постоянному току. Для этого в цепь эмиттера включают резистор $R_3 = (0,1 \div 0,2)R_k$. Напряжение на этом резисторе $U_{R_3} = I_{k0}R_3$ будет изменять напряжение $U_{\delta\delta}$ транзистора в соответствии с изменением I_{k0} , стабилизируя I_{k0} . Для исключения возникновения ООС по переменному току (что уменьшало бы K_u усилителя) конденсатором C_3 шунтируют R_3 . Величину емкости C_3 выбирают такой, чтобы выполнялось условие $X_{C_3} \ll R_3$.

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

- 2.1. По конспекту лекций, разделу 1 данной работы и рекомендуемой литературе изучить назначение, устройство и принцип работы электронных ключей, ограничителей амплитуды и усилителей электрических сигналов, реализуемых на полупроводниковых диодах и транзисторах.
- 2.2. Научиться определять параметры элементов ключей, ограничителей амплитуды и усилителей.
- 2.3. Заготовить отчёт по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

- 3.1. Исследуйте работу диодных ключей.
 - 3.1.1. Соберите схему рис. 2.2а. (Диод КД522, резистор $R = 5,1 \div 10$ кОм) на монтажной панели стенда.
 - 3.1.2. С помощью проводников со штекерами подключите выход блока ГС (гнездо ГН) со входом ключа и со входом «ВНЕН.1:1» внешней синхронизации развёртки осциллографа (на правой боковой стороне осциллографа). Гнездо « \perp » блока ГС присоедините к нижней общей шине монтажной панели стенда. Переключатели «Диапазон» и «Род работы» блока ГС установите в положение «1кГц» и «1:1 ГН» - соответственно.
 - 3.1.3. Подключите короткий (корпусной) провод усилителя вертикального входа осциллографа к общей шине панели стенда, а длинный (сигнальный) провод этого кабеля подключите ко входу исследуемой схемы.
 - 3.1.4. После проверки правильности сборки схемы преподавателем, включите питание стенда, блока ГС и осциллографа соответствующими тумблерами. Подайте на вход синусоидальный сигнал частотой $f = 1$ кГц и с амплитудой $U_{max} = 10$ В пользуясь органами управления блока ГС, частотомера и осциллографа.
 - 3.1.5. Получите на экране неподвижное изображение $(2 - 3)^x$ периодов синусоидального входного сигнала $u_1(t)$ совместив (ручкой смещение луча по горизонтали и ручкой «уровень») начало синусоиды с точкой пересечения левой вертикальной и средней горизонтальной линий сетки на экране осциллографа.
 - 3.1.6. Зарисуйте сигналы $u_1(t)$, $u_2'(t)$ и $u_2''(t)$ в протокол (по образцу рис. 2.2б и укажите значения масштабных множителей « m_t » и « m_v », определив их по шкалам «время/дел» и «V/дел» осциллографа. Сигнал u_2'' получите для обратного включения диода.
 - 3.1.7. Поменяйте местами диод и резистор на рис. 2.3а и зарисуйте в протокол сигналы $u_1(t)$, $u_2'(t)$ и $u_2''(t)$ по образцу рис.2.3б, указав рядом « m_t » и « m_v ». Выключите питание блока ГС и стенда. Уберите детали с панели.
- 3.2. Исследуйте работу транзисторного ключа.

- 3.2.1. Соберите схему рис. 2.5а. Подайте питание 12В от источника ГН2 (плюс – на R_k , а минус – на общую шину). От блока ГС подайте на вход ключа прямоугольные импульсы частотой $f = 1000$ Гц. При помощи осциллографа наблюдайте сигнал u_2 на выходе ключа (на коллекторе транзистора).
- 3.2.2. Увеличивая амплитуду входных импульсов ручкой «амплитуда» блока ГС, установите такое её минимальное значение, при котором ток коллектора транзистора достигает величины насыщения ($I_{к.нас}$). Зарисуйте в протокол диаграммы $u_1(t)$ и $u_2(t)$. Укажите « m_t » и « m_v ». Выключите питание стенда и уберите детали с панели.
- 3.3. Исследуйте работу диодных ограничителей.
- 3.3.1. Соберите схему рис. 2.7а. Подайте на вход синусоидальный сигнал $f = 1000$ Гц и $U_{mex} = 10$ В. Подайте от источника ГН2 напряжение смещения $U_{см} = U_{mex}/2$, соблюдая полярность. Получите на экране осциллографа неподвижное изображение $(2 - 3)^x$ периодов $u_1(t) = u_{вх}(t)$ и $u_2(t) = u_{вых}(t)$ и зарисуйте в протокол, по образцу рис. 2.7б, указав « m_t » и « m_v ». Измените полярность $U_{см}$ и зарисуйте также сигнал $u_2''(t)$. Регулируя рукой «грубо» источника ГН2 величину $U_{см}$ от 0 до 10 В, наблюдайте изменение формы сигнала на выходе ограничителя. Выключите питание стенда. Внимание. Перед сменой полярности $U_{см}$ выключите питание стенда.
- 3.3.2. Дополните схему рис. 2.7а по рис. 2.8а. Установите $U_{1см} = U_{mex}/2$ от ГН2, а $U_{2см} = U_{mex}/2$ от ГН1, соблюдая полярность. Настройте осциллограф и зарисуйте в протокол диаграмму $u_1(t)$, $u_2(t)$ по образцу рис. 2.8б, указав « m_t » и « m_v ». Выключите питание блока ГС и стенда. Уберите детали и провода с панели стенда.
- 3.3.3. Соберите схему двустороннего ограничителя на встречно включенных стабилитронах рис. 2.9а. Подайте на вход синусоидальный сигнал $f = 1000$ Гц и $U_{mex} = 10$ В и зарисуйте диаграмму по образцу рис. 2.9б, указав « m_t » и « m_v ». Выключите питание блока ГС и стенда. Уберите детали и провода.

- 3.4. Исследуйте работу формирователя коротких импульсов.
- 3.4.1. Соберите схему рис. 2.10а. На вход подайте прямоугольные импульсы ($f = 1000$ Гц и $U_{mex} = 5$ В) длительность импульса установите равной длительности паузы ручкой «длит» блока ГС. Определите длительность импульса $t_u = T/2 = 1/(2f)$, а затем постоянную времени $\tau = 0,1t_u$.
- 3.4.2. Выбрав $C = 0,01$ мкф, определите $R = \tau/C$. Установите ближайшее к рассчитанному значению R , имеющееся в стенде. Установите $R_n = 47$ кОм.
- 3.4.3. Наблюдайте с помощью осциллографа сигналы u_1 , u_2' и u_2'' на входе, выходе дифференцирующей цепочки и на выходе формирователя. Зарисуйте диаграмму напряжений в протокол, указав « t_t » и « t_v ». Выключите питание стенда. Уберите детали и провода.
- 3.5. Исследуйте работу однокаскадного транзисторного усилителя на биполярном транзисторе.
- 3.5.1. Соберите схему рис. 2.11а, приняв $C_1 = C_2 = 0,1$ мкф. Для стендов начиная с первого установите $R_{к1} = 3,0$ кОм; $R_{к2} = 3,6$ кОм; $R_{к3} = 4,3$ кОм; $R_{к4} = 5,1$ кОм; $R_{к5} = 6,2$ кОм; $R_{к6} = 7,6$ кОм; $R_{кб} = 10,0$ кОм; $R_{кд} = 15,0$ кОм; $R_9 = 0,2R_k$; $C_9 = 10$ мкф. **Соблюдайте полярность включения электролитического конденсатора C_9 .** Подайте от ГН2 $U_n = 12$ В соблюдая полярность, а на вход усилителя подайте синусоидальный сигнал от блока ГС $f = 1000$ Гц, амплитуды $U_{mex} = 0,2$ В.
- 3.5.2. Наблюдая $u_{вых}(t)$ и изменяя $R_{б2}$ добейтесь симметричного ограничения положительных и отрицательных полупериодов выходного сигнала и далее уменьшая U_{mex} добейтесь отсутствия искажения. (Рабочая точка А рис. 2.4 установлена в середине линейной части передаточной характеристики транзистора).
- 3.5.3. Настройте осциллограф так чтобы, при внешней синхронизации синусоида входного сигнала начиналась в начале осей координат (см. рис. 2.11б). Зарисуйте синхронно во времени сигналы u_{ex} , u_k и $u_{вых}$, указав « t_t » и « t_v ». Выключите питание блока ГС и блока стенда. Уберите все детали и провода. Наведите ис-

ходный порядок на рабочем месте и получите подпись преподавателя на протоколе.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. В чем проявляются вентильные свойства диода? Поясните с помощью АВХ.
- 4.2. Из каких соображений выбирается значение R в схемах 2.2, 2.3, 2.7, 2.8?
- 4.3. Укажите на обозначении диода где анод, где катод?
- 4.4. Что такое стабилитрон? Поясните его назначение и принцип действия с помощью ВАХ.
- 4.5. Нарисуйте форму сигнала на выходе дифференцирующей цепочки, если на вход подан синусоидальный сигнал.
- 4.6. Чем отличается амплитудный ограничитель на полупроводниковых диодах от диодного ключа?
- 4.7. Что такое полупроводниковый транзистор?
- 4.8. Назовите типы транзисторов и укажите их обозначения на схемах.
- 4.9. Перечислите основные параметры и характеристики биполярного транзистора.
- 4.10. Какие вы знаете схемы включения транзисторов?
- 4.11. Поясните, как работает транзистор в ключевом режиме.
- 4.12. Для чего в схеме усилителя установлены C_1 и C_2 ?
- 4.13. Каково назначение элементов C_3 и R_3 ?
- 4.14. Назначение цепочки $R_{\sigma 1}$ и $R_{\sigma 2}$?
- 4.15. От чего зависит значение коэффициента усилителя транзистора рис. 2.11?

5. Требования к оформлению отчёта

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие письменные ответы на контрольные вопросы;
- раздел «ход работы» с названиями пунктов 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5,

По пункту 3.1:

- схему устройств и синхронизированную диаграмму по образцу рис 2.2, 2.3.

По пункту 3.2:

- схему рис. 2.5а, диаграмму напряжений на входах и значение $U_{ex.min}$ отвечающее состоянию насыщения транзистора.

По пункту 3.3:

- схемы устройств и синхронизированные диаграммы по образцу рис 2.7, 2.8, 2.9.

По пункту 3.4:

- схему и диаграмму напряжений по образцу рис. 2.10.

По пункту 3.5:

- схему рис. 2.11а и диаграммы напряжений по рис. 2.11б для усилителя;
- значения коэффициента усиления усилителя по напряжению.

Примечание: рядом с каждой схемой следует указать значения параметров установленных элементов.

- анализ результатов экспериментальных исследований выводы по цели работы;
- протокол экспериментальных данных полученных в ходе выполнения лабораторного задания, подписанный преподавателем.

Лабораторная работа № 3

Тема: Усилители на микросхемах ИОУ

Цель работы:

- изучить назначение и основные параметры микросхемы операционного усилителя;
- ознакомиться с блок-схемой усилителя, его основными параметрами и характеристиками;
- изучить разновидности усилителей реализуемых на основе микросхемы ИОУ;
- приобрести навыки упрощенного расчёта усилителей на микросхемах ОУ, навыки сборки их на монтажной панели стенда и навыки экспериментального определения их основных параметров и характеристик.

1. Краткие теоретические сведения

1.1 Блок-схема усилителя, его основные параметры и характеристики.

Усилитель электрических сигналов – это электронное устройство, управляющее потоками энергии поступающей от источника питания (от источника постоянного тока) к нагрузке. При этом мощность входного сигнала (мощность управления), как правило, намного меньше мощности отдаваемой в нагрузку, а формы входного (усиливаемого) и выходного (в нагрузке) сигналов совпадают.

Блок схема усилителя приведена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Блок-схема усилителя

Все усилители можно классифицировать по следующим критериям:

- по частоте усиливаемого сигнала (усилители низких частот (УНЧ) – до сотен кГц, широкополосные (единицы и десятки МГц), частотно-избирательные);
- по роду усиливаемого сигнала (УПТ – от 0 Гц и выше, усилители переменного тока);
- по функциональному назначению (усилители напряжения, усилители тока, усилители мощности).

Свойства усилителей определяются следующими основными параметрами и характеристиками:

Коэффициенты усиления:

по напряжению $\underline{K}_u = \frac{U_{\text{вbx}}}{U_{\text{вх}}}$, по току $\underline{K}_I = \frac{I_{\text{вbx}}}{I_{\text{вх}}}$, и по мощности

$$K_p = \frac{P_{\text{вbx}}}{P_{\text{вх}}} . \quad (3.1)$$

Если усилитель состоит из нескольких каскадов, то его коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления его каскадов

$$\underline{K} = \underline{K}_1 \cdot \underline{K}_2 \dots \cdot \underline{K}_n , \quad (3.2)$$

Вследствие того, что в усилителе часто содержатся реактивные элементы, его коэффициент усиления является комплексной величиной

$$\underline{K}_u = K_u e^{j\varphi},$$

где

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad (3.3)$$

- модуль коэффициента усиления;

φ - сдвиг фаз между $\underline{U}_{\text{вых}}$ и $\underline{U}_{\text{вх}}$, т.е.

$$\varphi = \psi_{u_{\text{вых}}} - \psi_{u_{\text{вх}}}. \quad (3.4)$$

Входное $\underline{Z}_{\text{вх}}$ и выходное $\underline{Z}_{\text{вых}}$ сопротивления

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}; \quad \underline{Z}_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}}, \quad (3.5)$$

Коэффициент полезного действия $\eta = \frac{P_n}{P_{\text{пот}}}$.

Амплитудная характеристика (АХ) – это зависимость амплитуды $U_{\text{твых}}$ или действующего значения $U_{\text{вых}}$ напряжения (тока) на выходе усилителя от амплитудного $U_{\text{твх}}$ или действующего $U_{\text{вх}}$ значения напряжения (тока) на входе усилителя. График этой зависимости приведен на рис. 3.2.

Точка 1 соответствует напряжению шумов, измеряемому при $U_{\text{вх}} = 0$. Точка 2 – минимальному входному напряжению, при котором на выходе усилителя можно различать сигнал на фоне шумов.

Участок 2-3 – рабочий участок, на котором сохраняется пропорциональность между входным и выходным напряжениями усилителя. После точки 3 наблюдаются нелинейные искажения входного сигнала при которых например изменяется форма сигнала на выходе усилителя.

Величина

$$D = \frac{U_{\text{вх max}}}{U_{\text{вх min}}} \quad (3.6)$$

- характеризует динамический диапазон усилителя.

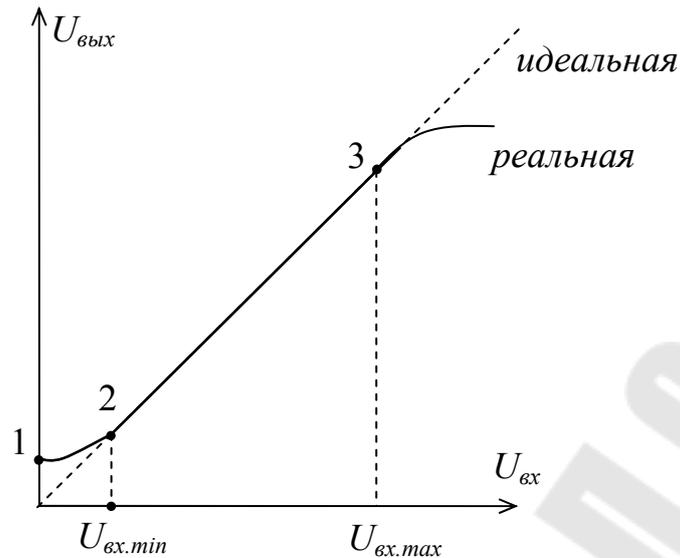


Рис. 3.2. Амплитудная характеристика усилителя

Амплитудно-частотная характеристика и фазо-частотная характеристика (АЧХ) и (ФЧХ) – это зависимость модуля коэффициента усиления и угла сдвига фаз между $\underline{U}_{вых}$ и $\underline{U}_{вх}$ от частоты рис. 3.3а, б.

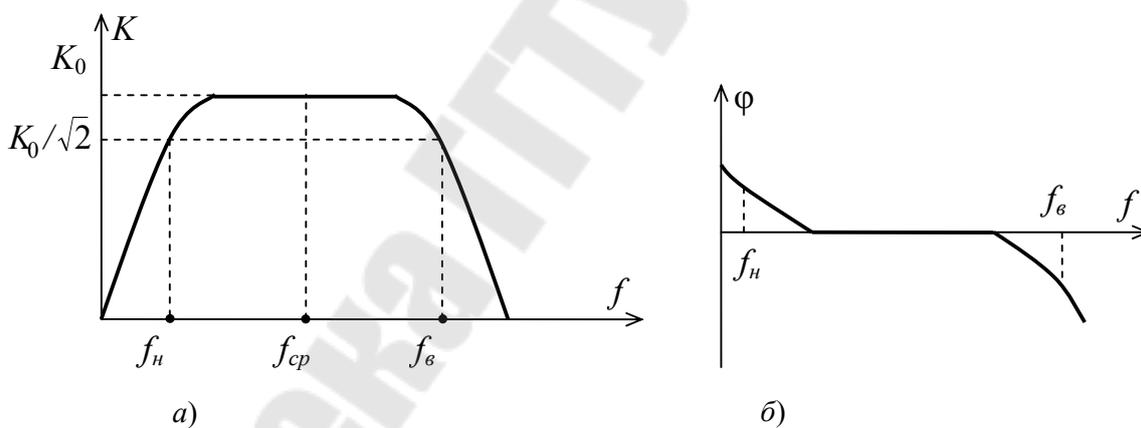


Рис. 3.3. АЧХ (а), и ФЧХ (б) усилителя

Частоты f_n и f_v называются нижней и верхней граничными частотами, а их разность $\Pi = f_v - f_n$ - рабочей полосой частот усилителя.

1.2. Обратные связи в усилителях

Обратной связью называют влияние части выходного сигнала на входной, который в свою очередь существенным образом влияет на выходной сигнал.

В усилителях используют, как правило отрицательные обратные связи (ООС). При наличии в схеме ООС часть сигнала с его выхода передается на вход усилителя в противофазе, т.е. $\Delta\varphi = \psi_{u_{\text{вых}}} - \psi_{u_{\text{вх}}} = 180^\circ$. При этом входной сигнал уменьшается, что в свою очередь приводит к уменьшению выходного сигнала. Несмотря на уменьшение коэффициента усиления, использование ООС в усилителях исключительно благотворно влияет на многие параметры и характеристики усилителя. В частности уменьшаются искажения формы сигнала, увеличивается полоса пропускания и т.д.

Различают ООС последовательную по напряжению, последовательную по току, параллельную по напряжению и току.

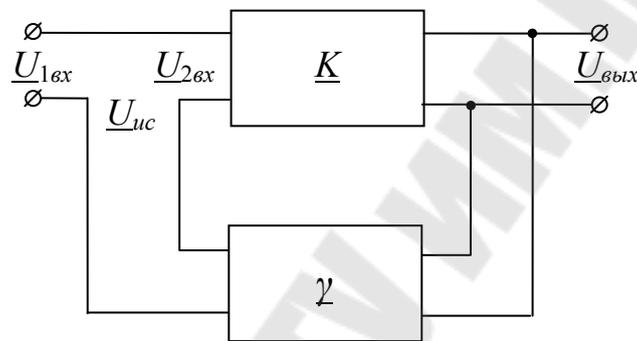


Рис. 3.4. Блок-схема усилительного каскада с последовательной обратной связью по напряжению

На примере схемы рис. 3.4 рассмотрим, как влияет ОС на параметры усилителя. Усилитель без ОС характеризуется комплексным коэффициентом усиления по напряжению $\underline{K}_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$, а цепь обратной связи характеризуется комплексным коэффициентом передачи

$$\underline{\gamma} = \frac{U_{\text{оc}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (3.7)$$

Коэффициент усиления усилителя охваченного отрицательной обратной связью $\underline{K}_{u\text{ООС}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{1\text{вх}}}$.

Из рис. 3.4 следует, что $U_{2\text{вх}} = U_{1\text{вх}} - U_{\text{ООС}}$, или

$$\underline{K}_{u\text{ООС}} = \frac{\underline{K}_u U_{2\text{вх}}}{U_{2\text{вх}} + U_{\text{ООС}}} = \frac{\underline{K}_u U_{2\text{вх}}}{U_{2\text{вх}} + \underline{\gamma} \underline{K}_u U_{2\text{вх}}} = \frac{\underline{K}_u}{1 + \underline{\gamma} \underline{K}_u}$$

таким образом,

$$\underline{K}_{uOOC} = \frac{\underline{K}_u}{1 + \gamma \underline{K}_u}. \quad (3.8)$$

Из (3.8) следует, что при глубокой ООС, когда

$$|\gamma \underline{K}_u| \gg 1, \quad \underline{K}_{uOOC} = \frac{1}{\underline{\gamma}}, \quad (3.9)$$

т.е. коэффициент усилителя \underline{K}_{uOOC} зависит только от свойств цепи обратной связи и мало зависит от свойств самого усилителя.

Аналогично можно показать, что ООС изменяет значение входного $\underline{Z}_{вхOOC}$ и выходного $\underline{Z}_{выхOOC}$ сопротивлений усилителя.

$$\underline{Z}_{вхOOC} = \underline{Z}_{вх}(1 + \underline{K}_u \underline{\gamma}) \quad \text{и} \quad \underline{Z}_{выхOOC} = \frac{\underline{Z}_{вых}}{1 + \underline{\gamma} \underline{K}_u}, \quad (3.10)$$

т.е. наличие ООС увеличивает модуль $\underline{Z}_{вхOOC}$ и уменьшает модуль $\underline{Z}_{выхOOC}$ в сравнении с $\underline{Z}_{вх}$ и $\underline{Z}_{вых}$ усилителя без ООС.

1.3. Блок-схема и основные параметры микросхемы операционного усилителя

Микросхема операционного усилителя – это высококачественный усилитель в интегральном исполнении, предназначенный для усиления как постоянных ($f = 0$), так и переменных сигналов. Поскольку раньше такие усилители использовались в аналоговых вычислительных машинах для выполнения математических операций (сложения, вычитания и т.д.), то этим объясняется происхождение термина «операционный».

В настоящее время ОУ широко используются в виде полупроводниковых аналоговых интегральных микросхем для решения многочисленных задач усиления, преобразования, сравнения, генерирования маломощных сигналов. Упрощенное графическое обозначение операционного усилителя на схемах приведено на рис. 3.5.

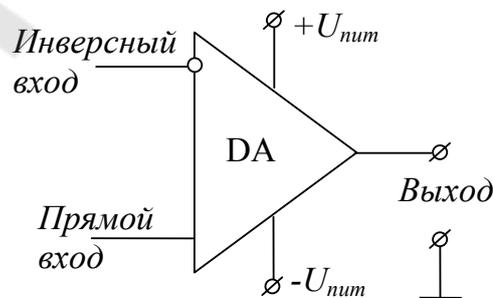


Рис. 3.5. УГО микросхемы операционного усилителя

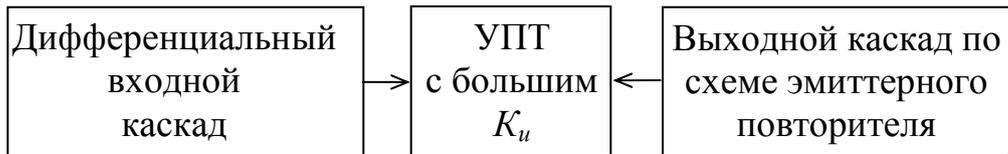


Рис. 3.6. Блок-схема операционного усилителя

Блок-схема операционного усилителя приведена на рис. 3.6. ОУ представляет собой довольно сложное электронное устройство, состоящее из входного дифференцирующего каскада, усилителя постоянного тока с большим коэффициентом усиления и выходного каскада на схеме эмиттерного повторителя.

Чаще всего для питания ОУ применяют двухполярный стабилизированный источник постоянного тока.

В идеализированном представлении его коэффициент усиления по напряжению K_u очень высок ($K_u \rightarrow \infty$), он имеет большое входное ($R_{вх} \rightarrow \infty$) и малое выходное ($R_{вых} \rightarrow 0$) сопротивления.

Параметрами ОУ можно управлять посредством введения внешних цепей обратных связей.

1.4. Схемотехнические разновидности усилителей на основе микросхемы ОУ

1.4.1. Инвертирующий усилитель

Если прямой (неинвертирующий) вход ОУ заземлить (соединить с общей шиной), а на инвертирующий вход подать входное напряжение $u_{вх}(t)$ рис. 3.7а, то напряжение на выходе $u_{вых}(t)$ можно определить по выражению

$$u_{вых}(t) = -\frac{R_2}{R_1} u_{вх}(t); K_u = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (3.11)$$

Из рис. 3.7а следует, что в этой схеме действует параллельная обратная связь по напряжению. Так как $i_- = 0$, то по первому закону

Кирхгофа $i_1 = i_2$. Тогда по второму закону Кирхгофа $i_1 = \frac{u_{вх}}{R_1}$,

$$i_2 = -\frac{u_{вых}}{R_2} \text{ и, следовательно } u_{вых} = -\frac{R_2}{R_1} u_{вх}; U_{вых} = -\frac{R_2}{R_1} U_{вх}.$$

На рис. 3.7б приведена передаточная характеристика инвертирующего усилителя, а на рис. 3.7в – временные синхронизированные диаграммы напряжений.

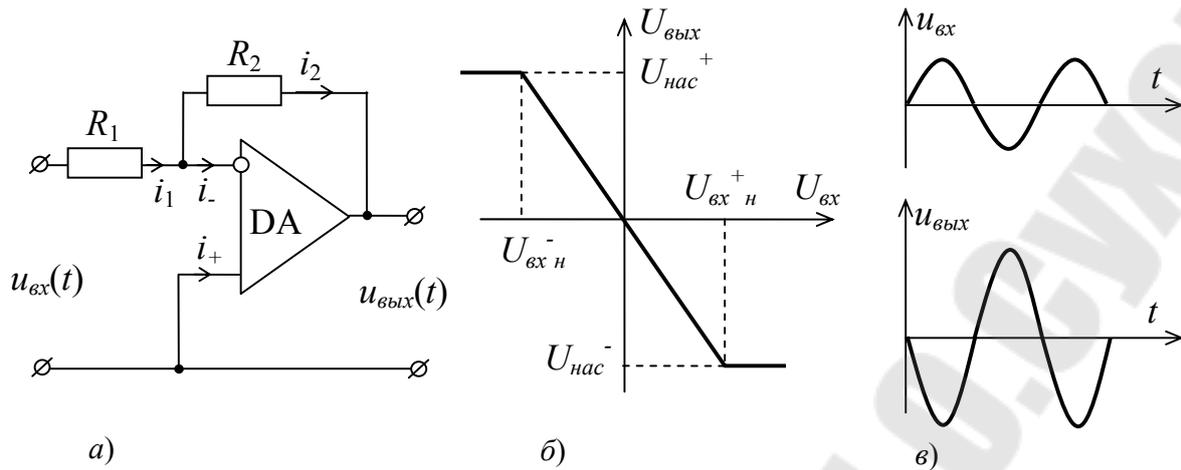


Рис. 3.7. Схема (а), передаточная характеристика (б) и временные синхронизированные диаграммы напряжений инвертирующего усилителя на ИОУ

Знак (-) в 3.11 означает, что полярность u_{ex} и $u_{вых}$ (см. рис. 3.7в) противоположны в каждый полупериод.

Величина $K_{uOOC} = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} = \frac{R_2}{R_1}$, т.е. зависит только от R_2/R_1 и потому его стабильность очень высока.

Входное сопротивление $R_{ex} = \frac{U_{ex}}{i} = R_1$, а выходное сопротивление $R_{вых} \rightarrow 0$ (при $K_u \rightarrow \infty$).

1.4.2. Неинвертирующий усилитель

Схема, передаточная характеристика и диаграммы напряжений на входах неинвертирующего усилителя приведены на рис.3.8а,б,в. Если $i_- = i_+ = 0$, то $i_1 = i_2$. Тогда по второму закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} u_{R_1} &= -u_{ex}, \quad u_{R_2} = u_{ex} - u_{вых} \\ i_1 R_1 &= -u_{ex}, \quad i_2 R_2 = u_{ex} - u_{вых} \\ i_1 &= -\frac{u_{ex}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{u_{ex} - u_{вых}}{R_2} \end{aligned}$$

$$-\frac{u_{ex}}{R_1} = \frac{u_{ex} - u_{вых}}{R_2}, \text{ или } u_{ex} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{u_{вых}}{R_2} \text{ или } u_{вых} = u_{ex} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Таким образом,

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (3.12)$$

Этот же результат следует из (3.8) при $K_u \rightarrow \infty$

$$K_{uOOC} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \gamma} = \frac{1}{\gamma} \text{ и следовательно } K_{uOOC} = \frac{1}{\gamma}, \text{ где } \gamma = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

таким образом $K_{uOOC} = \frac{1}{\gamma} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$.

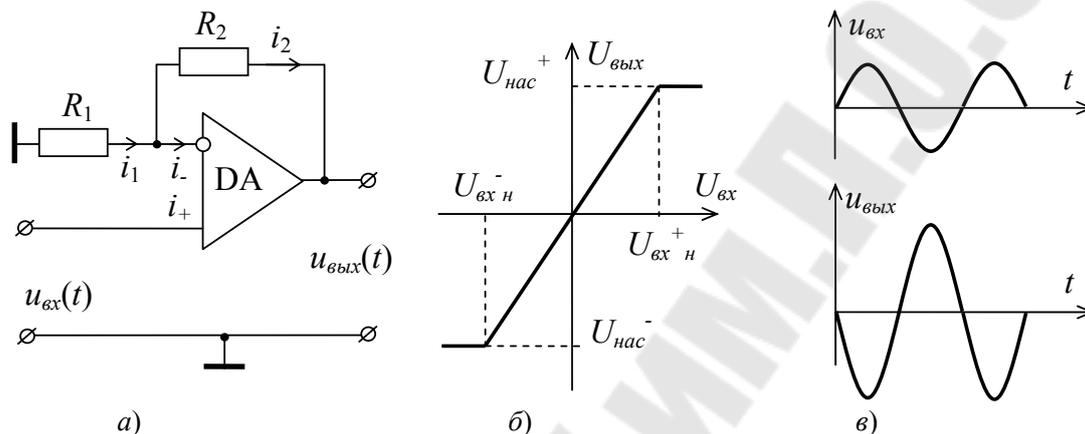


Рис. 3.8. Схема (а), передаточная характеристика (б) и временные синхронизированные диаграммы (в) напряжений неинвертирующего усилителя

Как и в схеме с инвертированием, $R_{вхOOC} \rightarrow \infty$, а $R_{выхOOC} \rightarrow 0$, при $K_u \rightarrow \infty$.

1.4.3 Повторитель напряжения

Если все выходное напряжение подать на инвертирующий вход рис. 3.9а т.е. принять, что $R_2 = 0$, то из (3.12) следует что $K_u = 1$. Тогда $u_{вых} = u_{вх}$.

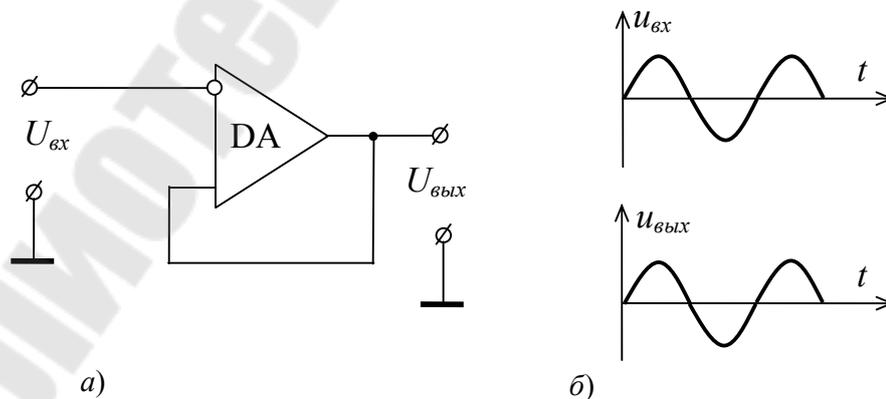


Рис.3.9. Схема (а) и временные диаграммы напряжений на входе и выходе повторителя напряжения (б)

1.4.4. Суммирующий усилитель

На рис. 3.10а приведена схема усилителя, напряжение на выходе которого пропорционально сумме напряжений на входах, т.е.

$$u_{\text{вых}} = -R_{OC} \left(\frac{u_{1\text{вх}}}{R_1} + \frac{u_{2\text{вх}}}{R_2} + \dots + \frac{u_{n\text{вх}}}{R_n} \right), \quad (3.13)$$

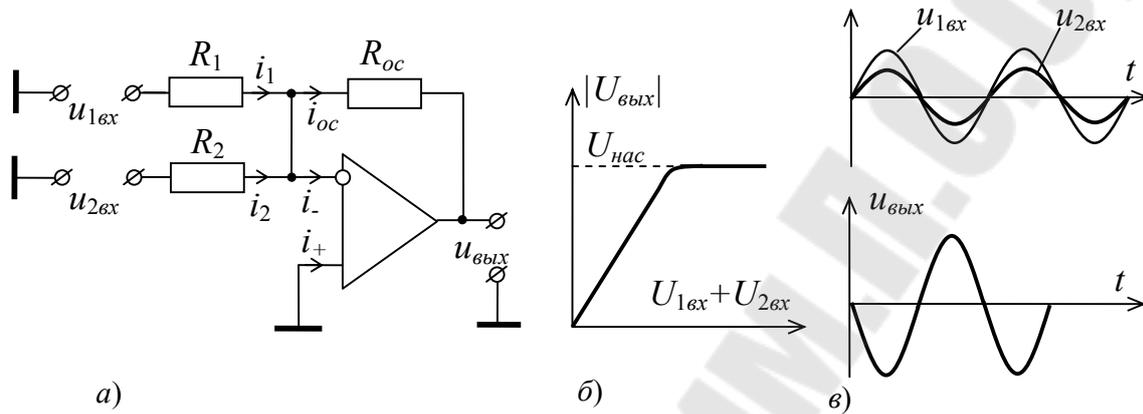


Рис. 3.10. Схема (а), амплитудная характеристика (б) и временные синхронизированные диаграммы (в) напряжений усилителя на ИОУ

В частном случае, когда $R_1 = R_2 = R$,

$$u_{\text{вых}} = -\frac{R_{OC}}{R} (u_{1\text{вх}} + u_{2\text{вх}}), \quad (3.14)$$

Если $i_- = i_+ = 0$, то $i_1 + i_2 = i_{OC}$

$$u_{R_1} = u_{1\text{вх}}, u_{R_2} = u_{2\text{вх}}, u_{R_{OC}} = u_{\text{вых}}$$

$$i_1 = \frac{u_{1\text{вх}}}{R_1}, i_2 = \frac{u_{2\text{вх}}}{R_2}, i_{OC} = -\frac{u_{\text{вых}}}{R_{OC}} \text{ или}$$

$$\frac{u_{1\text{вх}}}{R_1} + \frac{u_{2\text{вх}}}{R_2} = -\frac{u_{\text{вых}}}{R_{OC}}, \text{ или } u_{\text{вых}} = -R_{OC} \left(\frac{u_{1\text{вх}}}{R_1} + \frac{u_{2\text{вх}}}{R_2} \right) \text{ и при } R_1 = R_2 = R$$

приходим к (3.14).

Входные сигналы должны быть когерентными, т.е. иметь одинаковую частоту и неизменную во времени разность фаз.

1.4.4. Вычитающий усилитель

На рис. 3.11 приведена схема усилителя, напряжение на выходе которого пропорционально разности напряжений на его неинвертирующем и инвертирующем входах.

Если ОУ работает в линейном режиме, то для анализа можно использовать принцип суперпозиции;

$$\text{Если } u_{2ex} = 0, \text{ то } u'_{вых} = -u_{1ex} \frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{Если } u_{1ex} = 0, \text{ то } u''_{вых} = u_{2ex} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$\text{Тогда } u_{вых} = u'_{вых} + u''_{вых} = u_{2ex} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - u_{1ex} \frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{Если } R_1 = R_2 = R_3 = R_4, \text{ то } u_{вых} = u_{2ex} - u_{1ex}$$

$$\text{Если } R_1 = R_3 \text{ и } R_2 = R_4, \text{ то } u_{вых} = \frac{R_2}{R_1} (u_{2ex} - u_{1ex})$$

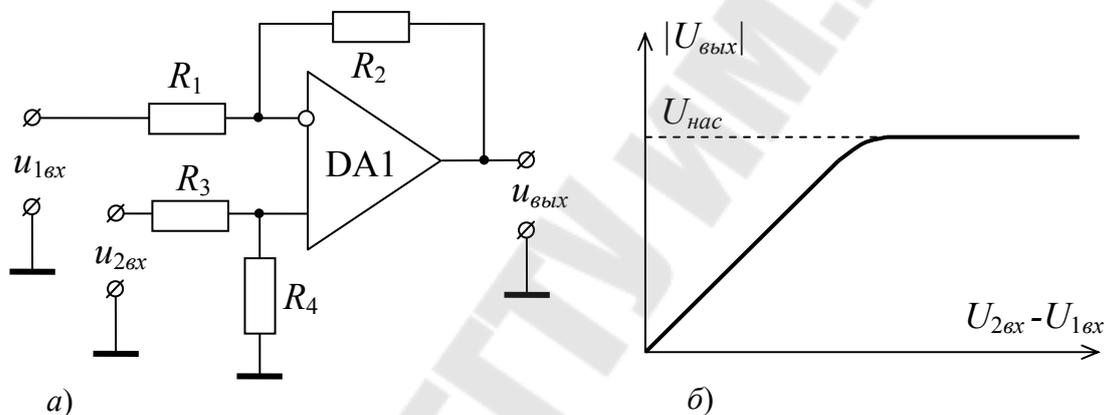


Рис. 3.11. Схема (а) амплитудная характеристика (б) вычитающего усилителя на ИОУ

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

- 2.1 По конспекту лекций, разделу 1 данной работы и рекомендуемой литературе изучите назначение, классификацию, параметры и характеристики усилителей электрических сигналов на основе ИОУ.
- 2.2 Изучите назначение, блок-схему и основные параметры микросхемы операционного усилителя. Ознакомьтесь с маркировкой аналоговых микросхем.
- 2.3 Изучите разновидности обратных связей (ОС) применяемых в усилителях и влияние их на характеристики усилителей.
- 2.4 Производите расчёт параметров элементов усилителей рис. 3.7а, рис. 3.8а, рис. 3.10а и рис. 3.11а по заданным в таблице 3.3 исходным данным.

Примечание:

- для суммирующего усилителя принять, что $R_1 = R_2$;
- для вычитающего усилителя принять что $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$;

2.5 Заготовьте отчёт по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Исследуйте работу инвертирующего усилителя. Для этого:

3.1.1. Соберите на монтажной панели усилитель по рис. 3.7а воспользовавшись данными по п. 2.4 и выбрав из комплекта резисторы и конденсаторы с наиболее близкими к расчётным значениями C и R .

3.1.2. Микросхему ОУ установите на монтажной панели стенда выходом вправо и подключите провода её питания к двухполярному источнику ИсНЗ, соблюдая полярность (красный провод +15В, белый -15В). Гнездо «0» соедините проводом с нижней общей шиной панели.

3.1.3. С блока ГС (гнездо ГН) подайте синусоидальный сигнал на вход усилителя, а гнездо «⊥» блока ГС соедините с общей шиной панели.

3.1.4. После проверки правильности сборки схемы преподавателем, включите питание стенда, блока ГС и осциллографа соответствующими тумблерами и установите параметры входного сигнала f , $U_{1вх}$, $U_{2вх}$ по таблице 3.3.

3.1.5. Пользуясь ручками «время/дел», «V/дел» и «уровень» осциллографа, в режиме внешней синхронизации получите на экране неподвижное изображение $u_{вх}(t)$ по рис. 3.7в и зарисуйте в протоколе диаграмму $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$ по образцу рис. 3.7в, указав « t_t » и « t_v ».

3.1.6. Увеличивая амплитуду входного сигнала u наблюдая сигнал $u_{вых}(t)$, определите $U_{твх}$, при котором $U_{твых}$ достигнет величины насыщения $U_{нас}$. Определите и запишите в протокол действующее значение $U_{вхн} = U_{твхн} / \sqrt{2}$.

3.1.7. Изменяя $U_{вх}$ от 0 до $1,5U_{вхн}$, с шагом $0,25U_{вхн}$, заполните таблицу 3.1. Напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$ измерьте с помощью МВА.

Таблица 3.1

$U_{вх}/U_{вхн}$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
$U_{вх}, В$							
$U_{вых}, В$							

Выключите питание блока ГС и стенда и уберите детали с панели стенда. Микросхему не убирайте

3.2. Исследуйте работу неинвертирующего усилителя. Для этого:

3.2.1. Соберите усилитель по схеме рис. 3.8а.

3.2.2. Повторите действия по п. 3.1.2÷3.1.6.

3.2.3. Установите $U_{вх} = 0,5U_{вхн}$ и изменяя частоту f входного сигнала, заполните таблицу 3.2. Сигнал $U_{вых}$ измеряйте с помощью МВА стенда.

Таблица 3.2

$f, кГц$	0,02	0,1	0,25	0,5	1,0	5	20	40	60	$U_{вх} = \dots В$
$U_{вых}, В$										
$K = U_{вых}/U_{вх}$										

Выключите питание блока ГС и стенда и уберите резисторы R_1, R_2 .

3.3. Исследуйте работу суммирующего усилителя. Для этого:

3.3.1. Соберите усилитель по схеме рис. 3.10а и подайте на входы сигналы $U_{1вх}$ и $U_{2вх}$ от генератора ГС. Параметры сигналов $(f, U_{1вх}, U_{2вх})$ установите по таблице 3.5 и зарисуйте в протокол временную синхронизированную диаграмму напряжений по образцу рис. 3.10в.

Примечание: два входных сигнала получите используя на входе усилителя регулируемое (переменное) сопротивление (по указанию преподавателя) $R = 1 кОм$.

3.3.2. Увеличивая $(U_{1вх} + U_{2вх})$ ручкой «амплитуда» блока ГС, наблюдайте за изменением $U_{вых}$. Запишите в протокол значение $(U_{1вх} + U_{2вх})_н$, при котором $U_{вых} = U_{нас}$. Выключите питание блока ГС и стенда и уберите резисторы с панели.

- 3.4. Исследуйте работу вычитающего усилителя. Для этого:
- 3.4.1. Соберите усилитель по схеме рис. 3.11а по данным п. 2.4. включите питание стенда и блока ГС и подайте (через регулируемое сопротивление $R = 1 \text{ кОм}$) на входы $U_{1вх}$ и $U_{2вх}$ заданных в таблице 3.3 значений и заданной частоты f .
 - 3.4.2. В режиме внешней синхронизации получите неподвижное изображение сигналов $u_{1вх}$, $u_{2вх}$ и $u_{вых}$ и зарисуйте их в протокол указав значения масштабных множителей « m_t » и « m_v ».
 - 3.4.3. Увеличивая разность $(U_{2вх} - U_{1вх})$ сигналов на входах, наблюдайте за изменением сигнала $u_{вых}$. Запишите в протокол значение $(U_{2вх} - U_{1вх})$, при котором $U_{вых} = U_{нас}$. Выключите питание блока ГС, стенда и осциллографа. Уберите детали и провода с монтажной панели стенда и приведите лабораторную установку в исходное положение. Подпишите полученные данные у преподавателя.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Дайте определение усилителя электрических сигналов.
- 4.2. Начертите блок-схему усилителя.
- 4.3. Какие разновидности усилителей вам известны?
- 4.4. Перечислите основные параметры и характеристики усилителей.
- 4.5. Дайте определение обратной связи. Какие виды обратных связей применяются в усилителях?
- 4.6. Начертите упрощенное условное графическое обозначение микросхемы ОУ и укажите её выводы.
- 4.7. Какими параметрами характеризуется работа микросхемы ИОУ?
- 4.8. Чем отличаются амплитудные характеристики (АХ) инвертирующего и неинвертирующего усилителей?
- 4.9. В каких электронных устройствах, кроме усилителей, применяются микросхемы ИОУ?
- 4.10. Как маркируются микросхемы ИОУ? Приведите основные параметры микросхемы К157УД2.

5. Требования к оформлению отчёта.

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие письменные ответы на контрольные вопросы;
- результаты расчета параметров элементов усилителей – по п. 2.4 домашней подготовки;
- схему, временные, синхронизированные диаграммы напряжений и амплитудную характеристику инвертирующего усилителя;
- схему, временные диаграммы напряжений и частотную характеристику неинвертирующего усилителя;
- схему, временные диаграммы напряжений на входах и амплитудную характеристику суммирующего усилителя;
- схему, временные диаграммы напряжений на входах и амплитудную характеристику вычитающего усилителя;
- анализ результатов экспериментальных исследований по каждому усилителю и выводы по цели работы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный у преподавателя.

Таблица 3.3

Параметры № стенда	Подгруппа 1				Параметры № стенда	Подгруппа 2			
	Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.	$U_{1вх}$	$U_{2вх}$	$U_{вых}$		Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.	$U_{1вх}$	$U_{2вх}$	$U_{вых}$
	кГц	В	В	В		кГц	В	В	В
1	0,5	3,1	1,5	9,1	1	1,4	1,1	2,1	6,5
2	0,6	2,1	1,1	8,5	2	1,5	2,1	3,1	6,3
3	0,7	1,5	1,0	7,7	3	1,6	3,1	1,2	7,0
4	0,8	1,0	2,2	8,1	4	1,7	1,5	2,1	7,2
5	0,9	1,4	2,3	7,5	5	1,8	2,5	3,3	7,7
6	1,0	1,1	2,7	6,8	6	1,9	0,8	1,8	8,5
7	1,1	0,8	2,0	6,6	7	2,0	1,8	0,8	8,8
8	1,2	0,9	1,8	7,6	8	2,1	1,3	1,9	9,2
9	1,3	0,6	1,8	5,9	9	2,2	2,0	1,1	9,5

Лабораторная работа № 4

Тема: Генераторы электрических колебаний на ИОУ

Цель работы:

- изучить условия самовозбуждения генератора, реализуемого на основе усилителя с положительной обратной связью;
- изучить свойства частотноизбирательных RC – цепей положительной обратной связи;
- изучить устройство, методы расчёта параметров элементов и принцип работы генераторов синусоидальных (гармонических) колебаний и генераторов прямоугольных импульсов;
- ознакомиться с режимами работы генераторов прямоугольных импульсов, и с разновидностями генераторов прямоугольных импульсов;
- приобрести навыки сборки генераторов, их настройки и исследование влияния параметров элементов на параметры генерируемых импульсов.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Условия самовозбуждения генератора электрических колебаний

Генератор электрических колебаний – это электронное устройство преобразующее энергию источника питания в энергию переменного тока требуемой частоты и формы.

Генераторы строятся на основе усилительных устройств с применением положительной обратной связи (ПОС). При этом для обеспечения режима самовозбуждения, цепь ПОС должна быть соответствующей структуры для каждой формы генерируемого сигнала.

На рис. 4.1 приведена блок-схема генератора.

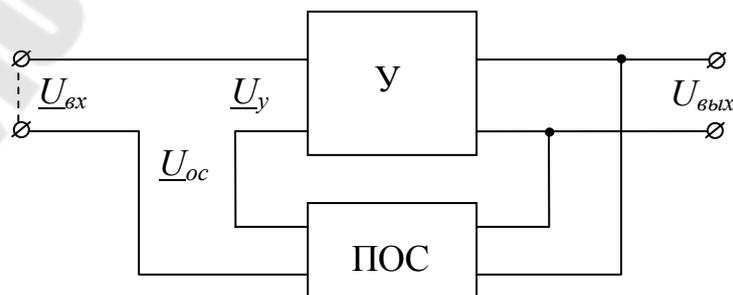


Рис .4.1. Блок-схема генератора электрических колебаний

Если вход усилителя не закорочен и на него подается сигнал $\underline{U}_{вх}$, то $\underline{U}_y = \underline{U}_{вх} + \underline{U}_{ПОС}$, где $\underline{U}_{ПОС} = \underline{\gamma}\underline{U}_{вых}$

Следовательно,

$$\underline{U}_{вых} = \underline{K}\underline{U}_y = \underline{K}(\underline{U}_{вх} + \underline{\gamma}\underline{U}_{вых}), \quad (4.1)$$

где \underline{K} и $\underline{\gamma}$ - комплексные коэффициенты передачи усилителя (У) и цепи (ПОС).

У самовозбуждающихся генераторов $\underline{U}_{вх} = 0$ (т.е. входные клеммы замкнуты накоротко рис. 4.1. С учетом этого, соотношение (4.1) преобразуется к виду

$$\underline{U}_{вых} = \underline{K}\underline{\gamma}\underline{U}_{вых}, \text{ или } 1 = \underline{K}\underline{\gamma}, \quad (4.2)$$

Выражение (4.2) – математическая запись условия самовозбуждения генератора.

Так как $\underline{K} = Ke^{j\varphi}$ и $\underline{\gamma} = \gamma e^{j\alpha}$, то (4.2) распадается на два уравнения

$$K\gamma = 1, \quad (4.3)$$

и

$$\alpha + \varphi = 0, 2\pi, \dots \quad (4.4)$$

где K и γ - коэффициенты передачи усилителя и цепи ПОС;

φ - сдвиг по фазе между $\underline{U}_{ПОС}$ и $\underline{U}_{вых}$, определяемый структурой цепи ПОС;

α - сдвиг по фазе между $\underline{U}_y = \underline{U}_{ПОС}$ и $\underline{U}_{вых}$, определяемый параметрами схемы усилителя.

Соотношение $K\gamma = 1$ называется условием баланса амплитуд. Оно означает, что сигнал, проходя через цепь ПОС ослабляется в « K » раз ($K = 1/\gamma$), а проходя через усилитель – усиливается в « K » раз, и приходит на выход усилителя с той же амплитудой.

Соотношение $\alpha + \varphi = 0, 2\pi, \dots$ называется условием баланса фаз. Оно означает, что в генераторе должна быть цепь ПОС такая, чтобы угол φ в сумме с углом α равнялся нулю или целому числу 2π .

Если условия (4.3) и (4.4) выполняются только на одной частоте, то на выходе генератора поддерживается синусоидальное напряжение. В этом случае рассматривается генератор гармонических колебаний.

Если условие (4.3) и (4.4) выполняются на множестве частот, то на выходе генератора поддерживается напряжение прямоугольное по

форме. В этом случае рассматривается генератор прямоугольных импульсов, называемый мультивибратором.

1.2. Свойства частотно-избирательных цепей ПОС

В генераторах гармонических колебаний в качестве обратной связи часто используют частотно зависимые RC -цепи, которые на частоте ω_0 осуществляют сдвиг по фазе либо 180° (трехзвенная RC -цепь, двойной Т-мост), либо на угол $\alpha=0$ (мост Вина, упрощенный мост Вина). При этом для выполнения условия (4.4) первые цепи включают между выходом и инвертирующим входом усилителя на основе микросхемы интегрального операционного усилителя (ИОУ). В этом случае суммарный сдвиг по фазе $\varphi + \alpha = 180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$.

Частотно зависимые цепи ПОС, не вносящие фазового сдвига на частоте ω_0 включают между выходным и неинвертирующим входным ИОУ. В этом случае суммарный сдвиг по фазе равен нулю.

На рис. 4.2а приведена RC -цепь по схеме упрощенного моста Вина.

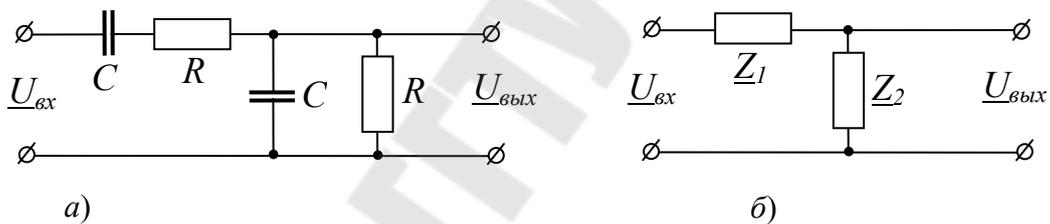


Рис. 4.2. Схема (а) и расчетный эквивалент (б) частотноизбирательной RC -цепи

Так как $\underline{Z}_1 = R - j \frac{1}{\omega C}$ и $\underline{Z}_2 = \frac{R}{1 + \omega RC}$, то из рис. 4.2б следует, что

$\underline{U}_{\text{вых}} = \underline{I} \underline{Z}_2$, где $\underline{I} = \frac{\underline{U}_{\text{вх}}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$, и, следовательно,

$$\underline{U}_{\text{вых}} = \frac{\underline{U}_{\text{вх}}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \underline{U}_{\text{вх}}, \quad (4.5)$$

Таким образом, коэффициент передачи цепи рис. 4.2а по напряжению

$$\underline{\gamma} = \frac{\underline{U}_{\text{вых}}}{\underline{U}_{\text{вх}}} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{3}{3R + \left(j\omega R^2 C - \frac{1}{\omega C} \right)}, \quad (4.6)$$

При этом

$$|\underline{\gamma}| = \gamma = \frac{R}{\sqrt{9R^2 + \left(\omega R^2 C - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (4.7)$$

Из условия $\frac{d\gamma}{d\omega} = 0$, следует выражение для резонансной частоты

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, \text{ или } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (4.8)$$

на которой γ принимает максимальные значения рис. 4.3а. Из подстановки (4.8) в (4.7) следует, что $\gamma(\omega = \omega_0) = 1/3$.

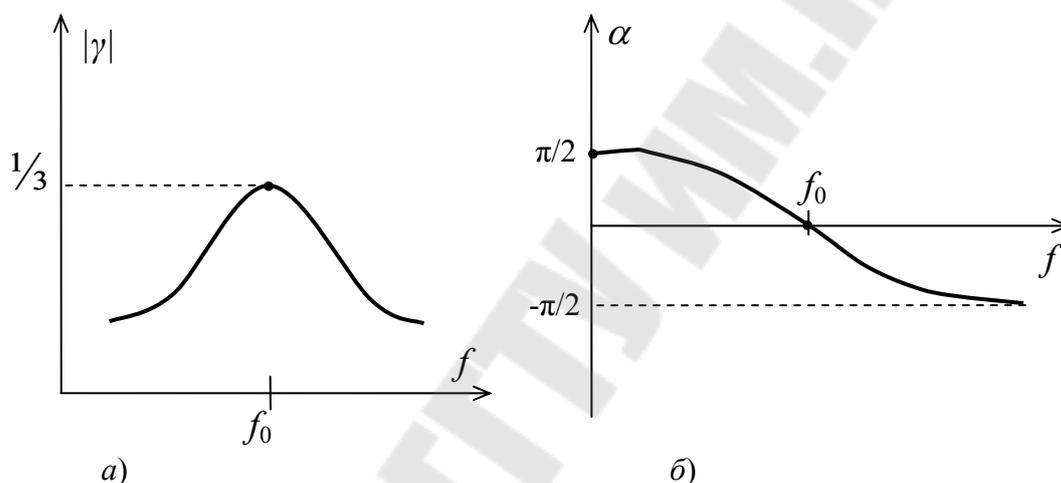


Рис. 4.3. Частотные характеристики RC -цепи ПОС

Вносимый фазовый сдвиг

$$\alpha = -\text{arctg}\left(\frac{\omega R^2 C - 1/\omega C}{3R}\right), \quad (4.9)$$

На рис. 4.4 приведена схема цепи ПОС, обеспечивающая частотно независимое значение коэффициента передачи цепи ПОС.

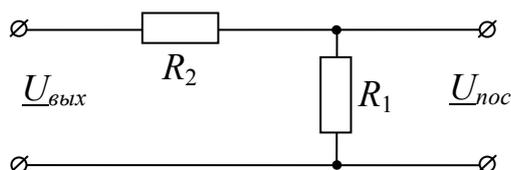


Рис. 4.4. Схема цепи ПОС на вносящей фазовый сдвиг

$$\underline{U}_{\text{ПОС}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_1 + R_2} R_1, \text{ или } \underline{\gamma} = \frac{U_{\text{ПОС}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (4.10)$$

Частотные свойства других типов цепей ПОС, применяемых в генераторах приводятся в литературе.

1.3. Генератор гармонических колебаний на основе ИОУ.

На рис. 4.5а приведена схема генератора синусоидальных колебаний (с цепью ПОС по рис. 4.2а, реализуемого на основе ИОУ).

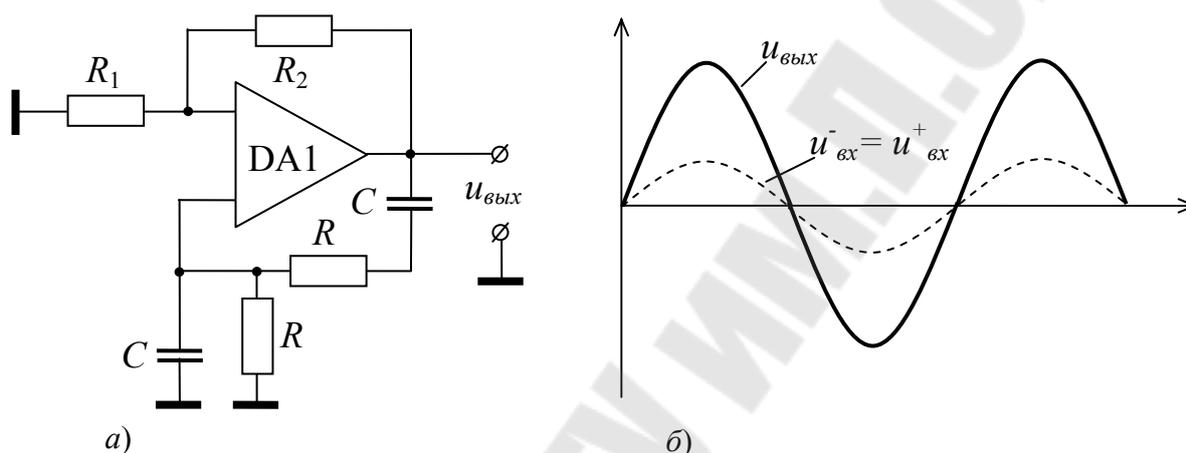


Рис. 4.5. Схема и временные диаграммы напряжений на входах ИОУ и выходе генератора синусоидальных колебаний

Соотношение между R_1 и R_2 выбирается из условия

$$K = \frac{1}{\gamma_0} = 3 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.11)$$

При этом $R_2 \gg R_{\text{вых}}$, а $R_1 \ll R_{\text{вх}}$, а затем определив $\tau = RC = \frac{1}{2\pi f_0}$ (по

заданной частоте f_0) и задавшись значением C , находят $R = \frac{\tau}{C}$.

При практическом расчете генератора рис. 4.5а дополнительно применяются элементы автоматической стабилизации амплитуды.

1.4. Генератор прямоугольных импульсов (симметричный мультивибратор) на ИОУ

На рис. 4.6а приведена схема генератора прямоугольных импульсов с частотнозадающей RC -цепью и широкополосной (частотонезависимой) резистивной цепью ПОС рис. 4.4.

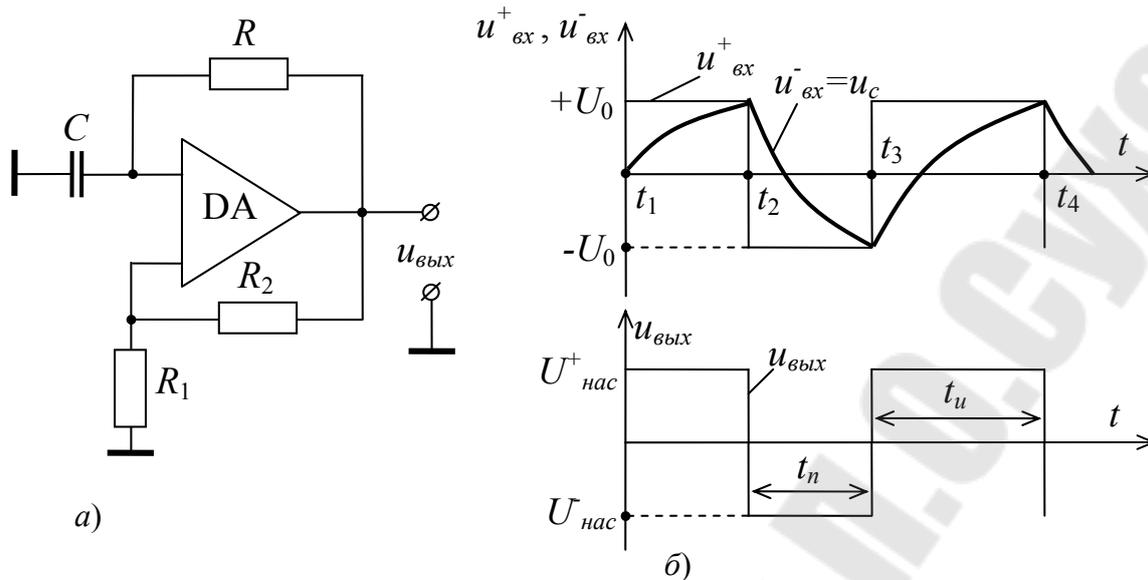


Рис. 4.6. Схема (а) и временные синхронизированные диаграммы напряжений на входах и выходах симметричного мультивибратора (б)

Мультивибратор рис 4.6а работает в автоколебательном режиме, т.е. непрерывно формирует импульсные сигналы без внешнего воздействия. При этом частота генерируемых импульсов

$$f = \frac{1}{2RC \ln\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}, \quad (4.12)$$

Генератор работает следующим образом. Пусть в момент времени $t_1 = 0$ включается напряжение питания ИОУ, напряжение $u_C = 0$, а $u_{\text{вых}}$ случайно возросло. Тогда через R_2 это напряжение подается на прямой вход ИОУ, усиливается, и в результате в момент времени $t_1 = 0$ на выходе скачком устанавливается $u_{\text{вых}} = U_{\text{нас}}^+$ рис. 4.6б. С этого момента t_1 конденсатор C заряжается напряжением $U_{\text{нас}}^+$ через резистор R по экспоненте

$$u_c(t) = u_{\text{вх}}^-(t) = U_{\text{нас}}^+ (1 - e^{-t/\tau}), \quad (4.13)$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени RC -цепи.

В момент времени t_2 , когда $u_c(t)$ достигнет значения

$$U_0^+ = U_{\text{нас}}^+ \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (4.14)$$

произойдет лавинообразное переключение компаратора, т.е. $u_{\text{вых}}$ скачком изменится от $U_{\text{нас}}^+$ до $U_{\text{нас}}^-$. Далее в период времени

$t_2 < t < t_3$ будет происходить перезаряд конденсатора через резистор R от U_0^+ до U_0^- по соотношению

$$u_c(t) = U_{нас}^- - (U_{нас}^- - U_0) e^{-t/\tau}, \quad (4.15)$$

В момент времени t_3 , в результате нового переключения аналогового компаратора начнется процесс перезаряда конденсатора в интервале $t_3 < t < t_4$ по экспоненте

$$u_c(t) = U_{нас}^+ - (U_{нас}^+ + U_0) e^{-t/\tau}, \quad (4.16)$$

и т.д.

Поскольку цепь каждого перезаряда конденсатора одна и та же в обоих интервалах, то длительность импульса t_u положительной полярности равна длительности t_n импульса отрицательной полярности, и следовательно скважность генерируемых импульсов $Q = \frac{T}{t_n} = 2$. Из (4.15), (4.16), с учетом (4.14) следует соотношение (4.12).

1.5. Генератор прямоугольных импульсов (несимметричный мультивибратор) на ИОУ

Для получения прямоугольных импульсов с большей скважностью (когда $t_u \ll t_n$) применяется несимметричный мультивибратор рис. 4.7а, в котором вместо резистора R (рис. 4.6а) применяются две параллельные R -D цепи (R_u -VD1 и R_n -VD2).

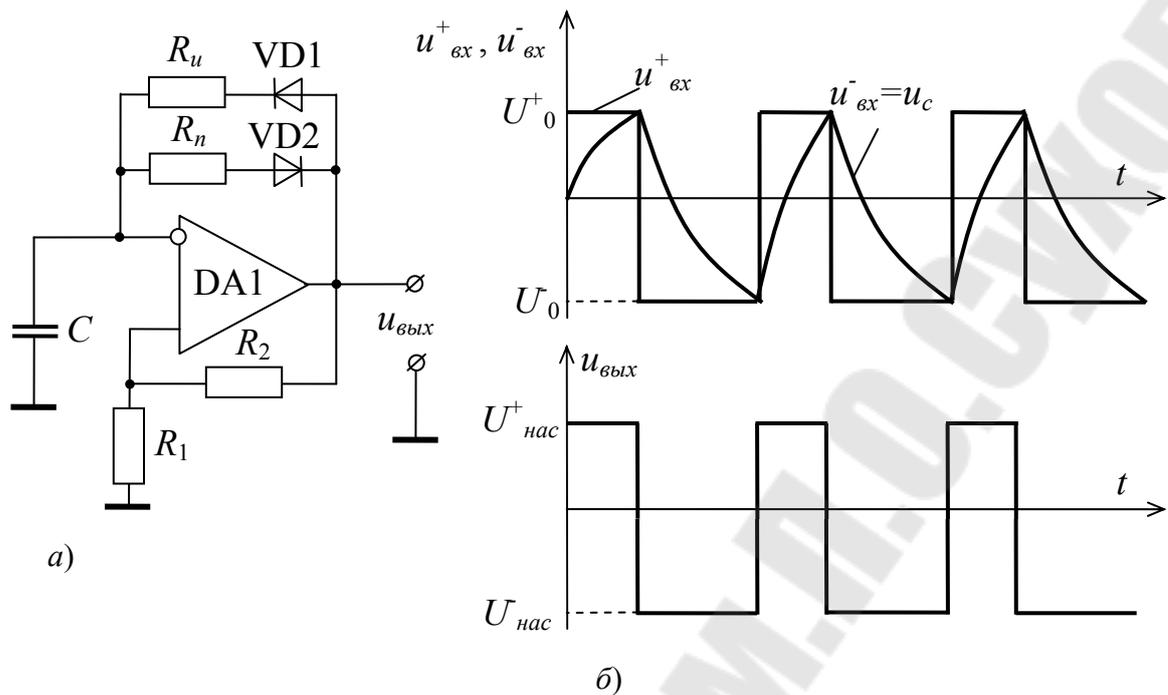


Рис. 4.7. Схема (а) и временные синхронизированные диаграммы напряжения (б) на входах и выходе несимметричного мультивибратора

В этом генераторе длительности импульса t_u и t_n связаны с $\tau_u = R_u C$ и $\tau_n = R_n C$ соотношениями

$$\tau_u = \frac{t_u}{\ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)} = R_u C; \quad \tau_n = \frac{t_n}{\ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)} = R_n C, \quad (4.17)$$

1.6. Генератор одиночных прямоугольных импульсов (ждущий мультивибратор) на ИОУ

Генераторы импульсных сигналов могут работать кроме автоколебательного режима в ждущем режиме и в режиме внешней синхронизации.

В ждущем режиме генератор формирует импульс на выходе только после подачи на вход внешнего (запускающего) импульса определенной полярности и амплитуды большей, чем $\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{нас}$ рис.

4.8а.

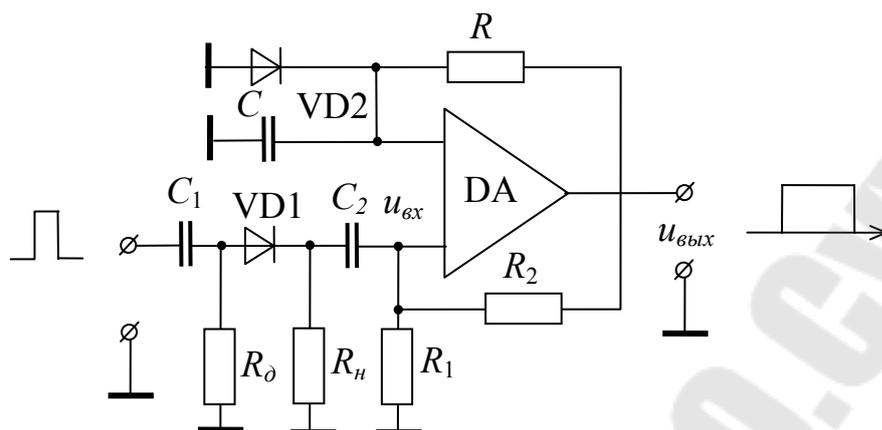


Рис. 4.8. Схема одновибратора со схемой формирования запускающих импульсов ($C_1 = 0,01\text{мкФ}$, $R_0 = 2,4\text{кОм}$; $C_2 = 0,1\text{мкФ}$, $R_н = 30\text{кОм}$)

Ждущие мультивибраторы называют также одновибраторами. Длительность генерируемого импульса

$$t_u = \tau \ln \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (4.18)$$

В режиме внешней синхронизации генераторы вырабатывают (генерируют) импульсы напряжения, частота которых равна или кратна частоте периодических синхронизирующих импульсов.

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке.

- 2.1. По конспекту лекций, разделу 1 данной работы и рекомендуемой литературе изучить условия самовозбуждения генераторов электрических колебаний реализуемых на ИОУ с ПОС.
- 2.2. Ознакомиться с разновидностями и характеристиками цепей ПОС.
- 2.3. Освоить алгоритмы расчёта параметров элементов генераторов и произвести расчет для схем рис. 4.5а, 4.6а, 4.7а и 4.8а по заданным в таблице 4.1 исходным данным своего варианта. Для рис. 4.5а принять $C = 0,01\text{мкф}$. Для рис 4.6а принять $C = 0,1\text{мкф}$, $U_{нас}^+ = |U_{нас}^-| = 14\text{В}$, и $U_0^+ = 2\text{В}$. Для рис. 4.7а принять $R_1/R_2 = 0,5$ и $C = 0,1\text{мкф}$.
- 2.4. Заготовьте отчёт по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

- 3.1. Исследуйте работу RC – генератора синусоидальных колебаний.
- 3.1.1. Соберите на монтажной панели RC – генератор синусоидальных колебаний по рис. 4.5а воспользовавшись расчетными данными по п. 2.3, выбирая из комплекта резисторы с ближайшими значениями сопротивлений.
- 3.1.2. Провода питания микросхемы К157УД2 подсоедините к источнику питания ИсНЗ.
- 3.1.3. После проверки схемы преподавателем, включите питание стенда и осциллографа и наблюдайте сигнал на выходе генератора подключив к нему провода кабеля вертикального входа осциллографа.
- 3.1.4. В случае отсутствия сигнала на выходе генератора, замените R_1 на меньшее ближайшее значение и после появления искаженного сигнала, подберите (постепенным увеличением R_1) такое его значение при котором сигнал будет иметь минимальное искажение. Зарисуйте два периода сигнала в протокол, указав рядом значения « m_t » и « m_v ». Запишите значение R_1 и R_2 .
- 3.1.5. Подайте сигнал с выхода генератора на вход частотомера. Измерьте и запишите в протокол значение f_2 . Замените конденсаторы $C = 0,01\text{мкФ}$ на $C' = 0,1\text{мкФ}$, измерьте и запишите f' .
- 3.1.6. Выключите питание стенда. Уберите все детали кроме микросхем с монтажной панели стенда.
- 3.2. Исследуйте работу симметричного мультивибратора. Для этого:
- 3.2.1. Соберите симметричный мультивибратор по схеме рис 4.6 а) действуя аналогично п. 3.1.1.
- 3.2.2. Повторите п. 3.1.2 и 3.1.3.
- 3.2.3. В режиме внешней синхронизации развертки осциллографа зарисуйте в протокол диаграммы напряжений $u_{вх}^+$, $u_{вх}^-$ и $u_{вых}^-$ по образцу рис. 4.6б, указав рядом значения « m_t » и « m_v ».
- 3.2.4. Исследуйте влияние параметров элементов на частоту и амплитуду генерируемых колебаний:
- увеличьте R_1/R_2 , измерьте f , U_0^+ , $U_{вых}$ и запишите в протокол;

- восстановите предыдущее значение R_1/R_2 , уменьшите $\tau = RC$, измерьте f_0 , U^+_0 , $U_{\text{вых}}$ и запишите в протокол;
 - выключите питание стенда.
- 3.3. Исследуйте работу заторможенного мультивибратора рис 4.8. Для этого:
- 3.3.1. Установите в схеме рис. 4.6 диод VD2 параллельно конденсатору «С» рис. 4.8 и убедитесь в отсутствии генерации.
 - 3.3.2. Подайте на неинвертирующий вход (через формирователь однополярных коротких запускающих импульсов рис. 4.8) прямоугольные импульсы максимальной амплитуды и частоты $f' = f/2$.
 - 3.3.3. Наблюдайте сигнал на выходе одновибратора. Уменьшая амплитуду входных прямоугольных импульсов, убедитесь в срыве генерации и снова установите максимальную амплитуду.
 - 3.3.4. Зарисуйте в протокол синхронно во времени (друг под другом) диаграммы импульсов на входе формирующей цепи, на неинвертирующем входе микросхемы DA и на выходе микросхемы указав « t_t » и « t_v ».
 - 3.3.5. Убедитесь в постоянстве длительности генерируемых одновибратором импульсов t_u , при изменении частоты запускающих импульсов (уменьшая f_c). Увеличивая f_{sc} и, наблюдая $U_{\text{вых}}$, убедитесь в возможности работы одновибратора в режиме деления частоты. Зарисуйте в протокол диаграммы напряжения на входе и выходе, указав « t_t » и « t_v ». Выключите питание стенда и уберите с панели все детали кроме микросхемы.
- 3.4. Исследуйте работу несимметричного мультивибратора. Для этого:
- 3.4.1. Соберите схему по рис. 4.7а, используя результаты расчетов по п. 2.3 для несимметричного мультивибратора.
 - 3.4.2. Наблюдайте сигналы на входе и выходах с помощью осциллографа в режиме внешней синхронизации развертки. Зарисуйте диаграммы напряжений по образцу рис. 4.7б, указав « t_t » и « t_v ». Выключите питание стенда и осциллографа. Уберите все детали и провода с панели и приведите лабораторную установку в исходное состояние. Подпишите данные у преподавателя.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Запишите математически выражения для «баланса амплитуд» и «баланса фаз».
- 4.2. Какую роль выполняет цепь ПОС в генераторе?
- 4.3. Как можно изменить частоту генерируемых гармонических колебаний в схеме рис. 4.5а?
- 4.4. Поясните принцип работы симметричного мультивибратора, работающего в автоколебательном режиме.
- 4.5. Как изменить частоту импульсов, генерируемых симметричным мультивибратором?
- 4.6. Как изменить длительность импульсов, генерируемых одновибратором?
- 4.7. При какой минимальной амплитуде запускающих импульсов срабатывает одновибратор?
- 4.8. Как настроить несимметричный мультивибратор для получения заданных значений t_u и t_n ?
- 4.9. Как установить $K = 1/\gamma$ в генераторе гармонических колебаний?
- 4.10. Какие виды цепей ПОС применяются в генераторах электрических колебаний?

5. Требования к оформлению отчёта

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие письменные ответы на контрольные вопросы;
- схему рис. 4.5а, параметры элементов этой схемы, осциллограмму сигнала на выходе с указанием « t_t » и « t_v » и результаты измерения частоты f (для $C = 0,01\text{мкф}$) и f' (для $C = 0,1\text{мкф}$);
- схему рис. 4.6а, параметры элементов этой схемы, временные диаграммы напряжений на входах и выходе симметричного мультивибратора по образцу рис. 4.6б, а также результаты исследований по п. 3.2.4;
- схему рис. 4.8, значение параметров элементов этой схемы, диаграмму напряжений по п. 3.3.4, диаграмму напряжений по п. 3.3.5;

- схему рис. 4.7, параметры элементов этой схемы и диаграмму напряжений несимметричного мультивибратора;
- анализ результатов экспериментальных данных и выводы по цели работы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный у преподавателя.

Таблица 4.1

	Подгруппа 1				Подгруппа 2			
	Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.		t_u	t_n	Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.		t_u	t_n
	кГц		мс	мс	кГц		мс	мс
1	2	0,2	1,0	7,0	5,3	1,1	1,5	2,8
2	2,2	0,3	2,0	5,0	5,0	0,8	1,3	2,6
3	1,5	0,4	3,0	6,0	4,6	0,7	2,3	3,4
4	3,2	0,5	4,0	3,0	4,0	0,6	2,6	3,5
5	1,3	0,6	5,0	2,0	3,2	0,9	3,2	6,6
6	4,2	0,7	6,0	4,0	2,8	0,5	3,6	5,1
7	5,2	0,8	7,0	5,2	2,5	0,4	4,2	3,1
8	1,6	0,9	8,0	3,1	1,2	0,3	4,6	2,1
9	3,8	1,0	9,0	2,2	0,8	0,2	5,6	1,5
Тип генератора	Генератор синусоидальных колебаний	Симметричный мультивибратор	Несимметричный мультивибратор		Генератор синусоидальных колебаний	Симметричный мультивибратор	Несимметричный мультивибратор	

Лабораторная работа №5

Тема: Генераторы линейно-изменяющегося напряжения

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Общие сведения

Генераторы линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) формируют импульсы напряжения пилообразной формы рис. 5.1б. При этом в течение некоторого времени $t_{нар.х}$ напряжение линейно нарастает, а затем в течение времени $t_{обр.х}$ происходит возврат к исходному значению.

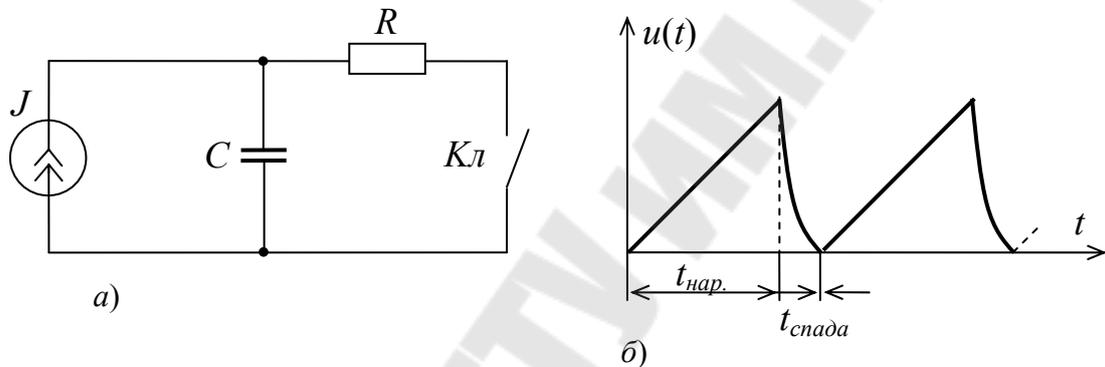


Рис. 5.1. Простейшая схема формирования линейно-нарастающего напряжения

Для создания линейной зависимости напряжения от времени чаще всего используют заряд или разряд конденсатора постоянным током рис. 5.1а.

При разомкнутом ключе $Кл$ конденсатор C заряжается от источника тока j , и напряжение на нем возрастает по линейному закону

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^{t_{нар.х}} J dt + U_C(0) = \frac{J}{C} t + U_C(0). \quad (5.1)$$

При замыкании ключа $Кл$ - происходит разряд конденсатора по экспоненциальному закону

$$u_C(t) = U_m e^{-t/RC}. \quad (5.2)$$

Схема интегрирующего усилителя на основе микросхемы операционного усилителя приведена на рис. 5.2.

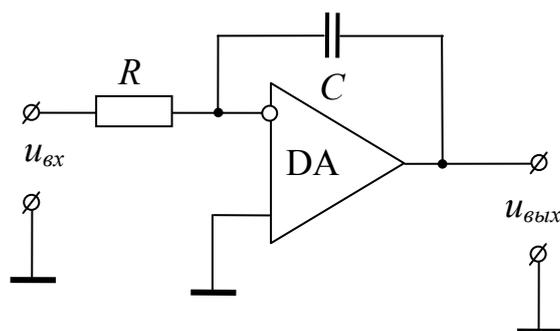


Рис. 5.2. Схема интегрирующего усилителя

Напряжение на выходе этого устройства изменяется по соотношению

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt + U_{\text{вых}}(0). \quad (5.3)$$

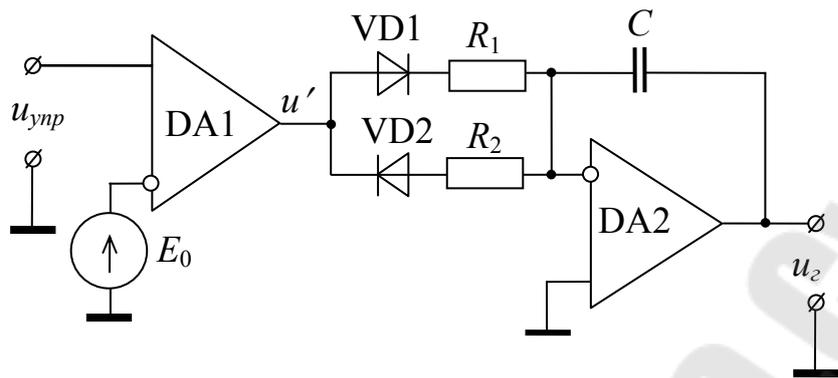
Если на вход генератора рис. 5.2 подано постоянное напряжение $u_{\text{вх}}(t) = U_m = \text{const}$, то из (5.3) следует что

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{U_m}{RC} t + U_{\text{вых}}(0). \quad (5.4)$$

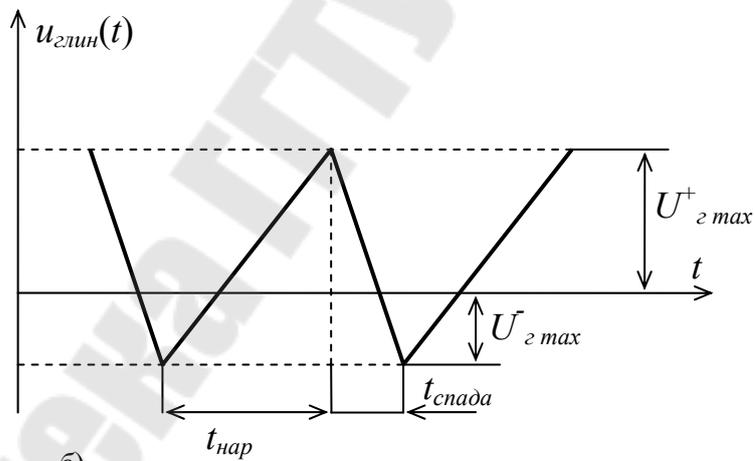
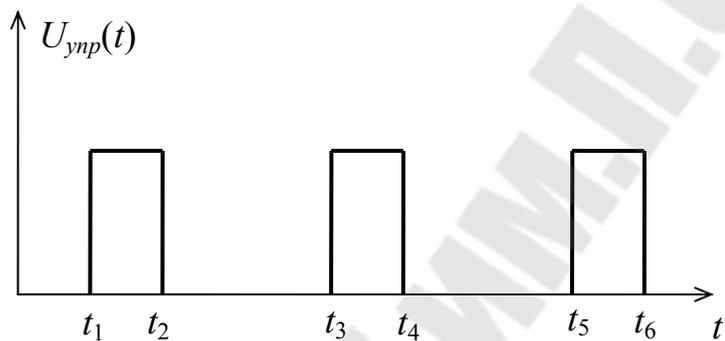
Пилообразные по форме напряжения и токи находят применение в генераторах горизонтальной развертки электронно-лучевых трубок осциллографов в преобразователях напряжения во временной интервал, напряжения в частоту электрических колебаний, в число импульсов в фазовый сдвиг и т.п.

1.2. ГЛИН с внешним запуском

На рис. 5.3а приведена схема ГЛИН с внешним управлением (u_y - управляющее напряжение), а на рис. 5.3б – временные диаграммы напряжений.



a)



б)

Рис. 5.3. Схема ГЛИН с внешним запуском (а) и временные диаграммы на входе и выходе (б)

Схема состоит из аналогового компаратора (DA1) и интегратора (DA2). Длительность t_u входного положительного импульса $u_y(t)$ определяет длительность стадии спада t_c выходного напряжения $u_2(t)$, а длительность паузы между импульсами – определяет длительность стадии нарастания t_n выходного напряжения.

При поступлении входного прямоугольного импульса напряжения, амплитуда которого $U_m > E_0$, компаратор переходит в состояние положительного насыщения $u' = U_{нас}^+$. Открывается диод VD2, и напряжение $u_2(t)$ убывает по линейному закону. Для этого случая, подставив в (5.4) $R = R_1$, $U_{вых}(0) = U_{2max}^+$, получим для момента времени t_2 ($t = t_u, U_{вых}(t) = U_{2max}^-$).

$$U_{2max}^- = -\frac{U_{нас}^+}{R_1 C} t_u + U_{2max}^+, \text{ или } \tau_1 = -\frac{U_{нас}^+ t_u}{U_{2max}^- - U_{2max}^+}. \quad (5.5)$$

Крутизна напряжения $U_2(t)$ на интервале $t_1 - t_2$:

$$S_C = \frac{du(t)}{dt} = -\frac{U_{нас}^+}{R_1 C}. \quad (5.6)$$

После окончания импульса, компаратор под воздействием E_0 на инвертирующем входе переходит в состояние отрицательного насыщения $u' = U_{нас}^-$. Открывается диод VD2 и интегратор формирует линейно нарастающее напряжение. Для этого случая, подставляя в (5.4) $R = R_2$, $U_{вых}(0) = U_{2max}^-$, получим для момента времени t_3 ($t = t_n, U_{вых}(t) = U_{2max}^+$).

$$U_{2max}^+ = -\frac{U_{нас}^-}{R_2 C} t_n + U_{2max}^-, \text{ или } \tau_2 = -\frac{U_{нас}^- t_n}{U_{2max}^+ - U_{2max}^-}. \quad (5.7)$$

Крутизна нарастания напряжения на интервал $t_2 - t_3$:

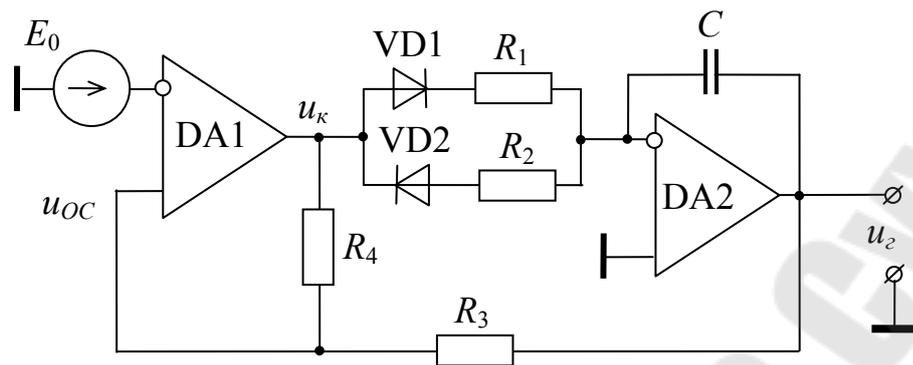
$$S_H = \frac{U_m}{R_2 C}. \quad (5.8)$$

Устойчивая работа генератора рис. 5.3а сводится к требованию

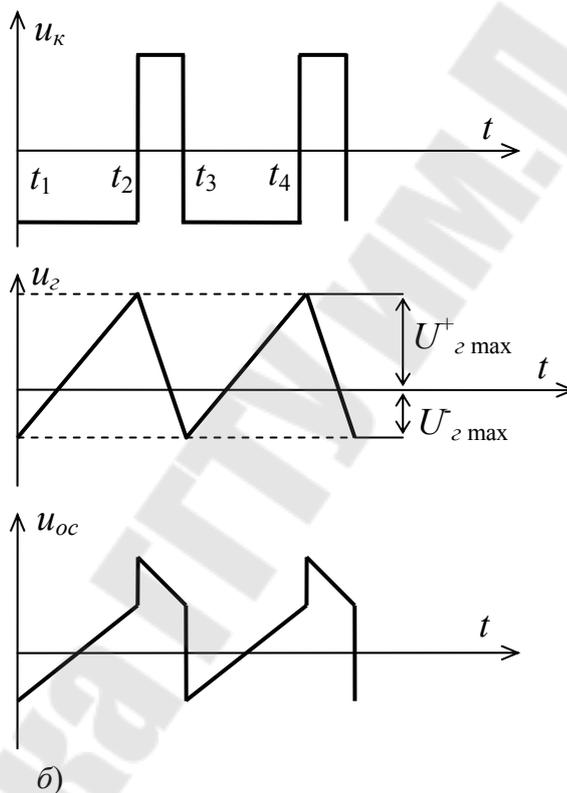
$$-t_u S_C = t_n S_H. \quad (5.9)$$

1.2. ГЛИН в автогенераторном режиме

Кроме ГЛИН с внешним управлением находят широкое применение ГЛИН, работающих в автогенераторном режиме, т.е. без управляющего сигнала рис. 5.4а.



a)



б)

Рис. 5.4. Схема ГЛИН в автогенераторном режиме (а) и временные диаграммы напряжений (б)

Напряжение u_{oc} можно найти методом суперпозиции $u_{oc} = u'_{oc} + u''_{oc}$, где

u'_{oc} - напряжение при $u_2 = 0$, u''_{oc} - при $u_k = 0$

$$u_{oc}(t) = u_k \frac{R_3}{R_3 + R_4} + u_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} . \quad (5.10)$$

Пусть в момент t_1 , $U_k = U_{нас}^-$. При этом открывается диод VD2 и интегратор формирует линейно нарастающее напряжение $u_2(t)$. На-

пряжение $u_{oc}(t)$ на интервале $t_1 - t_2$ также линейно нарастает в соответствии с (5.19). Для момента t_2 из (5.10) следует:

$$u_{oc}(t_2) = E_0 = U_{нас}^- \frac{R_3}{R_3 + R_4} + U_{2max}^+ \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (5.11)$$

В этот момент t_2 компаратор переключается, напряжение на его выходе скачком изменяется до $u_k = U_{нас}^-$. Из (5.10) также следует, что в момент t_2 скачком изменяется и $u_{oc}(t)$.

Процесс переключения развивается регенеративно (лавиннообразно) за счет ПОС через R_4 .

На интервале $t_2 - t_3$ открыт диод VD1, а генератор формирует линейно убывающее напряжение $u_2(t)$. Напряжение $u_{oc}(t)$ также убывает линейно, и при $t = t_3$ из (5.10) следует соотношение

$$u_{oc}(t_3) = E_0 = U_{нас}^+ \frac{R_3}{R_3 + R_4} + U_{2max}^- \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (5.12)$$

Компаратор снова переключается и т.д.

Из (5.11) следует, что

$$U_{2max}^+ = (E_0 - U_{нас}^-) \frac{R_3}{R_4} + E_0, \quad (5.13)$$

а из (5.12):

$$U_{2max}^- = (E_0 - U_{нас}^+) \frac{R_3}{R_4} + E_0. \quad (5.14)$$

Из (5.3) следует, что при, $U_k = U_{нас}^-$, $U_{вых}(0) = U_{2max}^-$, а, $u_{вых}(t) = U_{2max}^+$ и, следовательно,

$$\frac{U_{нас}}{\tau_2} t_n + U_{2max}^- = U_{2max}^+, \text{ или } t_n = \frac{U_{2max}^+ - U_{2max}^-}{U_{нас}} \tau_2. \quad (5.15)$$

При $U_k = U_{нас}^+$, $U_{вых}(0) = U_{2max}^+$, а $u_{вых}(t) = u_{2max}^-$, и, следовательно,

$$-\frac{U_{нас}}{\tau_1} t_c + U_{2max}^+ = U_{2max}^-, \text{ или } t_c = \frac{U_{2max}^+ - U_{2max}^-}{U_{нас}} \tau_1. \quad (5.16)$$

В соотношениях (5.15) и (5.16) принято, что $U_{нас}^+ = |U_{нас}^-| = U_{нас}$.

Из (5.14) следует, что при $E_0 = 0$ инверсный вход компаратора заземлен) $U_{2max}^+ = |U_{2max}^-| = U_{2max}$, и

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{U_{z\max}^-}{U_{\text{нас}}^-} = \frac{\Delta U_z}{2U_{\text{нас}}}. \quad (5.17)$$

Из (5.13) и (5.14) следует, что возможен режим однополярных пилообразных импульсов.

Если к примеру принять что $U_{z\max}^- = 0$, то из (5.14) следует, что

$$E_0 = \frac{U_{\text{нас}}^+ R_3/R_4}{1 + R_3/R_4}. \quad (5.18)$$

Подставив (5.18) в (5.13), получим, что

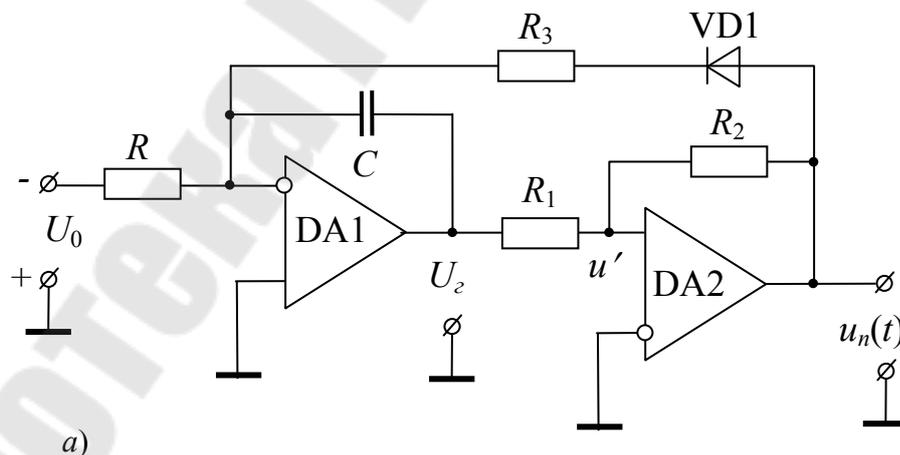
$$U_{z\max}^- = \frac{R_3}{R_4} (U_{\text{нас}}^+ - U_{\text{нас}}^-). \quad (5.19)$$

В этом случае R_3/R_4 должно быть $< 0,5$. Задаваясь значением $U_{z\max}^- < U_{\text{нас}}^+$ и зная $U_{\text{нас}}^+$ и $U_{\text{нас}}^-$, можно определить

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{U_{z\max}^-}{U_{\text{нас}}^+ - U_{\text{нас}}^-}. \quad (5.20)$$

1.4. ГЛИН - преобразователь напряжения в частоту

На рис. 5.5а приведена схема ГЛИН, совмещенная с преобразователем напряжения в частоту генерируемых прямоугольных импульсов на выходе компаратора.



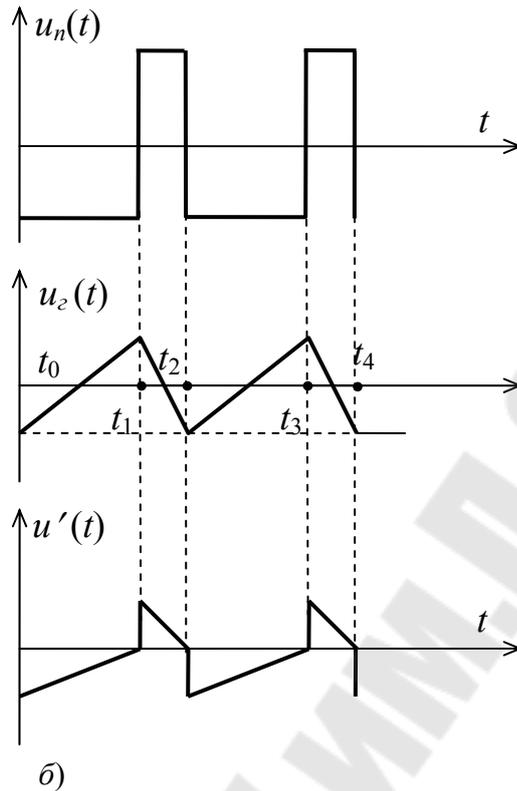


Рис. 5.5. Схема ГЛИН (а)
и синхронизированные диаграммы напряжений на выходах (б)

Если ставится задача определить параметры элементов схемы по заданным:

t_n - длительность фазы нарастания напряжения $u_2(t)$ от U_{2max}^+ до U_{2max}^- ;

t_c - длительность фазы убывания напряжения $u_2(t)$ от U_{2max}^+ до U_{2max}^- ;

$\Delta U_2 = U_{2max}^+ - U_{2max}^-$ - размах напряжения на выходе ГЛИН;

U_0 - напряжение питания подаваемого на инвертирующий вход интегратора;

$U_{нас}^+$, $U_{нас}^-$ - напряжения насыщения выходных транзисторов микросхем;

то эти параметры (R_1, R_2, R_3, R, C) можно определить по соотношениям

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta U_2}{2U_{нас}}, \text{ где } U_{нас}^+ = |U_{нас}^-| = U_{нас}. \quad (5.21)$$

Задаваясь значением $R_1 = (2 - 5) \text{ кОм}$, определяют R_2

$$\tau = RC = \frac{|U_0|t_n}{\Delta U_z}. \quad (5.22)$$

Приняв значение C (например, $C = 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ф), определяют R

$$R_3 = \frac{U_{нас} R t_c}{(t_n + t_c)|U_0| + RC \Delta U_z / 2}, \quad (5.23)$$

где $U_{z.max}^+ = |U_{z.max}^-| < U_{нас}$.

Максимальное значение $u'(t) = u_{max}'$ на инвертирующем входе компаратора можно определить методом суперпозиции аналогично (5.10)

$$U_{max}' = \frac{U_{нас}^{+(-)}}{R_1 + R_2} R_1 + \frac{U_{z.max}^{+(-)}}{R_1 + R_2} R_2. \quad (5.24)$$

Принципы работы устройства рис. 5.5а рассмотрим начиная с момента t_0 , когда $u_z(t_0) = U_{z.max}^-$, а $u_n(t_0) = U_{нас}^-$, рис. 5.5 б).

Напряжение $u_z(t)$ в интервале времени $t_0 - t_1$ будет нарастать линейно от $U_{z.max}^-$ до $U_{z.max}^+$. При этом момент времени t_1 соответствует равенству нулю напряжения $u'(t)$. В этот момент переключается компаратор (напряжение, на его выходе изменяется с $U_{нас}^-$ на $U_{нас}^+$).

Из (5.24) следует соотношение

$$0 = \frac{U_{нас}^-}{R_1 + R_2} R_1 + \frac{U_{z.max}^+}{R_1 + R_2} R_2, \text{ или } \frac{R_1}{R_2} = -\frac{U_{z.max}^+}{U_{нас}^-}, \quad (5.25)$$

Если $|U_{z.max}^-| = U_{z.max}^+$, то $U_{z.max}^+ = \Delta U_z / 2$, тогда с учетом того, что $-U_{нас}^- = U_{нас}^+$, из (5.25) следует соотношение (5.21).

В интервале времени $t_0 - t_1$, напряжение на конденсаторе

$$u_c(t) = U_z(t) = -\frac{U_0}{RC} t + U_z(t_0).$$

Так как $U_z(t_0) = U_{z.max}^- = -\frac{R_1}{R_2} U_{нас}^+$, то для момента t_1 можно

записать соотношение $U_{z.max}^+ = -\frac{U_0}{RC} t_n + U_{z.max}^-$, и, следовательно,

$$\tau = RC = \frac{U_0 t_n}{U_{z.max}^- - U_{z.max}^+}, \text{ или } \tau = \frac{|U_0| t_n}{\Delta U_z}, \text{ что совпадает с (5.22).}$$

В момент времени t_1 напряжение $u_n(t)$ изменяется с $U_{нас}^-$ на $U_{нас}^+$, а $u'(t)$ изменяется скачком от 0 до $\frac{U_{нас}^+}{R_1 + R_2} R_1 + \frac{U_{zmax}^+}{R_1 + R_2} R_2$.

После смены $u_n(t)$ с $U_{нас}^-$ на $U_{нас}^+$, диод VD1 откроется, и конденсатор C будет перезаряжаться через R_3 от U_{zmax}^+ до U_{zmax}^- по линейному закону в интервале $t \div t_2$.

$U_{zmax} - \frac{U_0}{RC}(t_H + t_0) + U_{zmax}^+ - \frac{U_{нас}^+}{R_3 C} t_c = U_{zmax}^-$, откуда (с учетом того, что $|U_{zmax}^-| = U_{zmax}^+ = \Delta U_z / 2$) следует соотношение (5.23).

Устройство рис. 5.5а применяется так же в качестве преобразователя напряжения U_0 (подаваемого на вход интегратора от источника регулируемого постоянного тока) в частоту f прямоугольных импульсов на выходе компаратора.

$$\text{При этом } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_H + t_c},$$

где

$$t_H = \frac{R_C \Delta U_z}{|U_0|}. \quad (5.26)$$

Подставив (5.26) в (5.23), получим выражение для t_c

$$t_c = \frac{3R_3 R C \Delta U_z}{2(RU_{нас} - R_3|U_0|)}, \quad (5.27)$$

Следовательно,

$$f = \frac{|U_0|}{RC \Delta U_z \left[1 + \frac{3R_3|U_0|}{2(RU_{нас} - R_3|U_0|)} \right]}. \quad (5.28)$$

На рис. 5.6 приведен график зависимости $f(U_0)$ рассчитанный для $t_H = 4$ мс, $t_c = 1$ мс, $\Delta U_z = 20$ В, $U_{нас} = 14$ В.

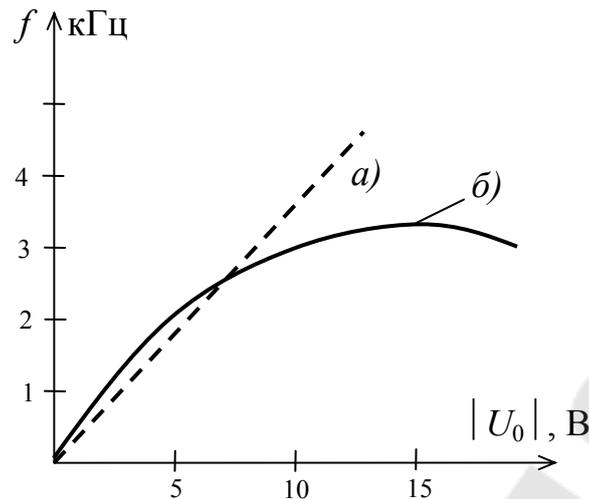


Рис. 5.6. Характеристика преобразования *a)* – идеальная, *б)* – реальная

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке.

- 2.1. По конспекту лекций, разделу 1 данной работы и рекомендуемой литературе изучите назначение, принцип работы и основные параметры ГЛИН.
- 2.2. Освойте методику расчета параметров элементов схем рис. 5.4*a*, 5.5*a*, и произвести расчет по исходным данным таблицы 5.1.

Примечания:

- а) При выполнении расчетов принять $|U_{нас}| = 14 \text{ В}$;
 - б) Для схемы рис. 5.3*a* принять $U_{г max}^+ = |U_{г max}^-| = 14 \text{ В}$ и определить C , R_1 , R_2 по соотношениям (5.5) (5.7);
 - в) Для схемы рис. 5.4*a* принять $E_0 = 0 \text{ В}$ и определить C , R_1 , R_2 , R_3 , R_4 по соотношениям (5.15), (5.16), (5.117) для получения симметричного двухполярного пилообразного напряжения;
 - г) Для схемы рис. 5.4*a* определить C , R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , E_0 по соотношениям (5.15)÷(5.18) – для получения положительного (однополярного) пилообразного напряжения;
 - д) Для схемы рис. 5.5*a* определить R , C , R_1 , R_2 , R_3 по соотношениям (5.21), (5.22), (5.23).
- 2.3. Рассчитайте и постройте характеристику преобразования (см рис. 5.6) напряжения U_0 в частоту f по соотношению (5.28).
 - 2.4. Заготовьте отчёт по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Исследуйте работу ГЛИН с внешним запуском. Для этого:

3.1.1. Соберите схему рис. 5.3а, установив R_1 , R_2 , близкие к расчётным. Провода питания микросхемы присоедините к гнездам источника питания ИСНЗ соблюдая полярность, Инвертирующий вход микросхемы DA1 присоедините к гнезду +12В источника ГН2 а гнездо (-) этого источника присоедините к общей шине монтажной панели. Выходное гнездо ГН импульсного генератора блока ГС присоедините к неинвертирующему входу микросхемы DA1, а корпусное гнездо к общей шине.

3.1.2. После проверки правильности сборки схемы преподавателем, установить $E_0 = +2\text{В}$ контролируя его значение вольтметром постоянного тока либо осциллографом в режиме открытого входа. Установите амплитуду входных прямоугольных импульсов $U_{\text{вх}} = 5\text{В}$ ручкой «амплитуда» блока ГС, а ручками «частота» и «длительность» блока ГС установить заданное в таблице 5.1 параметры t_n и t_u , наблюдая сигнал с помощью осциллографа на неинвертирующем входе DA1. Сигнал $u'(t)$ с выхода DA1 подайте на вход внешней синхронизации осциллографа при положении тумблера вида синхронизации «внешн». Регулируя в небольших пределах t_n и t_u ручкой «частота» и «длительность» получить $u_{\text{элин}}(t)$ по рис. 5.3б.

3.1.3. Занесите в протокол осциллограммы напряжений $u_{\text{вх}}(t)$, $u'(t)$, $u_2(t)$ в режиме внешней синхронизации осциллографа друг под другом, указав « t_i » и « t_y ». Выключите питание блока ГС и стенда. Отсоедините провода от блока ГС.

3.2. Исследуйте работу ГЛИН в автогенераторном режиме. Для этого:

3.2.1. Замените в предыдущей схеме значения R_1 , R_2 и «С» по результатам расчетов для схемы рис. 5.4а с учетом примечания в). Отключите источник ГН2 от инвертирующего входа DA1 и присоедините этот вход к общей шине ($E_0 = 0$).

- 3.2.2. Дособерите схему рис. 5.4а установив резисторы R_3 , R_4 и после проверки схемы преподавателем, включите питание стенда и занесите в протокол синхронизированные временные диаграммы напряжений $u_k(t)$, $u_{oc}(t)$, $u_z(t)$ предварительно получив на экране осциллографа неподвижное изображение 2-3 периодов. Зарисуйте диаграммы по образцу рис. 5.4б, указав « m_t » и « m_v ». Выключите питание стенда.
- 3.2.3. Отсоедините инвертирующий вход DA1 от общей шины и подсоедините его к гнезду +12В источника ГН2 а гнездо (-) этого источника к общей шине панели и увеличивая E_0 от нуля, наблюдайте сигнал на выходе ГЛИН. Зарисуйте в протокол диаграммы напряжений по образцу п. 3.2.2. Выключите питание стенда и разберите схему не убирая микросхемы.
- 3.3. Исследуйте работу ГЛИН с преобразователем напряжения в частоту. Для этого:
- 3.3.1. Соберите схему рис. 5.5а. Подсоедините гнезда (+12В) и (-) источника ГН2 со входом интегратора соблюдая полярность. Подключите кабель усилителя вертикального отклонения осциллографа к выходу микросхемы DA2 и подключите провод внешней синхронизации осциллографа к выходу DA2.
- 3.3.2. После проверки схемы преподавателем, установите значение U_0 заданное в таблице 5.1, получите на экране неподвижное изображение ручкой «уровень» в режиме внешней синхронизации развертки и запишите в протокол временные синхронизированные диаграммы напряжений $u_z(t)$, $u'(t)$, $u_n(t)$, оформив их по образцу рис. 5.5б. Укажите « m_t » и « m_v ».
- 3.3.3. Снимите зависимость частоты импульсов на выходе преобразователя от величины напряжения U_0 , заполнив таблицу 5.2. Величины U_0 контролируйте осциллографом в режиме открытого входа а частоту f_0 измеряйте частотомером.

Таблица №2

U_0 , В	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
f , кГц									

Выключите питание приборов. Наведите порядок на рабочем месте. Протокол подпишите у преподавателя.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Как формируется линейно изменяющееся напряжение в схеме интегрирующего усилителя?
- 4.2. Приведите примеры практического применения пилообразных по форме напряжений и токов.
- 4.3. Как устроен и как работает ГЛИН с внешним управлением?
- 4.4. Как связаны параметры линейного изменяющегося напряжения $t_{нар}$ и $t_{снад}$ с параметрами внешних запускающих импульсов t_n и t_u в схеме ГЛИН с внешним управлением?
- 4.5. Как рассчитываются параметры ГЛИН с внешним управлением?
- 4.6. Как устроен и как работает ГЛИН в автогенераторном режиме?
- 4.7. Изложите суть метода суперпозиции применяемого для определения напряжения обратной связи в схеме ГЛИН работающего в автогенераторном режиме.
- 4.8. Какие функции выполняет триггер Шмитта в схеме ГЛИН? Как влияет значение E_0 на параметры генерируемых импульсов в схеме ГЛИН работающей с положительной обратной связью?
- 4.9. Как рассчитываются параметры элементов схемы ГЛИН автогенераторного режима?
- 4.10. Как устроен и как работает ГЛИН совмещенный с преобразователем напряжения в частоту?
- 4.11. Как рассчитываются параметры элементов ГЛИН совмещенного с преобразователем напряжения в частоту?

5. Требования к оформлению отчета

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие письменные ответы на контрольные вопросы;
- схему рис. 5.3а и временную синхронизированную диаграмму напряжений $u_{урп}(t)$, $u'(t)$ и $u_2(t)$ на входах ГЛИН с внешним управлением. Параметры элементов схемы устанавливаемых при сборке схемы;

- схему рис. 5.4а и временные синхронизированные диаграммы напряжений $u_k(t)$, $u_{oc}(t)$ и $u_2(t)$. Параметры элементов схемы:

а) при двухполярных импульсах на входе ГЛИН;

б) при однополярных импульсах на входе ГЛИН;

- схему рис. 5.5а и временные синхронизированные диаграммы напряжений $u_{np}(t)$, $u'(t)$ и $u_2(t)$ на входах ГЛИН совмещенного с преобразователем напряжения в частоту;

- характеристику преобразования

а) расчетную;

б) экспериментальную,
построенные на одном рисунке.

Примечание: возле каждой схемы должны быть указаны параметры элементов, а возле диаграмм значения масштабных множителей.

	Подгруппа №1				Подгруппа №2			
	$t_n = t_{нар}$	$t_u = t_{сн}$	$ U_{Г\max} $	U_0	$t_n = t_{нар}$	$t_u = t_{сн}$	$ U_{Г\max} $	U_0
	мс	мс	В	В	мс	мс	В	В
1	5,0	2,5	2,5	11,0	1,0	0,5	7,0	6,5
2	4,5	2,25	3,0	10,5	1,5	0,75	7,5	6,0
3	4,0	2,0	3,5	10,0	2,0	1,0	8,0	5,5
4	3,5	1,75	4,0	9,5	2,5	1,25	8,5	5,0
5	3,0	1,5	4,5	9,0	3,0	1,5	9,0	4,5
6	2,5	1,25	5,0	8,5	3,5	1,75	9,5	4,0
7	2,0	1,0	5,5	8,0	4,0	2,0	10,0	3,5
8	1,5	0,75	6,0	7,5	4,5	2,25	10,5	3,0
9	1,0	0,5	6,5	7,0	5,0	2,5	11,0	2,5

Лабораторная работа №6

Тема: Частотные фильтры

Цель работы:

- изучить назначение, классификацию и основные параметры частотных фильтров;
- приобрести навыки упрощенного расчёта параметров элементов фильтров, реализуемых на основе микросхемы операционного усилителя;
- приобрести навыки экспериментальной оценки влияния параметров элементов фильтров на их характеристики и параметры.

1. Краткие теоретические сведения.

1.1. Классификация частотных фильтров, их основные параметры и характеристики, области применения.

Частотный фильтр – это устройство (четырёхполюсник) которое хорошо пропускает синусоидальные сигналы в одном диапазоне частоты (в полосе пропускания) и задерживает сигнал в остальном диапазоне частот (в полосе заграждения).

Из определения следует, что коэффициент передачи частотного фильтра по напряжению $K_{\phi} = |K_{\phi}| = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ – зависит от частоты.

При помощи частотных фильтров выделяют – полезный сигнал из множества сигналов других частот, что в частности применяется при частотном разделении каналов связи, когда на одной линии связи создают несколько каналов работающих на разных частотах.

Так как K_{ϕ} зависит от частоты, то следовательно частотные фильтры строятся с применением RC , RL , RLC – цепей, в которых имеются элементы с реактивным сопротивлением $X_L = 2\pi fL$ и $X_C = 1/(2\pi fC)$, зависящим от частоты f .

Фильтры бывают пассивные и активные. Пассивные – собираются только на пассивных элементах и следовательно максимальное значение их коэффициента передачи не превышает единицы.

В активных частотных фильтрах для улучшения избирательности, в дополнение к пассивным частотно-зависимым RC -цепям применяют электронные усилители, что позволяет увеличить коэффициент передачи в полосе пропускания.

Основной характеристикой частотного фильтра является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), т.е. зависимости модуля коэффициента передачи фильтра от частоты.

В зависимости от вида АЧХ фильтры подразделяются на четыре типа:

- фильтры нижних частот (ФНЧ);
- фильтры верхних частот (ФВЧ);
- полосовые (полосно-пропускающие) фильтры (ПФЧ);
- заграждающие (режекторные) частотные фильтры (ЗЧФ).

На рис 6.1 приведены АЧХ этих фильтров.

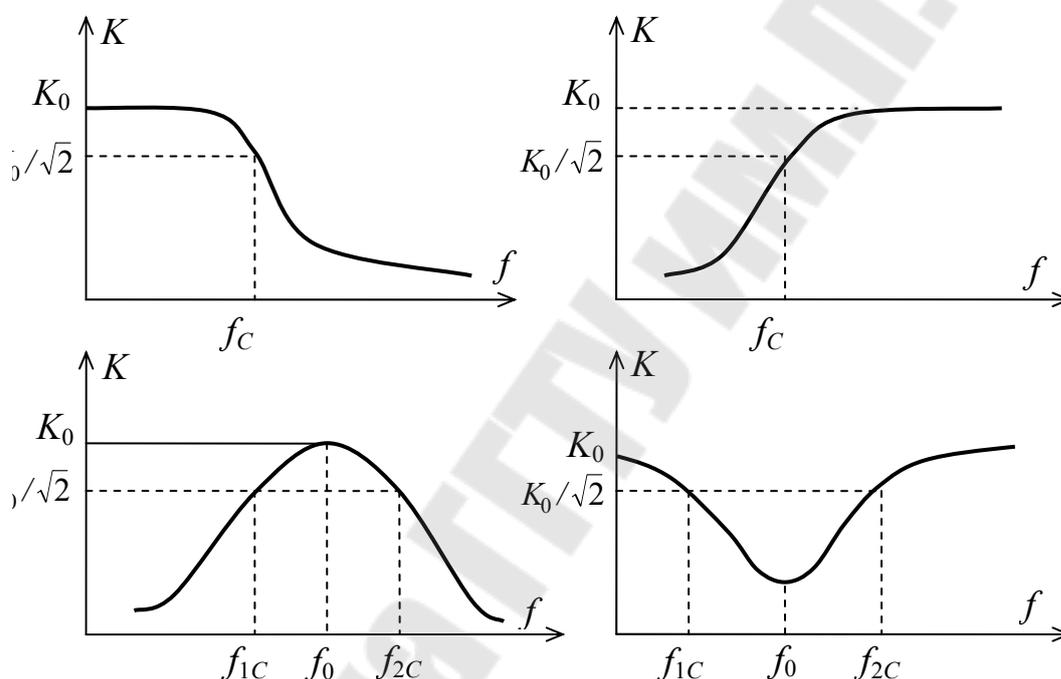


Рис. 6.1. Типы АЧХ частотных фильтров:
а) ФНЧ, б) ФВЧ, в) ПФЧ, г) ЗЧФ

Фильтры характеризуются также частотой среза f_c (частотами среза) это такие частоты на которых коэффициент передачи в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального его значения K_0 , т.е.

$$K_\phi(f_c) = K_0 / \sqrt{2} = 0,707K_0, \quad (6.1)$$

где K_0 - максимальное значение коэффициента передачи фильтра в полосе пропускания.

Полосовой и заграждающий фильтры характеризуются также абсолютной и относительной полосой пропускания (заграждения)

$$\Delta f = f_{2c} - f_{1c} \text{ и } \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (6.2)$$

1.2. Пассивные частотные фильтры

1.2.1. Фильтры нижних частот.

На рис. 6.2а приведена простейшая схема пассивного ФНЧ RC-типа.

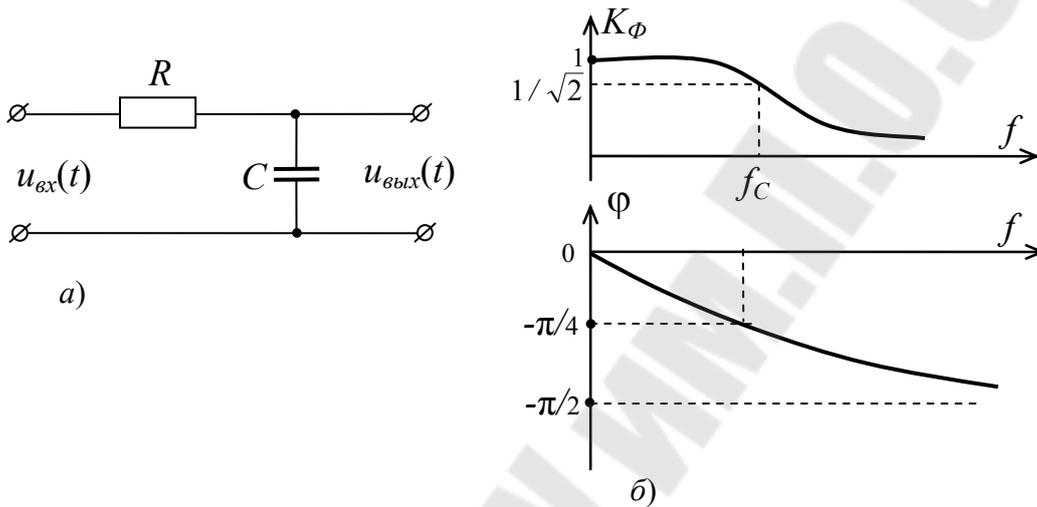


Рис. 6.2. Фильтр нижних частот:
а) схема; б) АЧХ и ФЧХ

Из рис. 6.2а следует, что $\underline{U}_{\text{вых}} = \frac{\underline{U}_{\text{вх}}}{R - jX_C}$, или

$$K_\phi = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = K_\phi e^{j\varphi}, \quad (6.3)$$

$$\text{где } K_\phi = |K_\phi| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \quad \varphi = -\arctg(\omega RC), \quad \omega = 2\pi f, \quad (6.4)$$

На рис. 6.2б приведены АЧХ и ФЧХ этого типа фильтра. Для частоты среза f_c , $K_\phi = K_0/\sqrt{2}$, где $K_0 = 1$, и, следовательно,

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_c RC)^2}}, \text{ или } f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (6.5)$$

При каскадном соединении двух звеньев типа рис 6.2 а) образуются ФНЧ рис. 6.3а, для которого

$$K_\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + 7(\omega RC)^2 + (\omega RC)^4}}, \text{ или } f_c = \frac{0,1885}{2\pi RC}. \quad (6.6)$$

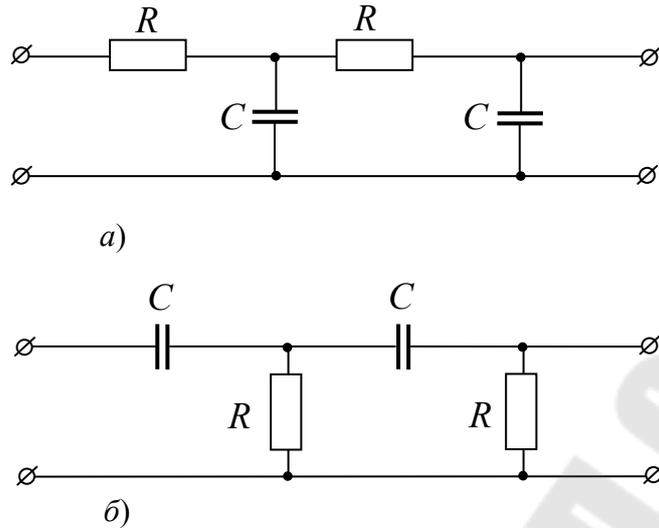


Рис. 6.3. Двухзвенный пассивный ФНЧ (а) и ФВЧ (б)

1.2.2. Фильтры верхних частот

На рис. 6.4а приведена схема простейшего ФВЧ – RC типа. Из схемы видно, что она отличается от предыдущей перестановкой местами R и C – элементов.

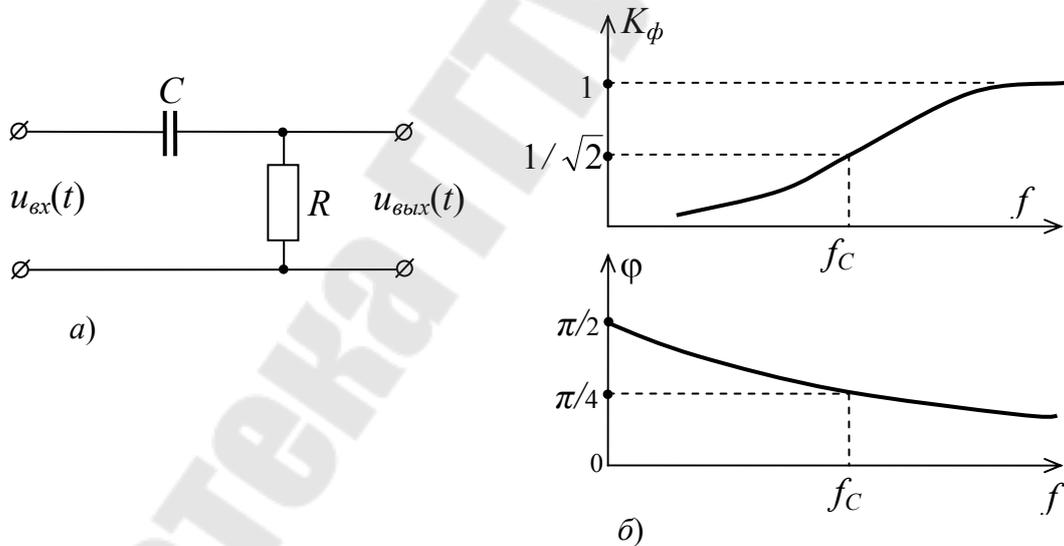


Рис. 6.4. Фильтр верхних частот:
а) схема, б) АЧХ и ФЧХ

$$\underline{U}_{вых} = \frac{\underline{U}_{вх}}{R + \frac{1}{j\omega C}} R,$$

ИЛИ

$$\underline{K}_\phi = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = K_\phi e^{j\varphi}, \quad (6.7)$$

$$\text{где } K_\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega RC)^2}}}; \quad \varphi = -\arctg \frac{1}{\omega RC}. \quad (6.8)$$

Частоту среза f_c определяют при каскадном соединении двух звеньев из (6.5). По схеме рис. 6.3б образуется ФВЧ, для которого

$$K_\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{7}{(\omega RC)^2} + \frac{1}{(\omega RC)^4}}} \quad \text{или} \quad f_c = \frac{2,652}{2\pi RC}. \quad (6.9)$$

1.2.3. Полосовые частотные фильтры

Для получения пассивного ПЧФ, цепи ФНЧ и ФВЧ рис. 2а и рис. 6.3а соединяют по схеме рис. 6.5а, либо по схеме рис. 6.5б

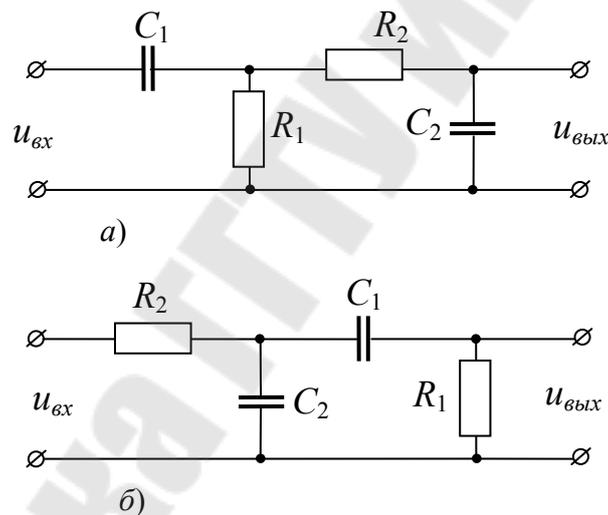


Рис. 6.5. Варианты реализации ПЧФ

Цепочка R_1C_1 ФВЧ в схеме рис. 6.5а обеспечивает увеличение K_ϕ с ростом частоты, а цепочка R_2C_2 ФНЧ обеспечивает уменьшение K_ϕ с ростом частоты f , и поэтому АЧХ этого типа фильтра имеет максимум коэффициента передачи на частоте f_0 рис. 6.6а.

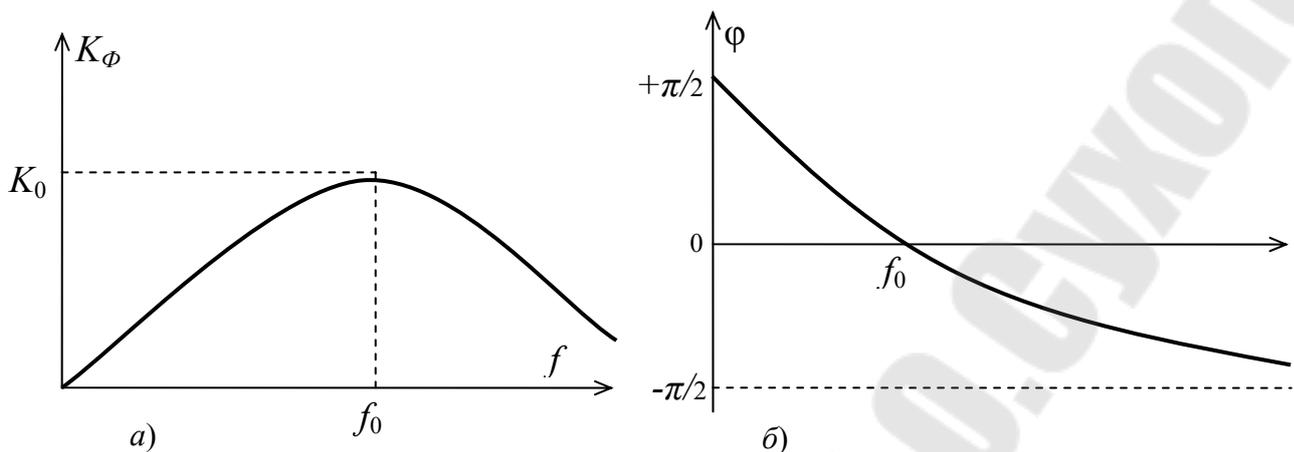


Рис. 6.6. Частотные характеристики ПЧФ:
а) АЧХ, б) ФЧХ

Для случая, когда $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$ модуль коэффициентов передачи схем рис. 6.5 определяется выражением

$$K_\phi = \frac{1}{\sqrt{9 + \left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}}, \quad (6.10)$$

в этом случае на частоте f_0 ,

$$K_\phi = K_0 = \frac{1}{3}, \quad \varphi = 0, \quad \text{а } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (6.11)$$

1.2.4. Заграждающие частотные фильтры

Схема пассивного ЗЧФ приведена на рис. 6.7а и представляет собой двойной Т-образный мост.

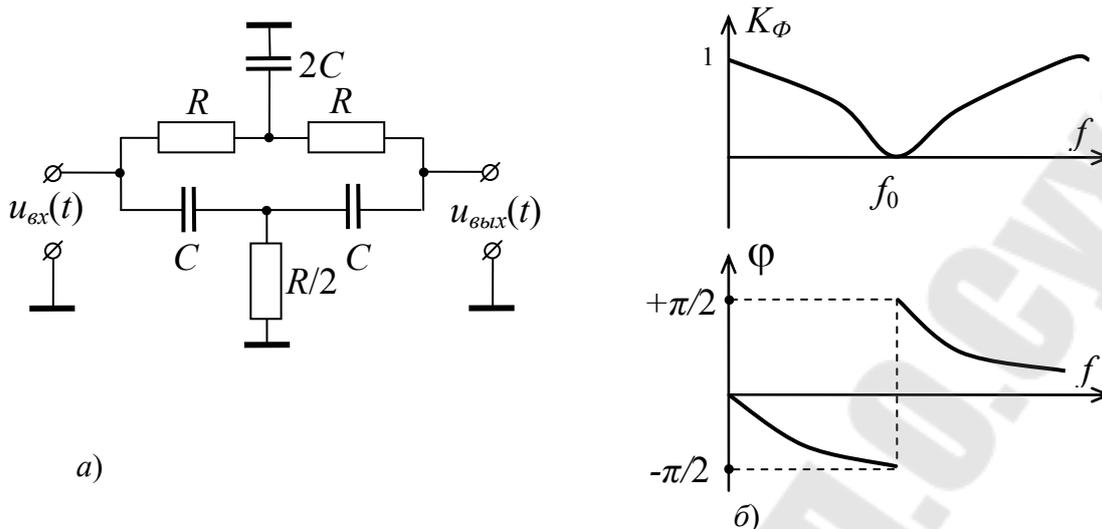


Рис. 6.7. Заграждающий частотный фильтр на основе двойного Т-образного моста

В этом устройстве сигналы высоких частот проходят на выход по двум конденсаторам, так как для этих частот $X_C \rightarrow 0$, а сигналы низких частот - через два резистора R , поэтому на высоких и низких частотах $K_\phi = 1$.

Упрощенный расчет ЗЧФ аналогичен расчету ПЧФ, т.е

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad K_0 = 0, \quad K(\omega) = \frac{1 - \omega^2 R^2 C^2}{\sqrt{(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + 16\omega^2 R^2 C^2}}, \quad (6.12)$$

1.3. Активные частотные фильтры

Пассивные фильтры имеют существенный недостаток. Их характеристики зависят от сопротивления нагрузки.

Если выход пассивного фильтра подключить к входу электронного усилителя с большим входным сопротивлением, то получится активный фильтр в котором сопротивление нагрузки не будет влиять на характеристики фильтра. Кроме того, за счет обратных связей в активных фильтрах можно существенно улучшить характеристики фильтров и увеличить величину и стабильность коэффициента передачи K_ϕ фильтра.

1.3.1. Активные фильтры нижних частот на основе операционного усилителя

Схема активного ФНЧ приведена на рис. 6.8а. Фильтр собран на двух соединенных цепочкой ФНЧ RC-типа и неинвертирующим усилителем, охваченном цепью положительной обратной связи (ПОС), через емкость C . Коэффициент усиления этого усилителя

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1} \text{ а частота среза } f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

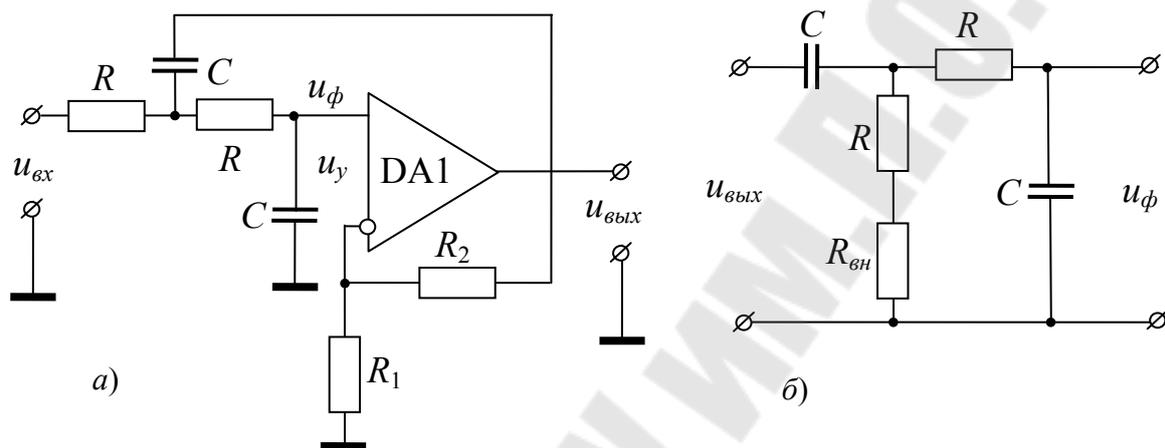


Рис. 6.8. Активный ФНЧ: а) схема, б) цепь ПОС

Кроме $u_{вх}$ на неинвертирующий вход DA1 поступает сигнал ПОС, величину которого можно найти из рис. 6.8б. Цепь ПОС представляет собой полосовой частотный фильтр у которого на частоте f_c , $K_0 = \frac{1}{3}$, а это значит что коэффициент усиления усилителя не должен превышать трех, т.е. $K < 3$, иначе будет иметь место режим самовозбуждения и начнется генерация на частоте f_c .

Для получения плоской АЧХ в полосе пропускания, рекомендуется выбирать $K = 1,5 \div 1,7$.

Расчет активного ФНЧ сводится к определению $\tau = RC = \frac{1}{2\pi f_c}$,

выбору C и определению $R = \frac{\tau}{C}$, определению $\frac{R_2}{R_1} = K - 1$, выбору R_1 и определению R_2 .

На рис. 6.9а приведены АЧХ пассивного (кривая 1) и активного (кривая 2) ФНЧ.

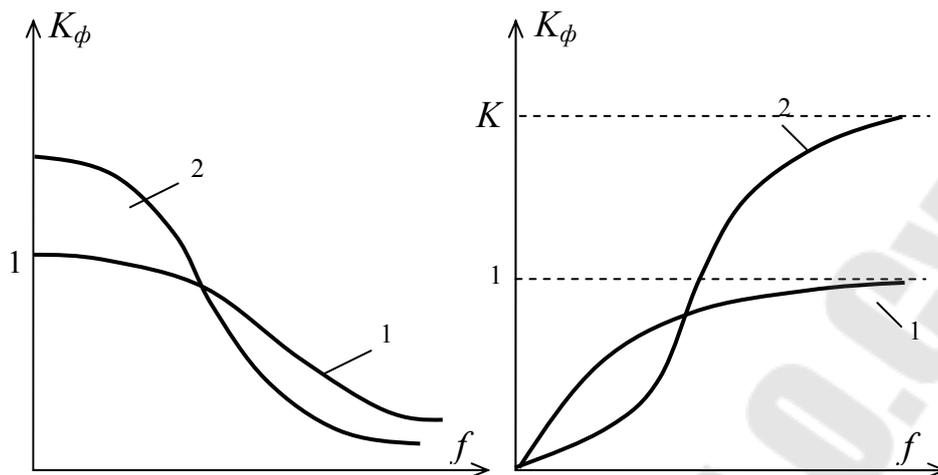


Рис. 6.9. АЧХ ФНЧ (а), АЧХ ФВЧ (б)

1.3.2. Активный фильтр верхних частот на основе операционного усилителя.

Схема активного ФВЧ приведена на рис. 6.10а. Фильтр отличается от предыдущего заменой местами R и C .

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

У этого фильтра на f_c $K_\phi = 1/3$ и следовательно при $K \geq 3$ он будет самовозбуждаться.

Схема цепи ПОС для этого фильтра приведена на рис. 6.10б. Для этого типа фильтра также для получения плоской вершины АЧХ рекомендуется принимать $K = 1,5 \div 1,7$.

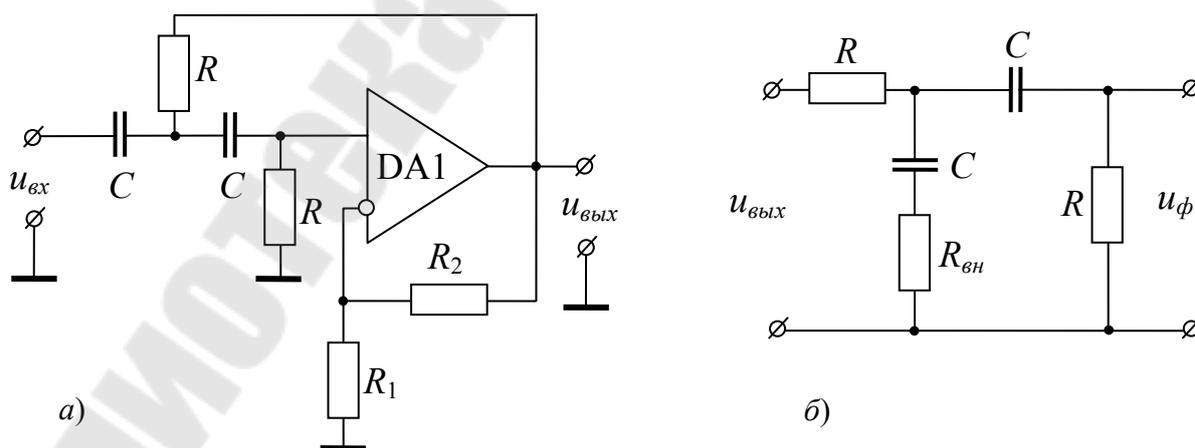


Рис. 6.10. Схема активного ФВЧ (а) и схема цепи ПОС (б)

АЧХ пассивного (кривая 1) и активного (кривая 2) ФВЧ приведена на рис. 6.9б.

1.3.3. Полосовой активный частотный фильтр на основе операционного усилителя.

Схема этого типа фильтра приведена на рис. 6.11а

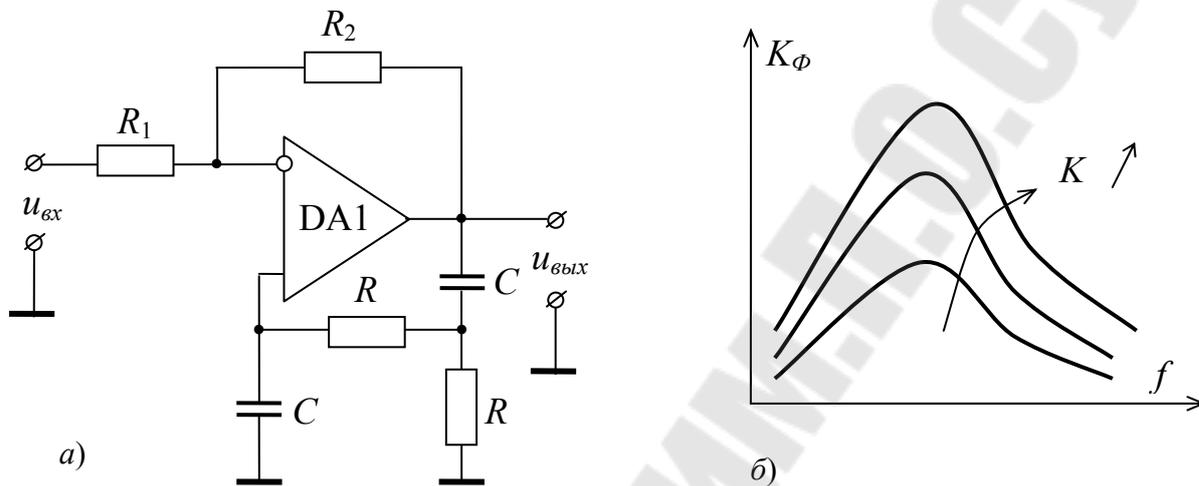


Рис. 6.11. Активный ПЧФ:

а) схема; б) АЧХ для разных значений $K = R_2/R_1$

Устройство содержит пассивный ПЧФ (по схеме упрощенного моста Вина) и инвертирующий усилитель на основе микросхемы ОУ. Пассивный ПЧФ включен в цепь ПОС, а сигнал от генератора подается на инвертирующий вход DA1. так как у пассивного ПЧФ $K_0 = 1/3$ на частоте $f_c = 1/(2\pi RC)$, то коэффициент передачи цепи ПОС $\gamma_0 = 1/3$ и следовательно коэффициент усиления усилителя $K = -R_2/R_1$ не должен превышать 3. В противном случае фильтр превратится в генератор.

Семейство АЧХ этого типа фильтра приведено на рис. 6.11б

1.3.4. Заграждающий активный частотный фильтр на основе операционного усилителя.

Схема этого типа фильтра рис. 6.12а содержит пассивный ЗЧФ на основе двойного Т-моста и неинвертирующего усилителя на микросхеме DA1.

Так как здесь нет цепи ПОС, то стабильность его работы не зависит от величины $K = 1 + R_2/R_1$.

Как и в предыдущих схемах частота заграждения $f_0 = 1/(2\pi RC)$.

Коэффициент передачи зависит от частоты по соотношению $K_{\phi} = K(1 - \Omega) / \sqrt{(1 - \Omega)^2 + 16\Omega}$, где $\Omega = (\omega RC)$ (см. (6.12)).

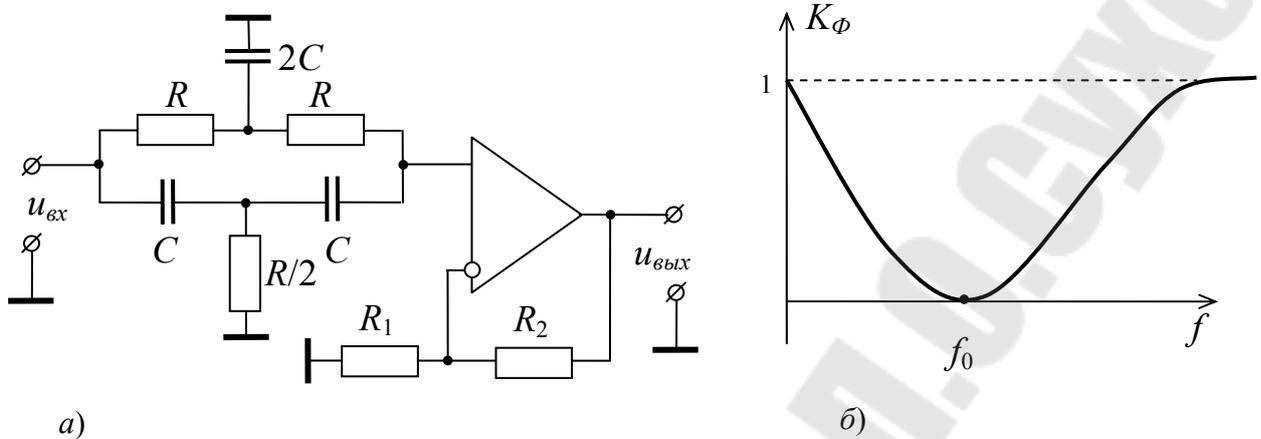


Рис. 6.12. Схема активного ЗЧФ (а) и его АЧХ (б)

2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

- 2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной работы изучить назначение, классификацию, принцип работы, параметры и характеристики активных и пассивных частотных фильтров.
- 2.2. По исходным данным таблицы 6.1 определить значения параметров элементов пассивных и активных фильтров.

Таблица 6.1

Параметры № стенда	Подгруппа 1			Подгруппа 2		
	$f_c, (f_0),$ кГц	K_0		$f_c, (f_0),$ кГц	K_0	
		ФНЧ, ФВЧ, ПЧФ	ЗЧФ		ФНЧ, ФВЧ, ПЧФ	ЗЧФ
1	1,5	1,6	2,0	6,0	1,6	2,9
2	2,0	1,6	2,1	6,5	1,6	3,0
3	2,5	1,6	2,2	7,0	1,6	3,1
4	3,0	1,6	2,3	7,5	1,6	3,2
5	3,5	1,6	2,4	8,0	1,6	3,3
6	4,0	1,6	2,5	8,5	1,6	3,4
7	4,5	1,6	2,6	9,0	1,6	3,5
8	5,0	1,6	2,7	9,5	1,6	3,6
9	5,5	1,6	2,8	10,0	1,6	3,7

Примечание: для расчета параметров элементов необходимо по заданной f_c (f_0) определить $\tau = RC = (1/2\pi f_c)$ и задавшись значением C (например $C = 0,01 \cdot 10^{-6} \phi$), определить $R = \tau/C$. Затем по $K = K_0$ определить R_2/R_1 и задавшись значением R_1 определить R_2 .

- 2.3. Полученные в п. 2.2 значения параметров элементов активных фильтров привести к табличным, т.е. выбрать значения электрических сопротивлений резисторов ближайšie к рассчитанным из таблицы приложения 1. Рассчитайте и постройте АЧХ пассивных фильтров по формулам (6.6), (6.9), (6.10) и (6.12). Частоту f_c изменять от $0,25f_c$ (либо от $0,25f_0$), до $4f_c$ (либо $4f_0$) по закону удвоения. Построить графики этих АЧХ по образцу рис. 6.2б, рис. 6.4б, рис. 6.6а, рис. 6.7б.
- 2.4. Заготовьте отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

- 3.1 Исследуйте экспериментально частотные свойства одного типа пассивного фильтра, выбрав вариант фильтра из таблицы 6.2.

Таблица 6.2

№ стен- да	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип фильтра	ФНЧ	ФВЧ	ПЧФ	ЗЧФ	ФНЧ	ФВЧ	ПЧФ	ЗЧФ	ФНЧ

- 3.1.1. Соберите схему пассивного фильтра заданного в таблице 6.2 варианта, по одному из рисунков рис. 6.3а, либо рис. 6.3б, либо рис. 6.5а, либо рис. 6.7а.
- 3.1.2. Подайте на вход фильтра с выхода генератора ГС стенда синусоидальный сигнал с амплитудой $U_m = 5\text{ В}$. Установите с помощью частотомера стенда $f_c = 0,25f_c$ (либо $f_c = 0,25f_0$), измерьте вольтметром МВА действующее значение напряжения на входе и выходе фильтра и запишите в таблицу 6.3.

Таблица 6.3

$f_{Г}/f_c$		0,25	0,5	1	2	4
$f_{Г}$, кГц						
Пассивный фильтр	U_{ex} , В					
	$U_{вых}$, В					
	$K_{ПФ} = \frac{U_{вых}}{U_{ex}}$					
Активный фильтр	U_{ex} , В					
	$U_{вых}$, В					
	$K_{ПФ} = \frac{U_{вых}}{U_{ex}}$					

3.1.3. Изменяя частоты f_2 по таблице 6.3 ручкой «частота» и (при необходимости) переключателем «диапазон» блока ГС стенда – заполните таблицу 6.3 – для пассивного фильтра.

3.2. Исследуйте экспериментально частотные свойства одного типа активного фильтра (по таблице 6.2).

3.2.1. Соберите схему вашего варианта активного фильтра по схеме рис. 6.8а, либо рис. 6.10а, либо рис. 6.11а, либо рис. 6.12а и повторите действия по пунктам 3.1.2, 3.1.3 заполнив соответствующие строки таблицы 6.3.

Примечание: перед снятием АЧХ активного фильтра настройте генератор на одну из частот ($0,25f_c$ - для ФНЧ, либо $4f_c$ - для ФВЧ, либо $0,25f_0$ - для ПЧФ, либо $4f_0$ - для ЗЧФ) и отрегулируйте (при необходимости) амплитуду входного сигнала, добиваясь отсутствия ограничения амплитуды $U_{твых}$ - на выходе фильтра. При этом $U_{вых}$ не должен превышать 10В.

3.3. Исследуйте влияние изменения параметров элементов схемы активного фильтра на f_c (f_0) и K_0 .

3.3.1. Замените резистор R на $R' \approx 2R$ и определите значение f_c' (либо f_0'). Для ФНЧ и ФВЧ частоту f_c определите по уровню выходного действующего напряжения $U'_{вых}(f_c) = U_{вых0}/\sqrt{2}$, где $U_{вых0}$ - максимальное значение, соответствующее частотам полосы

пропускания фильтра. Результат запишите в протокол. Определите также значение K'_0 . Вернитесь к исходному значению R .

3.3.2. Замените резистор R_1 на $R'_1 = 2R_1$ и определите значение f_c'' (f_0'') и K_0'' . Выключите питание стенда и осциллографа и не разбирая схему, подпишите полученные данные у преподавателя.

3.3.3. При обнаружении ошибок преподавателем повторите эксперимент и только после этого выключите питание стенда и наведите порядок на рабочем месте.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Что такое частотный фильтр?
- 4.2. Что понимается под комплексным коэффициентом передачи частотного фильтра?
- 4.3. Дайте определение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) частотного фильтра.
- 4.4. Дайте определение фазо-частотной характеристики (ФЧХ) частотного фильтра.
- 4.5. Чем обусловлены зависимости от частоты АЧХ и ФЧХ частотных фильтров, реализуемых с применением RC -цепей?
- 4.6. Приведите частотные характеристики (АЧХ) ФНЧ, ФВЧ, ПЧФ и ЗЧФ.
- 4.7. Как устроены активные фильтры и каковы функции усилителя в схеме активных фильтров?
- 4.8. Как определяется граничная частота (частота среза) фильтров НЧ и фильтров ВЧ?
- 4.9. Как определяется абсолютная и относительная полоса пропускания ПЧФ и полоса заграждения ЗЧФ?
- 4.10. Почему могут возбуждаться активные фильтры рис. 6.8а, рис. 6.10а, рис. 6.11а?
- 4.11. Каким образом можно изменить f_c , (f_0) фильтров а) активных, б) пассивных?
- 4.12. От чего зависит ширина полосы пропускания ПЧФ и полоса заграждения ЗЧФ?

5. Требования к содержанию отчета.

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие письменные ответы на контрольные вопросы;
- схему рис. 6.8*a*, значения, рассчитанные в п. 2.2 параметров элементов и график рассчитанный в п. 2.3 АЧХ фильтра нижних частот;
- схему рис. 6.10*a*, значения, рассчитанные в п. 2.2 параметров элементов и график рассчитанный в п. 2.3 АЧХ фильтра верхних частот;
- схему рис. 6.11*a*, значения, рассчитанные в п. 2.2 параметров элементов и график, рассчитанный в п. 2.3 АЧХ полосового частотного фильтра;
- схему рис. 6.12*a*, значения, рассчитанные в п. 2.2 параметров элементов и график рассчитанный в п. 2.3 АЧХ заграждающего частотного фильтра;
- заполненную таблицу 6.3 и построенные по данным этой таблицы экспериментальные АЧХ пассивного и активного фильтра заданного таблицей 6.2 варианта, приведенные на том же рисунке, что и теоретически рассчитанная АЧХ того же самого варианта.

Приложение 1

Номинальные значения сопротивлений резисторов
и емкости конденсаторов стенда 17Л-03

Резисторы				Конденсаторы	
Сопротивления	Кол- во	Сопротивления	Кол- во	Емкость	Кол- во
кОм		кОм		мкФ	
0,1	2	4,3	1	0,47	1
0,15	3	5,1	2	0,1	2
0,2	3	6,2	1	0,033	2
0,3	1	7,5	1	0,01	4
0,51	3	10,0	2	3300пФ	2
0,7	1	15,0	2	1000пФ	2
1,0	2	20,0	1	510пФ	2
1,5	2	24,0	1	5,0	1
2,0	2	30	2	10,0	2
2,4	1	39	1	20,0	2
3,0	2	47	1	50,0	2
3,6	1	100	2		
		200	1		

Литература

1. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника/ Ю.С. Забродин. – М.: Высшая школа, 1982. – 495 с.
2. Гусев, В.Г. Электроника/ В.Г. Гусев. – М.: Высшая школа, 1982. – 495 с.
3. Гусев, В.Г. Электроника/ В.Г. Гусев. – М.: Высшая школа, 1991. – 615 с.
4. Горбачев, Г.Н., Чаплыгин, Е.Е. Промышленная электроника/ Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
5. Галкин, И.В., Палевич, Е.В. Промышленная электроника и микроэлектроника/ И.В. Галкин, Е.В. Палевич. – Мн.: Беларусь, 2000.- 350 с.
6. Чубриков, Л.Г. Основы промышленной электроники/ Л.Г. Чубриков. – Гомель, ГГТУ им. П.О. Сухого, 2003. – 256 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 2. Устройства на полупроводниковых диодах и транзисторах	4
Лабораторная работа № 3. Усилители на микросхемах ИОУ	19
Лабораторная работа № 4. Генераторы электрических колебаний на ИОУ	34
Лабораторная работа № 5. Генераторы линейно-изменяющегося напряжения	62
Лабораторная работа № 6. Частотные фильтры	47
Приложение 1	77
Литература.....	78

Тиличенко Михаил Павлович
Чубриков Леонид Гаврилович
Изотов Петр Павлович

АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Лабораторный практикум
по курсу «Электротехника и электроника»
для студентов неэлектротехнических специальностей

Подписано в печать 26.10.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 3,7.

Тираж 200 экз. Заказ № /113.

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.