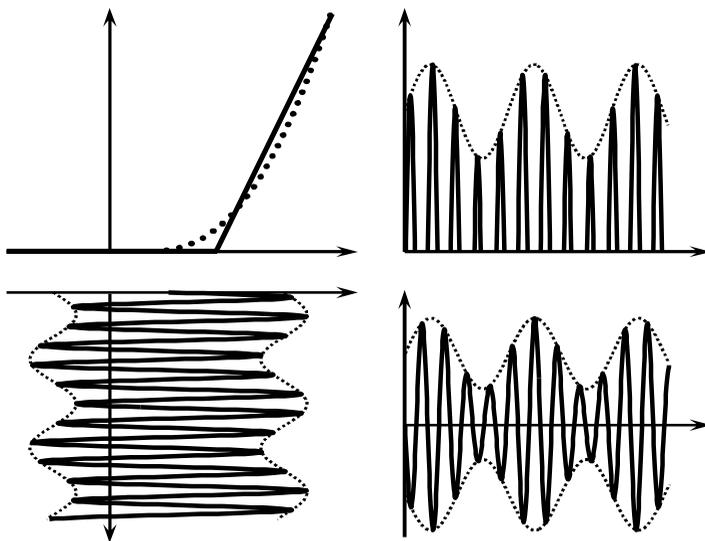


366-2021

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Методические указания
к лабораторным работам № 7, 8
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения



Воронеж 2021

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиотехники

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Методические указания
к лабораторным работам № 7, 8
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения

Воронеж 2021

УДК 621.37(07)
ББК 32.841я7

Составитель

д-р техн. наук А. В. Останков.

Радиотехнические цепи и сигналы: методические указания к лабораторным работам № 7, 8 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. В. Останков. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 36 с.

Приводится описание лабораторных работ по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы», относящихся к разделам «Преобразования сигналов нелинейными цепями» и «Цифровая обработка сигналов».

Предназначены для студентов третьего курса, обучающихся по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Ил. 10. Табл. 3. Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.37(07)
ББК 32.841я7

Рецензент – Е. Д. Алперин, канд. техн. наук, доц.
кафедры радиотехники ВГТУ

*Печатается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью лабораторных занятий по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы» является проверка, углубление и закрепление основных теоретических положений, приобретение новых знаний практического характера, освоение методики ведения экспериментальных исследований, получение навыков работы с измерительной аппаратурой, вычислительной техникой и современными программами математического и схемотехнического моделирования.

Программой дисциплины предусматривается выполнение восьми лабораторных работ – по четыре работы в пятом и в шестом семестрах.

Перед непосредственным выполнением каждой лабораторной работы (за исключением первой) студент обязан выполнить домашнее задание, которое предполагает:

- 1) изучение теоретического материала по соответствующей теме, уяснение содержания работы, её основной цели и определяемых содержанием работы способов её достижения;
- 2) выполнение подготовительных расчётов;
- 3) оформление заготовки отчёта по работе.

Заготовка отчёта оформляется на отдельных скреплённых между собой листах белой бумаги формата А4 в книжной ориентации с обязательным указанием Ф.И.О. и группы студента, названия лабораторной работы и её цели. Далее следуют разделы лабораторного задания, в каждом из которых отражаются результаты выполнения подготовительных расчётов, краткое содержание лабораторного задания. Кроме того, приводятся необходимые структурные схемы, иллюстрирующие методику проведения экспериментов, а также электрические схемы исследуемых радиотехнических цепей, заготовки таблиц и графиков (с разлиновкой), которые будут заполняться в ходе эксперимента. В каждом разделе лабораторного задания оставляется свободное место (например, половина страницы) для сопутствующих расчётов и промежуточных выводов. Вы-

воды следует формулировать по каждому разделу задания и носить они должны сугубо конкретный, вытекающий только из результатов эксперимента характер. В конце отчёта оставляется место для общих выводов – заключения.

Текст отчёта следует выполнять только с использованием компьютера (при условии дальнейшей распечатки на принтере). Размер шрифта – 14, цвет шрифта – чёрный.

Выполнению экспериментальной части лабораторной работы предшествует процедура допуска – проверки подготовленности студента. Для того чтобы быть допущенным к работе студент обязан предъявить «заготовку» отчёта, содержащую, в том числе, подготовительные расчёты, и ответить на контрольные вопросы. При невыполненном домашнем задании, отсутствии «заготовки» отчёта или неудовлетворительных ответах на вопросы студент не допускается к работе.

Приступать к выполнению экспериментальных исследований можно только после разрешения преподавателя, соблюдая при этом правила техники безопасности. По окончании работы необходимо предъявить результаты работы преподавателю. После одобрения преподавателем полученных результатов следует выключить базовый блок установки и измерительные приборы или персональный компьютер, привести в порядок рабочее место.

Защита каждой лабораторной работы предполагает объяснение полученных экспериментальных результатов, ответы на теоретические вопросы, решение микрозадач, связанных с тематикой проведённых исследований, или тестирование с использованием специально разработанного программного средства на персональном компьютере. Зачёт по проделанной работе должен быть сдан до начала следующей.

Лабораторная работа № 7

АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СМЕЩЕНИЕМ

1.1. Цель работы – экспериментально исследовать физические процессы в нелинейном резонансном усилителе с управляемым напряжением смещения.

1.2. Краткие теоретические сведения

С теоретическими сведениями, необходимыми для выполнения работы, можно ознакомиться в учебных пособиях: [1, с. 254-255], [2, с. 362-364], [3, с. 283-284].

1.3. Описание лабораторной установки

Работа выполняется на сменном блоке, верхняя панель которого (с сокращениями, не затрагивающими данную работу) показана на рис. 1.

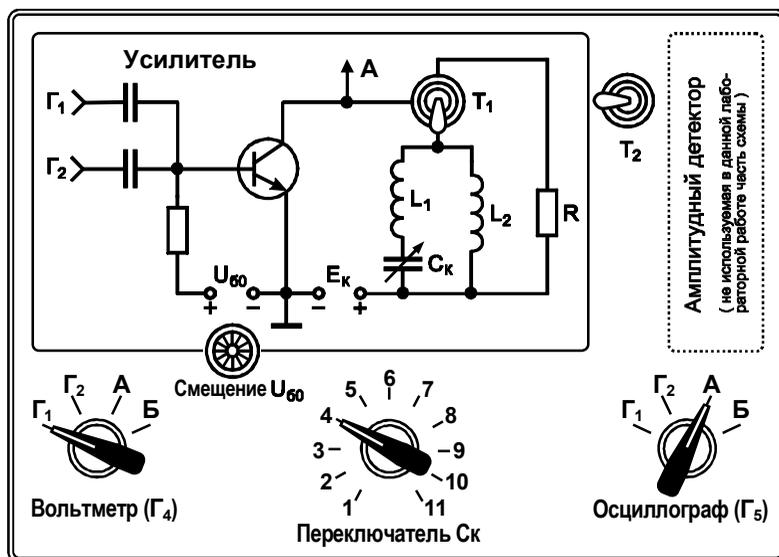


Рис. 1

Исследуемая цепь представляет собой амплитудный модулятор, реализованный на основе транзисторного резонансного усилителя. Предполагается, что усилитель работает в нелинейном режиме, при котором проходную характеристику транзистора – зависимость тока коллектора i_K от напряжения между базой и эмиттером u_B – целесообразно аппроксимировать кусочно-линейной функцией с начальным напряжением U_H и крутизной S . Роль усиливаемого сигнала, поступающего на вход схемы (к клеммам Γ_1) от высокочастотного генератора, исполняет гармоническое колебание $u_{вч}(t) = U_\omega \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$ с частотой 150...220 кГц, которое служит основой для формирования несущей АМ-колебания. Модуляция в усилителе осуществляется за счёт изменения во времени напряжения смещения $u_{см}(t)$ на базе транзистора по закону модулирующего колебания $u_{нч}(t) = U_\Omega \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)$ частотой 300...500 Гц, подаваемого на клеммы Γ_2 от внешнего низкочастотного генератора. Меняющееся во времени относительно U_{B0} напряжение смещения $u_{см}(t) = U_{B0} + u_{нч}(t)$ обеспечивает текущую вариацию угла отсечки Θ коллекторного тока, что приводит к изменению во времени амплитуды его первой гармоники I_{K1} . Благодаря избирательным свойствам колебательного контура, настроенного на частоту первой гармоники тока, амплитуда напряжения на контуре $U_K(t)$ приобретает форму модулирующего напряжения $u_{нч}(t)$. Временные диаграммы, отражающие принцип амплитудной модуляции смещением, приведены на рис. 2.

Постоянная составляющая напряжения смещения на базе транзистора U_{B0} , определяющая положение рабочей точки на проходной ВАХ транзистора, регулируется ручкой «Смещение U_{B0} » и измеряется вольтметром, размещённым непосредственно на панели блока питания (предел шкалы равен 2 В). Запитывается модулятор от источника напряжения $E_K = 6,3$ В.

В работе предусмотрена возможность замены резонансной нагрузки резистивной (тумблер T_1), что дает возможность наблюдать осциллограммы выходного тока модулятора.

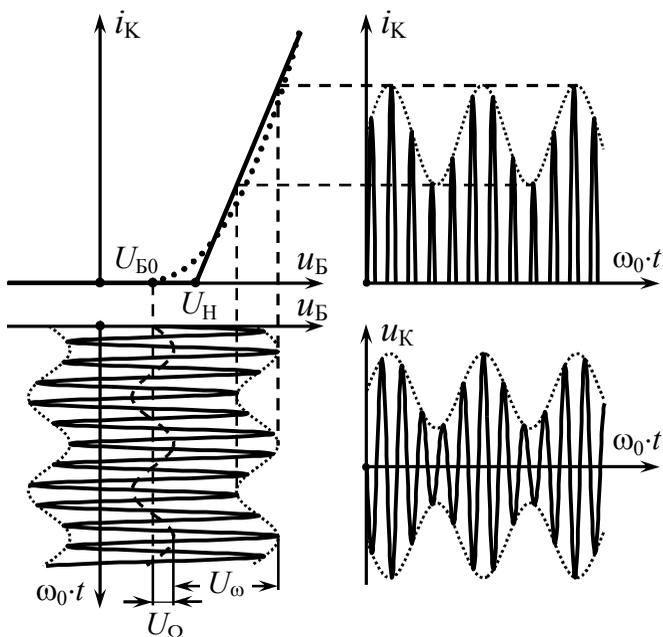


Рис. 2

Напряжение с выхода модулятора поступает на клеммы Γ_5 при условии перевода переключателя «Осциллограф» в положение «А». Уровни модулируемого $u_{вч}(t)$ и модулирующего $u_{нч}(t)$ напряжений следует фиксировать внешним вольтметром на клеммах Γ_4 , при этом переключатель «Вольтметр» должен быть переведен в положение « Γ_1 » или « Γ_2 » (рис. 1).

1.4. Подготовительное (расчётное) задание

1.4.1. Расчёт модуляционных характеристик

Начертить схему амплитудного модулятора с модуляцией смещением на базу. Полагая, что напряжение излома проходной ВАХ транзистора $U_H = 0,6$ В, а значение её крутизны S приведено в табл. 1, рассчитать и построить модуляционные характеристики модулятора для двух значений амплитуды модулируемого напряжения $U_{\omega} = 0,4$ и $0,6$ В.

Таблица 1

Смен- ный блок	S , мА/В	$R_{КЭ}$, кОм	Поло- жение «С _к »	Смен- ный блок	S , мА/В	$R_{КЭ}$, кОм	Поло- жение «С _к »
1	1,3	10,2	1	6	1,0	13,4	6
2	1,2	12,2	2	7	1,0	13,7	7
3	1,3	12,6	3	8	1,1	11,7	8
4	1,2	12,5	4	9	1,1	13,0	9
5	1,4	11,2	5	10	1,5	10,4	10

Комментарий к выполнению задания. Модуляционной характеристикой амплитудного модулятора называют зависимость амплитуды первой гармоники выходного колебания (напряжения на контуре U_K) от статического напряжения смещения $U_{Б0}$ (соответствующего условию $u_{нч}(t) = 0$) при постоянной амплитуде модулируемого высокочастотного напряжения U_{ω} . Для заданной аппроксимации ВАХ модуляционную характеристику можно рассчитать по формуле

$$U_K = S \cdot R_{КЭ} \cdot \gamma_1(\Theta) \cdot U_{\omega}, \quad (1)$$

где $R_{КЭ}$ – эквивалентное резонансное сопротивление колебательного контура, настроенного на частоту f_0 (табл. 1);

$$\gamma_1(\Theta) = \frac{\Theta - \sin \Theta \cdot \cos \Theta}{\pi} \text{ – коэффициент Берга;}$$

$$\Theta = \arccos \frac{U_H - U_{Б0}}{U_{\omega}} \text{ – угол отсечки выходного тока.}$$

Область определения модуляционной характеристики задаётся условием $\Theta \in [0^\circ; 180^\circ]$, что, очевидно, соответствует неравенству $U_H - U_{\omega} \leq U_{Б0} \leq U_H + U_{\omega}$. Результаты расчёта – девять точек для каждого значения амплитуды модулируемого напряжения U_{ω} – необходимо внести в таблицу. Характеристики изобразить графически (каждую в отдельной системе координат).

1.4.2. Расчёт условий режима линейной модуляции

Считая, что на вход модулятор подается высокочастотное напряжение амплитудой $U_{\omega} = 0,6$ В, рассчитать максимальную амплитуду $U_{\Omega \max}$ модулирующего колебания и напряжение смещения $U_{B0 \text{ опт}}$, при которых обеспечивается режим линейной амплитудной модуляции.

Полагая напряжение смещения U_{B0} равным напряжению излома проходной ВАХ транзистора U_H , а амплитуды модулируемого U_{ω} и модулирующего U_{Ω} колебаний одинаковыми, изобразить ожидаемую осциллограмму выходного напряжения $u_K(t)$ для случаев, когда нагрузкой модулятора служат: а) резонансный контур; б) резистор.

Комментарий к выполнению задания. Модуляционная характеристика определяет условия линейного режима работы модулятора. Рабочую точку, соответствующую режиму «молчания» (условию отсутствия $u_{HЧ}(t)$), следует выбирать на середине её линейного участка. Теоретически это означает, что оптимальная величина смещения должна быть равна напряжению излома проходной ВАХ транзистора: $U_{B0 \text{ опт}} = U_H$. Тогда для обеспечения минимальных нелинейных искажений амплитуда модулирующего колебания U_{Ω} не должна превышать $U_{\omega}/2$. Результаты расчёта необходимо внести в отдельную таблицу, в которой предусмотреть графу для ожидаемых осциллограмм напряжения на выходе модулятора могут быть получены в соответствии с методикой, использованной при построении графиков на рис. 2.

1.4.3. Расчёт коэффициента модуляции

Полагая, что статическое напряжение смещения модулятора U_{B0} соответствует середине линейного участка модуляционной характеристики, амплитуда модулируемого колебания $U_{\omega} = 0,6$ В, частота модулирующего сигнала F такова, что сопротивление контура боковым спектральным составляющим

амплитудно-модулированного тока практически не отличается от резонансного, рассчитать и построить зависимость коэффициента модуляции выходного напряжения M_U от амплитуды модулирующего колебания U_Ω .

Описать методику оценки коэффициента модуляции по осциллограмме модулированного колебания.

Комментарий к выполнению задания. Если частота F модулирующего гармонического колебания $U_\Omega \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)$ мала по сравнению с полосой пропускания эквивалентного контура (резонансного усилителя), можно считать, что искомый коэффициент модуляции выходного напряжения M_U совпадает по величине с коэффициентом модуляции первой гармоники тока модулятора M_I . Зависимость M_I от амплитуды модулирующего напряжения U_Ω можно рассчитать по формуле:

$$M_I = \frac{I_{K1 \max} - I_{K1 \min}}{I_{K1 \max} + I_{K1 \min}}, \quad (2)$$

где $I_{K1 \max}$ и $I_{K1 \min}$ – максимальное и минимальное значения амплитуды первой гармоники выходного тока модулятора. При выборе рабочей точки на середине линейного участка модуляционной характеристики ($U_{B0} = U_H$) значения $I_{K1 \max}$ и $I_{K1 \min}$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{K1 \max} &= S \cdot U_\omega \cdot \gamma_1 \left[\arccos \left(-\frac{U_\Omega}{U_\omega} \right) \right], \\ I_{K1 \min} &= S \cdot U_\omega \cdot \gamma_1 \left[\arccos \left(+\frac{U_\Omega}{U_\omega} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Амплитуду модулирующего напряжения U_Ω изменять в пределах от 0 до $1,2 \cdot U_\omega$ с шагом $0,1 \cdot U_\omega$. Результаты внести в таблицу и отразить графически.

1.5. Задания и указания к их выполнению

1.5.1. Исследование модуляционных характеристик модулятора

Включить измерительные приборы: генераторы ГЗ-33 и АНР-1001, вольтметр АВМ-1071 и осциллограф АСК-1021. Дать приборам прогреться. Подготовить сменный лабораторный блок к работе: 1) тумблер T_2 переключить в левое положение; 2) переключатель «Ск» перевести в положение, соответствующее номеру варианта; 3) переключатель «Вольтметр» установить в положение «Г₁», переключатель «Осциллограф» – в положение «А»; 4) тумблер T_1 переключить в нижнее положение «Контур»; 5) к гнездам Γ_3 подключить спаренные вольтметр и осциллограф; 6) к гнездам Γ_1 подключить генератор ВЧ, в роли которого использовать генератор ГЗ-33 (генератор НЧ – АНР-1001 – при выполнении задания к Γ_2 не подключать!).

Установить на базе транзистора постоянное напряжение смещения около 1 В. Обеспечить на выходе генератора ВЧ уровень гармонического напряжения около 20 - 40 мВ и, изменяя его частоту в пределах от 150 до 220 кГц, добиться совпадения частоты ВЧ колебаний с резонансной частотой контура. Увеличить уровень ВЧ колебания так, чтобы его амплитуда составила 0,6 В, а действующее значение, фиксируемое вольтметром на клеммах Γ_4 , – примерно 0,85 В. Плавно изменяя напряжение смещения в доступных пределах, убедиться по осциллограмме, что амплитуда выходного напряжения не остается постоянной, т.е. амплитудная модуляция возможна.

Снять модуляционные характеристики для двух значений амплитуды высокочастотного колебания $U_\omega = 0,6$ В и 0,4 В: изменяя постоянное напряжение смещения $U_{Б0}$ в пределах от $U_H - U_\omega$ до $U_H + U_\omega$ с шагом не более 0,1 В, измерять амплитуду напряжения на выходе модулятора U_K . Особенно тщательно (с малым шагом) следует фиксировать показания на краях ука-

занного интервала. Учесть, что шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях напряжения. Результаты измерений оформить в таблицу. Полученные экспериментально характеристики построить в одной системе координат с расчётными характеристиками.

Прокомментировать степень соответствия теоретических и экспериментальных результатов. Дать рекомендации по выбору параметров модулятора (напряжения смещения, амплитуды модулирующего напряжения и т.п.), обеспечивающих удовлетворительное качество его работы.

1.5.2. Определение условий обеспечения линейной модуляции

Получить на выходе модулятора АМ-колебание. Для этого установить амплитуду (не действующее значение!) модулируемого ВЧ колебания $U_{\omega} = 0,6$ В, подать от НЧ генератора через гнезда Γ_2 модулирующее напряжение частотой 400 Гц и амплитудой $U_{\Omega} \approx 0,4 \cdot U_{\omega}$. Изменяя напряжение смещения U_{B0} и анализируя осциллограмму АМ-колебания, зафиксировать оптимальное значение смещения $\tilde{U}_{B0 \text{ опт}}$, т.е. такое, при котором обеспечиваются минимальные искажения огибающей АМ-колебания (режим линейной модуляции). Найденное значение $\tilde{U}_{B0 \text{ опт}}$ занести в таблицу и сравнить с рассчитанным теоретически. Осциллограмму выходного напряжения для режима линейной модуляции зарисовать*.

Плавно увеличивая модулирующее НЧ напряжение, оценить его максимальную амплитуду $\tilde{U}_{\Omega \text{ max}}$, т.е. такую предельную амплитуду напряжения, превышение которой приводит к визуально фиксируемым нелинейным искажениям огибающей АМ-сигнала на выходе модулятора. Зафиксировать значение максимальной амплитуды $\tilde{U}_{\Omega \text{ max}}$ в отчёт и сравнить с расчётным значением. Сделать вывод.

* Допускается приводить в отчёте не рисунки, а фотографии осциллограмм с оцифрованными делениями осей.

Не меняя напряжение смещения ($U_{Б0} = \check{U}_{Б0 \text{ опт}}$), увеличить амплитуду модулирующего НЧ напряжения до значения, равного амплитуде модулируемого ВЧ колебания: $U_{\Omega} \approx U_{\omega}$. Зафиксировать осциллограммы выходного напряжения как для резонансной, так и для резистивной нагрузки (тумблер T_1 – в верхнем положении). Визуально оценить возникающие искажения огибающей амплитуд. При разной степени искажений максимума и минимума огибающей амплитуды выяснить и указать причину этого различия.

Тумблером T_1 вновь включить резонансную нагрузку модулятора. Уменьшить амплитуду модулирующего НЧ напряжения до значения $U_{\Omega} \approx 0,5 \cdot U_{\omega}$ и одновременно увеличить постоянное напряжение смещения, положив $U_{Б0} = U_{Н} + U_{\omega}$. Обратит внимание на возникающие искажения АМ-колебания и установить их причину (для этого может оказаться полезной замена резонансной нагрузки резистивной). Осциллограммы выходного напряжения и тока зафиксировать. Уменьшить напряжение смещения $U_{Б0}$ до значения $U_{Н} - U_{\omega}$. Оценить возникающие искажения огибающей амплитуд, выяснить и указать их причину. Осциллограмму выходного напряжения вновь зафиксировать. Провести анализ полученных результатов. Сделать предварительные выводы.

Дать рекомендации по выбору режима работы модулятора (напряжения смещения, амплитуды модулирующего напряжения и т.п.), который бы обеспечил формирование амплитудной модуляции с наименьшими искажениями.

1.5.3. Исследование зависимости коэффициента модуляции от амплитуды модулирующего колебания

Установить напряжение смещения $U_{Б0}$ равным оптимальному значению $\check{U}_{Б0 \text{ опт}}$, подобранному экспериментально в предыдущем пункте. Обеспечить амплитуду (не действующее значение!) модулируемого ВЧ колебания U_{ω} равной 0,6 В, модулирующего НЧ колебания – $U_{\Omega} \approx 0,4 \cdot U_{\omega}$, и получить на вы-

ходе модулятора неискаженное амплитудно-модулированное колебание с частотой модуляции 400 Гц.

Снять экспериментальную зависимость коэффициента модуляции \tilde{M}_U выходного напряжения модулятора от амплитуды модулирующего колебания U_Ω , изменяя амплитуду U_Ω от нуля до $1,2 \cdot U_\omega$ с шагом $0,1 \cdot U_\omega$ и фиксируя максимальный A_{\max} и минимальный A_{\min} размах по вертикали выходного напряжения. Данные внести в таблицу, значения коэффициента модуляции для текущей амплитуды U_Ω рассчитать по формуле:

$$\tilde{M}_U = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}. \quad (4)$$

Экспериментальную зависимость $\tilde{M}_U(U_\Omega)$ нанести на график расчётной. Дать сравнительную оценку теоретическим и экспериментальным результатам. По экспериментальной характеристике оценить интервал значений амплитуды модулирующего колебания U_Ω , определяющий режим неискаженной модуляции. Установить причину загиба исследуемой зависимости при больших значениях амплитуды U_Ω .

Контрольные вопросы к защите работы

1. Почему режим работы транзистора при модуляции смещением должен быть нелинейным? Чему будет равен коэффициент модуляции первой гармоники коллекторного тока, если мгновенное напряжение на базе не будет выходить за пределы линейного участка проходной ВАХ транзистора?

2. Изобразить временные диаграммы напряжения между базой и эмиттером, коллекторного тока и напряжения между коллектором и эмиттером при использовании в качестве нагрузки модулятора: а) избирательного фильтра, б) резистора.

3. Почему напряжение смещения, определяющее положение рабочей точки модулятора, должно соответствовать середине линейного участка модуляционной характеристики?

4. Можно ли при модуляции смещением получить неискаженную по форме амплитудно-модулированную первую гармонику тока с коэффициентом амплитудной модуляции, равным единице?

5. Как изменится модуляционная характеристика с изменением: а) постоянного напряжения смещения на базе транзистора? б) амплитуды модулируемого колебания? в) резонансного сопротивления контура?

6. В модуляторе смещением подобран режим неискажённой модуляции. Как изменится временная диаграмма выходного напряжения, если значительно увеличить: а) напряжение смещения? б) амплитуду напряжения высокой частоты?

7. Для чего в амплитудном модуляторе нужен избирательный фильтр? Из каких соображений следует выбирать частоту настройки и полосу пропускания фильтра?

8. Транзистор, используемый в амплитудном модуляторе, обладает характеристикой с изломом в точке 0,6 В. Амплитуда несущего колебания на входе 0,4 В, амплитуда модулирующего сигнала 0,1 В, постоянное напряжение смещения 0,6 В. Рассчитать коэффициент амплитудной модуляции первой гармоники выходного тока. Можно ли его увеличить за счёт увеличения крутизны характеристики транзистора?

Литература: [1, с. 254-255],
[2, с. 362-364],
[3, с. 283-284],
[5, с. 79-81].

Лабораторная работа № 8

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ СИГНАЛОВ ПО ДИСКРЕТНЫМ ОТСЧЁТАМ

2.1. Цель работы – экспериментально исследовать зависимость качества восстановления непрерывного видеосигнала по его дискретным отсчётам от частоты дискретизации и длительности сигнала, а также характеристик восстанавливающего фильтра нижних частот.

2.2. Краткие теоретические сведения

Дискретизация – это основанное на теореме Котельникова представление непрерывного сигнала (например, показанного на рис. 3, *a*) последовательностью отсчётных импульсов (рис. 3, *б*), по которым с заданной точностью можно восстановить исходное колебание (рис. 3, *в*).

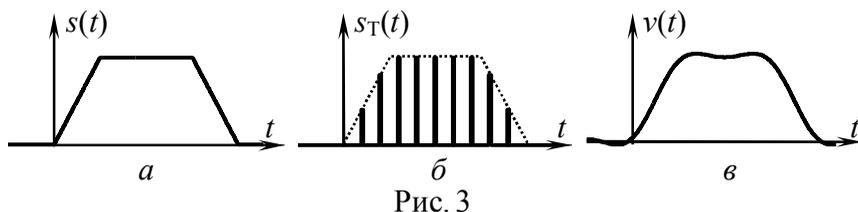


Рис. 3

Применительно к сигналам, спектр которых примыкает к нулевой частоте – видеосигналам, – теорему Котельникова можно сформулировать следующим образом.

Видеосигнал, обладающий конечной энергией, спектр которого ограничен частотой F_M , полностью и однозначно определяется последовательностью своих мгновенных значений, взятых с частотой дискретизации

$$F \geq 2 \cdot F_M, \quad (5)$$

то есть совокупностью дискретных отсчётов, считываемых через интервал времени (интервал дискретизации), равный

$$T \leq 1/(2F_M). \quad (6)$$

Доказывается, что такой сигнал $s(t)$ может быть представлен обобщённым рядом Фурье (в базе Котельникова):

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(k \cdot T) \cdot \text{sinc}[2\pi \cdot F_M \cdot (t - k \cdot T)], \quad (7)$$

где $s(k \cdot T)$ – коэффициенты, совпадающие с отсчётами мгновенных значений сигнала $s(t)$, взятых в моменты времени $k \cdot T$;

$\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ – базисная функция «синк».

Для восстановления видеосигнала $s(t)$ по его дискретным отсчётам достаточно дискретизированный сигнал $s_T(t)$, объединяющий воедино последовательность отсчётов $s(k \cdot T)$, подать на фильтр нижних частот с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), обладающей частотой среза F_M , и линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ).

Действительно, реакция линейной цепи на воздействие идеального дискретизированного сигнала $s_T(t)$ (с бесконечно малой длительностью отсчётных импульсов)

$$s_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(k \cdot T) \cdot T \cdot \delta(t - k \cdot T) \quad (8)$$

($\delta(t)$ – дельта-функция) определяется сумма взвешенных с коэффициентами $s(k \cdot T) \cdot T$ импульсных характеристик цепи:

$$v(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(k \cdot T) \cdot T \cdot g(t - k \cdot T). \quad (9)$$

Импульсная характеристика идеального фильтра нижних частот, как известно, определяется выражением –

$$g_{\text{ФНЧ}}(t) = 2 \cdot K_0 \cdot F_C \cdot \text{sinc}[2\pi \cdot F_C \cdot (t - t_3)],$$

где F_C – частота среза АЧХ, t_3 – время задержки отклика.

Тогда реакция идеального ФНЧ на воздействие дискретизированного сигнала будет определяться выражением

$$v(t) = 2 \cdot K_0 \cdot F_C \cdot T \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(k \cdot T) \cdot \text{sinc}[2\pi \cdot F_C \cdot (t - t_3 - k \cdot T)]. \quad (10)$$

Если интервал дискретизации T принять равным $1/(2F_M)$ и для восстановления сигнала применить фильтр с коэффициентом передачи $K_0 = 1$ и частотой среза $F_C = F_M$, то выражение (10), определяющее реакцию идеального ФНЧ (ИФНЧ) на воздействие (8), будет совпадать с (7).

Подтвердить этот результат можно и с частотных позиций. Известно, что комплексный спектр $\dot{G}_T(f)$ дискретизированного сигнала представляет собой бесконечно и периодически повторяющуюся последовательность копий комплексного спектра $\dot{G}_S(f)$ исходного сигнала, смещённых друг относительно друга на частоту дискретизации F :

$$\dot{G}_T(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{G}_S(f - n \cdot F). \quad (11)$$

Результат определяемого формулой (11) преобразования спектра отображён на рис. 4, где показан спектр $\dot{G}_S(f)$ исходного непрерывного сигнала $s(t)$ (рис. 4, *a*) и спектр сигнала $s_T(t)$, полученного при дискретизации $s(t)$ (рис. 4, *б-з*). Видно, что если интервал дискретизации выбран из условия $T \leq 1/(2F_M)$, то копии в составе спектра дискретизированного сигнала не перекрываются. В соответствии с частотным методом анализа спектр сигнала $v(t)$ на выходе фильтра с комплексным коэффициентом передачи $\dot{K}_{\text{ФНЧ}}(f)$ определяется произведением спектра входного дискретизированного сигнала на $\dot{K}_{\text{ФНЧ}}(f)$:

$$\dot{G}_V(f) = \dot{G}_T(f) \cdot \dot{K}_{\text{ФНЧ}}(f).$$

Это означает возможность без искажений выделить центральная копия в спектре дискретизированного сигнала $s_T(t)$, соответствующий спектру исходного сигнала, с помощью фильтра, АЧХ которого показана штриховой линией на рис. 4, *б*. При этом если $T = 1/(2F_M)$, то для неискажённого

восстановления сигнала следует использовать только фильтр с идеальной прямоугольной АЧХ. При $T < 1/(2F_M)$ требования к характеристике восстанавливающего фильтра снижаются (в частности, можно использовать фильтры с конечной крутизной скатов АЧХ), при $T > 1/(2F_M)$ неискажённое восстановление сигнала принципиально невозможно, поскольку исходный спектр оказывается частично перекрытым своими сдвинутыми на $\pm F$ копиями.

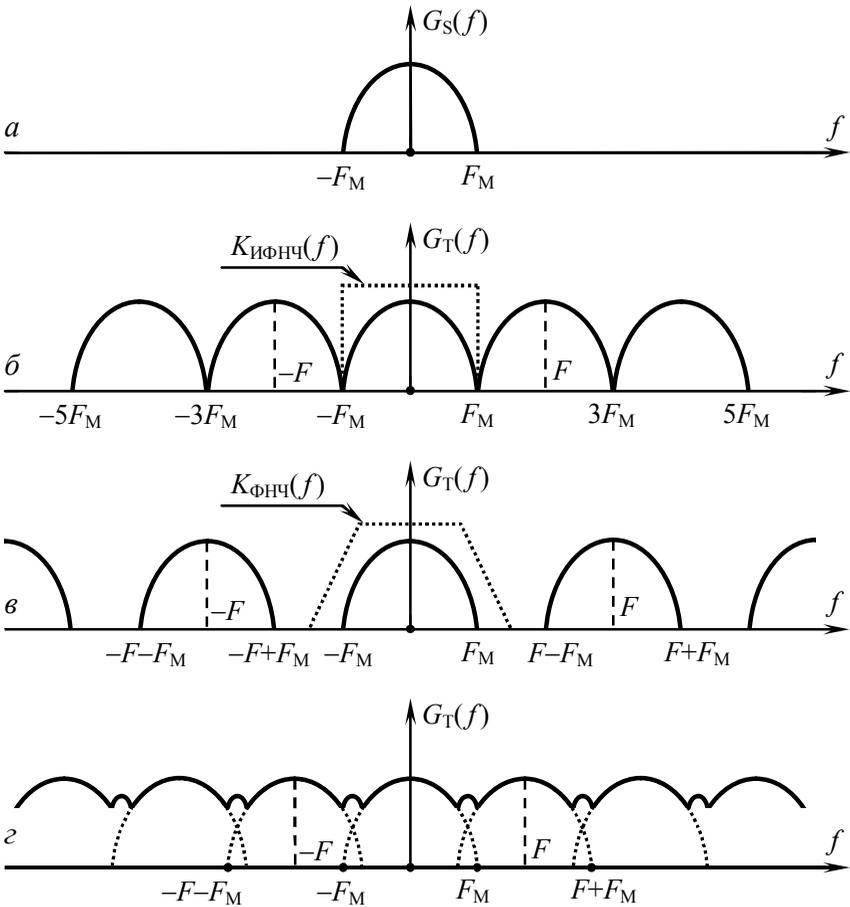


Рис. 4

Итак, процедура дискретизации не исключает возможности точного восстановления сигнала по его дискретным отсчётам. Но теорема Котельникова, определяющая эти процедуры, оговаривает ряд условий, выполнение которых на практике невозможно. Так, требуется, чтобы спектр дискретизируемого сигнала был ограничен, отсчёты имели бы нулевую длительность и учитывались на бесконечном интервале времени, а восстанавливающий фильтр обладал бы бесконечным затуханием за пределами полосы пропускания. В действительности число отсчётов $s(kT)$ дискретизированного сигнала всегда конечно, его спектр не ограничен по частоте, а идеальный восстанавливающий фильтр физически не реализуем. Вследствие этого дискретизация и восстановления сигналов всегда сопровождаются погрешностью. Возникающие при этом искажения проиллюстрированы на рис. 5 и 6.

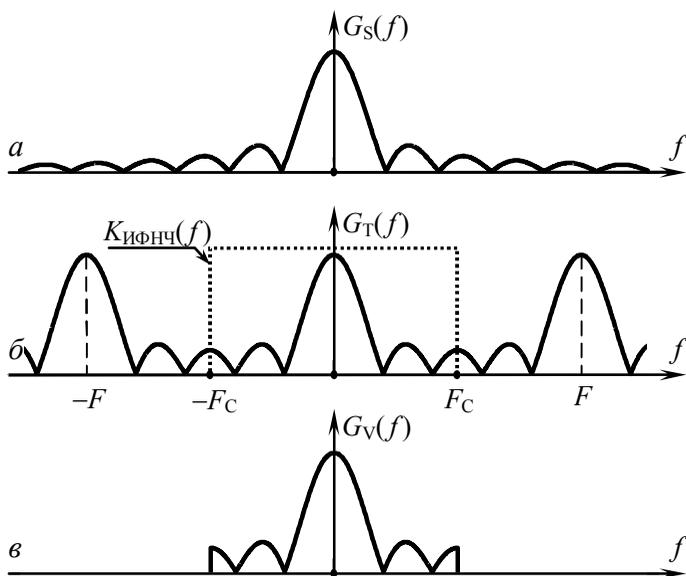


Рис. 5

Из рис. 5, а видно, что реальный сигнал $s(t)$ конечной длительности обладает бесконечно протяжённым спектром (в

качестве примера рассмотрен спектр прямоугольного импульса). Его дискретизация даже с малым (но ненулевым!) интервалом дискретизации T всегда приводит к перекрытию копий в составе спектра дискретизированного сигнала (рис. 5, б). По этой причине центральная копия в спектре сигнала $s_T(t)$, выделяемая при восстановлении идеальным ФНЧ, не совпадает по форме со спектром исходного сигнала (сравните рис. 5, в и а), что естественно приводит к искажению восстановленного сигнала по сравнению с исходным.

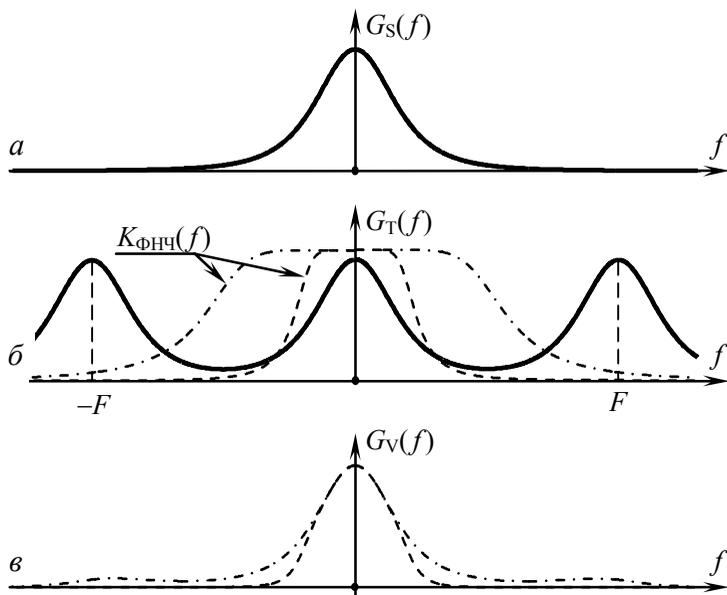


Рис. 6

Идеальный ФНЧ служит лишь теоретической моделью для объяснения принципа восстановления сигнала по его дискретным отсчётам. Реальный фильтр нижних частот вне полосы пропускания обладает конечным ослаблением. Это приводит к тому, что при выборе частоты среза $\sim \frac{1}{2}F$ (как в случае идеального ФНЧ, рис. 4, б) на выход реального фильтра проникают составляющие не только центрального, но и соседних

(вторичных) копий в спектре дискретизированного сигнала (штрих-пунктир на рис. 6, б и в). При уменьшении же частоты среза частотная характеристика фильтра оказывается уже центральной копии в спектре $\dot{G}_T(f)$: полезные спектральные составляющие верхних частот проходят через фильтр с заметным ослаблением (пунктир на рис. 6, б и в). Из приведённых на рис. 6 графиков видно, что реальный фильтр нижних частот неизбежно искажает сигнал при восстановлении.

Невозможность обеспечения нулевой длительности отсчётных импульсов также ведёт к погрешности. Если длительность импульсов конечна и равна $\tau_{и}$, то сигнал, подаваемый на вход восстанавливающего фильтра, может быть представлен в виде совокупности прямоугольных импульсов с амплитудами, равными величине дискретных отсчётов $s(k \cdot T)$. Тогда спектр дискретизированного сигнала в отличие от (11) имеет вид

$$\dot{G}_T(f) = \frac{\tau_{и}}{T} \cdot \text{sinc}(\pi \cdot f \cdot \tau_{и}) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \dot{G}_S(f - n \cdot F). \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что ненулевая длительность отсчётных импульсов приводит к показанному на рис. 7 «завалу» высокочастотной части центральной копии в спектре дискретизированного сигнала, а значит внесению дополнительной погрешности при восстановлении непрерывного сигнала.

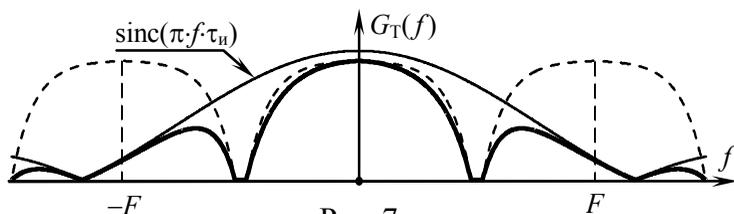


Рис. 7

Заметим, однако, что реально незначительные по величине искажения, хотя и нежелательны, но допустимы.

Если частота среза F_C восстанавливающего фильтра задана и не может быть изменена, тогда выбор частоты дискре-

тизации F должен производиться с учётом заданного значения F_C . Так, для случая восстановления сигнала идеальным ФНЧ

$$F \geq F_M + F_C, \quad (13)$$

при условии, что практическая ширина спектра F_M исходного сигнала не превышает полосу пропускания фильтра: $F_M \leq F_C$.

В случае если практическая ширина спектра F_M дискретизируемого сигнала не удовлетворяет условию восстановления с допустимой погрешностью, т.е. $F_M > F_C$, целесообразно увеличить (если имеется такая возможность) длительность T_S исходного сигнала. Последнее приведёт к тому, что ширина спектра исходного сигнала $F_M \sim 1/T_S$ пропорционально уменьшится и обеспечится выполнение неравенства $F_M \leq F_C$.

Особенностью используемого в работе генератора отсчётных импульсов, является то, что регулировка частоты следования отсчётов при их фиксированном количестве сопровождается одновременным изменением длительности дискретизированного сигнала (рис. 8).

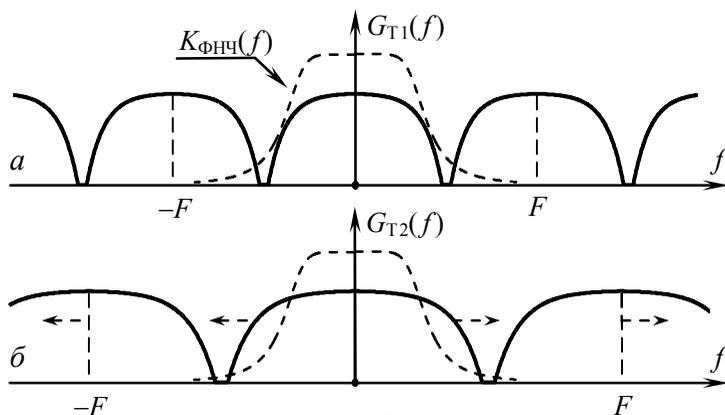


Рис. 8

В частности, увеличение частоты дискретизации влечёт уменьшение длительности сигнала, а следовательно, расширение копий в составе спектра дискретизированного сигнала. Последнее может привести к несоответствию ширины выде-

ляемой (центральной) спектральной копии и полосы пропускания восстанавливающего фильтра (рис. 8) и, как следствие, к увеличению погрешности восстановления.

2.3. Описание лабораторной установки

Работа выполняется на стенде с использованием сменного блока, верхняя панель которого изображена на рис. 9.

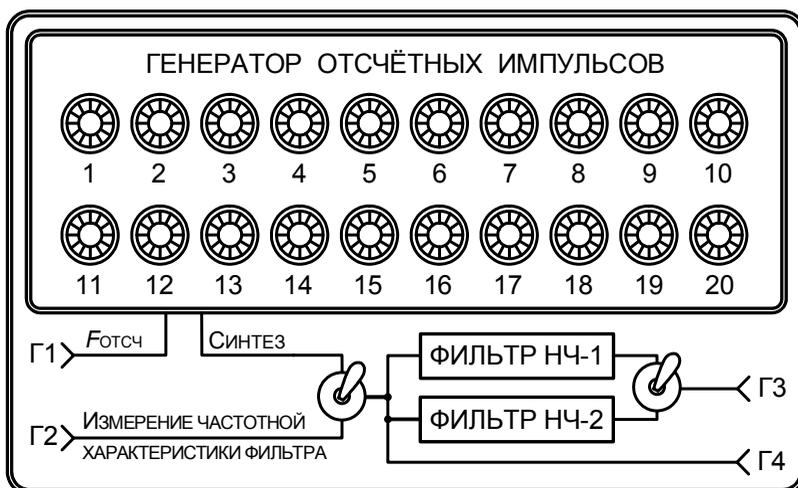


Рис. 9

Сменный блок содержит запускаемый извне генератор отсчётных импульсов, формирующий периодически повторяющиеся пачки из 32-х малых по длительности прямоугольных импульсов (отсчётов). Амплитуду и полярность первых 20-ти отсчётных импульсов можно регулировать с помощью потенциометров, выведенных на верхнюю панель блока. Последние 12 импульсов в пачке отсутствуют, что позволяет визуально отделять пачки импульсов друг от друга. В результате генератор отсчётных импульсов позволяет формировать периодически повторяющиеся дискретизированные сигналы разнообразной формы.

Запуск генератора отсчётных импульсов осуществляется гармоническим напряжением от внешнего лабораторного генератора, подключаемого к клеммам Γ_1 . Частота внешнего сигнала определяет частоту отсчётов (дискретизации). Регулировка частоты колебаний запускающего генератора гармонического напряжения приводит к изменению как интервала между соседними отсчётными импульсами, так и совокупной длительности дискретизированного сигнала.

В сменный блок встроены два фильтра нижних частот – трёхзвенный LC -фильтр («Фильтр НЧ-1») и однозвенный RC -фильтр («Фильтр НЧ-2»), – используемые в работе для восстановления непрерывных сигналов. Принципиальные электрические схемы фильтров НЧ-1 и НЧ-2 приведены на рис. 10. Граничная частота полосы пропускания (частота среза АЧХ) LC -фильтра составляет 3,5 кГц, RC -фильтра – 2,5 кГц.

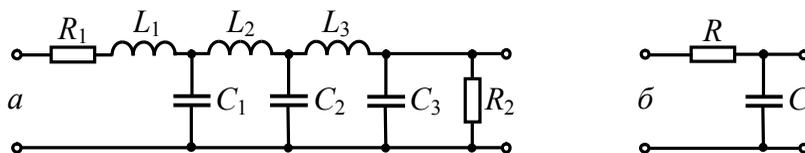


Рис. 10

Напряжение с выхода фильтра (НЧ-1 или НЧ-2 в зависимости от положения правого тумблера верхней панели блока) поступает на клеммы Γ_3 . К клеммам Γ_4 подводится сигнал, действующий на входе фильтров, к клеммам Γ_5 – импульсы, предназначенные для внешней синхронизации осциллографа, используемого для наблюдения дискретизированных и восстановленных посредством фильтров сигналов.

2.4. Подготовительное (расчётное) задание

К разделу «Исследование влияния параметров фильтра на качество восстановления сигнала»

2.4.1. Изобразить в масштабе импульсную характеристику идеального ФНЧ с частотой среза $F_C = 4$ кГц, единичным коэффициентом передачи и нулевым временем задержки.

2.4.2. Рассчитать и построить временные диаграммы напряжения на выходе этого идеального фильтра в предположении, что на его вход подаётся последовательность из 20-ти малых по длительности импульсов одного знака и единичной амплитуды с частотой следования $F = F_C, 2 \cdot F_C$ и $8 \cdot F_C$.

Комментарий к выполнению заданию. Сигнал на выходе ИФНЧ рассчитать по формуле (10), в которой индекс суммирования k (номер отсчёта), менять от 0 до $N - 1 = 19$, амплитуды импульсов $s(k \cdot T)$ положить равными единице, интервал дискретизации – $T = 1/F$. Расчёт сигнала здесь и далее выполнить на отрезке времени от «минус» $T_S/2$ до $3 \cdot T_S/2$, где T_S – длительность дискретизированного сигнала, определяемая числом его отсчётов N и интервалом дискретизации T : $T_S = (N - 1) \cdot T$.

2.4.3. Рассчитать и построить график импульсной характеристики RC-фильтра, схема которого показана на рис. 10, б.

Комментарий к выполнению заданию. Использовать выражение для импульсной характеристики RC-фильтра нижних частот – $g_{RC}(t) = (1/\tau_\Phi) \cdot \exp(-t/\tau_\Phi)$ при $t \geq 0$, где τ_Φ – постоянная времени фильтра: $\tau_\Phi = R \cdot C$, $R = 560$ Ом, $C = 120$ нФ.

2.4.4. Применительно к воздействию, описанному выше в п. 2.4.2, рассчитать и изобразить временные диаграммы напряжения, наблюдаемые на выходе RC-фильтра при частотах следования воздействующих импульсов 8 и 32 кГц.

Комментарий к выполнению заданию. Сигнал на выходе восстанавливающего RC-фильтра следует рассчитывать по формуле (9), в которой $s(k \cdot T)$ при $k \in [0; 19]$ положить равными единице, $g(t) = g_{RC}(t)$, $T = 1/F$.

К разделу «Исследование влияния длительности сигнала на качество его восстановления»

2.4.5. Полагая, что спектр непрерывного сигнала, изображённого пунктиром в табл. 2, является ограниченным частотой F_M ($F_M \approx 2/T_S$, где T_S – длительность сигнала), рассчитать минимальную длительность сигнала T_{Smin} , который можно с приемлемыми искажениями сформировать по дискретным отсчётам с использованием в качестве восстанавливающего идеального ФНЧ с частотой среза $F_C = 4$ кГц.

Таблица 2

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Вариант 4	Вариант 5	Сигнал к общей части

Комментарий к выполнению задания. При фиксированной частоте среза F_C идеального ФНЧ восстановление сигнала с минимальными искажениями возможно, если высшая частота спектра F_M исходного сигнала не превышает F_C : $F_M \leq F_C$.

2.4.6. Применительно к длительности непрерывного сигнала T_{Smin} , рассчитанной в п. 2.4.5, и его высшей частоте $F_M = 4$ кГц рассчитать максимально возможный интервал T_{max} между отсчётами и соответствующее ему минимально необходимое число отсчётов N_{min} в составе дискретизированного сигнала: $N_{min} = 1 + T_{Smin}/T_{max}$.

2.4.7. Для найденного интервала между отсчётами T_{\max} рассчитать и изобразить временную диаграмму отклика идеального ФНЧ с частотой среза 4 кГц на воздействие дискретизированного сигнала из табл. 2 длительностью $T_{S\min}$.

Комментарий к выполнению задания. Сигнал на выходе идеального ФНЧ следует рассчитать по формуле (10), в которой k менять от 0 до $N_{\min} - 1$. Значение N_{\min} взять из п. 2.4.6, величину отсчётов $s(k \cdot T)$ определять по формуле из табл. 3, а интервал дискретизации взять равным значению T_{\max} , найденному в п. 2.4.6.

Таблица 3

Вар-т	Формула, определяющая значение k -го отсчета $s(k \cdot T)$
1	$\begin{cases} 2k/(N-1) & \text{при } 0 \leq k \leq (N-1)/2, \\ 1 & \text{при } (N-1)/2 \leq k \leq (N-1) \end{cases}$
2	$\begin{cases} 1-2k/(N-1) & \text{при } 0 \leq k \leq (N-1)/2, \\ (2k-N+1)/(N-1) & \text{при } (N-1)/2 \leq k \leq (N-1) \end{cases}$
3	$k/(N-1)$ при $0 \leq k \leq (N-1)$
4	$\begin{cases} 2k/(N-1) & \text{при } 0 \leq k \leq (N-1)/2, \\ 2-2k/(N-1) & \text{при } (N-1)/2 \leq k \leq (N-1) \end{cases}$
5	$\begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq k \leq (N-1)/2, \\ 2-2k/(N-1) & \text{при } (N-1)/2 \leq k \leq (N-1) \end{cases}$

2.4.8. Для того же интервала между отсчётами рассчитать и построить временную диаграмму отклика идеального ФНЧ на воздействие дискретизированного сигнала, обладающего вчетверо большей длительностью: $T_S = 4 \cdot T_{S\min}$.

Комментарий к выполнению задания. Число отсчётов N дискретизированного сигнала при этом возрастёт вследствие увеличения длительности сигнала. Амплитуды всех отсчётных импульсов (табл. 3) следует рассчитать заново.

К разделу «Исследование влияния частоты дискретизации на качество восстановления сигнала»

2.4.9. Рассчитать и построить временную диаграмму отклика ИФНЧ с частотой среза $F_C = 4$ кГц на воздействие дискретизированного сигнала (табл. 2) минимально допустимой длительности $T_{S\min}$ при интервале между отсчётами, четверо меньшим максимально допустимого: $T = 0.25 \cdot T_{\max}$.

Комментарий к выполнению задания. Предварительно рассчитать заново число отсчётов дискретизированного сигнала и их амплитуды (табл. 3). Учесть, что в используемый в формуле (10) интервал дискретизации T также будет другим.

2.5. Задания и указания к их выполнению

2.5.1. Исследование влияния параметров фильтра на качество восстановления сигнала

Включить стенд, осциллограф АСК-1021, лабораторный генератор АНР-1001 и вольтметр АВМ-1071. Частоту гармонических колебаний генератора установить равной 30 кГц, амплитуду (с помощью вольтметра) – 10...15 В. Подключить генератор к клеммам Γ_1 съёмного блока, осциллограф – к клеммам Γ_4 , сняв сигнал внешней синхронизации с клемм Γ_5 . Чувствительность осциллографа установить равной «2 В/дел», длительность развёртки – «0,1 мс/дел». Левый тумблер съёмного блока перевести в положение «Синтез». Несколько потенциометров блока выкрутить в правое положение и добиться появления на экране осциллографа отсчётных импульсов. Уменьшить амплитуды всех отсчётных импульсов, кроме первого, до нуля. Амплитуду первого импульса увеличить до максимального значения, не выкручивая потенциометр до упора. Правый тумблер сменного блока перевести в нижнее положение. Переключить осциллограф к клеммам Γ_3 , увеличить его чувствительность. Наблюдать отклик RC-фильтра («Фильтр НЧ-2»). Сравнить экспериментальную характеристику фильтра с расчётной характеристикой из п. 2.4.3.

Установить частоту колебаний запускающего генератора 4 кГц. Вновь подключить осциллограф к клеммам Γ_4 и сформировать последовательность из 20-ти отсчётных импульсов одинаковой амплитуды. Правый тумблер съёмного блока перевести в верхнее положение. Переключить осциллограф к клеммам Γ_3 . Зафиксировать и зарисовать в отчёт осциллограмму напряжения на выходе LC -фильтра («Фильтр НЧ-1»).

Последовательно увеличивать частоту воздействующих импульсов до 8, 16, 32 и 64 кГц и каждый раз фиксировать осциллограмму напряжения на выходе LC -фильтра. При каждом изменении частоты дискретизации необходимо контролировать форму огибающей дискретизированного сигнала, переключая осциллограф к клеммам Γ_4 . При обнаружении нарушения исходного соотношения между отсчётами, следует корректировать амплитуду отсчётных импульсов.

Для частот 4, 8, 32 кГц сравнить экспериментальные диаграммы восстановленного сигнала с расчётными из п. 2.4.2. Объяснить, почему по мере увеличения частоты дискретизации вначале происходит заметное улучшение качества восстановления сигнала, а при дальнейшем повышении частоты снова наблюдается искажение формы восстановленного сигнала. Указать частоту дискретизации, при которой качество восстановленного LC -фильтром сигнала наилучшее.

Заменить восстанавливающий LC -фильтр RC -фильтром («Фильтр НЧ-2»). Получить и зафиксировать осциллограммы напряжения на выходе фильтра при частотах следования импульсов 4, 8, 16, 32 и 64 кГц.

Для частот 8 и 32 кГц сравнить экспериментальные диаграммы восстановленного сигнала с расчётными из п. 2.4.4. Указать частоту следования отсчётов, при которой качество сигнала, восстановленного RC -фильтром, наилучшее.

Сравнить осциллограммы на выходе RC -фильтра с сигналами, восстановленными LC -фильтром. Сделать вывод о качестве восстановления сигнала прямоугольной формы LC - и RC -фильтром нижних частот.

2.5.2. Исследование влияния длительности сигнала на качество его восстановления

Продолжая работать со сменным блоком в режиме «Синтез», вновь подключить осциллограф к клеммам Г₄. Установить частоту задающего генератора равной 8 кГц. Сформировать заданный в табл. 2 дискретизированный сигнал, задействовав для этого минимально допустимое число отсчётных импульсов, рассчитанное в домашнем задании. При этом следует использовать первые по счёту импульсы в пачке (без пропусков). Амплитуды остальных отсчётов обнулить. Переключить осциллограф к клеммам Г₃ и зафиксировать осциллограмму восстановленного *LC*-фильтром сигнала. Сравнить её с диаграммой, рассчитанной в п. 2.4.7. Сделать вывод.

Не меняя частоты следования отсчётов (8 кГц), путём последовательного увеличения (добавления) числа используемых отсчётных импульсов за счёт активизации всё большего числа потенциометров сменного блока *увеличить длительность сигнала* сначала в два раза (число отсчётов установить равным 9), а затем в четыре раза (число отсчётов – 17). Во всех случаях зафиксировать осциллограмму восстановленного *LC*-фильтром сигнала. Временную диаграмму сигнала, восстановленного по 17-ти отсчётам, сравнить с расчётной диаграммой из п. 2.4.8. Сделать вывод.

Оценить степень улучшения формы восстанавливаемого фильтром сигнала при увеличении его длительности за счёт увеличения числа отсчётов дискретизированного сигнала, но сохранении неизменным временного интервала между отсчётами (частоты дискретизации).

2.5.3. Исследование влияния частоты дискретизации на качество восстановления сигнала

Восстановить настройки аппаратуры, использовавшиеся в начале выполнения п. 2.5.2. Воспроизвести осциллограмму восстановленного *LC*-фильтром непрерывного сигнала по ми-

нимально допустимому числу отсчётов, рассчитанному в домашнем задании, при частоте дискретизации 8 кГц. Увеличить *число отсчётов* сигнала (за счёт использования всё большего числа потенциометров сменного блока) до девяти ($N=9$), *одновременно увеличить частоту* следования отсчётных импульсов до 16 кГц, тем самым добиться уменьшения временного интервала между отсчётами сигнала в два раза, сохранив, таким образом, без изменения длительность дискретизированного сигнала. Зафиксировать осциллограмму сигнала на выходе LC -фильтра. Сравнить её с исходной. Сделать вывод.

Увеличить число формирующих сигнал отсчётов до 17, синхронно повысить частоту следования отсчётов до 32 кГц, т.е. обеспечить уменьшение интервала дискретизации в четыре раза при сохранении исходной длительности сигнала. Зафиксировать осциллограмму на выходе LC -фильтра. Сравнить её с расчётной диаграммой из п. 2.4.9. Сделать вывод.

На основе полученных осциллограмм оценить степень улучшения формы восстанавливаемого сигнала при увеличении числа отсчётов, но сохранении длительности сигнала.

Сравнить результаты данного раздела с предыдущими. Сделать вывод о том, что выгоднее для заметного улучшения формы восстанавливаемого сигнала: увеличивать число отсчётов сигнала за счёт повышения частоты дискретизации или путём увеличения длительности сигнала.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что представляет собой дискретизированный сигнал? Почему каждый отсчёт идеального дискретизированного сигнала взвешен с дельта-функцией? Как выглядит спектр дискретизированного сигнала? Как он связан со спектром исходного непрерывного сигнала и чем он отличается? Как зависит этот спектр от частоты отсчётов?

2. Сформулировать теорему Котельникова применительно к дискретизации и восстановлению видеосигналов? Почему частоту дискретизации сигнала следует выбирать по теореме

Котельникова? Ответ аргументировать с частотных позиций. Чем следует восстанавливать непрерывный видеосигнал? Каковы должны быть характеристики такого устройства?

3. Для чего при восстановлении сигнала по дискретным отсчётам требуется фильтр? Как следует выбирать частоту среза F_C его АЧХ? Почему в случае, когда частота среза фильтра превышает высшую частоту спектра сигнала шаг дискретизации нельзя выбирать из условия $T = 1/(2 \cdot F_C)$? При любом ли соотношении между высшей частотой спектра и частотой дискретизации фильтр должен быть идеальным?

4. Почему при практическом использовании теоремы Котельникова возникают погрешности? Указать все возможные причины погрешностей, охарактеризовать каждую в отдельности. Указать способы уменьшения этих погрешностей. Ответ аргументировать с частотных позиций.

5. Изобразить спектры двух дискретизированных сигналов, обладающих одинаковой формой исходных непрерывных сигналов, равными интервалами между отсчётами, но разной длительностью. Для какого из этих сигналов качество восстановленного сигнала будет хуже, если их оба подать на одинаковый восстанавливающий фильтр?

6. Почему с увеличением длительности дискретизированного сигнала при неизменной частоте дискретизации и правильном выборе частоты среза восстанавливающего фильтра погрешность восстановления уменьшается? Как это согласуется с данными лабораторной работы? Ответ проиллюстрировать частотными характеристиками сигналов и цепей.

7. Изобразить спектры двух дискретизированных сигналов, обладающих одинаковой формой исходных непрерывных сигналов, равной длительностью, но разными интервалами между отсчётами. Для какого из этих сигналов качество восстановления будет выше, если их подать на одинаковый восстанавливающий фильтр?

8. Почему при фиксированной частоте среза восстанавливающего фильтра и неизменном количестве отсчётов сигнала

ла увеличение частоты дискретизации может приводить сначала к уменьшению погрешности восстановления, а затем к её росту? Ответ проиллюстрировать результатами работы.

9. Чем отличаются спектры идеального и реального (с конечной длительностью отсчётов) дискретизированных сигналов? Как влияет конечная длительность отсчётных импульсов на погрешность восстановления сигнала? При каких условиях увеличение длительности отсчётов приводит к улучшению качества восстановления, при каких – к снижению?

10. Можно ли с помощью реального фильтра восстановить абсолютно точно (без какой-либо погрешности) непрерывный сигнал, уменьшая сколь угодно интервал между отсчётами дискретизированного сигнала? Увеличивая сколь угодно его длительность? Ответ аргументировать.

11. Сформулировать теорему Котельникова применительно к дискретизации и восстановлению узкополосных радиосигналов. Почему при этом выгодней отказаться от классической формулировки теоремы? Чем определяется частота дискретизации радиосигнала? Какое устройство, и с какими параметрами может быть использовано для восстановления непрерывного радиосигнала по его дискретным отсчётам?

Литература: [1, с. 148-155],
[2, с. 225-246],
[3, с. 349-361].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов, М.Т. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов. Стандарт третьего поколения / М.Т. Иванов, А.Б. Сергиенко, В.Н. Ушаков; под ред. В.Н. Ушакова. – СПб. : Питер, 2014. – 336 с.

2. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов / И.С. Гоноровский. – 5-е изд., испр. и доп. – М. : Дрофа, 2006. – 719 с.

3. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие / С.И. Баскаков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2003. – 462 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 7. Амплитудная модуляция смещением	5
Лабораторная работа № 8. Восстановление непрерывных сигналов по дискретным отсчётам	16
Библиографический список	35

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Методические указания
к лабораторным работам № 7, 8
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения

Составитель: Останков Александр Витальевич

В авторской редакции

Подписано в печать 18.11.2021.

Формат 60×84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 2,1. Тираж 54 экз. Зак. № 181.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский проспект, 14