

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
дневной формы обучения*



Могилев 2018

УДК 621.3:621.865.8
ББК 62.85:32.816
Э 45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «5» октября 2018 г.,
протокол № 3

Составители: канд. техн. наук, доц. А. Г. Старовойтов;
канд. техн. наук, доц. Ф. М. Трухачев

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации содержат сведения, необходимые для подготовки и выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электронные устройства мехатронных и робототехнических систем» для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Учебно-методическое издание

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Технический редактор	С. Н. Красовская
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2018



Содержание

Меры безопасности при проведении лабораторных работ.....	4
1 Изучение лабораторного оборудования и программного обеспечения для моделирования работы электронных устройств, сбора и обработки данных.....	5
2 Исследование параметров постоянных и переменных аналоговых сигналов.....	7
3 Исследование работы выпрямительного диода и стабилитрона.....	14
4 Исследование работы однофазных неуправляемых выпрямителей...	18
5 Исследование характеристик биполярных и полевых транзисторов....	24
6 Исследование схем на основе операционных усилителей.....	29
7 Исследование работы компенсационного стабилизатора напряжения.....	34
8 Исследование работы генератора гармонических колебаний и мультивибратора.....	38
Список литературы.....	47



Меры безопасности при проведении лабораторных работ

Работа в лаборатории электроники, связанная с эксплуатацией электрооборудования, находящегося под напряжением, требует организации и строгого соблюдения мер безопасности. Вопросы безопасности отражаются в инструкциях по эксплуатации, которыми снабжено поставляемое оборудование. Характерным видом поражения, которому может подвергаться работающий в лаборатории, является поражение электрическим током. Во избежание поражения электрическим током при работе с электрооборудованием необходимо соблюдать следующие меры безопасности.

1 К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие обучение мерам безопасности с последующей проверкой знаний и зарегистрированные в соответствующем протоколе.

2 Студенту разрешается выполнение только той лабораторной работы, задание на которую выдал преподаватель.

3 Приступая к работе, студент обязан ознакомиться с методикой ее выполнения.

4 Сборка электрической схемы для лабораторной работы, изменение в схеме производятся при отключении питания лабораторного оборудования и переведении всех выключателей в положение «отключено».

5 Переносное оборудование, необходимое для выполнения данной лабораторной работы (осциллографы, компьютеры, электроизмерительные приборы), обязательно заземляется (согласно требованиям завода-изготовителя), что проверяется преподавателем в обязательном порядке.

6 Включение питания оборудования для выполнения лабораторной работы производится только после разрешения преподавателя.

7 Включение измерительных приборов в цепь производится только одной рукой, не касаясь металлических частей.

При выполнении лабораторных работ в лаборатории запрещается:

- без разрешения преподавателя перемещать приборы и аппаратуру, выносить их из лаборатории;
- производить какие-либо работы по устранению неисправностей лабораторного оборудования;
- оставлять без присмотра электроприборы, включенные в сеть;
- загромождать посторонними предметами рабочие места;
- находиться в лаборатории в верхней одежде.

При возникновении любой неисправности студент обязан немедленно отключить лабораторное оборудование от электросети и сообщить об этом преподавателю.



1 Изучение лабораторного оборудования и программного обеспечения для моделирования работы электронных устройств, сбора и обработки данных

Цель работы: изучение комплекта лабораторного оборудования и режимов его работы; получение навыков создания электрических схем и моделирования их работы в среде Multisim; получение навыков создания виртуальных приборов для сбора и обработки данных в среде LabVIEW.

1.1 Порядок выполнения работы

1.1.1 Изучить устройство, органы управления и режимы работы блока управления БУК32, мультиметра К32, генератора Л31, устройства сбора данных NI USB-6009, источника НУ3002-D2.

1.1.2 По заданию преподавателя сформировать с помощью блока управления БУК 32 и источника НУ3002-D2 уровни постоянного напряжения U_1 , U_2 . Измерить их значения мультиметром К32.

Сформировать с помощью генератора Л31 гармонический сигнал с максимальным напряжением U_m , и частотой f . Наблюдать и измерить размах амплитуды $A = U_m/2$ и период $T = 1/f$ мультиметром К32. Вычислить частоту сигнала f , действующее значение напряжения U . Заполнить таблицу 1.1 (мультиметр).

Таблица 1.1 – Результаты измерений

Тип сигнала	Прибор	U_1 , В	U_2 , В	U_m , В	U , В	T , с	f , Гц
Постоянный	Мультиметр			–	–	–	–
	Виртуальный прибор			–	–	–	–
Гармонический	Мультиметр	–	–				
	Виртуальный прибор	–	–				

1.1.3 Изучить инструментальные панели среды Multisim, возможности эмуляции. Ознакомиться с набором компонентов и виртуальных приборов.

1.1.4 По заданию преподавателя собрать схему в «окне разработок», подключить виртуальные приборы.

Для чего:

– выбрать необходимые элементы из «инструментальной панели компонентов» и вынести их в «окно разработки»;

– задать свойства элементов схемы (номиналы сопротивлений, индуктивностей, емкостей и т. д.);

– из «панели инструментов» выбрать необходимые виртуальные приборы и вынести их в «окно разработки» (например, функциональный генератор XFG1, осциллограф XSC1, амперметры и вольтметры U1...U4);

– соединить между собой компоненты, получив электрическую схему.



Запустить моделирование работы схемы, нажав соответствующую кнопку «панели симуляции». Зафиксировать показания измерительных приборов, осциллограммы напряжений в контрольных точках.

Исследовать по заданию преподавателя влияние параметров элементов схемы (частоты генерируемого напряжения) на параметры выходных сигналов (тока и напряжений на реактивных элементах для определения резонансной частоты). Используя закон Ома, произвести расчёт тока и напряжений на элементах цепи. Сравнить полученные значения с результатами моделирования.

1.1.5 Изучить панели, палитры меню среды LabVIEW.

Разработать виртуальный прибор для исследования параметров сигналов в среде LabVIEW. Блок-диаграмма виртуального прибора содержит следующие блоки: «DAQ Assistant» – обеспечивает сбор данных с устройства NI USB-6009, «Amplitude and Level Measurements» – для определения действующего значения и постоянной составляющей напряжения, «Tone Measurements» – для определения амплитуды и частоты сигнала.

С помощью генератора ЛЗ1 и блока управления БУ К32 сформировать сигналы, указанные в п. 1.1.2. Исследовать полученные сигналы с помощью виртуального прибора. Заполнить таблицу 1.1 (виртуальный прибор). Сравнить измеренные значения с показаниями мультиметра К32.

1.1.6 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы; состав комплекта лабораторного оборудования с кратким описанием основных его блоков, органов управления и режимов работы; распечатку «окна схемы» среды Multisim, осциллограммы напряжений в контрольных точках, результаты расчёта цепи; распечатку лицевой панели и панели блок-диаграммы в среде LabVIEW, результаты измерений параметров сигналов; выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите состав комплекта лабораторного оборудования.
- 2 Охарактеризуйте возможности NI Multisim, его интерфейс.
- 3 Опишите порядок создания виртуального прибора в NI LabVIEW.
- 4 Какими параметрами характеризуются постоянное напряжение и гармонический сигнал?
- 5 Опишите настройку осциллографа GDS-71022 и виртуальных приборов NI Multisim при измерении параметров сигналов.



2 Исследование параметров постоянных и переменных аналоговых сигналов

Цель работы: приобрести навыки работы с комплектом лабораторного оборудования, научиться измерять основные параметры электрических сигналов.

2.1 Общие теоретические сведения

Токи и напряжения, действующие в электрических цепях как материальные носители информации, называются сигналами. По характеру изменения во времени различают гармонические, периодические, негармонические и непериодические сигналы.

Выражение для гармонических напряжений и токов:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_u);$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i),$$

где U_m , I_m , ω , φ_u , φ_i – амплитуды, угловая частота и начальные фазы напряжения и тока соответственно.

Кроме перечисленных параметров гармонический сигнал характеризуется периодом повторения T и циклической частотой f . Между параметрами T , f , ω имеется следующая связь:

$$f = \frac{1}{T}; \quad \omega = 2\pi \cdot f; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Период T измеряется в секундах, циклическая частота f – в герцах, угловая частота ω – в радианах в секунду.

Часто гармонические колебания характеризуются не только мгновенными значениями, но и их действующим и средним значениями.

Действующие значения гармонических колебаний определяются выражениями:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi_u) dt} = \frac{u_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707U_m,$$

$$I \approx 0,707I_m.$$

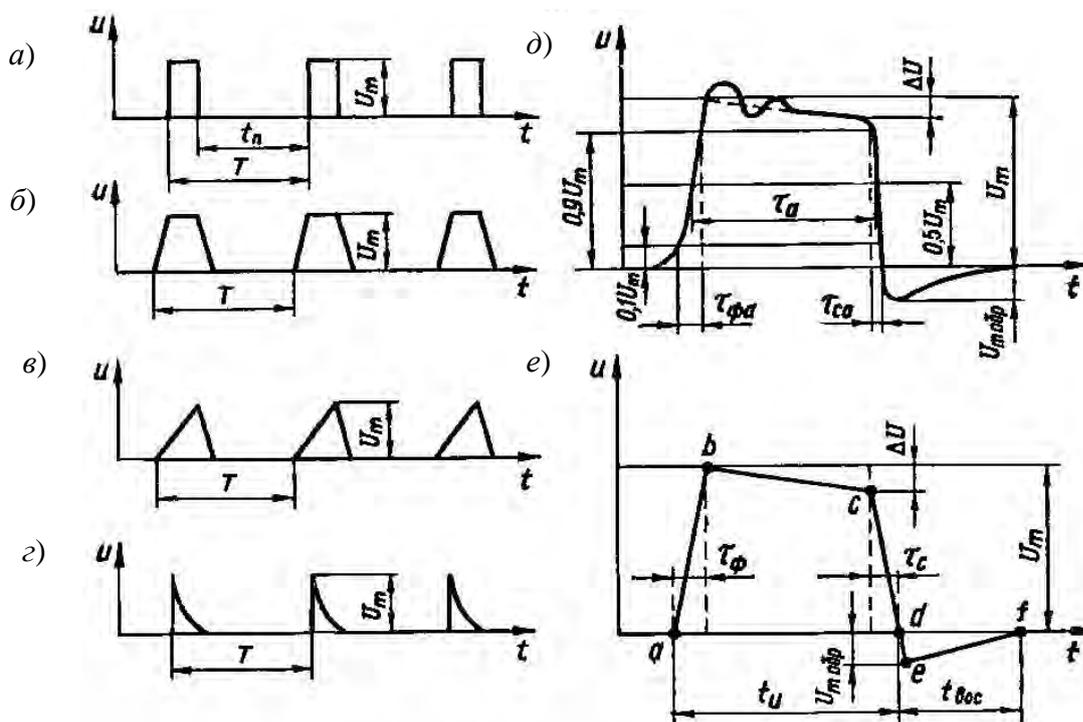
Средние значения гармонического тока и напряжения за период T определяются выражениями:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin(\omega t + \varphi_i) dt = 0;$$



$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t + \varphi_u) dt = 0.$$

Наряду с гармоническими сигналами в электронике широко используются импульсные периодические сигналы. Наиболее часто в импульсных электронных схемах используются импульсы прямоугольной (рисунок 2.1, *a*), трапецеидальной (рисунок 2.1, *б*), линейно изменяющейся (треугольной) (рисунок 2.1, *в*) и экспоненциальной (рисунок 2.1, *г*) формы. Импульсы, форма которых приведена на рисунке 2.1, *a–г*, являются идеализированными. Форма реальных импульсов не является геометрически правильной из-за нелинейности характеристик полупроводниковых приборов и влияния реактивных сопротивлений в схемах. Поэтому реальные прямоугольные импульсы, наиболее часто используемые в практических импульсных устройствах, имеют форму, иллюстрируемую рисунком 2.1, *д*. Участки быстрого нарастания и спада напряжения или тока называются соответственно фронтом и срезом импульса, а интервал, на котором напряжение или ток изменяются сравнительно медленно, – вершиной импульса.



a – импульсы прямоугольной формы, *б* – импульсы трапецеидальной формы, *в* – импульсы линейно изменяющейся (треугольной) формы, *г* – импульсы экспоненциальной формы, *д* – реальный вид прямоугольного импульса, *е* – упрощенная форма реального прямоугольного импульса

Рисунок 2.1 – Графическое изображение импульсных сигналов

Активные длительности фронта τ_{fa} и среза τ_{ca} определяются между уровнями $0,1U_m$ и $0,9U_m$, где U_m – амплитуда импульса. Активная длительность

вершины τ_a оценивается на уровне $0,5U_m$. Импульс, показанный на рисунке 2.1, *д*, имеет обратный выброс («хвост») с амплитудой U_m *обр.* Кроме того, на его вершину наложены затухающие синусоидальные колебания, которые часто возникают из-за наличия в схеме «паразитных» колебательных цепей, образованных распределенными индуктивностями и емкостями.

Упрощенная форма реального прямоугольного импульса показана на рисунке 2.1, *е*. Спрямоугольные отрезки *ab*, *be*, *cd* отображают соответственно фронт, вершину и срез импульса, а отрезки *de* и *ef* – нарастание и спад обратного выброса. Скорость нарастания напряжения или тока на рисунке 2.1 характеризуется

крутизной фронта импульса $S_\phi = \frac{U_m}{\tau_\phi}$, а убывание напряжения или тока на

вершине – относительным снижением $\delta U_m = \frac{\Delta U}{U_m}$.

Одним из важнейших показателей импульсных сигналов является длительность импульсов. Помимо указанного выше параметра τ_a , определяющего активную длительность вершины на уровне $0,5U_m$, длительность импульса характеризует время t_u , определяемое либо на уровне $0,1U_m$, либо по основанию импульса (см. рисунок 2.1, *з*). Длительность применяемых в современной электронной технике импульсных сигналов имеет весьма широкий диапазон: от единиц наносекунд до единиц и даже десятков секунд. Импульсы микросекундной части этого диапазона (от 10^{-7} до 10^{-1} с) наиболее употребительны и используются в ЭВМ, импульсной связи, радиолокации, телевидении и других областях технической электроники.

К основным параметрам импульсов следует отнести также период повторения импульсов T – интервал времени между началом двух соседних однополярных импульсов. Величину, обратную периоду повторения, называют частотой повторения (следования) импульсов f .

Часть периода занимает пауза t_n (см. рисунок 2.1, *а*) – отрезок времени между окончанием и началом двух соседних импульсов.

Отношение длительности импульса к периоду повторения называют коэффициентом заполнения $\gamma = \frac{t_u}{T}$. Величину, обратную коэффициенту заполнения,

называют скважностью импульсов: $q = \frac{1}{\gamma} = \frac{T}{t_u}$. Качество работы импульсных

устройств во многом зависит от времени восстановления импульса $t_{вос}$ (см. рисунок 2.1, *е*). Чем меньше $t_{вос}$, тем более надежно работает схема, тем выше ее быстродействие.

Временная диаграмма пилообразного напряжения приведена на рисунке 2.2. Основными параметрами такого напряжения являются: длительность рабочего t_p и обратного t_o хода пилообразного напряжения; период следования импульсов T ; амплитуда импульсов U_m ; коэффициент нелинейности ε и коэффициент использования напряжения источника питания ξ . Коэффициент нелинейности ε характеризует величину отклонения напряжения на рабочем

участке от линейного закона и оценивается относительным изменением скорости пилообразного напряжения du/dt на рабочем участке за время t_p :

$$\varepsilon = \frac{(du/dt)_{\max} - (du/dt)_{\min}}{(du/dt)_{\max}},$$

где $(du/dt)_{\max}$ – скорость изменения напряжения в начале рабочего участка;

$(du/dt)_{\min}$ – скорость изменения напряжения в конце рабочего участка (см. рисунок 2.2).

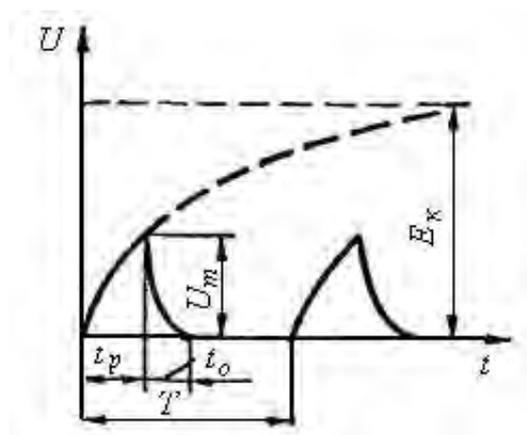


Рисунок 2.2 – Временная диаграмма пилообразного напряжения

В зависимости от области применения пилообразного напряжения коэффициент нелинейности имеет значение от долей до единиц и даже десятков процентов.

Эффективность работы генератора линейно изменяющегося напряжения оценивается коэффициентом использования источника питания E_k по формуле

$$\xi = \frac{U_m}{E_k}.$$

Для наиболее совершенных схем генераторов ξ может иметь величину порядка 0,9.

2.2 Задание к лабораторной работе

С помощью функционального генератора среды Multisim и генератора ЛЗ1, входящего в лабораторный комплект, сформировать сигналы, параметры которых указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры сигналов

Тип сигнала	Параметры				
	$U_m, В$	$T, с$	$t_u, с$	$t_p, с$	$t_o, с$
Постоянный		×	×	×	×
Гармонический			×	×	×
Импульсный				×	×
Пилообразный			×		

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Подключить генератор ЛЗ1 к гнездам «Вход ГС1» блока управления БУ К32. Блок мультиметра К32 подключить к разъёмам «Выход~» или «Выход=». Вставить макетную плату в БУ К32.

2.3.2 В среде Multisim подключить функциональный генератор XPG1 ко входу осциллографа XSC1 (рисунок 2.3).

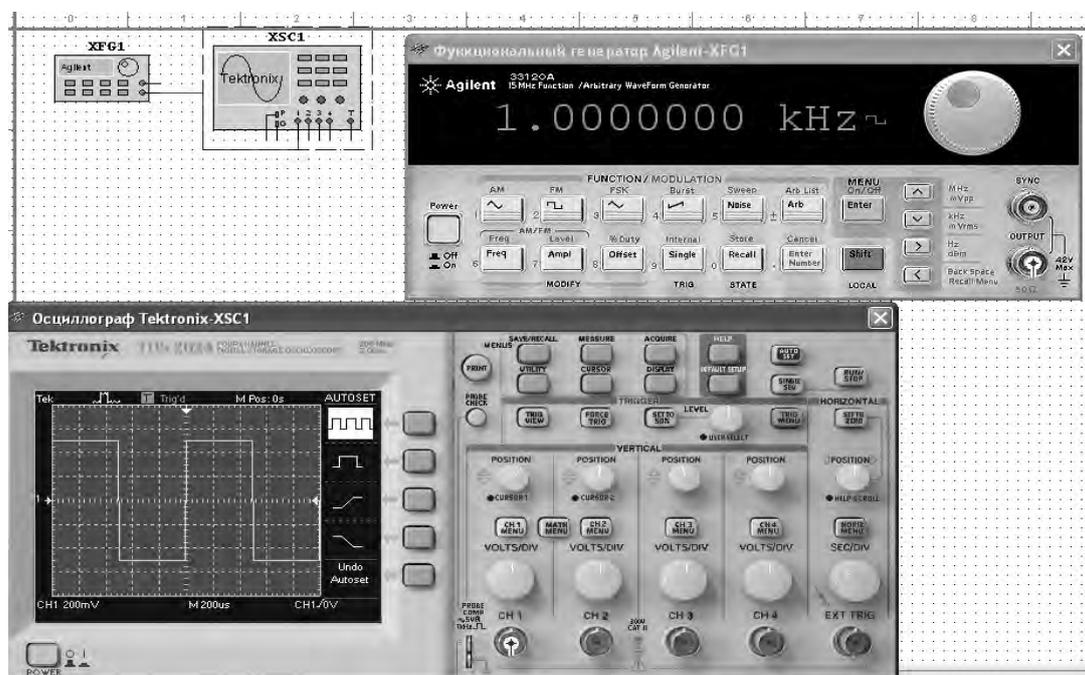


Рисунок 2.3 – Схема для исследования параметров сигналов в среде Multisim

2.3.3 Сформировать сигналы, указанные в задании (см. таблицу 2.1). Полученные сигналы зафиксировать с помощью осциллографа. Определить параметры сигналов. Результаты занести в таблицы 2.2–2.5 (моделирование).

2.3.4 Разработать виртуальный прибор для исследования параметров сигналов в среде LabVIEW (рисунок 2.4). Блок-диаграмма виртуального прибора (рисунок 2.5) содержит следующие блоки: «DAQ Assistant» – обеспечивает сбор данных с устройства NI USB-6009, «Amplitude and Level Measurements» – для определения действующего значения и постоянной составляющей напряжения, «Tone Measurements» – для определения амплитуды и частоты сигнала, «Spectral Measurements» – для определения спектра сигнала.

Таблица 2.2 – Результаты измерений для постоянного сигнала

Тип сигнала	Способ исследования	U_m , В
Постоянный	Моделирование	
	Эксперимент	

Таблица 2.3 – Результаты измерений для гармонического сигнала

Тип сигнала	Способ исследования	U_m , В	U , В	T , с	f , Гц
Гармонический	Моделирование				
	Эксперимент				

Таблица 2.4 – Результаты измерений для импульсного сигнала

Тип сигнала	Способ исследования	U_m , В	T , с	t_u , с	q	γ	τ_ϕ , с	τ_c , с	S_ϕ , В/с	U_m обр, В	$t_{вос}$, с
Импульсный	Моделирование										
	Эксперимент										

Таблица 2.5 – Результаты измерений для пилообразного сигнала

Тип сигнала	Способ исследования	U_m , В	T , с	t_p , с	t_c , с	ξ
Пилообразный	Моделирование					
	Эксперимент					

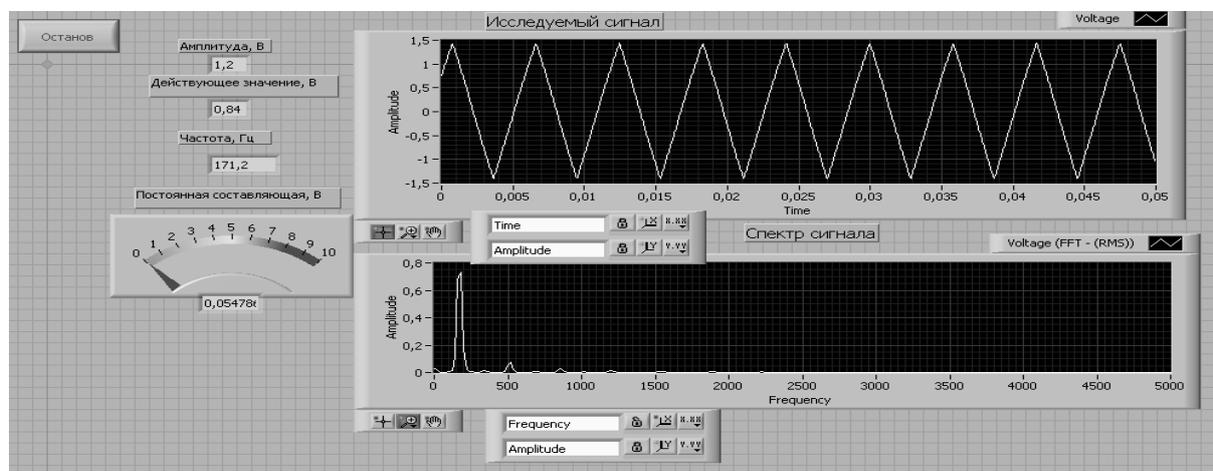


Рисунок 2.4 – Виртуальный прибор для исследования параметров сигналов в среде LabVIEW

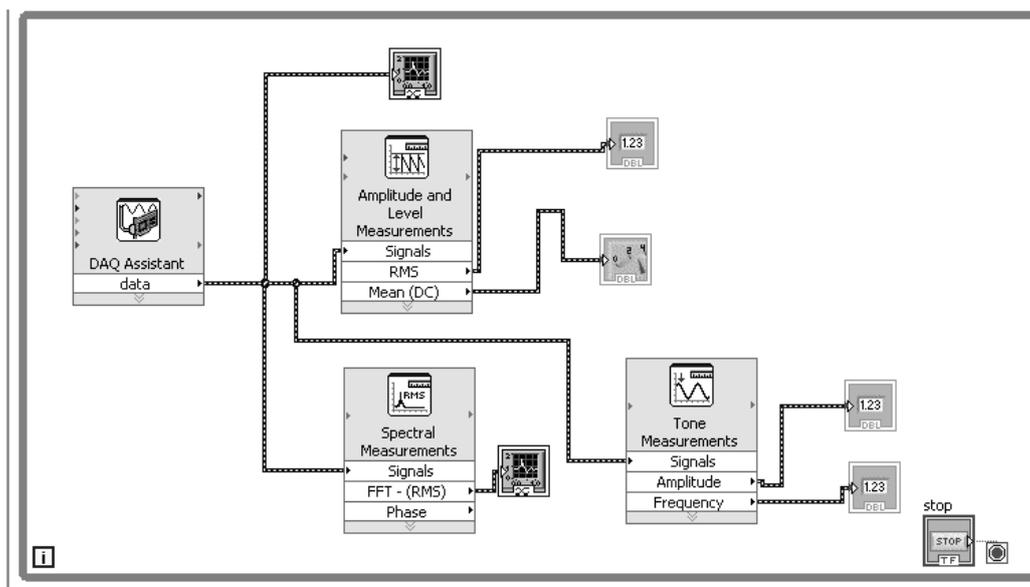


Рисунок 2.5 – Блок-диаграмма для исследования параметров сигналов в среде LabVIEW

2.3.5 С помощью генератора ЛЗ1 и блока управления БУ К32 сформировать сигналы, указанные в задании (таблица 2.1). Исследовать полученные сигналы с помощью виртуального прибора. Результаты занести в таблицы 2.2–2.5 (эксперимент).

2.3.6 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, задание к работе, распечатку «окна схемы» среды Multisim, распечатку лицевой панели и панели блок-диаграммы в среде LabVIEW, таблицу с результатами измерений, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Назовите виды сигналов.
- 2 Какими параметрами характеризуется переменный аналоговый сигнал?
- 3 Какими параметрами характеризуется импульсный сигнал?
- 4 Назовите параметры пилообразного сигнала.

3 Исследование работы выпрямительного диода и стабилитрона

Цель работы: изучение принципа функционирования, характеристик и параметров выпрямительных диодов и стабилитронов.

3.1 Порядок выполнения работы

3.1.1 Для заданных преподавателем диодов выписать из справочника их основные параметры.

3.1.2 Для построения вольт-амперной характеристики диода в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 3.1. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источников питания.

Диод выбирается из библиотеки элементов согласно заданию и подключается к источнику постоянного напряжения. Для снятия обратной ветви ВАХ с помощью ключа меняется полярность источника ЭДС.

ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1.

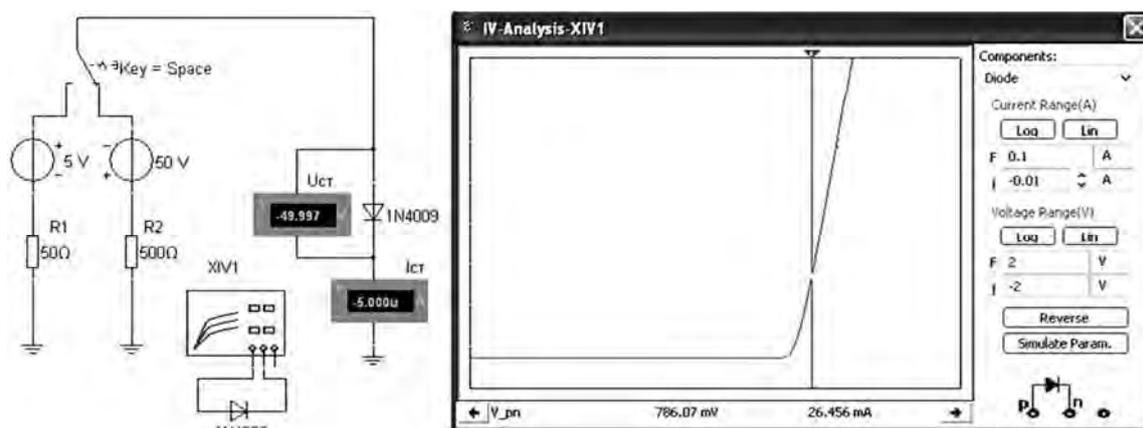


Рисунок 3.1 – Схема для снятия ВАХ в среде Multisim

3.1.3 Для экспериментального получения ВАХ диода на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 3.2.

Постоянное напряжение на вход схемы подаётся от генератора ГН1 блока управления К32 или источника НУ3002-D2. Прямое падение напряжения на диоде U_{np} поступает на дифференциальный канал А11, а напряжение на ограничивающем резисторе R_1 – на дифференциальный канал А12 устройства сбора данных NI USB-6009. Для определения тока I_{np} используется закон Ома:

$$I_{np} = \frac{U_{R_1}}{R_1} = \frac{U_{ГН1} - U_{np}}{R_1},$$

что реализовано на блок-диаграмме виртуального прибора (рисунок 3.3). Считывание напряжений осуществляется блоком «DAQ Assistant». ВАХ формиру-

ется с помощью блоков «Build XY Graph» и «XY Graph» (см. рисунок 3.3) и отображается в виде, представленном на рисунке 3.2.

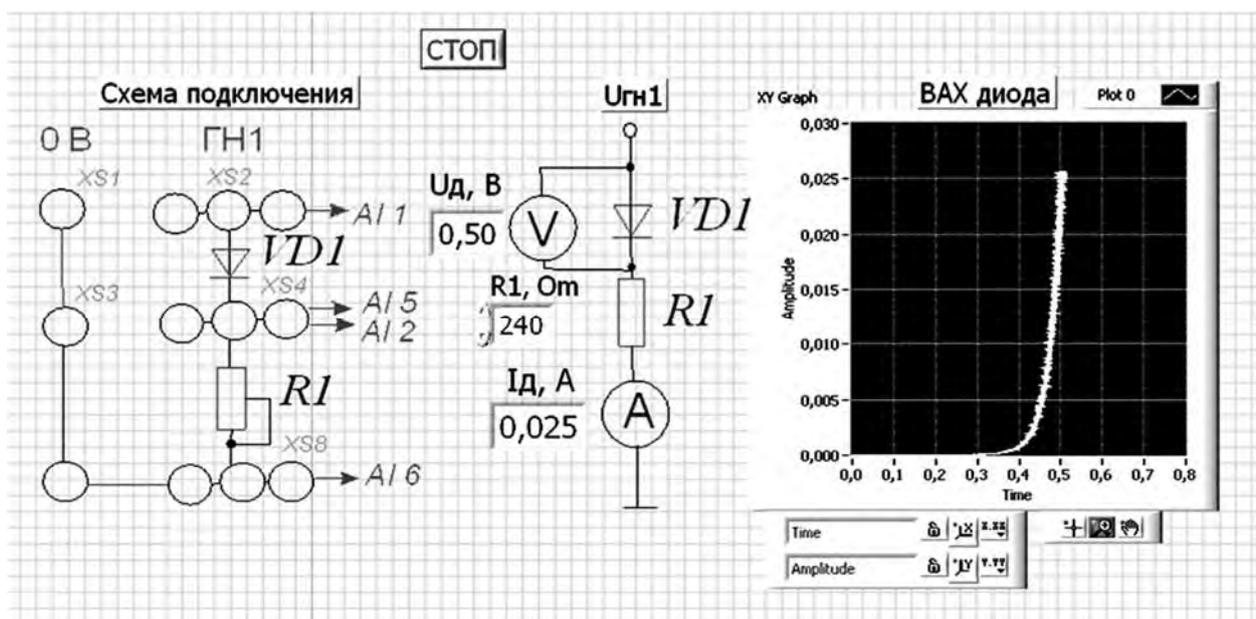


Рисунок 3.2 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования выпрямительного диода в среде LabVIEW

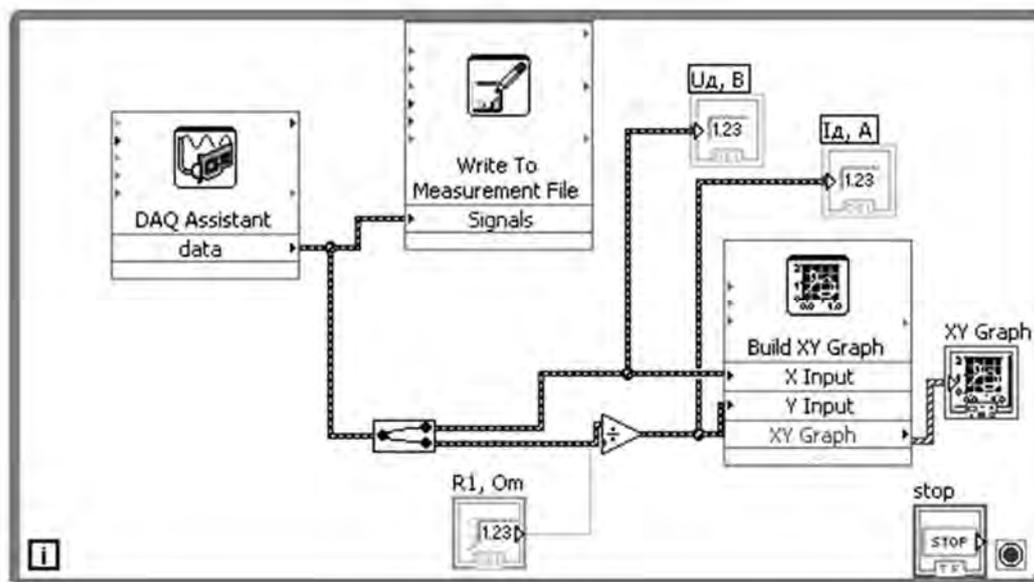


Рисунок 3.3 – Блок-диаграмма виртуального прибора в LabVIEW для экспериментального снятия характеристик

3.1.4 По полученным ВАХ диода определить:

– прямое статическое сопротивление диода при прямом токе, равном $0,5I_{np \max}$,

$$R_{np} = \frac{U_{np}}{I_{np}};$$

– обратное статическое сопротивление диода при обратном напряжении, равно $0,5 U_{обр \max}$,

$$R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}};$$

– прямое дифференциальное сопротивление диода

$$R_{диф} = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}}.$$

Результаты занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений и вычислений

Способ исследования	Результат измерения					Результат вычисления			
	U_{np} , В	I_{np} , мА	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мА	ΔU_{np} , В	ΔI_{np} , мА	R_{np} , Ом	$R_{обр}$, Ом	$R_{диф}$, Ом
Моделирование									
Эксперимент									

Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты со справочными данными.

3.1.5 На основании заданного преподавателем типа стабилизатора, параметров источника входного напряжения (E_{\min} , E_{\max}), параметров нагрузки (U_H , R_H) необходимо рассчитать сопротивление балластного резистора R_δ . Заполнить таблицы 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2 – Параметры стабилизатора

Данные	$U_{ст \text{ ном}}$, В	$U_{ст \text{ min}}$, В	$U_{ст \text{ max}}$, В	$I_{ст \text{ min}}$, мА	$I_{ст \text{ max}}$, мА	$I_{ст \text{ ср}}$, мА	$R_{диф}$, Ом
Паспортные данные							
Моделирование							
Эксперимент							

Таблица 3.3 – Параметры параметрического стабилизатора

E_{\min} , В	E_{\max} , В	$E_{ср}$, В	R_H , Ом	I_H , мА	$U_{ст}$, В	$I_{ст}$, мА	R_δ , Ом



3.1.6 Получить вольт-амперную характеристику стабилитрона (ВАХ) в программе Multisim с помощью характериографа XIV1 (рисунок 3.4). Стабилитрон выбирается из библиотеки элементов согласно заданию.

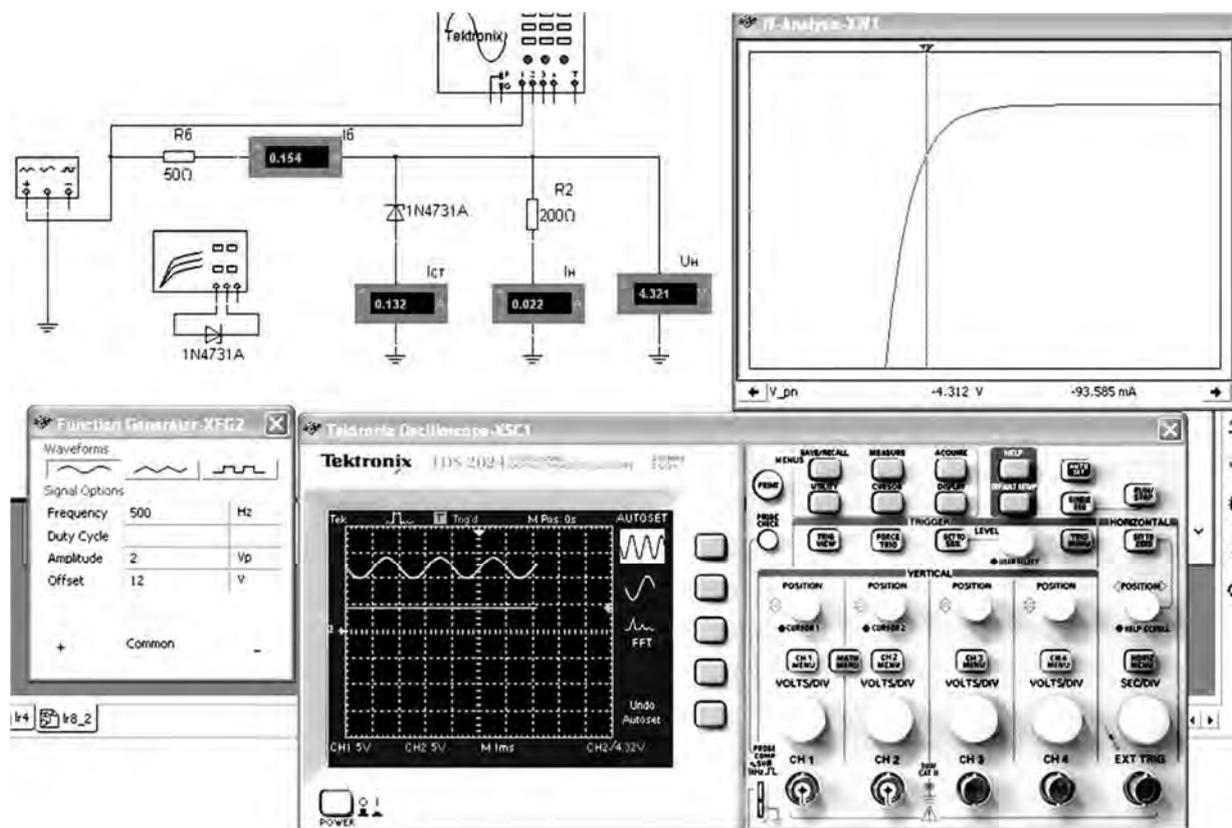


Рисунок 3.4 – Схема для снятия ВАХ стабилитрона и исследования параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim

3.1.7 Для экспериментального получения ВАХ стабилитрона на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 3.2 (вместо диода подключить стабилитрон, подавать на вход отрицательное напряжение $U_{зп1}$).

3.1.8 По полученным ВАХ стабилитрона определить: $U_{ст}$, $I_{ст}$, дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке стабилизации $R_{диф}$. Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты со справочными данными. Заполнить таблицы 3.2 и 3.3.

3.1.9 На основании выбранных элементов схемы параметрического стабилизатора напряжения осуществить моделирование его работы (см. рисунок 3.4). Входное напряжение формируется функциональным генератором XFG2, напряжения и токи в схеме отображаются с помощью виртуальных вольтметров, амперметров и осциллографа Tektronix-XSC1.

3.1.10 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы; схемы для моделирования работы выпрямительного диода и параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim; блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно; вольт-амперные характеристики диодов и стабилитрона, полученные в результате моделирования и экспериментально; основные параметры диода, стабилитрона, параметрического стабилизатора в виде таблиц; выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Что представляют собой полупроводниковые приборы?
- 2 Какие полупроводниковые материалы используются в диодах?
- 3 Где используются полупроводниковые диоды?
- 4 Объясните принцип работы p-n перехода?
- 5 Что такое вольт-амперная характеристика (ВАХ)?
- 6 Какие схемы выпрямителей Вам известны?
- 7 В чём различие выходных характеристик различных схем выпрямителей?
- 8 По каким соотношениям необходимо рассчитывать эти схемы?
- 9 Зачем нужен стабилитрон?

4 Исследование работы однофазных неуправляемых выпрямителей

Цель работы: изучение принципа функционирования, методик расчёта, характеристик и параметров неуправляемых однофазных выпрямителей.

4.1 Основные теоретические сведения

Выпрямителем называется устройство преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямительное устройство, помимо выпрямителя, в который входят один или несколько включенных по определенной схеме вентилях (диодов, тиристоров), содержит в себе силовой трансформатор, сглаживающий фильтр и стабилизатор. В зависимости от условий работы и требований отдельные узлы выпрямительного устройства могут отсутствовать.

Сравнительные показатели схем выпрямления приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнительные показатели схем выпрямления

Тип схемы	m	U_2/U_n	I_2/I_n	K_{n1}	S_{mp}/P_n	I_a/I_n	$U_{обр\ max}/U_n$
Однополупериодная	1	2,22	1,57	1,57	3,1	1	3,14
Двухполупериодная мостовая	2	1,11	1,11	0,667	1,23	0,5	1,57



Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения переменной составляющей напряжения на выходе выпрямителя до величины, при которой обеспечивается нормальная работа питаемого устройства.

Принцип работы сглаживающих фильтров основан на использовании элементов, имеющих различную проводимость для постоянного и переменного токов.

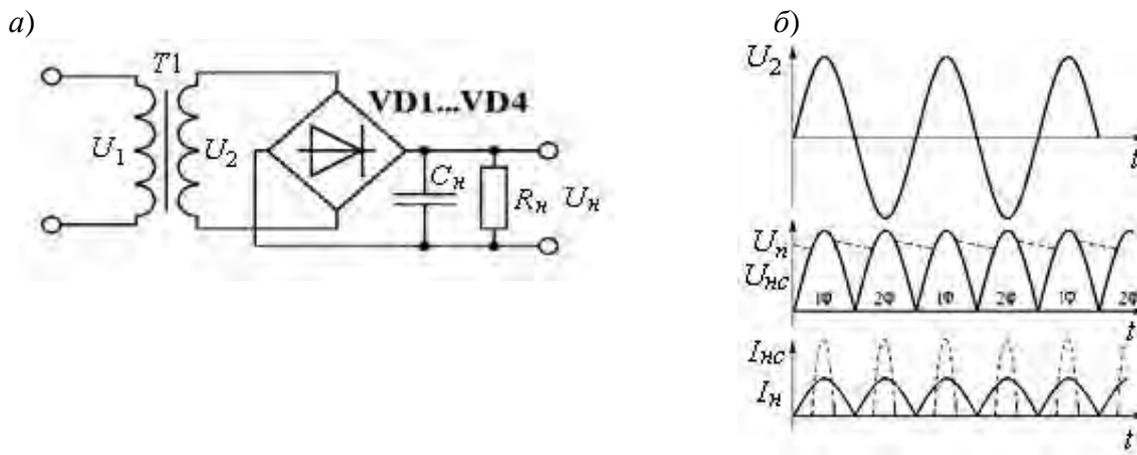


Рисунок 4.1 – Схема (а) и временные диаграммы (б) двухполупериодного мостового выпрямителя

Показателем качества сглаживающих фильтров служит коэффициент сглаживания пульсаций $K_{сг}$, равный отношению коэффициентов пульсаций на входе $K_{n\text{ вх}}$ и выходе (нагрузке) K_n фильтра: $K_{сг} = K_{n\text{ вх}}/K_n$.

Для емкостного фильтра при $R_n \gg 1/(m \cdot \omega \cdot C)$ коэффициент пульсаций:

– для однополупериодной схемы выпрямления

$$C \geq 2/(K_{n\text{ вх}} \omega R_n);$$

– для двухполупериодной схемы выпрямления

$$C \geq 1/(K_{n\text{ вх}} \omega R_n),$$

где ω – угловая частота напряжения u_2 трансформатора.

Коэффициент пульсации обычно выбирается в диапазоне $q_{n1} = 0,01 \dots 0,1$.

4.2 Порядок выполнения работы

4.2.1 На основании заданных параметров питающего напряжения U_1 , f_1 ; нагрузки U_n , R_n (таблица 4.2) и коэффициента пульсаций на нагрузке K_n произвести расчёт параметров выпрямителей (рисунки 4.2 и 4.3), выбрать вентили. Заполнить таблицы 4.2 и 4.3.

4.2.2 Для подтверждения правильности расчётов произвести моделирование работы выпрямителей в программе Multisim, построив их модели согласно рисункам 4.2 и 4.3. Напряжения и токи в схемах отображаются с помощью вир-

туальных вольтметров, амперметров и осциллографа Tektronix-XSC1.

Таблица 4.2 – Исходные данные

Схема выпрямления	Заданные параметры				
	U_1 , В	f , Гц	U_n , В	R_n , Ом	K_n
Однополупериодная					
Двухполупериодная мостовая					

Таблица 4.3 – Результаты вычислений

Схема выпрямления	Рассчитанные параметры								
	U_2 , В	K_{mp}	I_2 , А	S_{mp} , ВА	I_a , А	$U_{обр\ max}$, В	Тип вентилялей	C_ϕ , мкФ	$K_{сг}$
Однополупериодная									
Двухполупериодная мостовая									

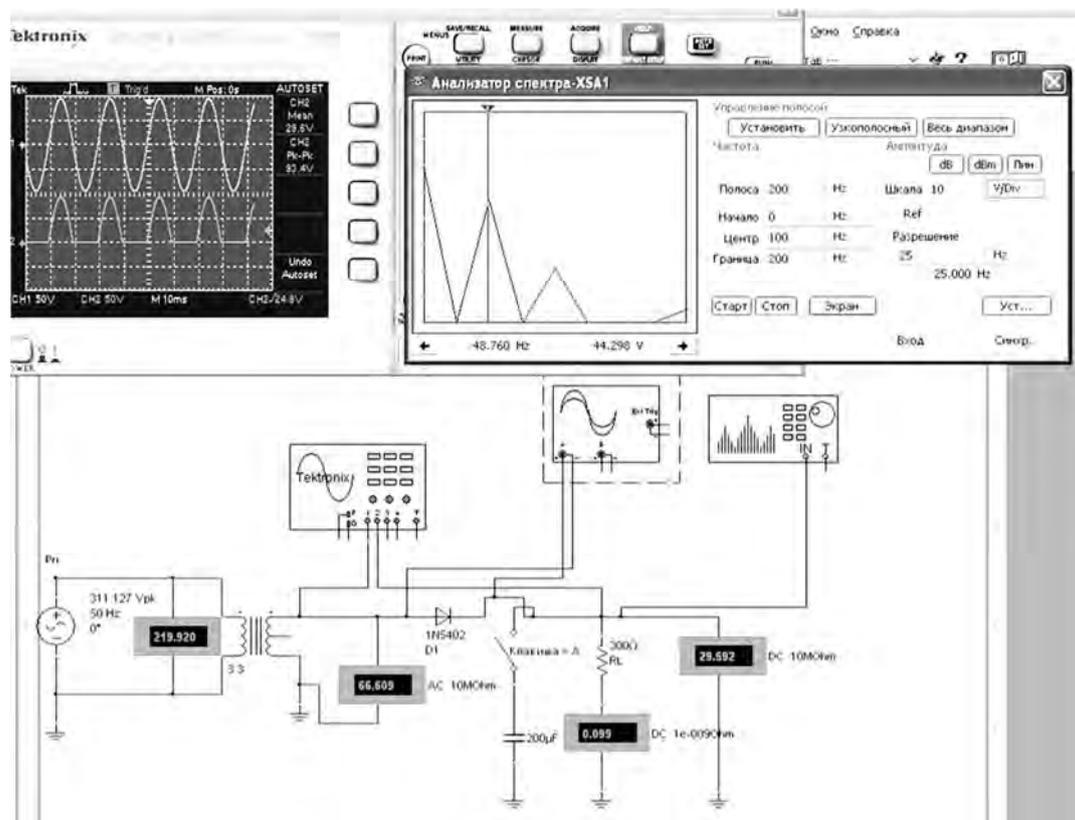


Рисунок 4.2 – Схема однофазного однополупериодного выпрямителя в среде Multisim

Снять осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора U_2 и на выходе выпрямителя U_n при работе на активную и емкостную нагрузки. Подключение сглаживающего фильтра осуществляется замыканием ключа (клавиша «А»).

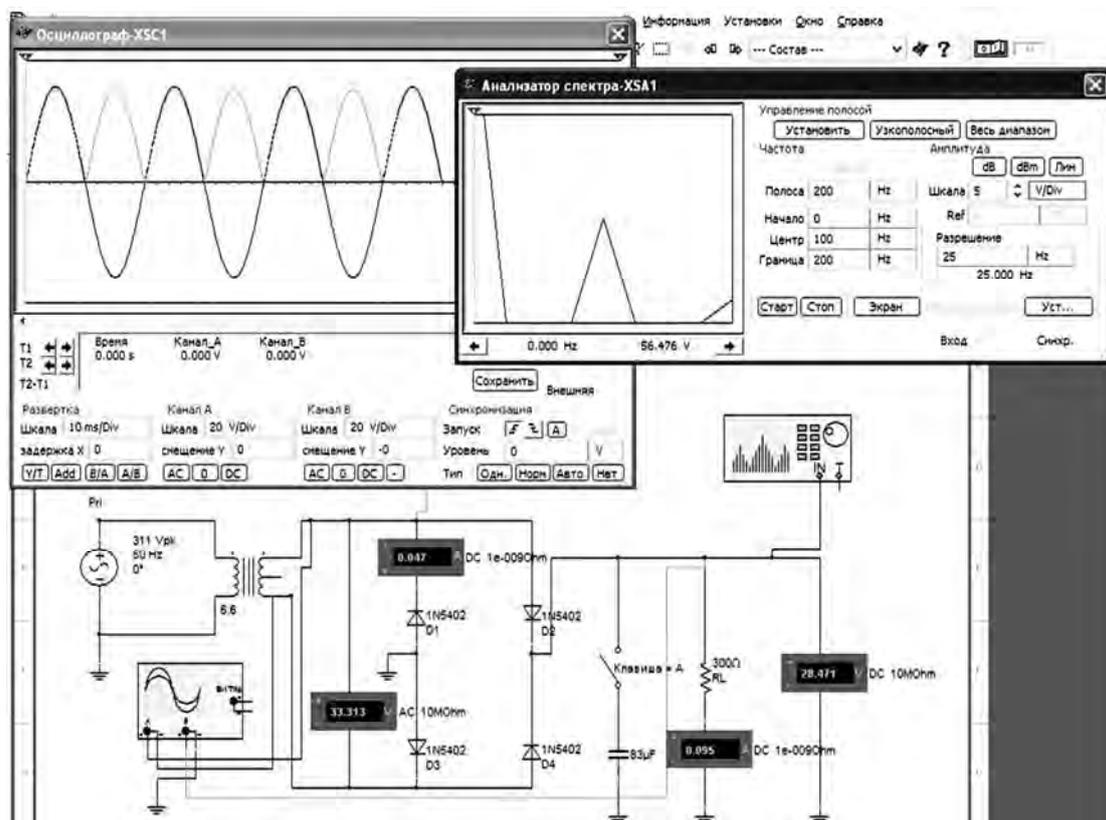


Рисунок 4.3 – Схема двухполупериодного мостового выпрямителя в среде Multisim

Измерить значение тока нагрузки I_n , тока через диод I_a и максимального обратного напряжения на диоде $U_{обр\ max}$. Определить коэффициент пульсаций нагрузки с фильтром K_n и коэффициент сглаживания $K_{сг}$. Для определения амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения U_{m1} воспользоваться анализатором спектра XSA1.

Результаты занести в таблицу 4.4 (моделирование).

Таблица 4.4 – Результаты исследования

Схема выпрямления	Способ исследования	Результаты измерений					Результаты вычислений	
		U_2 , В	I_n , мА	U_n , В	I_a , мА	$U_{обр\ max}$, В	K_n	$K_{сг}$
Однополупериодная	Моделирование							
	Эксперимент							
Двухполупериодная мостовая	Моделирование							
	Эксперимент							

4.2.3 Для экспериментального исследования однофазного однополупериодного выпрямителя на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 4.4. На вход схемы подавать синусоидальное напряжение от генератора $U_{ГС1}$. Блок-диаграмма виртуального прибора для снятия характеристик приведена на рисунке 4.5. Выделение первой гармо-

ники выпрямленного напряжения U_{m1} для определения коэффициента пульсаций K_n осуществляется блоком «Distortion Measurements».

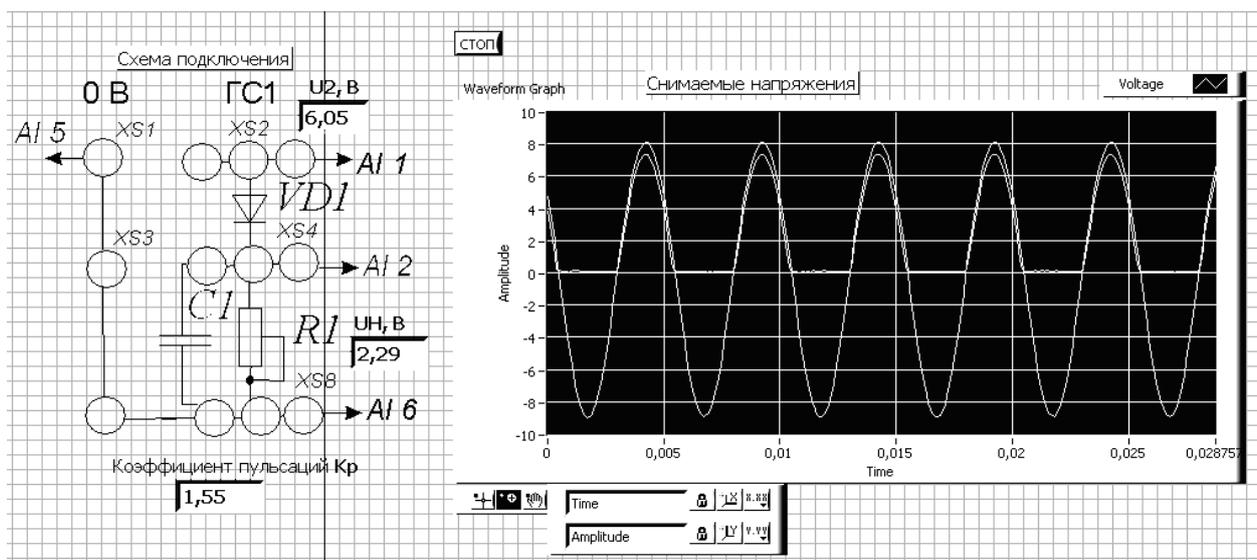


Рисунок 4.4 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования однополупериодного выпрямителя в среде LabVIEW

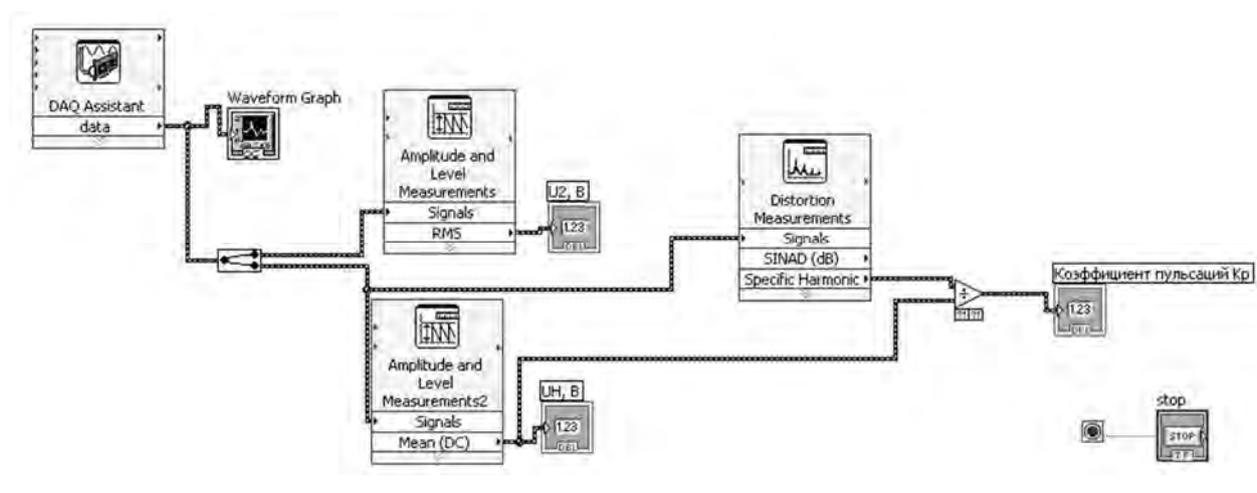


Рисунок 4.5 – Блок-диаграмма виртуального прибора в LabVIEW для экспериментального снятия характеристик однополупериодного выпрямителя

Для экспериментального исследования двухполупериодного выпрямителя на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 4.6.

Определить основные параметры выпрямителей. Результаты занести в таблицу 4.4 (эксперимент). Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты с расчётными данными.

4.2.4 Сделать выводы по результатам работы.

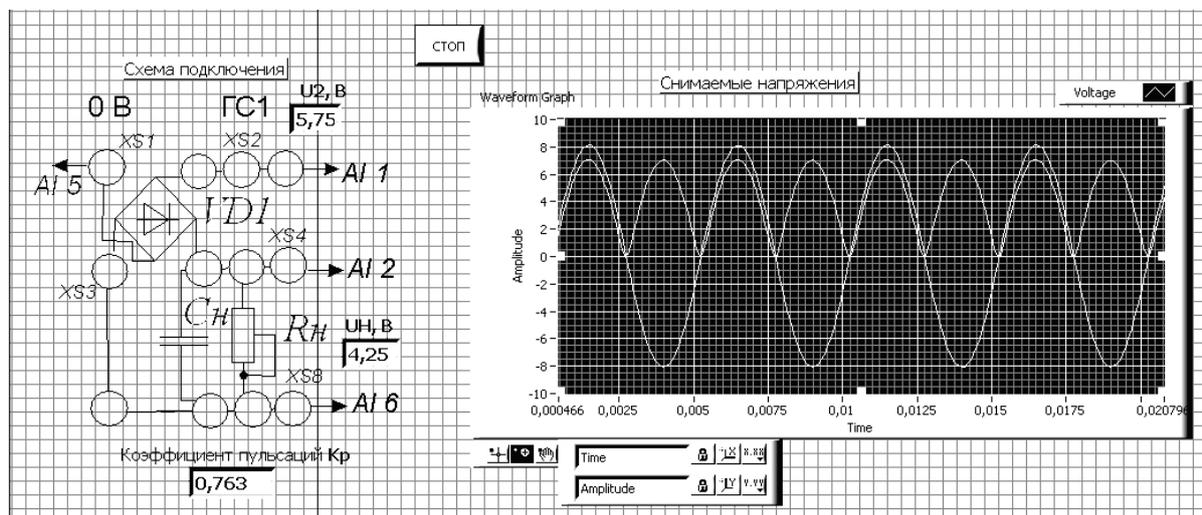


Рисунок 4.6 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования двухполупериодного мостового выпрямителя в среде LabVIEW

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, исходные данные, рассчитанные параметры выпрямителей, схемы для моделирования их работы в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора и нагрузке, полученные при моделировании и входе эксперимента параметры выпрямителей в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Чем вызвана необходимость создания вторичных источников питания?
- 2 Приведите основные признаки классификации ВИП.
- 3 Назовите основные выходные характеристики ВИП.
- 4 Составьте структурную схему выпрямителя источника питания и определите назначение его функциональных узлов.
- 5 Сравните основные параметры неуправляемых одно и двухполупериодных однофазных выпрямителей. Используя графики выходных напряжений, объясните разницу в значениях параметров.

5 Исследование характеристик биполярных и полевых транзисторов

Цель работы: получение входных, выходных характеристик и параметров биполярного транзистора; получение стоко-затворных, выходных характеристик и параметров полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и изолированным затвором.

5.1 Порядок выполнения работы

5.1.1 На основании заданного преподавателем типа биполярного транзистора необходимо рассчитать сопротивление ограничивающих резисторов R_1, R_2 (рисунок 5.1) с учётом обеспечения тока коллектора $I_k < 0,5I_{k \text{ max}}$. Заполнить таблицу 5.1.

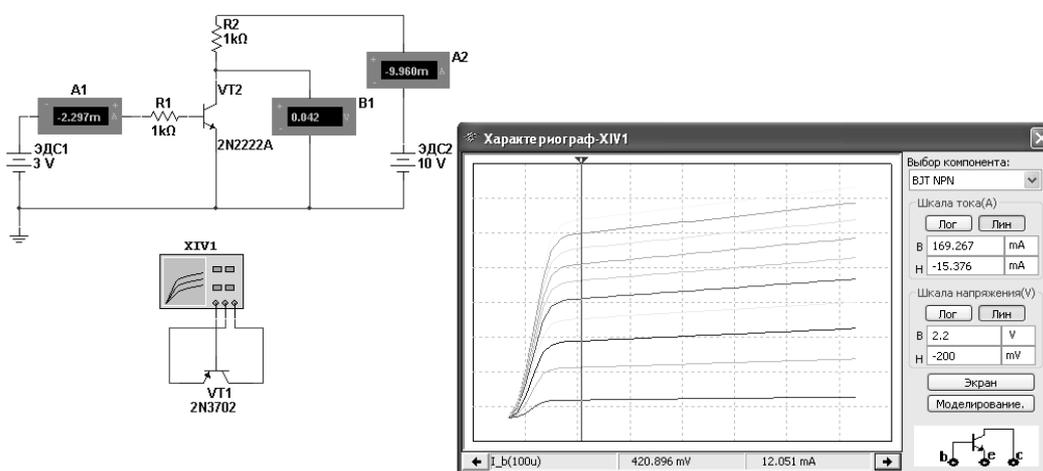


Рисунок 5.1 – Схема для снятия входных и выходных ВАХ биполярного транзистора в среде Multisim

Таблица 5.1 – Исходные данные

Тип транзистора	Параметры источников ЭДС		Параметры транзистора и ограничивающих резисторов				
	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$I_{k \text{ max}}, \text{мА}$	$U_{кэ \text{ max}}, \text{В}$	$h_{21 \text{ э}} (\beta)$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$

5.1.2 Для построения вольтамперных входной и выходной характеристик биполярного транзистора ($n-p-n$) в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 5.1.

Транзистор выбирается из библиотеки элементов согласно заданию. На базу подается напряжение от источника ЭДС-1 E_1 , который задает ток базы I_b , измеряемый амперметром A_1 . Напряжение «эмиттер-коллектор» задается источником ЭДС-2 E_2 , ток в цепи коллектора измеряется амперметром A_2 , напряжение – вольтметром B_1 . Выходную ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1.

5.1.3 Для экспериментального получения характеристик биполярного транзистора на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 5.2.

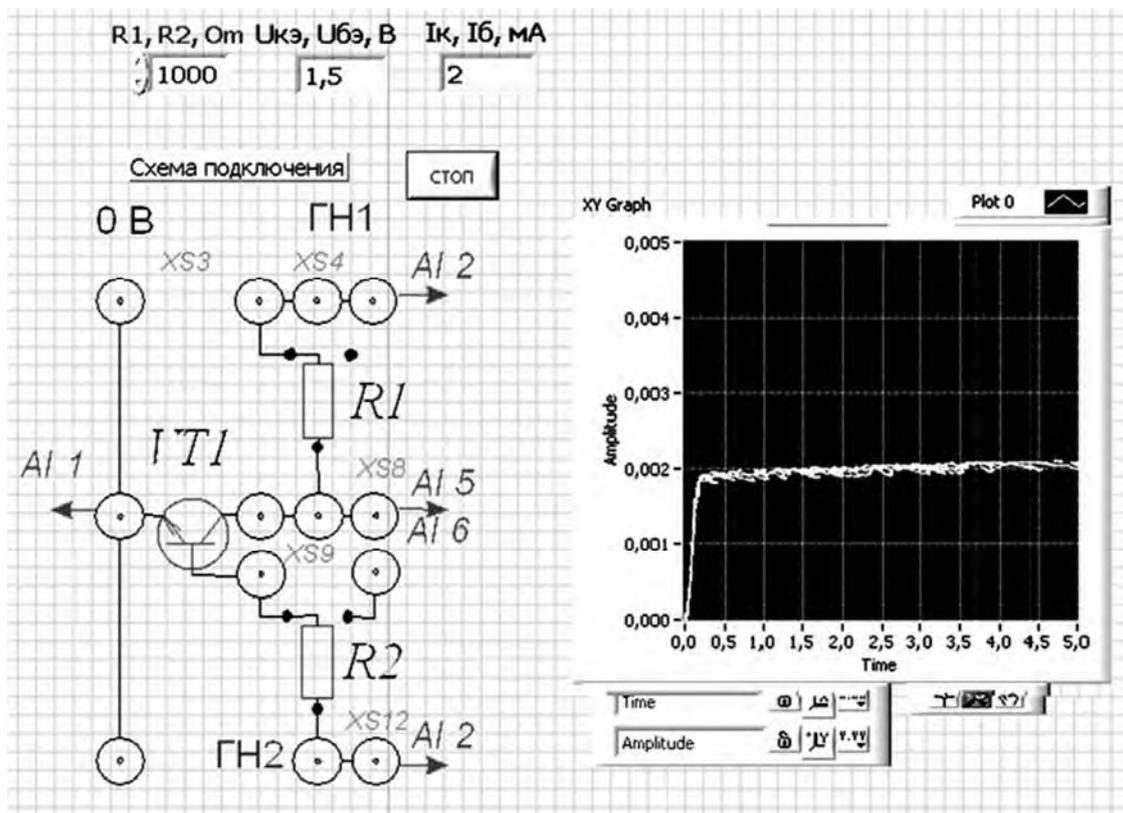


Рисунок 5.2 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования параметров биполярного транзистора в среде LabVIEW.

Постоянное напряжение на вход схемы подаётся от генератора ГН1 блока управления К32 или источника НУ3002-D2 и снимается каналом AI2 устройства сбора данных NI USB-6009. Напряжение $U_{кэ}$ поступает на канал AI1. Для определения тока коллектора I_k применяется закон Ома:

$$I_k = \frac{U_{R_2}}{R_2}.$$

Ток на базу транзистора поступает с генератора ГН2 или источника НУ3002-D2 через резистор R_3 . ВАХ отображается в виде, представленном на рисунке 5.2.

Снять ВАХ биполярного транзистора для нескольких значений тока базы I_b , сравнить их с полученными при моделировании.

Для того чтобы снять входные характеристики (зависимость I_b от $U_{бэ}$), необходимо в схеме сделать следующие изменения: каналом AI2 устройства сбора данных NI USB-6009 подключить к генератору ГН2 (гнездо XS12), канал AI6 – к гнезду XS8, изменить в формуле для закона Ома R_1 на R_2 (снимаем ток базы), канал AI1 подключить к гнезду XS3.

Снять входные ВАХ биполярного транзистора для нескольких значений напряжения $U_{кэ}$, сравнить их с полученными при моделировании.

5.1.4 Воспользовавшись графиками семейств входных и выходных ВАХ, определить h -параметры биполярного транзистора. Заполнить таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – h -параметры биполярного транзистора

Способ исследования	Результаты вычислений			
	$h_{11Э}$, Ом	$h_{12Э}$	$h_{21Э}$	$h_{22Э}$, См
Моделирование				
Эксперимент				

5.1.5 На основании заданных преподавателем типов полевых транзисторов необходимо рассчитать сопротивление ограничивающих резисторов R_1 , R_2 (рисунок 5.3) с учётом обеспечения тока стока $I_c < 0,5 I_{c \max}$. Заполнить таблицу 5.3.

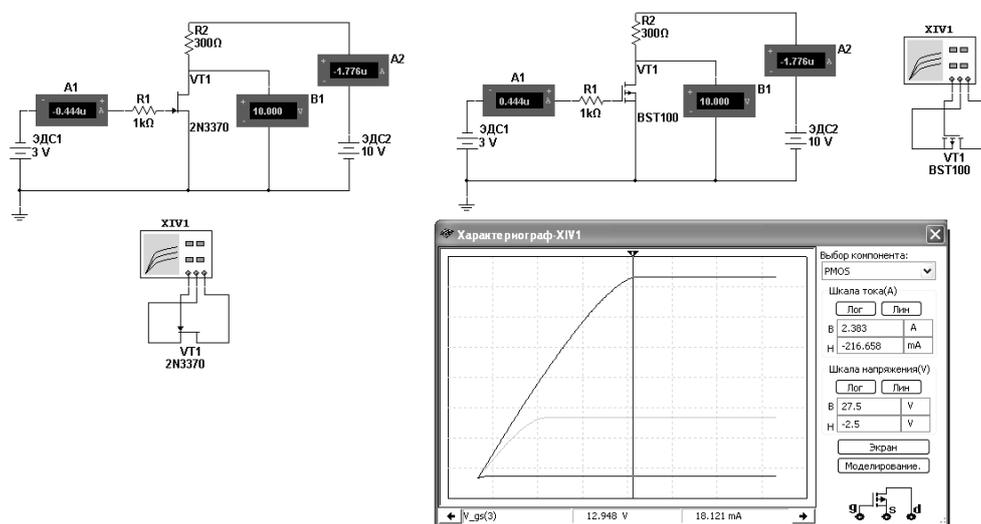


Рисунок 5.3 – Схемы для снятия стоко-затворной и выходных ВАХ полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом и изолированным затвором в среде Multisim

Таблица 5.3 – Исходные данные

Тип транзистора	Параметры источников ЭДС		Параметры транзистора и ограничивающих резисторов					
	E_1 , В	E_2 , В	$I_{c \max}$, мА	$U_{си \max}$, В	$U_{зи \max}$, В	S , мА/В	R_1 , Ом	R_2 , Ом

5.1.6 Для построения вольтамперных стоко-затворной и выходной характеристик полевых транзисторов (n - p - n) в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 5.3.

Транзистор выбирается из библиотеки элементов согласно заданию. На затвор подается напряжение от источника ЭДС-1, который задает ток затвора I_3 ,

измеряемый амперметром А1. Напряжение «сток-исток» задается источником ЭДС-2, ток в цепи стока измеряется амперметром А2, напряжение – вольтметром В1. Выходную ВАХ можно получить с помощью характеристики графа.

5.1.7 Для экспериментального получения характеристик полевого транзистора на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 5.4.

Постоянное напряжение на вход схемы подается от генератора ГН1 блока управления К32 и снимается каналом АИ2 устройства сбора данных NI USB-6009. Напряжение «сток-исток» U_{cu} поступает на канал АИ1. Для определения тока стока I_c необходимо применить закон Ома:

$$I_k = \frac{U_{R_2}}{R_2}.$$

Ток на затвор транзистора поступает с генератора ГН2 через резистор R_3 . ВАХ отображается в виде, представленном на рисунке 5.4.

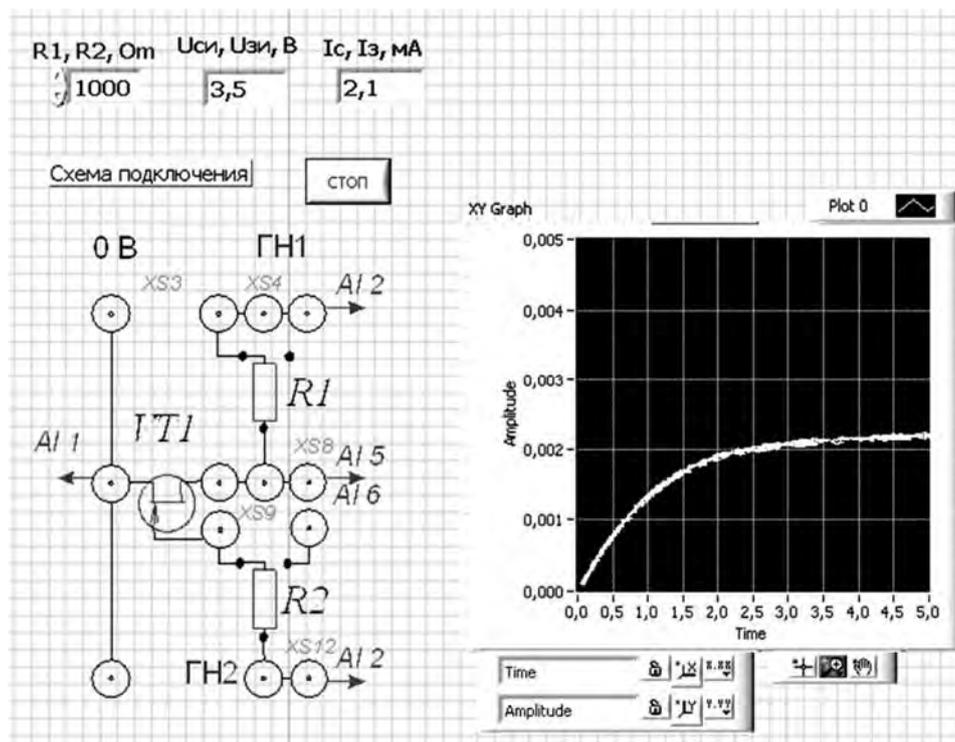


Рисунок 5.4 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования параметров полевого транзистора в среде LabVIEW

Снять выходные ВАХ полевого транзистора для нескольких значений тока затвора I_z , сравнить их с полученными при моделировании.

Снять стоко-затворные ВАХ полевого транзистора для нескольких значений напряжения U_{cu} , сравнить их с полученными при моделировании.

5.1.8 Определить статические параметры полевого транзистора S_i , R_i , μ_i и проверить соотношение между ними. Заполнить таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры полевого транзистора

Способ исследования	Результаты вычислений		
	S_i , мА/В	R_i , кОм	μ_i
Моделирование			
Эксперимент			

5.1.9 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы для моделирования работы биполярных и полевых транзисторов в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, экспериментальные и полученные в результате моделирования характеристики и параметры транзисторов, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите условно-графическое обозначение, структуру и схему включения с общим эмиттером биполярного транзистора.
- 2 Охарактеризуйте основные параметры биполярных транзисторов.
- 3 Изобразите входную и выходную характеристики биполярного транзистора. Как по ним определить h -параметры транзистора?
- 4 Приведите условно-графическое обозначение, структуру и схему подключения полевого МДП транзистора.
- 5 Охарактеризуйте основные параметры полевых транзисторов.
- 6 Изобразите стоко-затворную и выходную характеристики биполярного транзистора. Как по ним определить крутизну стоко-затворной характеристики, выходное сопротивление, коэффициент усиления по напряжению?
- 7 Опишите порядок создания виртуального прибора для снятия ВАХ транзистора в NI LabVIEW.



6 Исследование схем на основе операционных усилителей

Цель работы: изучение принципа работы, методик расчёта, характеристик устройств на базе операционных усилителей.

6.1 Основные теоретические сведения

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми и импульсными величинами.

На основе ОУ строят усилительные схемы, а также устройства для выполнения различных математических операций (рисунок 6.1): *инвертирующий усилитель* (а); *неинвертирующий усилитель* (б); *операционный повторитель* (в), выходной сигнал которого практически равен входному; *интегратор* (г), выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала; *дифференциатор* (д), выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала; *сумматор* (е), выходное напряжение которого равно инвертированной сумме входных напряжений, и др.

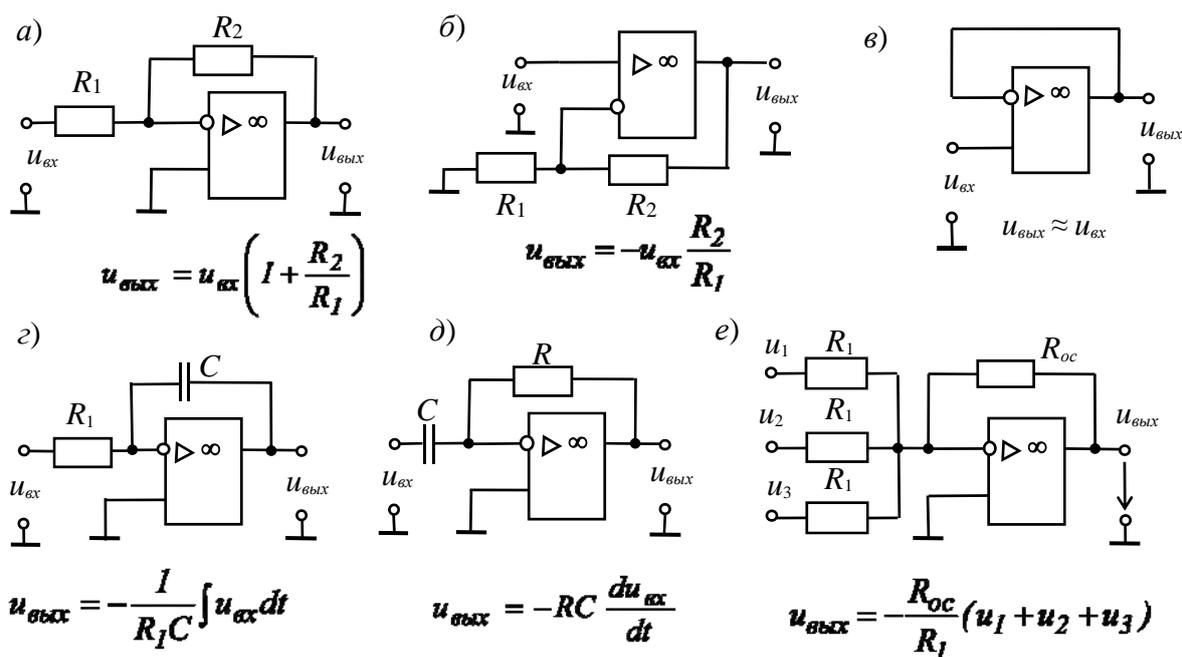


Рисунок 6.1 – Устройства на базе операционных усилителей

Параметры компонентов схемы определяют из условия получения приемлемой точности выполнения операций. Например, для уменьшения ошибки интегрирования и влияния входного тока и напряжения смещения параллельно конденсатору C интегратора (см. рисунок 6.1, г) подключают резистор, сопротивление которого значительно больше сопротивления R_1 .

С той же целью в дифференциаторе последовательно с конденсатором C



(см. рисунок 6.1, *д*) включают резистор. На практике при интегрировании выбирают постоянную времени звена обратной связи $\tau = RC$, по крайней мере, в 10...100 раз больше длительности входного сигнала, а при дифференцировании её выбирают в 10...100 раз меньше длительности нарастания фронта входного сигнала и, тем более, существенно меньше его длительности.

6.2 Порядок выполнения работы

6.2.1 На основании заданного преподавателем типа ОУ, пользуясь справочником, заполнить таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры ОУ

Тип ОУ	Справочные параметры				
	U_n , В	K_U	f_1 , Гц	$R_{вх}$, Ом	$R_{вых}$, Ом

6.2.2 По заданным параметрам заполнить таблицу 6.2. Произвести расчет устройств на рисунках 6.4 *а*, *б*, *е*, заполнить таблицу 6.3. Резисторы выбрать из ряда E24.

Таблица 6.2 – Исходные данные

Тип ОУ	Заданные параметры (рисунок 6.1, <i>а</i>)		Заданные параметры (рисунок 6.1, <i>б</i>)		Заданные параметры (рисунок 6.1, <i>е</i>)			
	$u_{вх}$, В	$u_{вых}$, В	$u_{вх}$, В	$u_{вых}$, В	u_1 , В	u_2 , В	u_3 , В	$u_{вых}$, В

Таблица 6.3 – Рассчитанные параметры

Тип ОУ	Рассчитанные параметры					
	(рисунок 6.1, <i>а</i>)		(рисунок 6.1, <i>б</i>)		(рисунок 6.1, <i>е</i>)	
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом

6.2.3 Для подтверждения правильности расчётов произвести моделирование работы устройств, представленных на рисунках 6.1 *а*, *б*, *е* в программе Multisim, построив их модели согласно рисунку 6.2. Напряжения и осциллограммы в схемах отображаются с помощью виртуальных вольтметров и осциллографа. Входной сигнал формируется функциональным генератором.

Для отображения параметров усилителя по постоянному току в свойствах измерительных приборов установить «DC», при измерении переменных сигналов установить «AC». Результаты моделирования для неинвертирующего уси-

лителя занести в таблицу 6.3 (моделирование).

Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) неинвертирующего усилителя, изменяя частоту входного сигнала или воспользовавшись плоттером Боде (Bode Plotter ХВР1). Определить частоту среза f_p и частоту единичного усиления f_1 .

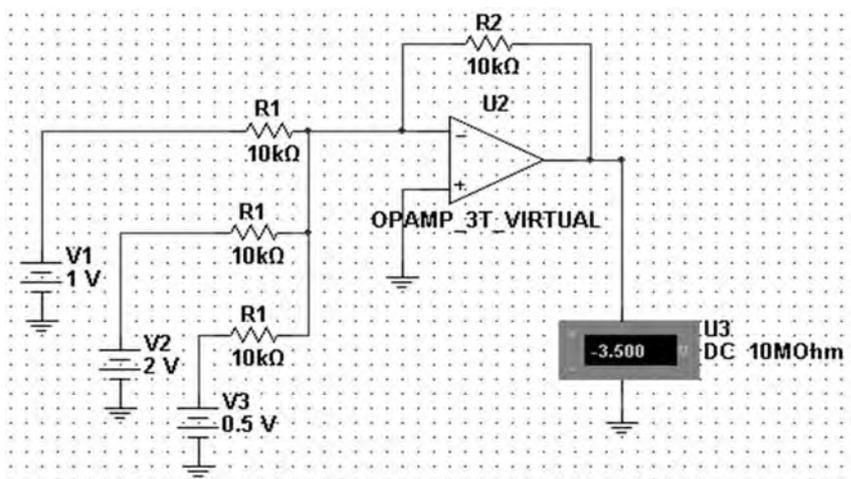
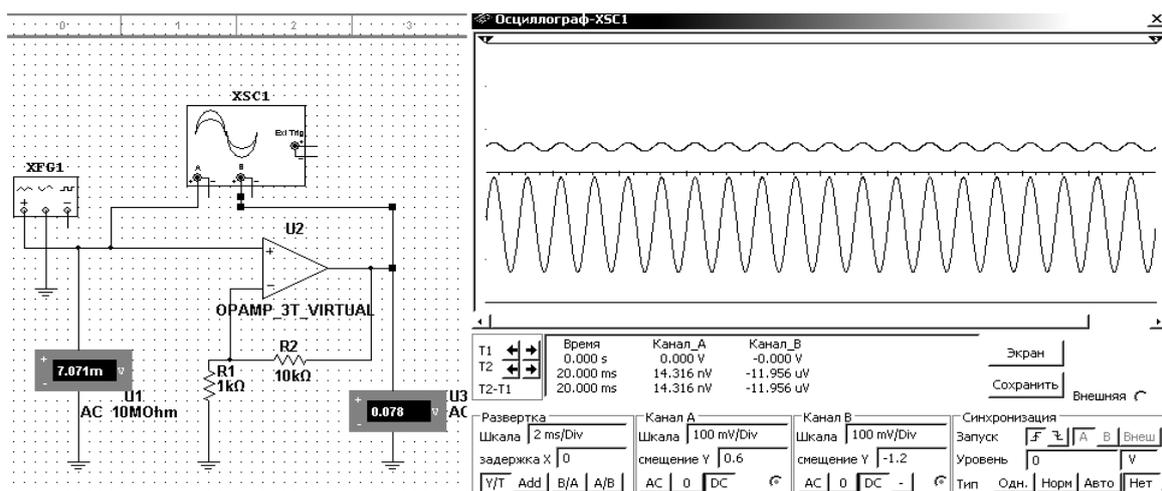
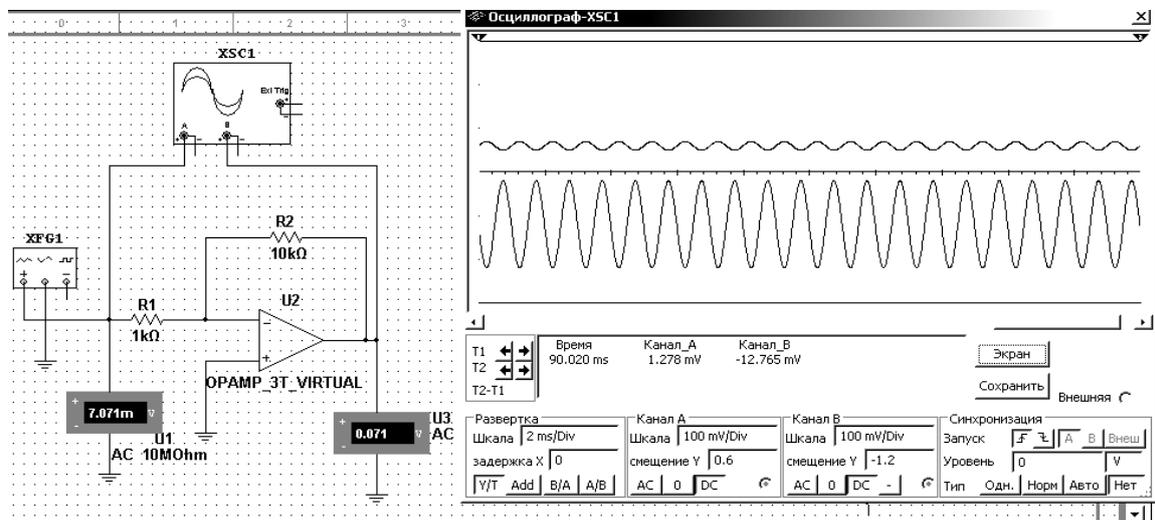


Рисунок 6.2 – Схемы инвертирующего усилителя (вверху), неинвертирующего усилителя (в центре) и сумматора (внизу) в среде Multisim

В схеме сумматора просуммировать постоянный и переменный сигналы, подав на вход 1 вместо постоянного напряжения 1 В переменное напряжение 1 В с частотой 1 кГц. Напряжение на выходе пронаблюдать с помощью осциллографа.

6.2.4 Экспериментально исследовать неинвертирующий усилитель на базе заданного преподавателем ОУ, для этого на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 6.3. На вход схемы подавать синусоидальное напряжение от генератора $U_{ГС1}$. Блок-диаграмма виртуального прибора для снятия характеристик в среде LabVIEW приведена на рисунке 6.4. Выделение действующего значения входного и выходного напряжений $U_{вх}$, $U_{вых}$ осуществляется блоком «Amplitude and Level Measurements».

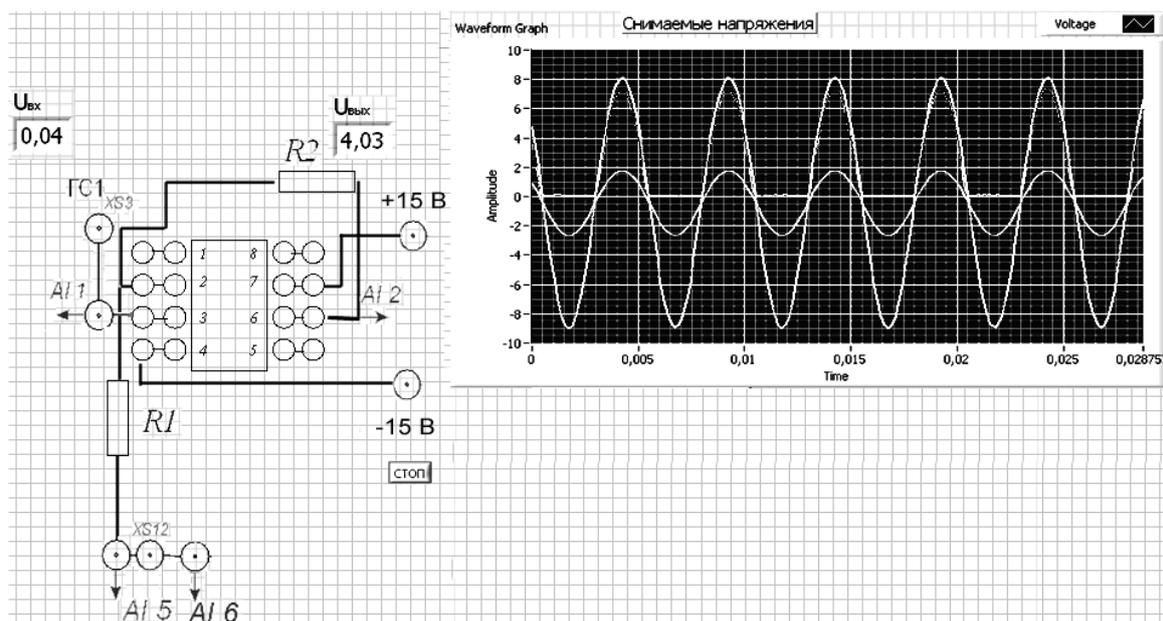


Рисунок 6.3 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования неинвертирующего усилителя на базе ОУ в среде LabVIEW

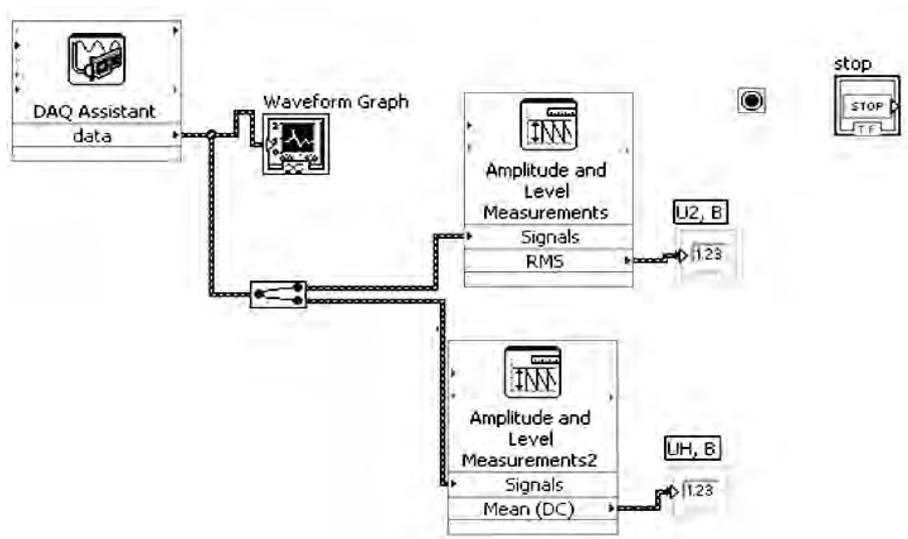


Рисунок 6.4 – Блок-диаграмма виртуального прибора в LabVIEW для экспериментального исследования неинвертирующего усилителя на базе ОУ

Определить основные параметры усилительного каскада. Результаты занести в таблицу 6.4 (эксперимент). Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты с расчётными данными.

Таблица 6.4 – Основные параметры усилительного каскада

Способ исследования	Параметры		
	$U_{вх}, В$	$U_{вых}, В$	K_u
Задано			
Моделирование			
Эксперимент			

6.2.5 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы для моделирования работы устройств на базе операционных усилителей в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, осциллограммы входных и выходных напряжений, АЧХ, основные параметры неинвертирующего усилителя в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение операционного усилителя.
- 2 Какие математические операции выполняются на базе операционных усилителей?
- 3 Что называют дифференциальным и синфазным сигналом?
- 4 Назовите параметры операционного усилителя.



7 Исследование работы компенсационного стабилизатора напряжения

Цель работы: изучение принципа функционирования, характеристик и параметров компенсационного стабилизатора напряжения на интегральной микросхеме КР142ЕН1А.

7.1 Основные теоретические сведения

Параметрический стабилизатор не позволяет осуществить плавную регулировку выходного напряжения. Кроме того, у него малая мощность и низкий КПД.

Компенсационный стабилизатор напряжения лишен указанных недостатков. Сущность его работы состоит в том, что процесс стабилизации основан на сравнении измерительным устройством (ИУ) выходного напряжения с опорным, вырабатываемым источником опорного напряжения (ИОН), например стабилитроном (рисунок 7.1).

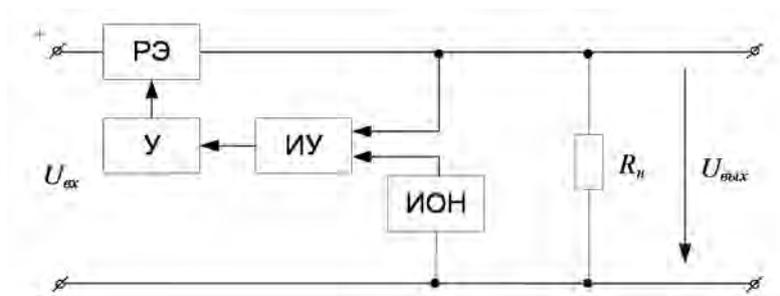


Рисунок 7.1 – Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения

Разностное напряжение усиливается усилителем У и подается на регулирующий элемент РЭ, изменяя его сопротивление так, чтобы выходное напряжение оставалось неизменным.

В данной работе исследуется компенсационный стабилизатор напряжения в интегральном исполнении КР142ЕН1А, принципиальная схема и основные электрические параметры которого представлены соответственно на рисунке 7.2 и в таблице 7.1.

Принципиальная схема стабилизатора с регулируемым выходным напряжением представлена на рисунке 7.3. Необходимое значение выходного напряжения устанавливается с помощью регулируемого делителя R_5 , R_6 . Резистором R_1 можно выставить порог срабатывания защиты стабилизатора от перегрузки по току, величина которого регулируется резистором нагрузки R_7 .

Основными параметрами компенсационного стабилизатора напряжения, по аналогии с параметрическим стабилизатором, являются:

- коэффициент стабилизации

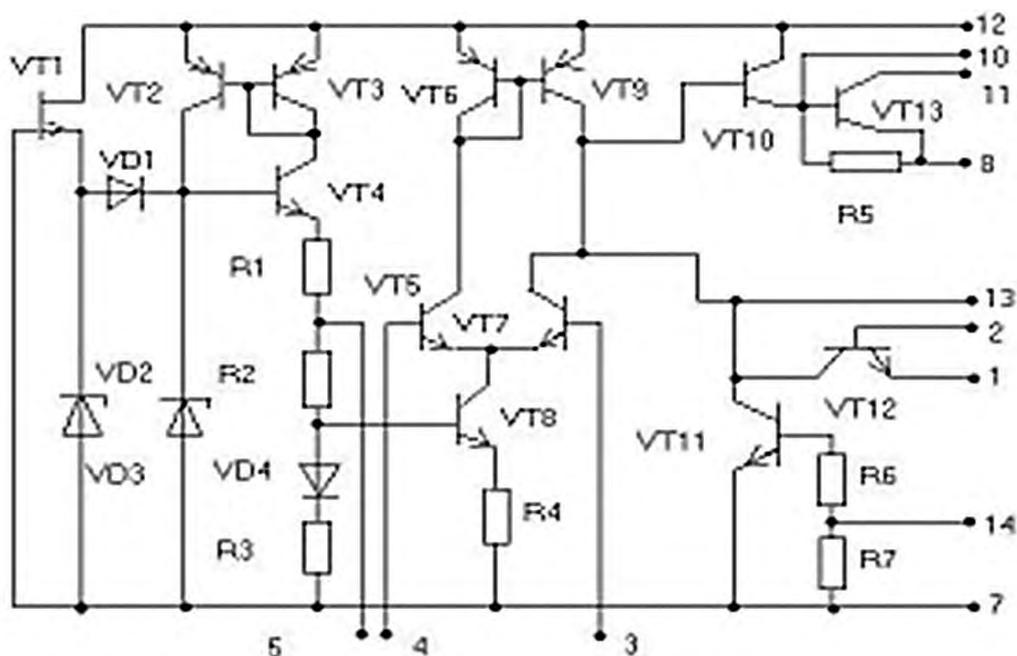
$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} : \frac{\Delta U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \Big|_{R_{\text{н}} = \text{const}} ;$$

– коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ex}} = \frac{U_H I_H}{U_{ex} I_{ex}};$$

– выходное сопротивление

$$R_{вых} = R_D = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}}.$$



1, 2 – защита по току; 3 – обратная связь; 4 – вход дифференциального усилителя; 5 – опорное напряжение; 6–9 – не используются; 7 – общий ($-U_n$); 8 – выход 1; 10 – выход 2; 11 – вход 2; 12 – вход 1; 13 – коррекция; 14 – выключатель

Рисунок 7.2 – Принципиальная схема микросхемы КР142ЕН1А

Таблица 7.1 – Основные параметры микросхемы КР142ЕН1А

Параметры	КР142ЕН1А
Выходное напряжение, В	3...12
Максимальное входное напряжение, В	20
Минимальное входное напряжение, В	9
Максимальный ток нагрузки, А	0,15
Минимальное падение напряжения на регулирующем транзисторе, В	4
Нестабильность по напряжению, %/В	0,2
Нестабильность по току, %/В	4,4
Относительный температурный коэффициент напряжения, %/°С	0,05

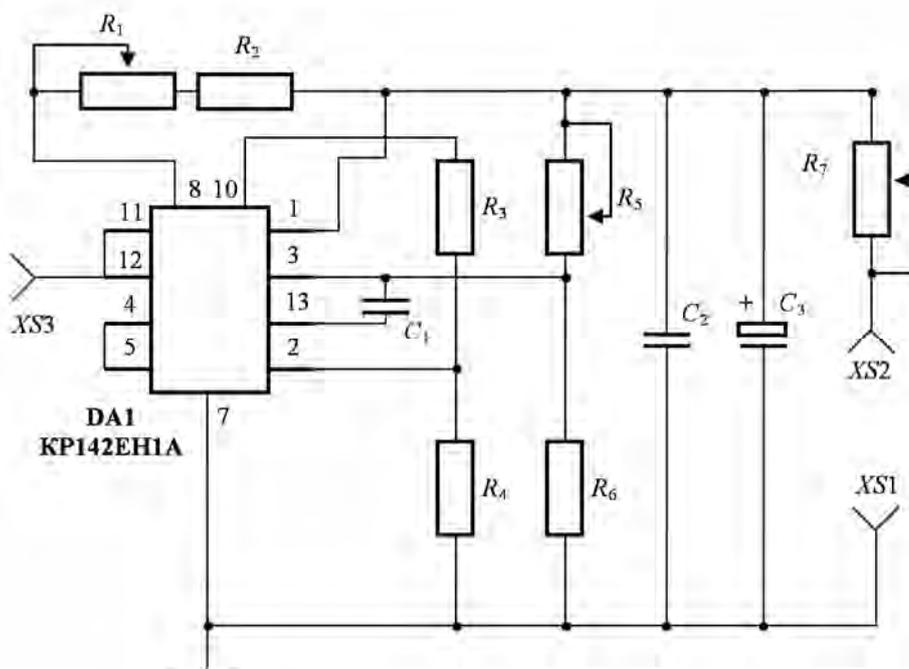


Рисунок 7.3 – Принципиальная схема компенсационного стабилизатора с регулируемым выходным напряжением на микросхеме KP142EH1A

7.2 Порядок выполнения работы

7.2.1 В разъем, расположенный на лицевой панели блока управления K32, вставить сменное устройство UC10.

Общий провод внешнего источника питания соединить с общим проводом блока управления K32, гнездо XS3 соединить с плюсом внешнего источника питания. Гнезда XS2 и XS1 соединить перемычкой.

Мультиметр перевести в режим измерения постоянного напряжения и включить в гнездо «Выход V=» блока управления K32.

7.2.2 Снять зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$ для значения $U_{см}$, заданного преподавателем ($U_{см}$ задается потенциометром R_5 и отображается на экране мультиметра, при этом напряжение внешнего источника питания должно быть на 2...3 В больше $U_{см}$; $U_{вх}$ задается внешним источником питания). Полученные данные занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Результаты измерений

Параметры	Значения												
$U_{вх}$, В													
$U_{вых}$, В													
ΔU , В													
$I_{вх}$, мА													
$I_{вых}$, мА													

7.2.3 Построить зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$ в виде графика. Рассчитать коэффициент стабилизации для $U_{вх}$, превышающего $U_{ст}$ на 2–3 В.

7.2.4 Построить графики зависимостей $\Delta U = U_{вх} - U_{вых} = f(U_{вх})$, предварительно заполнив третью строчку таблицы 7.2. Объяснить особенности их формы.

7.2.5 Измерить ток срабатывания защиты стабилизатора от короткого замыкания в цепи нагрузки. Для этого мультиметр перевести в режим измерения постоянного тока и включить в гнездо «Выход V~» блока управления К32. Соединить «XS2» с гнездом «ВХОД 2» блока «коммутатор». Нажать кнопку $BC_{в}|B_{н}K$ блока «коммутатор» и кнопку «ВХ2».

7.2.6 С помощью потенциометра R_1 выставить порог срабатывания схемы (по заданию преподавателя) от короткого замыкания в цепи нагрузки. Изменяя сопротивление потенциометра R_7 , определить ток в нагрузке $I_{защиты}$, при котором срабатывает схема защиты. Объяснить принцип ее работы.

7.2.7 Для нескольких значений сопротивления нагрузки R_7 определить входные $I_{вх}$ и выходные токи $I_{вых}$ ($I_{вх}$ отображается на внешнем блоке питания). Заполнить таблицу 7.2.

7.2.8 Рассчитать КПД и $R_{вых}$ для указанных выше значений R_7 .

7.2.9 По итогам измерений заполнить таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Результаты исследований

$U_{ст}, В$	$K_{ст}$	$I_{защиты}, мА$	$\eta_1, \%$	$\eta_2, \%$	$\eta_3, \%$	$R_{вых}, Ом$

7.2.10 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчет о проделанной работе должен содержать: цель работы, схему электрическую принципиальную стабилизатора напряжения на основе микросхемы КР142ЕН1А (в соответствии со схемой принципиальной электрической сменного устройства УС10) с указанием значений и типов всех радиоэлементов, таблицы, графики экспериментальных зависимостей, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Назовите основные параметры компенсационного стабилизатора.
- 2 Принцип работы компенсационного стабилизатора непрерывного действия.
- 3 Назовите типы стабилизаторов серии К142ЕН.



8 Исследование работы генератора гармонических колебаний и мультивибратора

Цель работы: изучение принципа функционирования, методик расчёта, характеристик и параметров генераторов гармонических колебаний и мультивибраторов.

8.1 Общие сведения

Электронные цепи, в которых периодические изменения напряжения или тока возникают без приложения к ним внешнего периодического воздействия, называются автоколебательными цепями, а устройства, выполненные на основе таких цепей, называются *автогенераторами* или *генераторами колебаний*.

Генератор можно построить на базе усилителя, охваченного положительной обратной связью. Структурная схема генератора приведена на рисунке 8.1.



Рисунок 8.1 – Структурная схема генератора

Условия генерации можно определить по следующим формулам:

1) $K_u \cdot \beta = 1$, где K_u – коэффициент усиления по напряжению усилителя без обратной связи, β – коэффициент обратной связи;

2) $\varphi_k + \varphi_\beta = 2\pi z$, где φ_k – сдвиг фаз вносимый усилителем; φ_β – сдвиг фаз вносимый цепью обратной связи; z – целое число.

Первое условия получило название – *баланс амплитуд*, второе – *баланс фаз*.

В комплексном виде два условия объединяются в одно:

$$\dot{K}_u \dot{\beta} = K_u \beta e^{j(\varphi_k + \varphi_\beta)} = 1.$$

При $K_u \beta < 1$ любые колебания затухают до нуля, при $K_u \beta > 1$ колебания возрастают до насыщения усилителя.

Различают два режима генерации – «мягкий» и «жесткий». Первый реализуется при появлении на входе усилителя сколь угодно малых изменений напряжения (флуктуаций), а второй – при подаче на вход усилителя напряжения, превышающего некоторый пороговый уровень.

При стабильной частоте колебаний условия баланса фаз и баланса амплитуд должны выполняться на одной частоте.

Существуют два типа *генераторов гармонических колебаний*: генераторы с колебательными контурами (LC -генераторы) и генераторы с фазосдвигающими RC -цепочками (RC -генераторы).

Генераторы первого типа содержат колебательный контур в цепи обратной связи или в цепи нагрузки. Контур выступает в роли фильтра для выделения колебаний в узкой полосе частот. Для таких генераторов выполняется условие баланса амплитуд на резонансной частоте контура.

На рисунке 8.2 представлена простейшая схема LC -генератора, собранного на транзисторе VT , включенном по схеме с общим эмиттером, с параллельным колебательным контуром $L_k C_k$ в цепи коллектора. Цепь обратной связи сформирована обмоткой L_B , индуктивно связанной с индуктивным элементом L_k контура. Усилитель генератора выполнен по схеме с фиксированным напряжением смещения с помощью делителей R_{B1} и R_{B2} напряжения и термостабилизацией в виде $R_Э C_Э$ -цепи.

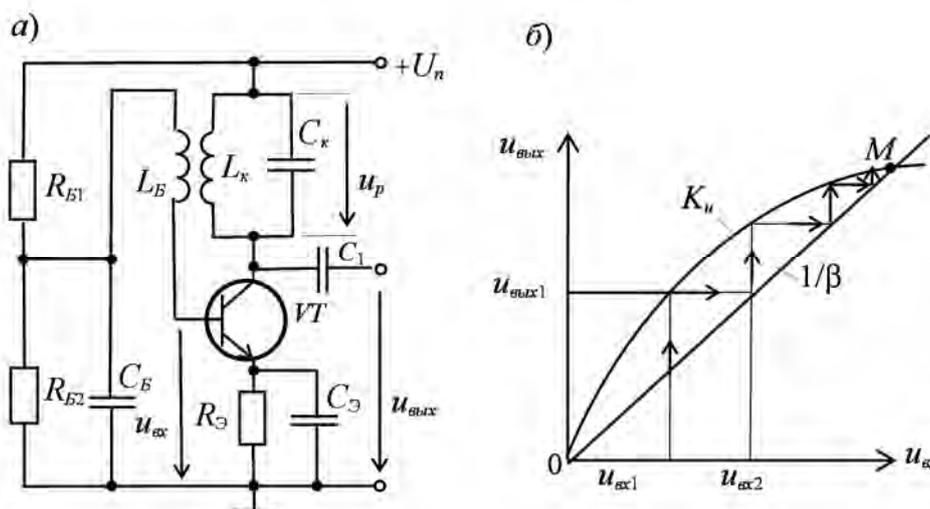


Рисунок 8.2 – Генератор гармонических колебаний с LC -контуром (а) и его характеристика (б)

Коллекторный ток, появившийся в момент включения источника питания U_n , заряжает конденсатор C_k , который затем разряжается через обмотку L_k , что приводит к возникновению в контуре колебаний с резонансной частотой:

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{L_k C_k} .$$

Эти колебания напряжения посредством индуктивной связи передаются на базу транзистора VT с обмотки L_B , вызывая колебания напряжения $u_{вх}$ на входе усилителя и пульсации тока коллектора, которые, подпитывая $L_k C_k$ -контур, восполняют в нем активные потери энергии. Чтобы колебания были незатухающими, нужно выполнить указанные выше два условия самовозбуждения.

Баланс фаз удовлетворяется, если обмотка L_B включена таким образом, что

фаза индуктируемой в ней ЭДС находится в противофазе с напряжением контура u_P (сдвиг фаз 180°), поскольку напряжение $u_{вых}$ в однокаскадном усилителе с ОЭ противофазно напряжению $u_{вх}$. В этом случае общий сдвиг фаз составляет $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$. На практике если генератор не возбуждается, то необходимо поменять полярность обмотки L_B на противоположную.

Второе условие самовозбуждения – баланс амплитуд – сводится к тому, чтобы коэффициент усиления был больше или равен $1/\beta$, т. е. $K_u \geq 1/\beta$.

Рассматриваемый генератор реализует мягкий режим возбуждения, что видно из рисунка 8.2, б. $K_u = u_{вых} / u_{вх}$ – амплитудная характеристика усилителя без обратной связи; $1/\beta = u_{вх.ос} / u_{вых}$ – прямая, характеризующая обратную связь.

Условию $K_u \beta > 1$ на графике соответствует расположение кривой K_u над прямой $1/\beta$ на участке OM , при этом наблюдается увеличение амплитуды сигнала на выходе генератора.

Пусть наличие колебания $u_{вх1}$ вызвало на выходе (в соответствии с кривой K_u) колебание $u_{вых1}$, которое через ПОС создает на входе возросшее колебание $u_{вх2}$, что вызовет дальнейшее увеличение выходного напряжения до тех пор, пока не будет достигнута точка M (см. рисунок 8.2, б), в которой $K_u = 1/\beta$ или $K_u \beta = 1$ (стационарный режим колебаний).

Преимущества LC -генераторов: низкие нелинейные искажения выходного сигнала, большой диапазон настройки частоты генерации.

К недостаткам можно отнести: большие габариты, неудовлетворительную работу на низких частотах.

Стремление уменьшить габариты и массу генераторов привели к тому, что вместо индуктивных катушек в низкочастотных автогенераторах гармонических колебаний стали использовать резисторы в сочетании с конденсаторами, формируя частотно-зависимые цепи обратной связи.

Условия генерации для RC -генератора совпадают с таковыми для LC -генератора: колебания должны возникнуть и поддерживаться на одной-единственной частоте, для которой выполняется условие баланса амплитуд и условие баланса фаз.

На практике распространение получили два типа таких генераторов: генераторы с фазосдвигающими RC -цепочками и генераторы с мостом Вина.

В однокаскадном резисторном усилителе выходное напряжение сдвинуто относительно входного на угол 180° . Для образования на его базе генератора в цепи обратной связи необходимо осуществить фазовый сдвиг выходного напряжения на угол 180° или минус 180° . Тогда будет достигнут баланс фаз и станет возможным возбуждение колебаний. Для получения такого сдвига фаз в цепь обратной связи включаются фазосдвигающие RC -цепочки. Так как одна дифференцирующая и интегрирующая цепочки создают сдвиг фаз менее 90° , то применяются обычно трех- и четырехзвенные цепочки в виде R -параллелей (рисунок 8.3, а) или C -параллелей (рисунок 8.3, б).

Схема RC -генератора на биполярном транзисторе с фазосдвигающей RC -цепочкой в виде трехзвенной R -параллели представлена на рисунке 8.4.

Частота генерируемых такими схемами синусоидальных колебаний при условии равенства сопротивлений резисторов R и ёмкостей C конденсаторов во



всех трех звеньях определяется формулой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}} = \frac{1}{15,4RC} = \frac{0,065}{RC}.$$

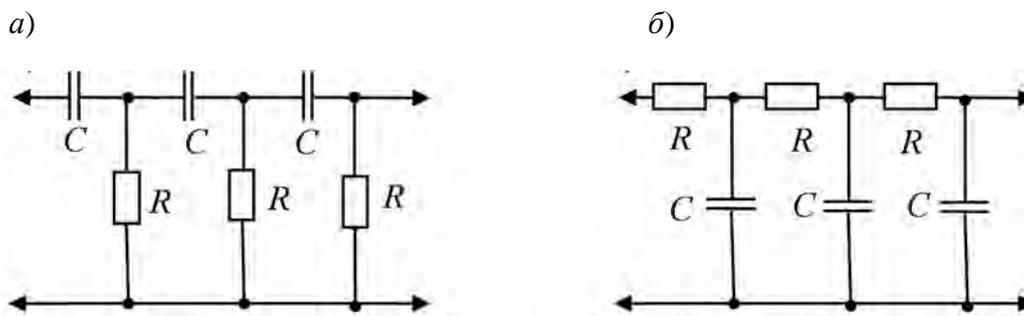


Рисунок 8.3 – Схемы фазосдвигающих RC -цепочек в виде трехзвенной R -параллели (а) и четырехзвенной C -параллели (б)

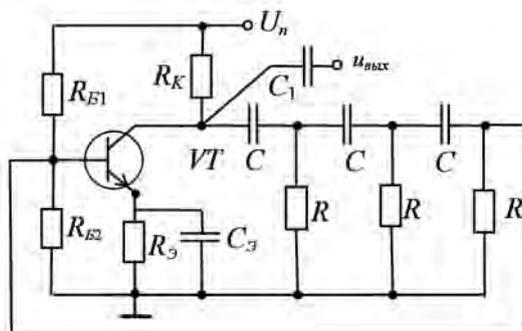


Рисунок 8.4 – Схема RC -генератора с трехзвенной фазосдвигающей цепью на биполярном транзисторе

Каждая RC -цепь ослабляет сигнал, как показывают расчеты, отношение $u_{вх} / u_{вых}$ на фазовозврателе равно $\beta = 29$, поэтому для обеспечения условия баланса амплитуд коэффициент усиления собственно усилителя должен удовлетворять условию: $K_u \geq 29$.

В качестве усилителя удобно использовать операционный усилитель, наличие прямого и инверсного входов в нем предоставляет свободу выбора цепей обратной связи. Рассмотрим генератор гармонического сигнала на операционном усилителе с мостом Вина в цепи обратной связи (рисунок 8.5).

Частоту генерации определяют по формуле

$$f_1 = 1 / (2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_3 R_4}).$$

При $C = C_1 = C_2$, $R = R_3 = R_4$ частота выходного напряжения $f_1 = 1 / (2\pi RC)$.

На неинвертирующий вход ОУ поступает сигнал положительной обратной связи, а несколько меньший по амплитуде сигнал отрицательной обратной связи поступает на инвертирующий вход ОУ, состоящей из резисторов R_1 и R_2 .

Для обеспечения нормальной работы автогенератора коэффициент усиления по напряжению усилителя должен иметь значение

$$K_u = 1/\beta \geq 3.$$

В реальном RC -генераторе обычно частота плавно перестраивается в пределах заданного диапазона, для чего используются сдвоенные переменные резисторы R_3 и R_4 или сдвоенный блок конденсаторов C_1 и C_2 с изменяемыми ёмкостями.

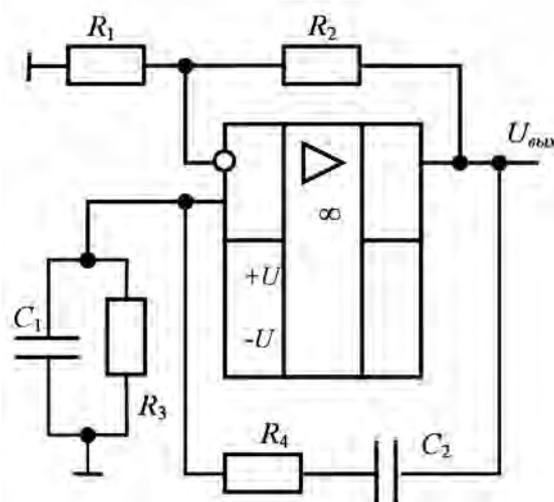


Рисунок 8.5 – Генератор гармонических колебаний на операционном усилителе с мостом Вина и цепью обратной связи

Если пассивные электрические цепи генератора не обладают избирательными свойствами, то период колебаний определяется не собственной частотой колебательной системы генератора (такой системы может и не быть вообще), а временем релаксации или временем установления равновесия в цепи.

В таких генераторах выполняются условия баланса амплитуд и баланса фаз для диапазона частот, поэтому генерируются одновременно много частот. Соответственно, в генераторах негармонических колебаний выходное напряжение имеет форму импульсов. Наблюдаются чередующиеся быстрые и относительно медленные изменения выходного напряжения. Такие колебания называют релаксационными. Форма колебаний релаксационных генераторов весьма разнообразна: от скачкообразных до близких к гармоническим.

Одним из наиболее распространенных генераторов негармонических колебаний является мультивибратор.

Транзисторный *мультивибратор* представляет собой двухкаскадный резисторный усилитель, у которого выход первого каскада соединен со входом второго, а выход второго – со входом первого. Обратная связь является положительной, осуществляется в широком диапазоне частот, коэффициент обратной связи равен единице. Наиболее распространены мультивибраторы с включением транзисторов по схеме с общим эмиттером и постоянным током смещения базы. Схема такого мультивибратора приведена на рисунке 8.6.

Колебательный процесс происходит вследствие поочередного накопления энергии в соответствующих конденсаторах от источника питания и в последующей их разрядке через цепи транзисторов.

В *симметричном* транзисторном мультивибраторе, собранном из сходных элементов (транзисторов $VT1$ и $VT2$, резисторов с сопротивлениями $R_{K1} = R_{K2} = R_K$; $R_{B1} = R_{B2} = R_B$ и конденсаторов с ёмкостями $C_1 = C_2 = C$) транзисторы работают в ключевом режиме, причём если один из них открыт, то в это время другой заперт и наоборот. Мультивибратор имеет два состояния квазиравновесия; пусть в одном из них транзистор $VT1$ находится в состоянии насыщения (т. е. открыт), а транзистор $VT2$ заперт. Это состояние квазиравновесия неустойчиво, т. к. отрицательный потенциал на базе закрытого транзистора $VT2$ по мере разрядки конденсатора C_1 через резистор R_{B2} стремится к положительному потенциалу источника питания U_n . Отметим, что зарядка конденсатора C_2 через сопротивление R_{K2} , разряженного к моменту открытия транзистора $VT1$, идет быстрее, чем разрядка конденсатора C_1 через сопротивление R_{B2} , а открытое состояние транзистора $VT1$ поддерживается постоянным током i_{Bn} . В момент, когда потенциал базы транзистора $VT2$ станет близким к нулю, состояние квазиравновесия нарушится, закрытый транзистор $VT2$ отпирается, открытый $VT1$ запирается и мультивибратор переходит в новое состояние квазиравновесия. На выходе формируются почти прямоугольные импульсы $u_{вых}$ при единичной скважности (рисунок 8.6, б).

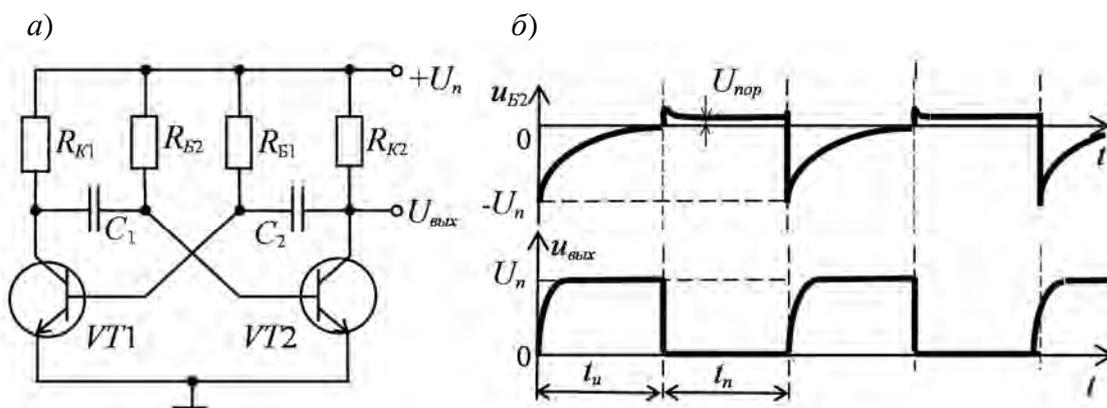


Рисунок 8.6 – Схема симметричного мультивибратора (а) и осциллограммы выходного напряжения (б)

Амплитуда генерируемых импульсов приблизительно равна напряжению питания U_n , а период колебаний симметричного мультивибратора

$$T = t_u + t_n = 2R_B C \ln 2 \approx 1,4R_B C.$$

В *несимметричном* мультивибраторе (при неравенстве параметров резистивных и ёмкостных элементов схемы) длительности импульса t_u и паузы t_n неодинаковы вследствие различной продолжительности запертых состояний транзисторов $VT1$ и $VT2$.

Мультивибратор можно также реализовать на операционном усилителе, логических элементах.

8.2 Порядок выполнения работы

8.2.1 На основании заданного преподавателем значения частоты f необходимо рассчитать: сопротивление R и емкость C фазоинвертора для RC-генератора с фазосдвигающими цепочками (см. рисунок 8.4), сопротивление R и емкость C генератора с мостом Вина (см. рисунок 8.5), емкость C и сопротивление R_6 мультивибратора (см. рисунок 8.6). Выбрать стандартные значения сопротивлений из ряда E24, заполнить таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Исходные данные и результаты расчета

f	RC-генератор с фазосдвигающими цепочками		RC-генератор с мостом Вина		Мультивибратор	
	R , Ом	C , мкФ	R , Ом	C , мкФ	R_6 , Ом	C , мкФ

8.2.2 Для подтверждения правильности расчетов произвести моделирование работы генераторов в программе Multisim, собрав схемы, приведенные на рисунках 8.7–8.9. Номиналы элементов установить согласно таблице 8.1. Параметры усилителей взять из практических занятий.

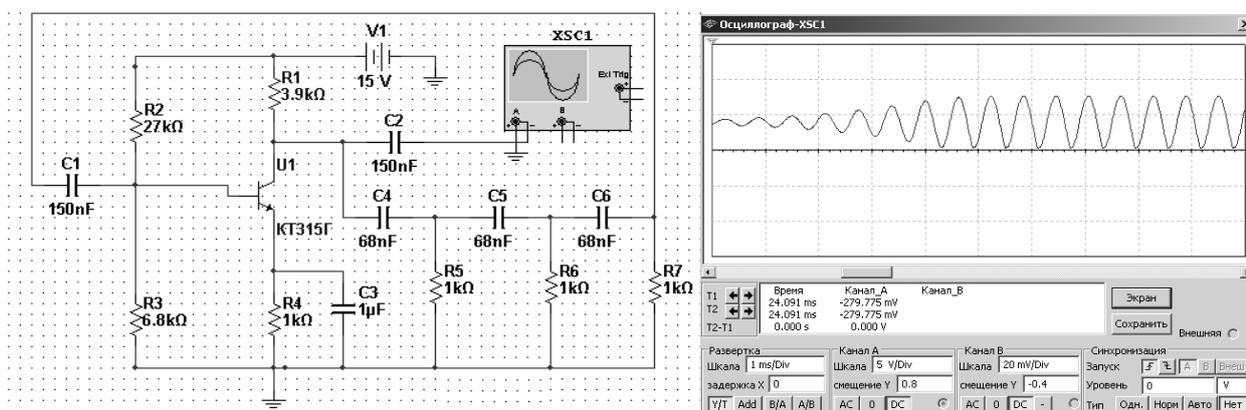


Рисунок 8.7 – RC-генератор

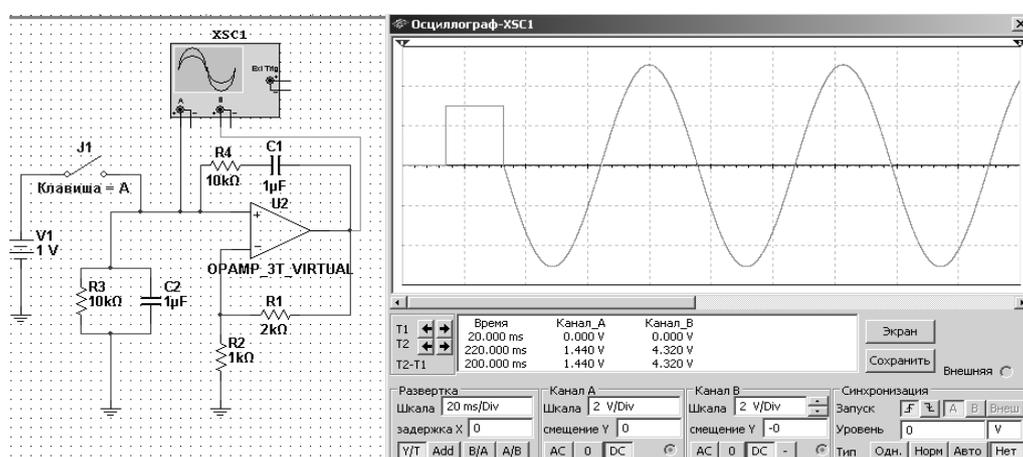


Рисунок 8.8 – Генератор с мостом Вина в обратной связи

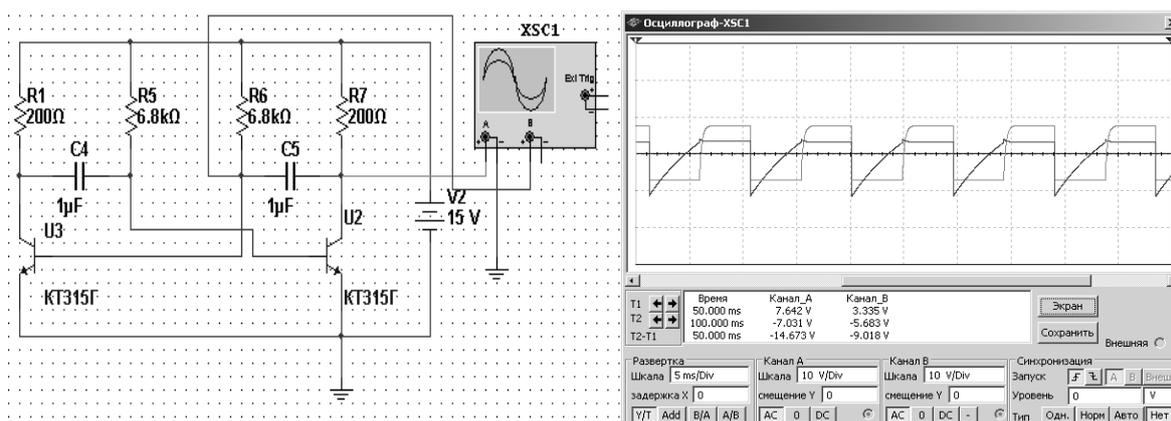


Рисунок 8.9 – Симметричный мультивибратор

Промоделировать работу генераторов, снять осциллограммы, определить частоту генерации f , действующее значение напряжения U , нелинейные искажения K_2 – для генератора гармонических колебаний, амплитуду U_m и время фронта t_ϕ импульса – для мультивибратора. Заполнить таблицу 8.2.

Исследовать влияние напряжения питания, значения RC -цепей на параметры выходного сигнала.

Таблица 8.2 – Результаты моделирования и эксперимента

Способ исследования	RC -генератор с фазосдвигающими цепями			RC -генератор с мостом Вина			Мультивибратор		
	f , Гц	U , В	K_2 , %	f , Гц	U , В	K_2 , %	f , Гц	U_m , В	t_ϕ , мс
Моделирование									
Эксперимент	–	–	–				–	–	–

8.2.3 Для экспериментального исследования RC -генератора с мостом Вина в цепи ПОС на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 8.10.

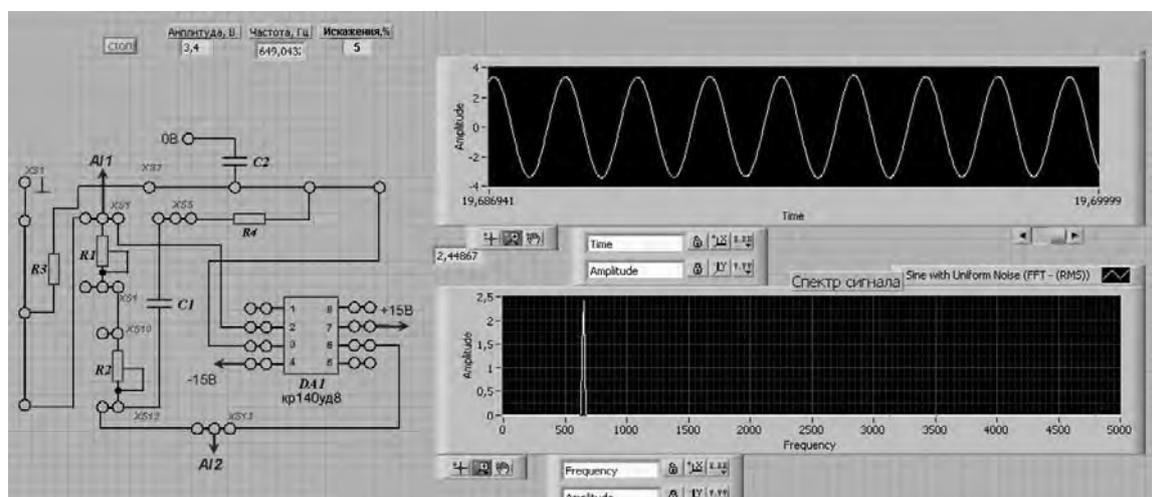


Рисунок 8.10 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования генератора с мостом Вина в среде LabVIEW

Напряжение питания операционного усилителя (+15 В, –15 В) на схему подается с блока управления К32 или источника НУ 3002-D2. Выходной сигнал генератора снимается каналом AI1 устройства сбора данных NI USB-6009. Виртуальный прибор в среде LabVIEW (рисунок 8.11) отображает частоту f , действующее значение U и коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала.

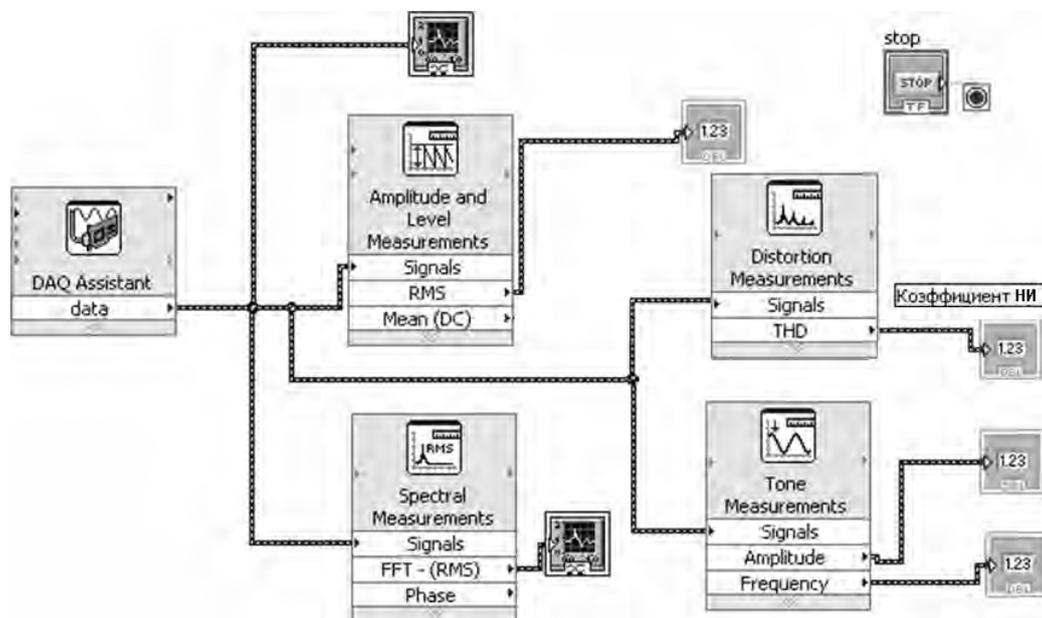


Рисунок 8.11 – Блок-диаграмма для исследования в среде генератора с мостом Вина в среде LabVIEW

Сравнить результаты расчета и моделирования с экспериментальными данными, заполнить таблицу 8.2.

8.2.4 Сделать выводы по результатам работы.

Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы для моделирования работы генераторов в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, осциллограммы выходных напряжений, основные параметры генераторов (таблицы 8.1, 8.2), выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите признаки классификации генераторов электрических сигналов.
- 2 Приведите деление генераторов по частоте.
- 3 Как делятся генераторы по типу частотно-избирательных цепей?
- 4 В чем заключаются отличия структурных схем генератора и избирательного усилителя?
- 5 Какую роль в схеме генератора выполняет цепь ООС?



6 В чем состоит отличие генератора гармонических колебаний от генератора негармонических колебаний?

7 Назовите основной признак трехточечных схем генераторов гармонических колебаний.

8 Обоснуйте необходимость применения RC генераторов.

9 В чем заключается недостаток RC генераторов и как он может быть устранен?

Список литературы

1 **Марченко, А. Л.** Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

2 **Лачин, В. И.** Электроника : учебное пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2009. – 703 с.

3 **Батоврин, В. К.** LabVIEW: практикум по электронике и микропроцессорной технике : учебное пособие для вузов / В. К. Батоврин, А. С. Бессонов, В. В. Мошкин. – Москва : ДМК Пресс, 2005. – 182 с.

4 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника: курсовые работы с методическими указаниями и примерами / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опачий. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 126 с.

5 **Клочков, М. И.** Расчет элементов и моделирование схем энергетической и информационной электроники : учебное пособие / М. И. Клочков. – Хабаровск : ДВГУПС, 2004. – 138 с.

6 **Панфилов, Д. И.** Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Лаборатория на компьютере : в 2 т. / Д. И. Панфилов ; под общ. ред. Д. И. Панфилова. – Москва : МЭИ, 2004.

7 **Москатов, Е. А.** Справочник по полупроводниковым приборам / Е. А. Москатов. – Москва : Радио, 2005. – 208 с.

8 **Ткаченко, Ф. А.** Техническая электроника / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2002. – 368 с.

9 **Миленина, С. А.** Электротехника, электроника и схемотехника : учебник и практикум для академ. бакалавриата / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. – Москва : Юрайт, 2015. – 399 с.

10 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника : в 2 т. Том 1 : Электротехника / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опачий. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 574 с.

11 **Перельман, Б. Л.** Отечественные микросхемы и зарубежные аналоги : справочник / Б. Л. Перельман, В. В. Шевелев. – Москва : Микротех, 2000. – 375 с.

12 Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА : справочник / Н. Н. Акимов [и др.]. – Минск : Беларусь, 1994. – 591 с.

