

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич  
Должность: ректор  
Дата подписания: 15.02.2022 14:29:38  
Уникальный программный ключ:  
9ba7d3e34c012eba460d1094c1b195e7300e2574c195c0e536f6c0

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра механики, мехатроники и робототехники



УТВЕРЖДАЮ  
проректор по учебной работе  
О.Г. Локтионова  
\_\_\_\_\_ 2022 г.

## СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА В МЕХАТРОНИКЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления подготовки  
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

Курск 2022

УДК 621

Составители: к.т.н. *Яцун А.С.*

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Е.Н. Политов*

**Силовые электронные устройства в мехатронике:**  
методические указания к выполнению лабораторных работ для  
студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и  
робототехника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. А.С. Яцун. Курск, 2022. 43 с.

Методические указания содержат лабораторные работы об  
исследованиях силовых систем управления мехатронными  
устройствами, преобразователями мощности, коммутации  
исполнительных устройств.

Методические указания соответствуют требованиям Федерального  
государственного образовательного стандарта.

Предназначены для студентов направления подготовки 15.03.06 –  
Мехатроника и робототехника всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 10.02.2022. . Формат 60x84 1/16 Усл.печ.л. 2,5.

Уч.-изд.л. 2,3 Тираж 20 экз. Заказ 718, Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Содержание

Общие требования к выполнению лабораторных работ .....	4
1. Лабораторная работа: Исследование однофазных схем выпрямления .....	5
2. Лабораторная работа: Исследование силовых драйверов управление электроприводами .....	13
3. Лабораторная работа: Исследование силовых транзисторных ключей IGBT .....	19
4. Лабораторная работа: Инверторы, исследование системы формирования импульса управления для схемы выпрямления .....	27
5. Лабораторная работа: Цифровые силовые преобразователи энергии (на примере мостового ШИП) .....	36
Рекомендуемая литература .....	43

## Общие требования к выполнению лабораторных работ

Изучение наиболее важных тем и разделов завершают лабораторные и практические занятия, которые обеспечивают закрепление учебного материала, развитие навыков работы с оборудованием, приобретение опыта устных выступлений, аргументации и защиты выдвигаемых положений и тезисов.

При выполнении работ у учащихся формируются следующие компетенции:

- ПК-3 способностью разрабатывать экспериментальные макеты управляющих, информационных и исполнительных модулей мехатронных и робототехнических систем и проводить их экспериментальное исследование с применением современных информационных технологий
- ПК-5 способностью проводить эксперименты на действующих макетах, образцах мехатронных и робототехнических систем по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных технологий и технических средств
- ПК-23 готовностью к участию в работах по изготовлению, отладке и сдаче в эксплуатацию мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей

Лабораторные занятия включают в себя:

- а) теоретическую подготовку студента к занятию, в ходе которой студент обязан осмыслить теоретический материал, выносимый на занятие, и заучить основные законы и формулы;
- б) выполнение лабораторной работы на занятии;
- в) написание отчета по выполненной лабораторной работе;
- г) защита лабораторной работы.

Каждый отчет должен быть подготовлен самостоятельно и соответствовать требованиям:

- отчет содержит титульный лист, описание выполняемого задания, описание проделанной работы, анализ полученных результатов, выводы, список использованной литературы;
- отчет выполняется на листах формата А4, 14 кегль, одинарный межстрочный интервал;
- список литературы оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003.

# 1. Лабораторная работа: Исследование однофазных схем выпрямления

## **Цель работы:**

1. Изучение устройства и принципа работы неуправляемых выпрямителей однофазных однополупериодных и двухполупериодных схем выпрямления тока.
2. Изучение работы сглаживающих фильтров типа "L", "C" и "LC".

**Объект исследования:** неуправляемый выпрямитель.

**Аппаратные средства:** пакет моделирования Proteus Professional demonstration или MultiSim.

## **1. Краткие теоретические сведения**

Выпрямительные устройства являются преобразователями переменного тока в постоянный ток и входят составной частью в большинство источников вторичного электропитания.

Виды выпрямителей:

- однофазные;
- трехфазные;
- многофазные.

Мощные выпрямители, мощностью более 1 кВт, как правило, выполняются по трехфазной и многофазной схеме и применяются для электродвигателей постоянного тока, для питания соленоидов постоянного тока, для теплоэлектронагревательных элементов системы отопления, для электрофильтров и др.

Однофазные маломощные выпрямители, устройства мощностью менее 1 кВт, применяются практически во всех источниках питания, электронных систем измерения, анализа, контроля и управления, электроприводов постоянного тока, систем автоматического управления и т. п.

Выпрямители, как правило, работают со сглаживающими фильтрами. Типы фильтров:

- емкостные (типа «C»);
- индуктивные (типа «L»)
- комбинированные «LC» фильтры.

Применение различных типов фильтров:

Емкостные фильтры применяются в маломощных источниках питания, предназначенных для измерения, анализа, контроля и управления при значениях выпрямленного тока менее 1 А ( $I_n \leq 1$  А).

Индуктивные фильтры используются в мощных источниках питания электродвигателей постоянного тока, преобразователях, сварочных аппаратах и т. п., в которых значения выпрямленного тока более 1 А ( $I_n \geq 1$  А), так как они более эффективны именно в режиме больших токов.

В комплекс выпрямительного устройства (источника вторичного электропитания – ИВЭ), изображенного на рис. 1.1, входят следующие элементы:

Tr - трансформатор, для согласования требуемых напряжений.

В - диоды или вентили, непосредственно преобразующие переменный ток в постоянный, за счет пропускания тока только в одном направлении.

Ф - фильтры, уменьшающие амплитуду пульсаций выпрямленного напряжения, но не влияющие на его частоту.

К выходу фильтра подключается нагрузка  $R_H$ .

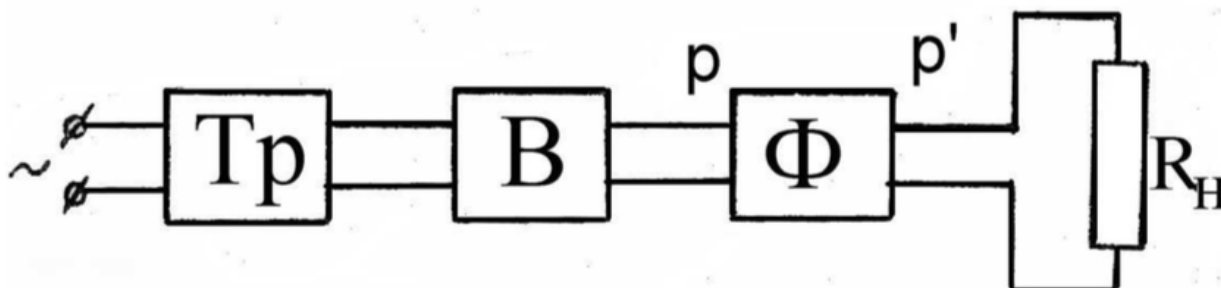


Рисунок 1.1 - Структурная схема источника вторичного электропитания.

Как источник постоянного тока, выпрямитель характеризует следующие параметры:

$U_H$  - номинальное выпрямленное напряжение;

$I_H$  - номинальный выпрямленный ток;

$U_{обр.мах}$  - максимальное обратное напряжение, приложенное к диоду в непроводящую часть периода;

$P_{тр}$  - расчетная мощность трансформатора;

$R_{вых}$  - выходное сопротивление на постоянном токе;

$q$  - коэффициент пульсации выпрямленного напряжения;  $U_2$  - переменное напряжение на входе выпрямителя.

Основной характеристикой выпрямителя, как источника питания, является его нагрузочная характеристика, которая называется внешней характеристикой выпрямителя.

Эта характеристика представляет собой зависимость выпрямленного напряжения от величины нагрузочного (выпрямленного) тока и записывается как  $U_H = f(I_H)$ .

По этой характеристике для любого выпрямителя может быть определено его выходное сопротивление при номинальных значениях выпрямленного тока  $I_H$  и напряжения  $U_H$  по выражению:

$$R_{вых} = \left| \frac{\Delta U_H}{\Delta I_H} \right|.$$

Фильтр, стоящий между выпрямителем и нагрузкой, уменьшает амплитуду пульсаций выпрямленного напряжения, передаваемого в нагрузку, т. е. оказывает сглаживающее действие.

Работа фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания  $S_{\phi}$ , равным отношению коэффициентов пульсации на входе фильтра  $q_{вх}$  (на выходе выпрямителя) и на выходе фильтра  $q_{вых}$  (на нагрузке):

$$S_{\phi} = q_{вх} / q_{вых}.$$

Величина коэффициента сглаживания фильтра всегда больше единицы.

Параметры элементов выпрямительного устройства зависят от величины выпрямленного напряжения  $U_n$  и тока  $I_n$  нагрузки.

Схема соединения диодов выбирается, исходя из требуемой формы и величины выпрямленного тока, напряжения и типа применяемого фильтра. В работе рассматриваются однофазные выпрямительные схемы с идеальными характеристиками элементов. Идеализация сводится к следующему:

1. Сопротивление диода (вентиля) в проводящем направлении считается равным нулю, а в непроводящем направлении равным бесконечности. При этом потери напряжения в прямом направлении будут равны нулю, и ток в обратном направлении в непроводящую часть периода также будет равен нулю.
2. Также не учитываются потери в фильтре на активном сопротивлении реактивных элементов.

Подобная идеализация в малой степени изменяет количественное соотношение между параметрами выпрямителя, и не изменяет качественной картины происходящих процессов. Зато значительно упрощает эксперимент и понимание происходящих процессов.

В данной работе рассматриваются следующие однофазные схемы:

- однофазная однополупериодная;
- однофазная мостовая (двухполупериодная).

Схема однофазного однополупериодного выпрямителя, работающего на активную нагрузку, работает следующим образом. Во время положительного полупериода переменного напряжения  $U_{вх}$ , к аноду диода  $D$  приложено положительное напряжение, и диод пропускает ток в нагрузку  $R_n$ .

Ток будет протекать в течение всего положительного полупериода питающего напряжения  $U_{вх}$ . При смене полярности напряжение  $U_{вх}$ , диод не будет пропускать

тока и к нему будет приложено обратное напряжение, максимальное значение которого  $U_{обр.мах} = 2 \cdot U_{вх}$ . Работу выпрямителя рассматривают с помощью временных диаграмм.

## 2. Выполнение работы

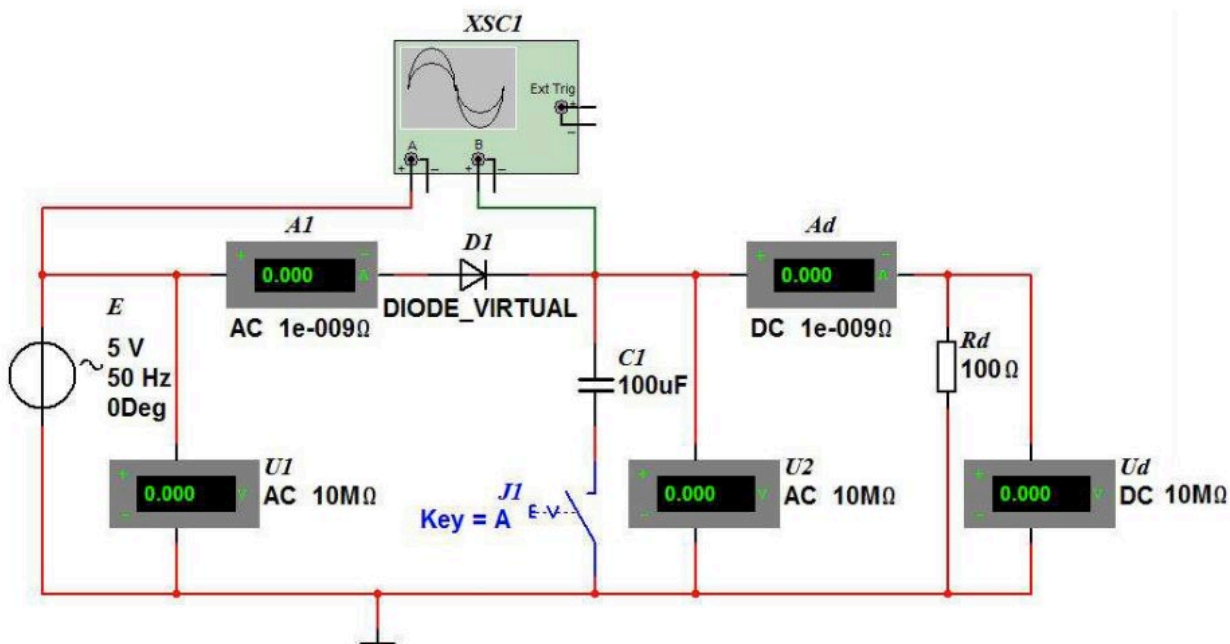


Рисунок 1.2 – Схема для моделирования работы бестрансформаторного однополупериодного выпрямителя

Подготовьте схему к проведению исследований. С этой целью установим:

- действующее значение ЭДС источника напряжения:  $E = (5 + N)$ , В ( $N$  - согласно номеру варианта в учебном журнале группы или номеру компьютера), частоту ЭДС  $f = 50$  Гц, начальный угол сдвига фазы  $\psi = 0$ ;
- значение резистора:  $R_d = 100$  Ом;
- емкость батареи конденсаторов:  $C = 100$  мкФ;
- режим AC работы вольтметра  $V_1$ ,  $V_2$  и амперметра  $A_1$ ; режим DC работы вольтметра  $V_d$  и амперметра  $A_d$ ; и внутренние сопротивления измерительных приборов оставить установленными по умолчанию;
- различные цвета проводов подходящих к каналу А и В осциллографа – нажав правой кнопкой мыши на проводе;
- чувствительность 50 В/дел (50 V/div) канала А осциллографа; чувствительность 100 В/дел (100 V/div) канала В (см. рис. 1.3); длительность развертки (Time base) в режиме Y/T – 5мс/дел (5 ms/div).

**Задание:** Снять внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя при работе на чисто активную нагрузку.



После проверки собранной схемы запустить моделирование ее работы (щелкнуть мышью на кнопке запуска моделирования). Открыть лицевую панель осциллографа, установить визирную линию на экране осциллографа приблизительно на максимальное значение исследуемого сигнала и сохранить полученный график, как в примере на рис. 1.3. Измерить амплитуду выпрямленного напряжения  $U_{mv}$ . Полученное значение и показания всех приборов занести в отчет.

Далее, изменяя сопротивление нагрузки  $R_d$  от 70 до 100 Ом при неизменном напряжении сети измерить амплитуду выпрямленного напряжения  $U_{mv}$ . Полученные значения и показания всех приборов записать в отчет.

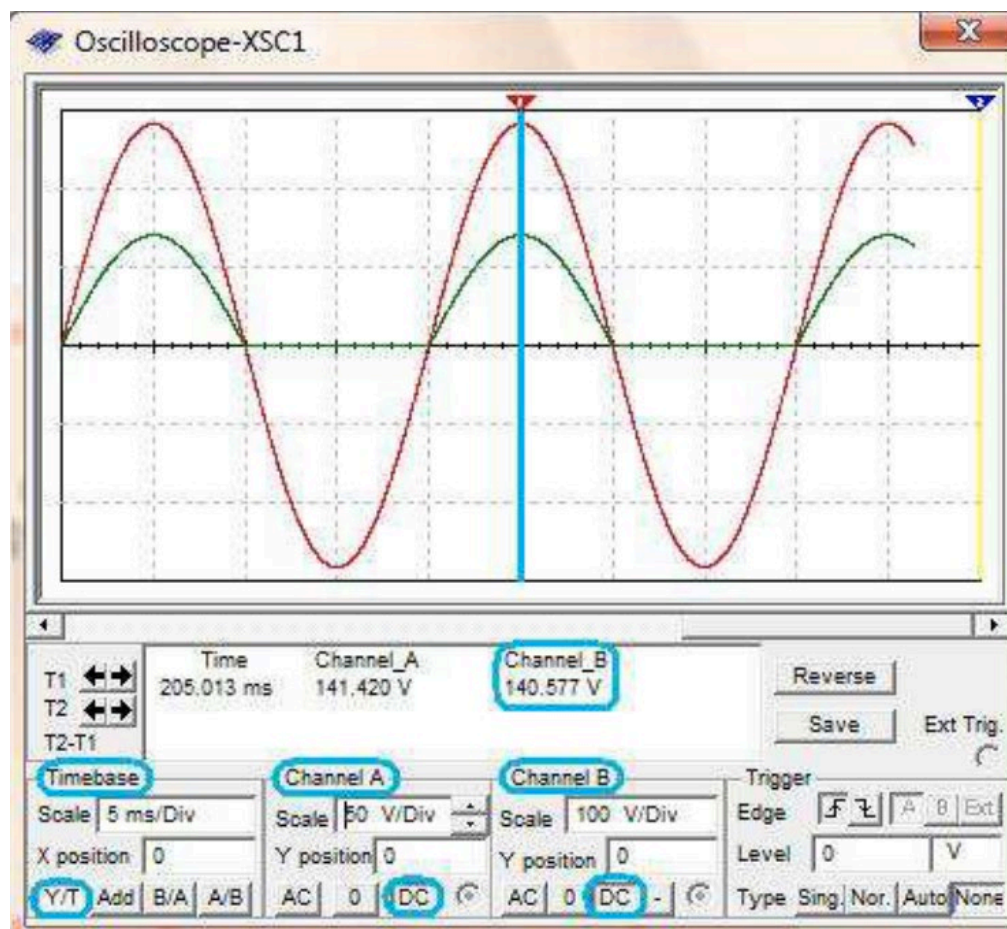


Рисунок 1.3 – Осциллограмма результатов моделирования

Далее соберите на рабочем поле среды моделирования схему однофазного мостового выпрямителя (рис. 1.4.)

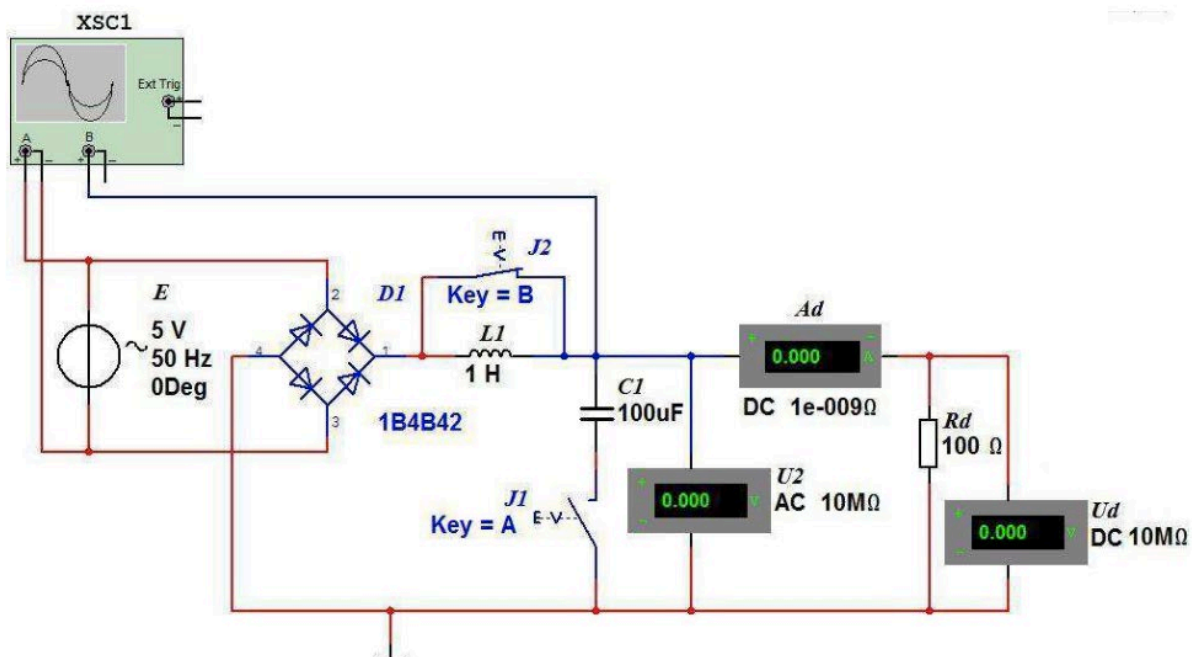


Рисунок 1.4 – Схема для моделирования работы однофазного мостового выпрямителя

**Задание:** Снять внешнюю характеристику однофазного мостового выпрямителя при работе на чисто активную нагрузку.

После проверки собранной схемы запустить моделирование ее работы. Открыть лицевую панель осциллографа, установить чувствительность 50 В/дел (50 V/div) канала А; визирную линию на экране осциллографа приближенно на максимальное значение исследуемого сигнала.

Сохранить с экрана осциллографа форму напряжений (рис. 1.5). Измерить амплитуду выпрямленного напряжения  $U_{mv}$ . Полученное значение и показания всех приборов записать в отчет.

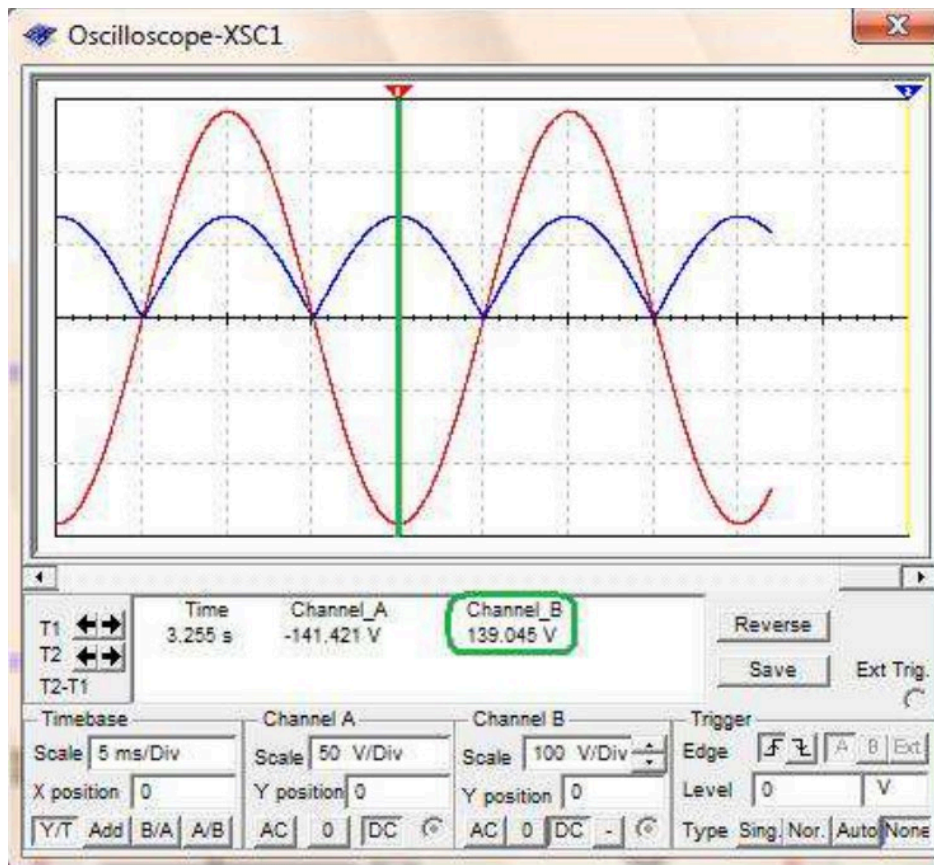


Рисунок 1.5 – Осциллограмма результатов моделирования

Далее изменяя сопротивление нагрузки  $R_d$  от 70 до 10 Ом при неизменном напряжении сети измерить амплитуду выпрямленного напряжения  $U_{mv}$ . Полученные значения и показания всех приборов записать в отчет.

### 3. Контрольные вопросы

1. Каковы основные параметры выпрямителей?
2. Каково назначение основных элементов выпрямительной схемы?
3. Что такое выпрямленное напряжение?
4. Принцип работы однофазного мостового выпрямителя.
5. Каковы основные параметры фильтра?
6. Что такое коэффициент пульсаций и как его вычисляют?
7. Как экспериментально определить коэффициент пульсации?
8. В какой из рассмотренных схем выпрямления обратное напряжение выше и почему?
9. Что такое коэффициент сглаживания и как его вычисляют?
10. Как влияет на величину выпрямленного напряжения подключение емкости параллельно нагрузке?
11. Как изменяется коэффициент пульсаций при подключении емкости параллельно нагрузке?
12. Если емкость фильтра бесконечна, чему напряжение?
13. Какова частота пульсаций однофазных выпрямителей?
14. Как отразится на работе мостовой схемы выпрямления обрыв одного из диодов?

15. Как отразится на работе мостовой схемы выпрямления короткое замыкание одного из диодов?

16. В каких случаях целесообразно использовать в выпрямителях: а) индуктивный фильтр;

б) емкостной фильтр?

## 2. Лабораторная работа: Исследование силовых драйверов управление электроприводами

**Цель работы:** Ознакомление с усилителями мощности (мостовыми драйверами), построение принципиальных схем подключения электроприводов.

**Объект исследования:** плата *MoviPower* или аналог.

**Аппаратные средства:** Источник питания *GPR-1850HD 0-18V-50A* (инв. 204.4462), Осциллограф цифровой запоминающий *RTE1034* (инв. 234.1164), Мультиметр *Fluke 18b* (инв. 234.1195), Мобильный реабилитационный робототехнический комплекс «Экзоскелет *E1*» (инв. 224.5), Частотно-регулирующий привод *SV015iC5-1F-RUS* (204.2236)

### 1. Общие теоретические сведения

Усилители мощности (мостовые драйверы) предназначены для управления двигателями постоянного тока, лампами накаливания, нагревательными элементами и другими устройствами. Принцип их работы – регулирование напряжения на нагрузке, подключенной к усилителю в диапазоне от  $-PVCC$  до  $+PVCC$ , где  $PVCC$  – напряжение питания силовой части усилителя.

Управление усилителем осуществляется посредством двух сигналов: ШИМ (широтно-импульсная модуляция), скважностью которого определяется выходное напряжение, и знака, определяющего полярность выходного напряжения. Включение и выключение работы усилителя осуществляется сигналом *Enable*. Все сигналы являются TTL –совместимыми и гальванически развязаны с рабочими элементами усилителя.

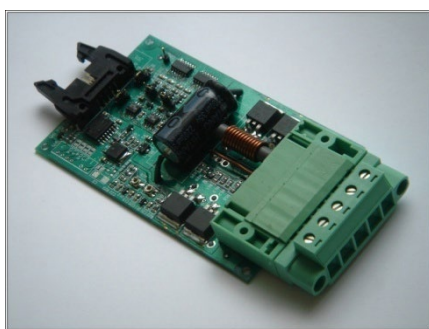


Рисунок 2.1 – Общий вид силового драйвера

Основные характеристики:

- Выходное напряжение – до 100 В
- Выходной ток – до 60 А, непрерывный
- Напряжение питания логической части – 12 В
- Частота ШИМ – до 30 кГц
- Гальваническая развязка управляющих сигналов

- Возможность реверса напряжения
- Защита от перегрузки по току
- 3.3 В и 5 В TTL-совместимое управление
- Включение и выключение по внешнему сигналу

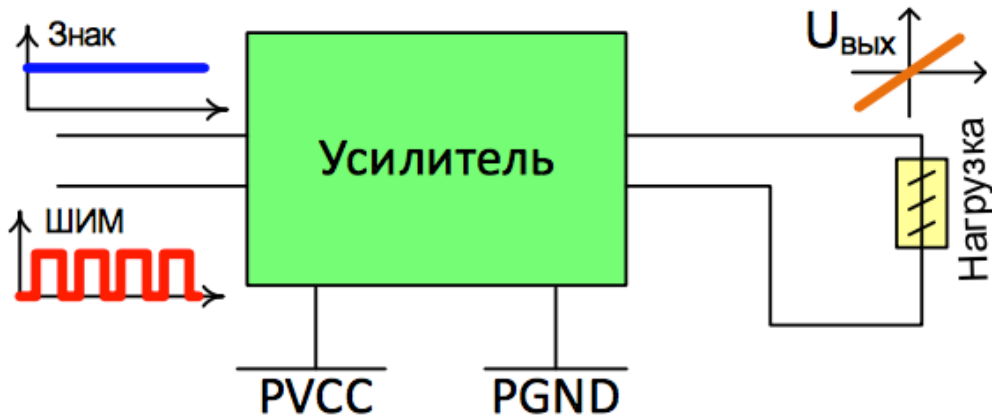


Рисунок 2.2 – Схема подключения драйвера

Рассмотрим электрические характеристики драйверов серии MoviPower

	мин.	тип.	макс.	ед.
Напряжение питания логической части LVCC	10.8	12	13.7	В
Рабочее напряжение VCC, коммутируемое усилителем, не более <sup>4</sup>			100	В
Рабочий ток (постоянная работа), не более			60	А
Ток в импульсе, не более			150	А
Собственное потребление платы усилителя			100	мА
Уровень логического нуля на входе			1.0	В
Уровни логических сигналов	2.7	3.3	5.5	В
Частота ШИМ <sup>5</sup>		20	30	кГц

**Устройство, принцип и логика работы усилителя.** Усилитель имеет две гальванически развязанных части. Первая из них отвечает за управление ключами и подачу напряжения на нагрузку. Она включает в себя силовые ключи и элементы управления. Подача питания на эту рабочую часть осуществляется через разъем **J2**. Напряжение питания элементов управления LVCC составляет 12 В. Напряжение PVCC, коммутируемое на нагрузку, может составлять в зависимости от конфигурации до 100 В. Напряжение питания элементов управления и коммутируемое напряжение имеют общую нулевую точку (PGND).

Вторая часть усилителя отвечает только за информационную связь с шиной управления и имеет гальваническую развязку с основной рабочей частью усилителя. Ее питание осуществляется через шину управления (разъем **J1**). Напряжение питания VDD составляет 5 В. Нулевая точка питания VSS одновременно является нулевой точкой всех сигналов шины управления.

Гальваническая развязка способна выдерживать перепады напряжения до 3000 В.

Схема подключения нагрузки к усилителю: Усилитель представляет собой транзисторный мост, между плечами которого подключается внешняя нагрузка. Схема подключения представлена на Рис. 3. Точки U1 и U2 выведены на силовой разъем усилителя. Нагрузка подключается снаружи к этому разъему.

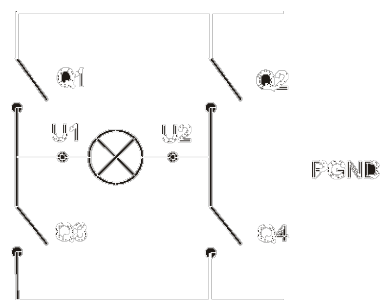


Рисунок 2.3 - Схема подключения нагрузки к усилителю

Структура управляющих сигналов и логика работы усилителя: Транзисторные ключи в зависимости от значения входного логического сигнала знака (SIGN) и сигнала ШИМ включаются и выключаются, коммутируя точки U1 и U2 с силовым питанием и силовой землей. Сигнал SIGN определяет, какое плечо моста используется. При значении SIGN = 1 и ШИМ = 1 замкнуты ключи Q1 и Q4, ключи Q2 и Q3 разомкнуты. Напряжение в точке U1 равно напряжению силового питания VCC; напряжение в точке U2 равно напряжению силовой земли. При SIGN = 1 и ШИМ = 0 верхний ключ Q1 и нижний ключ Q4 размыкаются. При значении SIGN = 0 сигнал ШИМ инвертируется внутри усилителя: при ШИМ = 0 Q2 и Q3 замкнуты, Q1 и Q4 разомкнуты. Напряжение в точке U1 равно напряжению силовой земли, в точке U2 – напряжению силового питания. При SIGN = 0 и ШИМ = 1 ключи Q2 и Q3 размыкаются.

Иначе говоря, при одинаковых значениях сигналов Знак и ШИМ одно плечо моста замкнуто, другое – разомкнуто. При разных значениях оба плеча разомкнуты.

Таким образом, между концами нагрузки (точками U1 и U2) может быть как положительное, так и отрицательное напряжение.

На логику включения транзисторов влияют также переключки **JP3** и **JP4**, определяющие, используется или нет динамическое торможение. В режиме динамического торможения при значении  $SIGN = 1$  ключ Q4 замкнут, а ключи Q1 и Q3 замыкаются и размыкаются в зависимости от значения сигнала ШИМ. При этом, когда ШИМ = 0, замкнуты оба нижних ключа Q3 и Q4, и нагрузка оказывается подключенной к земле PGND с обеих сторон, а когда ШИМ = 1, замкнуты ключи Q1 и Q4, в результате чего нагрузка подключена одной точкой к PGND, а другой – к PVCC.

При  $SIGN = 0$  аналогично работает другое плечо моста, при этом ключ Q3 все время замкнут, а ключи Q2 и Q4 «мигают».

Иначе говоря, при динамическом торможении при различающихся значениях сигналов Знак и ШИМ оба нижних ключа замкнуты.

Логика включения ключей сведена в таблицу .

Динамическое торможение выключено			Динамическое торможение включено		
SIGN	ШИМ	Схема замыкания ключей	SIGN	ШИМ	Схема замыкания ключей
1	1		1	1	
1	0		1	0	
0	1		0	1	
0	0		16	0	



Для получения произвольного напряжения между точками  $U1$  и  $U2$  в диапазоне от  $-PVCC$  до  $+PVCC$  используется быстрое переключение верхних транзисторов сигналом ШИМ. Этот сигнал представляет собой меандр, его частота постоянна, а скважность (отношение интервала времени, когда значение сигнала равно единице, к полному периоду сигнала) определяет среднее напряжение на нагрузке, поскольку при ШИМ = 1 подается полное напряжение силового питания, а при ШИМ = 0 напряжение равно нулю (или наоборот, если уровень сигнала SIGN низкий). Предполагается, что периодические пульсации напряжения сглаживаются за счет свойств самой нагрузки.

Включение и выключение платы усилителя: Управляющий сигнал ENABLE включает и выключает логическую часть платы усилителя. При значении сигнала ENABLE = 1 работа логической части разрешена, и ключи работают в одном из описанных выше режимов. При значении ENABLE = 0 все ключи разомкнуты вне зависимости от остальных управляющих сигналов.

Логика работы усилителя представлена на графике 2.4)

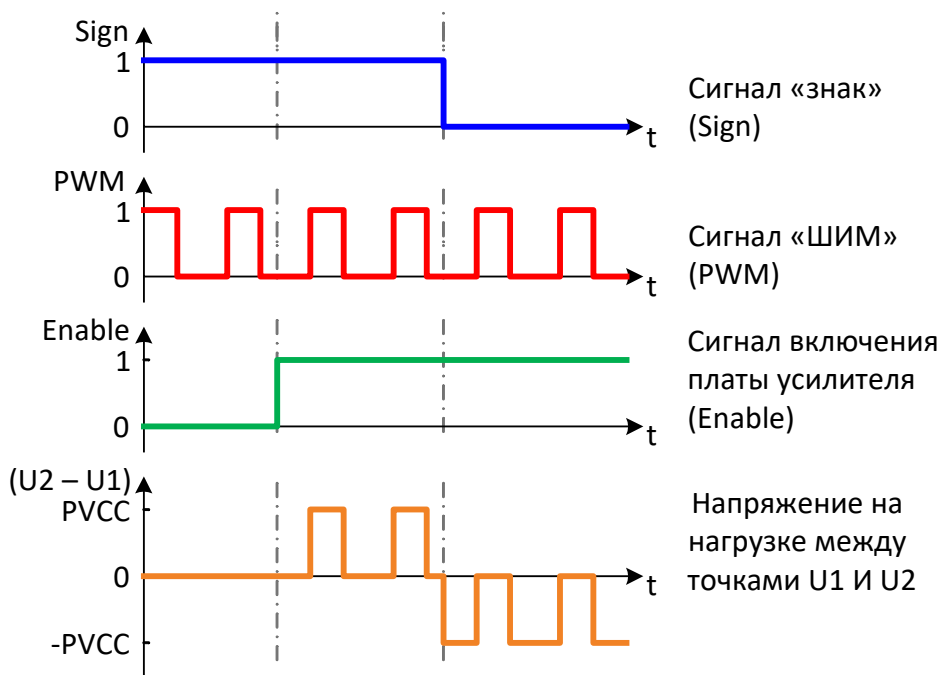


Рис. 2.4. Диаграмма работы платы усилителя

Усилитель имеет встроенную защиту от токовой перегрузки и короткого замыкания силовых выходов  $U1$  и  $U2$ . При достижении силы тока своей максимальной величины включается блокировка ключей. Ключи остаются разомкнутыми определенное время, затем защита снова переходит в режим слежения. Если перегрузка сохраняется, то защита срабатывает опять. Для того чтобы ключи не выходили из строя раньше, чем срабатывает защита, предусмотрено ограничение скорости нарастания тока через ключи.

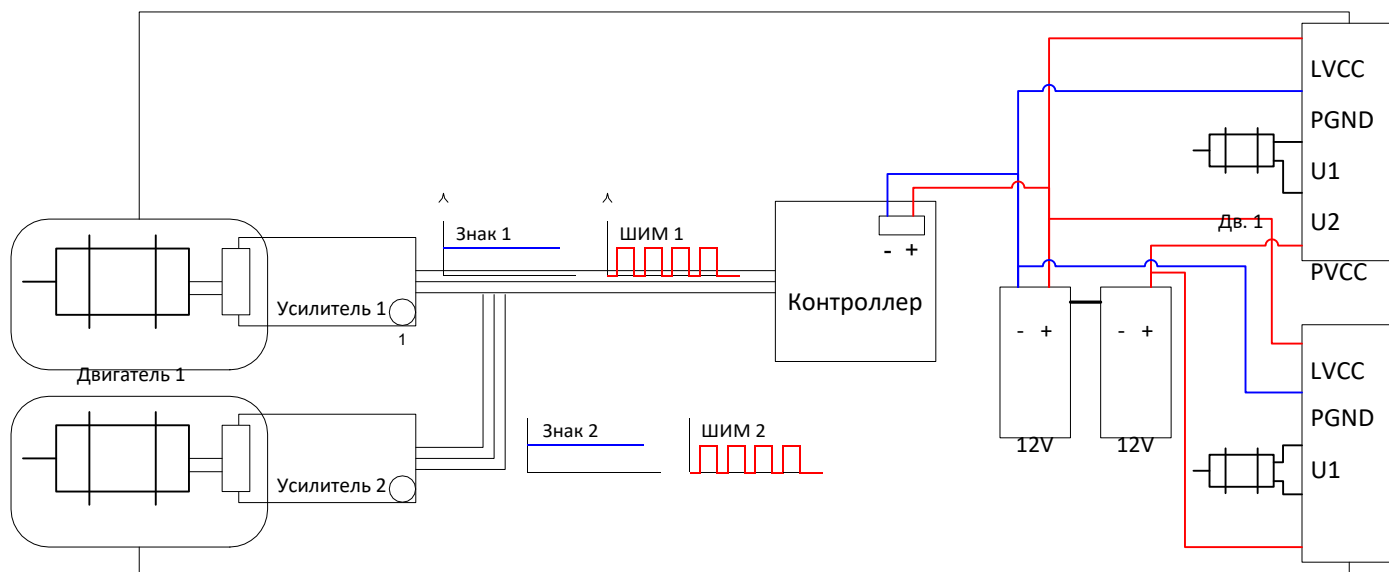
В то время, пока ключи оказываются заблокированными, на плате усилителя горит светодиод, предупреждающий о перегрузке. Одновременно платой

выдается сигнал ошибки ERROR (активный – высокий, т.е. ERROR = 1 при срабатывании защиты и ERROR = 0 при нормальной работе).

## 2. Выполнение лабораторной работы

Типичный пример применения усилителя MoviPower – управление двигателями постоянного тока в составе микроконтроллерной системы. Это может быть колесный аппарат с двумя ведущими и одним пассивным колесом. В этом случае два независимых двигателя постоянного тока вращают ведущие колеса. Рассмотрим систему управления приводами экзоскелета нижних конечностей E-1. Скорость и направление вращения колес регулируются посредством усилителей, на которые подаются управляющие сигналы с контроллера. Структурная схема такого аппарата представлена на Рис. 8. Один из усилителей переключками JP5, JP6 настраивается на использование первого канала управления (ШИМ и знак), второй – на использование второго канала. Затем усилители соединяются общим шлейфом с платой контроллера (например, контроллер URC201, оборудованный десятиконтактным разъемом, совместимым с разъемом усилителя).

Поскольку двигатели даже одной марки по-разному реагируют на одно и то же напряжение, рекомендуется измерять скорость вращения выходного звена и передавать ее в контроллер для реализации обратной связи.



Проведите исследования работы драйвера, на разных режимах скорости, измерьте уровни входных и выходных сигналов, нарисуйте принципиальную схему подключения и таблицу истинности для драйвера, занесите информацию в отчет.

### 3. Лабораторная работа: Исследование силовых транзисторных ключей IGBT

**Цель работы:** получение переходных характеристик и характеристик насыщения силовых транзисторных ключей, определение по ним статических и динамических параметров, получение навыков по выбору мощных транзисторных ключей для силовых электронных устройств.

**Объект исследования:** силовой транзисторный ключ.

**Аппаратные средства:** пакет моделирования Proteus Professional demonstration или MultiSim.

#### 1. Общие теоретические сведения

Биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ, англ. Insulated-gate bipolar transistor, IGBT) — трёхэлектродный силовой полупроводниковый прибор, сочетающий два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Используется, в основном, как мощный электронный ключ в импульсных источниках питания, инверторах, в системах управления электрическими приводами.

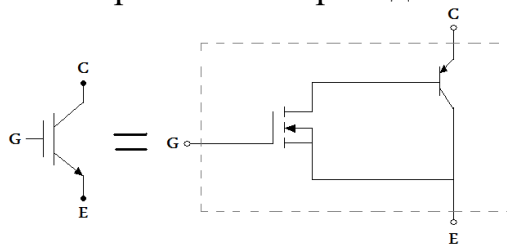


Рисунок 3.1. - Схематичное изображение внутренней структуры БТИЗ

Каскадное включение транзисторов двух типов позволяет сочетать их достоинства в одном приборе: выходные характеристики биполярного (большое допустимое рабочее напряжение и сопротивление открытого канала пропорционально току, а не квадрату тока, как у полевых) и входные характеристики полевого (минимальные затраты на управление). Управляющий электрод называется затвором, как у полевого транзистора, два других электрода — эмиттером и коллектором, как у биполярного.

Выпускаются как отдельные IGBT, так и силовые сборки (модули) на их основе, например, для управления цепями трёхфазного тока.

Основное применение IGBT — это инверторы, импульсные регуляторы тока, частотно-регулируемые приводы.

Широкое применение IGBT нашли в источниках сварочного тока, в управлении мощным электроприводом, в том числе на городском электрическом транспорте.

Применение IGBT-модулей в системах управления тяговыми двигателями позволяет (по сравнению с тиристорными устройствами) обеспечить высокий КПД, высокую плавность хода машины и возможность применения рекуперативного торможения практически на любой скорости.

IGBT применяют при работе с высокими напряжениями (более 1000 В), высокой температурой (более 100 °С) и высокой выходной мощностью (более 5 кВт). БТИЗ используются в схемах управления двигателями (при рабочей частоте менее 20 кГц), источниках бесперебойного питания (с постоянной нагрузкой и низкой частотой) и сварочных аппаратах (где требуется большой ток и низкая частота — до 50 кГц).

IGBT и полевые транзисторы, выполненных по технологии МОП (англ. MOSFET) занимают диапазон средних мощностей и частот, частично «перекрывая» друг друга. В общем случае, для высокочастотных низковольтных каскадов наиболее подходят MOSFET, а для высоковольтных мощных — IGBT.

В некоторых случаях IGBT и MOSFET полностью взаимозаменяемы, цоколёвка приборов и характеристики управляющих сигналов обоих устройств обычно одинаковы. IGBT и MOSFET требуют 12—15 В для полного включения и не нуждаются в отрицательном напряжении для выключения. Но «управляемый напряжением» не значит, что схеме управления не нужен источник тока. Затвор IGBT или MOSFET для управляющей схемы представляет собой конденсатор с величиной ёмкости, достигающей тысяч пикофард (для мощных устройств). Драйвер затвора должен быть способным быстро заряжать и разряжать эту ёмкость, чтобы гарантировать быстрое переключение транзистора.



Рисунок 3.2 - Сборка на IGBT для коммутации напряжения до 3300 В и токов до 1200 А.

IGBT сочетает достоинства двух основных видов транзисторов:

- высокое входное сопротивление, низкий уровень управляющей мощности — от полевых транзисторов с изолированным затвором
- низкое значение остаточного напряжения во включенном состоянии — от биполярных транзисторов.
- малые потери в открытом состоянии при больших токах и высоких напряжениях;

- характеристики переключения и проводимость биполярного транзистора;
- управление как у MOSFET — напряжением.

Диапазон использования — от десятков до 1200 ампер по току, от сотен вольт до 10 кВ по напряжению. В диапазоне токов до десятков ампер и напряжений до 500 В целесообразно применение обычных MOSFET, а не IGBT, так как при низких напряжениях полевые транзисторы обладают меньшим сопротивлением.

## 2. Выполнение лабораторной работы

Схема для исследований силовых ключей на биполярных транзисторах, собрана в среде электронного моделирования электронных схем, показана на рис. 3.3. и содержит:

- функциональный генератор сигналов (Function Generator – XFG1);
- двухлучевой осциллограф (Oscilloscope – XSC1);
- модель силового биполярного транзистора Q1 типа ZTX851;
- модель силового быстродействующего диода D1 типа MBR7545;
- измерительные пробники 2 и 4;
- потенциометр R1, управляемый клавишей A в сторону повышения сопротивления и клавишами shift + A в сторону понижения сопротивления;
- резистор R2;
- источники напряжения V1 и V3;
- переключатель J1, управляемый нажатием клавиши пробел (space).

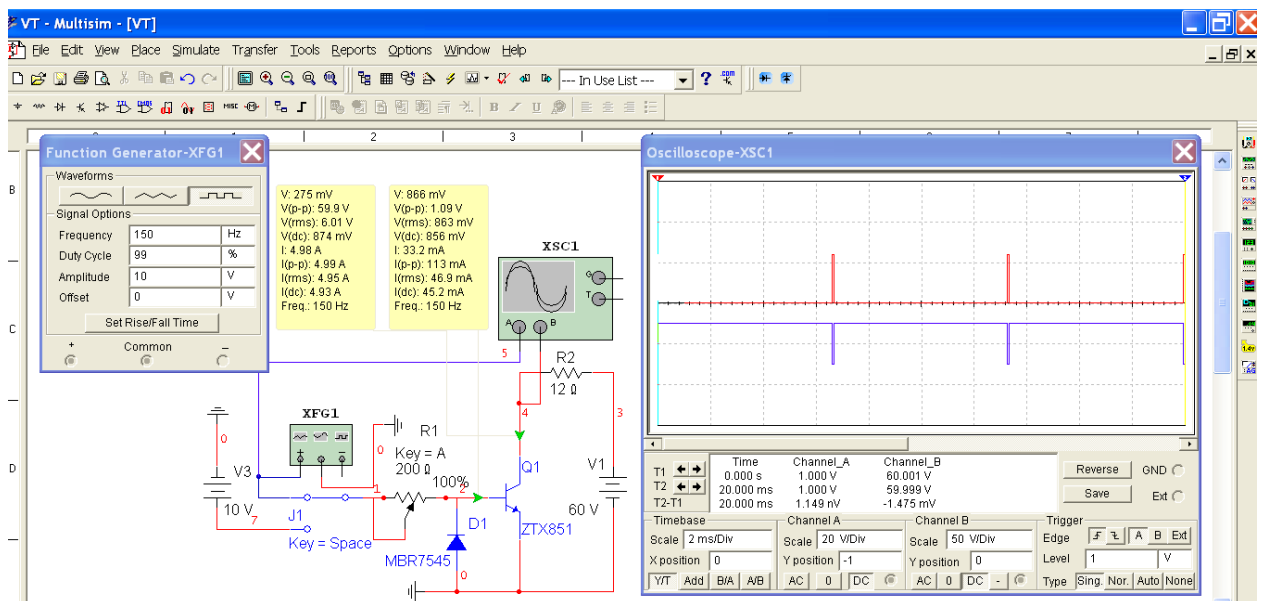


Рис. 3.3. Установка для исследования биполярных транзисторных ключей

Амплитуда выходных импульсов функционального генератора XFG1 и величина источника напряжения V3 устанавливаются равными типовому питающему напряжению драйверов для биполярных транзисторов (табл. 3.2). Напряжение источника V1 устанавливается равным максимально допустимому напряжению  $U_{CEO}$  коллекторного перехода транзистора ZTX851. Сопротивление виртуального резистора R2 определяется из выражения

$$R2 = \frac{U_{CEO}}{I_C},$$

где  $I_C$  – максимально допустимый ток коллектора транзистора ZTX851, и округляется до целого значения. Коэффициент насыщения транзистора S устанавливается в диапазоне оптимальных значений 2...3 следующими настройками:

– виртуальный резистор R2 шунтируется перемычкой (рис. 3.4);

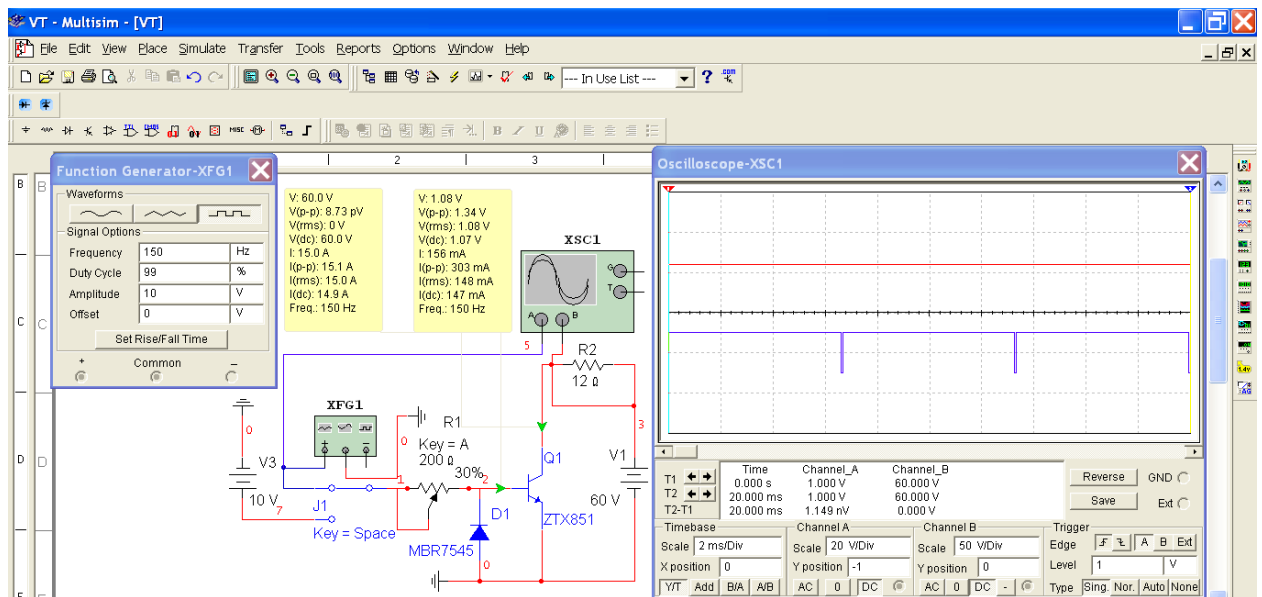


Рис. 3.4. Настройка оптимального коэффициента насыщения силового ключа

– включается моделирование;

– регулировкой потенциометра R1 выставляется значение тока  $I_{(dc)}$  измерительного пробника в коллекторной цепи Q1 равным:

$$I_{(dc)} = (2 \dots 3) \cdot I_C;$$

– определяется коэффициент усиления транзистора Q1 по току как отношение токов коллекторного и 2-го измерительных пробников:

$$\beta = \frac{I_{(dc)}}{I_{(dc)2}}$$

– отключается переключатель, шунтирующий резистор  $R2$ , и вычисляется значение коэффициента насыщения  $S$  с использованием тока  $I_{r2}$  коллекторного пробника, измеренного при отключенной переключке:

$$S = \frac{\beta \cdot I_{(dc)2}}{I_{r2}}$$

Динамические параметры включения силового транзисторного ключа Q1 определяются с помощью двухлучевого осциллографа XSC1 в режиме внешней синхронизации при масштабе (Scale) горизонтальной развертки 100 ns/div. Развертка запускается положительным перепадом импульсов выходного напряжения функционального генератора сигналов XFG1. При нажатии кнопки на экране осциллографа воспроизводится переходная характеристика включения силового биполярного транзистора Q1 (рис. 3.5). С помощью визирной линии 2 регистрируется продолжительность включения транзистора  $t_{ON} = 114,236$  нс, по визирной линии 1 определяются задержка включения  $t_{d(on)} = 38,664$  нс и продолжительность нарастания тока  $t_r = 75,571$  нс.

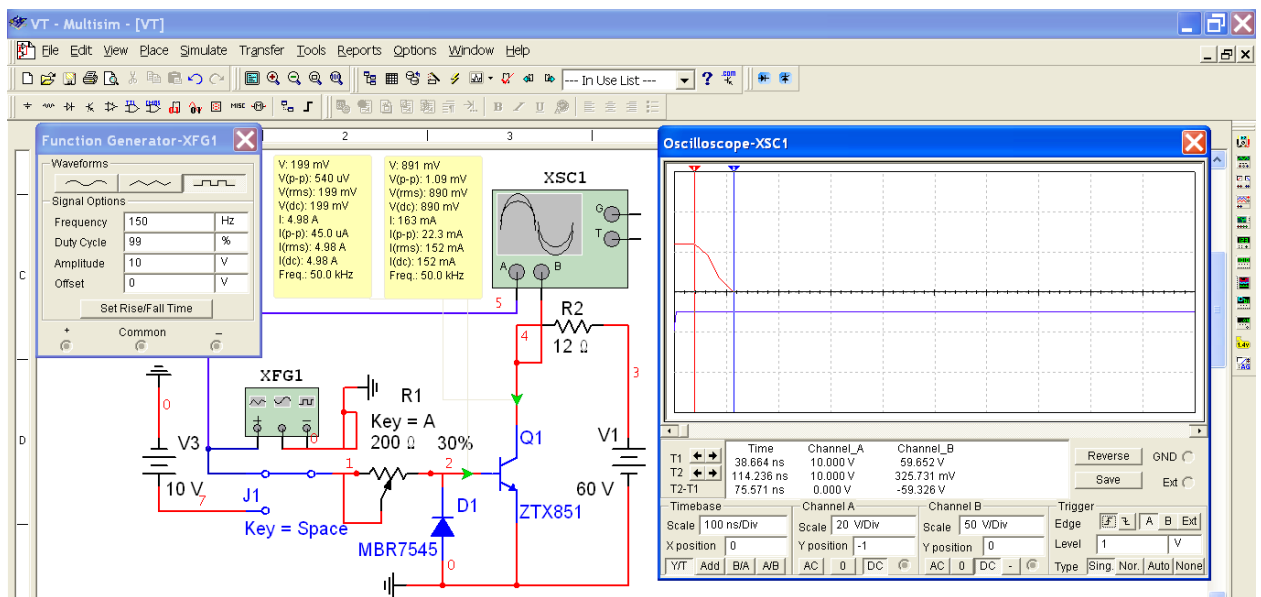


Рис. 3.5. Переходная характеристика включения биполярного транзисторного ключа

Динамические параметры выключения силового транзисторного ключа Q1 также определяются с помощью осциллографа при запуске горизонтальной развертки отрицательным перепадом импульсов выходного напряжения функционального генератора сигналов XFG1. На экране осциллографа воспроизводится переходная характеристика выключения мощного

транзисторного ключа (рис. 3.6). По визирной линии 2 определяется продолжительность переходного процесса выключения  $t_{off} = 771,529 \text{ нс}$ , с помощью визирной линии 1 находится длительность этапа рассасывания неосновных носителей  $t_s = 414,763 \text{ нс}$  и этапа спада коллекторного тока  $t_f = 356,766 \text{ нс}$ .

Сравнение переходных характеристик выключения (рис. 3.6) и включения (рис. 3.5) мощного транзисторного ключа приводит к выводу о том, что быстродействие последнего ограничивается большим временем выключения  $t_{off}$ , при этом период коммутации транзисторного ключа  $t_{off} + t_{on} = 885,765 \text{ нс}$ . При таком периоде коммутации и типовых значениях  $\gamma = 0,95 \dots 0,98$  частота коммутации ключа на биполярном транзисторе не может превышать  $10 \dots 12 \text{ кГц}$ , т. е. для силовой электроники является невысокой.

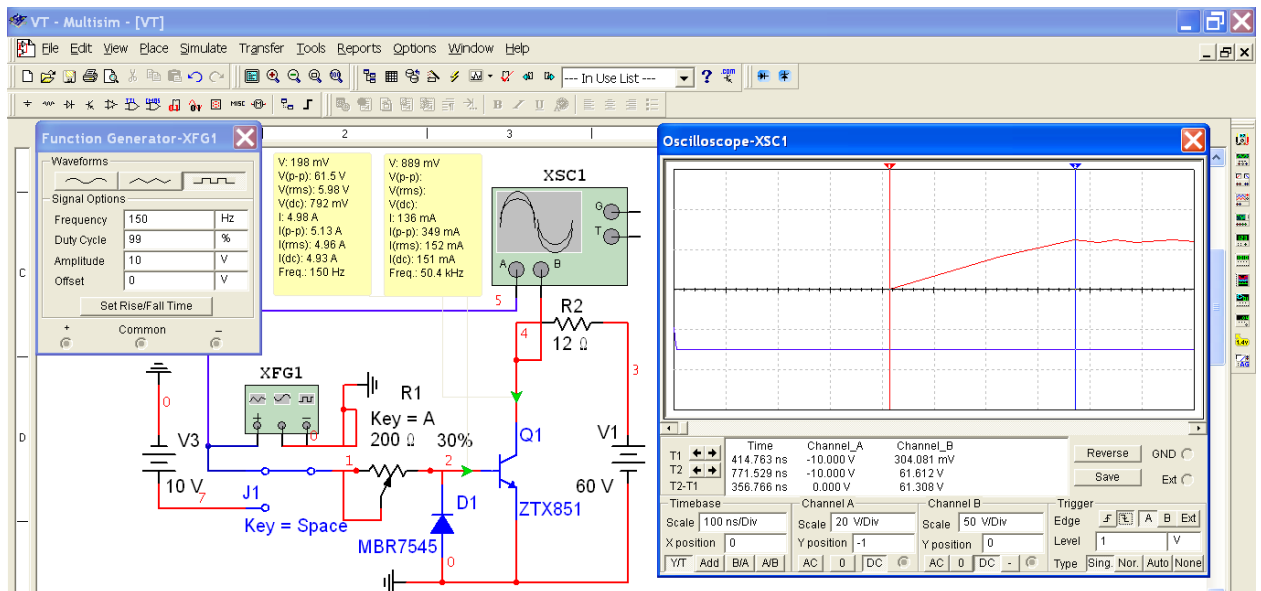


Рис. 3.6. Переходная характеристика выключения биполярного транзисторного ключа

Для получения осциллограммы импульсов напряжения на выходе транзисторного ключа, коммутируемого от функционального генератора с частотой  $(100+50 \cdot N) \text{ Гц}$ , необходимо выполнить настройки согласно рис. 3.7 и измерить с помощью визирных линий осциллографа амплитуду выходных импульсов напряжения.



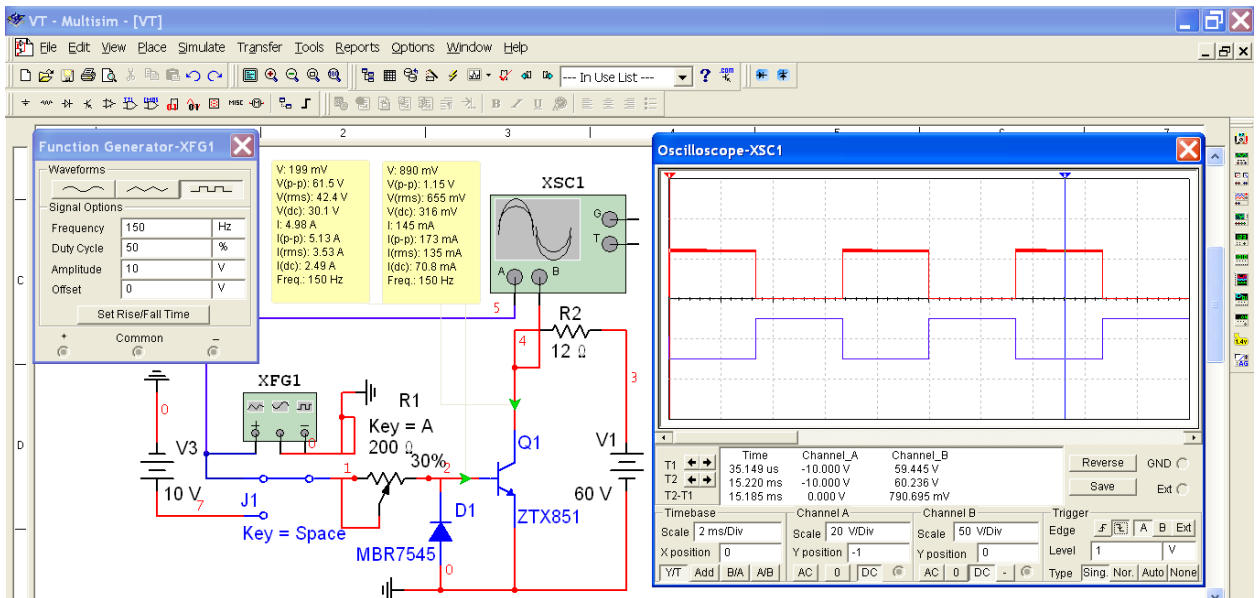


Рис. 3.7. Временная диаграмма коммутации транзисторного ключа

### 3. Задание на выполнение работы

Задание на выполнение работы состоит в реализации виртуальной модели силового ключа. Для исследования необходимо снять переходную характеристику включения биполярного транзисторного ключа в соответствии с методикой, привести характеристику в отчете. Определить динамические параметры включения транзистора.

Получить временную диаграмму коммутации транзисторного ключа в соответствии с методикой и привести ее в отчете. Определить по диаграмме амплитуду импульсов напряжения и частоту коммутации. Эти данные привести в отчете.

### 4. Контрольные вопросы

1. Что такое семейство силовых транзисторных ключей?
2. Как определяется величина сопротивления  $R_2$  в лабораторной установке?
3. Какой величины выбираются источники напряжения  $V_1$  и  $V_3$  в установке для исследования биполярных транзисторных ключей?
4. В чем состоит различие между задержкой включения  $t_{d(on)}$ , задержкой выключения  $t_{d(off)}$  и временем задержки рассасывания неосновных носителей зарядов  $t_s$ ?
5. Что такое пороговое напряжение у MOSFET-транзисторов и IGBT-транзисторов?

6. Что такое коэффициент насыщения биполярного транзистора?
7. Каким образом формируется индуцированный канал у MOSFET-транзисторов?
8. Какую традиционную область применения имеют IGBT транзисторные ключи?
9. Какие недостатки имеет биполярный транзисторный ключ?
10. В чем состоят достоинства и недостатки ключей на MOSFET-транзисторах?
11. Какие достоинства имеет IGBT-транзистор?
12. Что такое драйверы, по каким схемам и в каком исполнении они выпускаются?
13. Почему у IGBT-ключа падение напряжения в проводящем состоянии больше, чем у MOSFET-ключа?

## 4. Лабораторная работа: Инверторы, исследование системы формирования импульса управления для схемы выпрямления

*Цель работы:* Исследование однофазного мостового инвертора с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией при индуктивную нагрузку.

*Объект исследования:* автономный однофазный инвертор.

*Аппаратные средства:* MatLab/Octave.

### 1. Общие теоретические сведения

Автономные инверторы – устройства, преобразующие постоянный ток в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работающие на автономную (не связанную с сетью переменного тока) нагрузку. Нагрузкой автономного инвертора может быть единичный потребитель (асинхронный двигатель, электрическая установка) или разветвленная сеть потребителей (несколько нагрузок, работающих по своему графику).

Обычно основой автономного инвертора являются полностью управляемые полупроводниковые ключи (транзисторы, запираемые тиристоры и др.). Инверторы могут выполняться по однофазным и трехфазным схемам (с нулевым выводом или мостовым). Схемы автономных инверторов подразделяют на автономные инверторы напряжения, автономные инверторы тока и автономные резонансные инверторы. Соответственно, первые обладают преимущественно свойствами источника напряжения, вторые – свойствами источника тока. Для правильной работы схем третьего типа необходимы соответствующие резонансные явления в цепи нагрузки.

В настоящее время инверторы нашли наиболее широкое применение в регулируемом электроприводе и в устройствах бесперебойного питания. В первом случае используются обычно трехфазные инверторы с возможностью регулирования частоты напряжения, во втором – однофазные или трехфазные с частотой выходного напряжения 50 Гц. Использование автономных инверторов делает возможным питание потребителей переменным напряжением в условиях, когда единственным источником электроэнергии является аккумуляторная батарея. Также автономные инверторы применяются в тех областях, где необходим переменный ток повышенной частоты, например, в электротермии. В энергетике на базе схем автономных инверторов выполняют такие устройства как активные фильтры

гармоник напряжения и тока, регулируемые компенсаторы реактивной мощности.

Упрощенная схема однофазного мостового инвертора, работающего на активно-индуктивную нагрузку, представлена на рис. 1. В простейшем случае схема работает по следующему алгоритму: транзисторы парами попеременно переходят в проводящее состояние – VT1, VT4 и VT2, VT3. Таким образом, на выходе инвертора формируется напряжение, имеющее форму меандра (прямоугольное). Длительность включенного состояния транзисторов равна половине периода первой гармоники инвертированного напряжения. Известно, что при разложении меандра в ряд Фурье присутствуют все нечетные гармонические составляющие. Причем амплитуда третьей гармоники будет равна одной третьей амплитуды первой. В большинстве случаев такое напряжение не удовлетворяет требованиям потребителей.

Гораздо лучших показателей можно добиться, используя широтно-импульсное управление ключами. Широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) называется импульсное управление, при котором ширина импульсов изменяется (модулируется) в пределах периода основной частоты для того, чтобы создать определенную форму выходного напряжения.

Простейшим вариантом организации ШИМ является однократная модуляция. В этом случае переключение каждой пары транзисторов (VT1, VT2 и VT3, VT4)

происходит со смещением по отношению к другой. В результате на выходе инвертора формируется напряжение, имеющее форму меандра с нулевыми паузами. Это позволяет регулировать напряжение, изменяя длительность нулевых интервалов.

Наиболее эффективным вариантом ШИМ является изменение ширины импульсов выходного напряжения по синусоидальному закону. Формирование импульсов происходит посредством сравнения сигнала заданной формы (синусоидальной), называемого опорным или эталонным, с сигналом треугольной формы (несущим), который имеет более высокую частоту. Опорный сигнал является модулирующим и определяет форму выходного напряжения инвертора. Обычно этот сигнал имеет синусоидальную форму (синусоидальная ШИМ) и частоту основной (первой) гармоники формируемого напряжения (тока). Существует много модификаций этого метода, в которых модулирующие сигналы представлены специальными функциями, отличными от синусоиды, что помогает подавить некоторые высшие гармоники. Системы управления на основе ШИМ позволяют формировать основную гармонику напряжения (тока) требуемой частоты с возможностью регулирования её амплитуды и фазы.

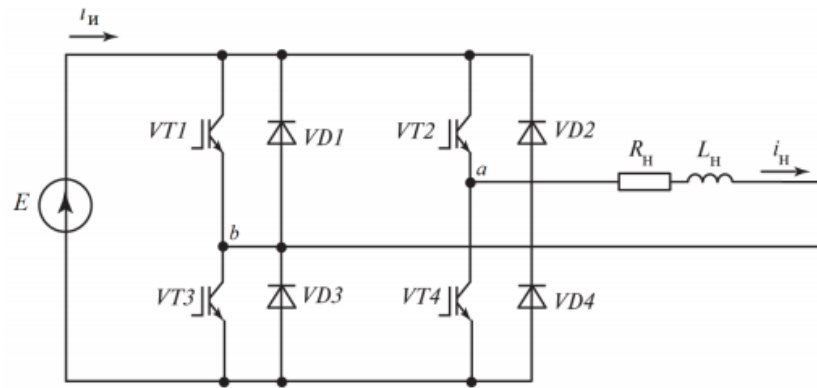


Рисунок 4.1. Схема однофазного мостового инвертора

В мостовой схеме инвертора возможна реализация двух типов ШИМ – двухполярной и однополярной. При двухполярной модуляции поочередно в проводящем состоянии находится сначала VT1 и VT4, потом VT2 и VT3. Условия переключения транзисторов (см. рис. 4.2):

$u_M(v) < u_H(v)$  – проводят VT1 и VT4;  
 $u_M(v) > u_H(v)$  – проводят VT2 и VT3.

При однополярной модуляции, в отличие от двухполярной, формируется две последовательности управляющих импульсов – одна для ключей VT1 и VT3, другая – для VT2 и VT4. Для этого используется два модулирующих сигнала. Таким образом, существует четыре возможных комбинации состояний, указанные в табл. 1 (проводящему состоянию ключей соответствует 1, выключенному - 0). Комбинациям I и II соответствуют значения напряжений на нагрузке  $-E, +E$ , а состояниям III и IV – нулевые значения напряжения.

Существует несколько способов реализации метода однополярной ШИМ. Один из них показан на рис. 4.3. Однополярный несущий сигнал сравнивается с модулирующими синусоидальными сигналами, находящимися в противофазе.

Рассмотрим формирование импульсов для ключей VT1 и VT3. В том случае, если модулирующий сигнал больше несущего, VT1 переходит в проводящее состояние, VT3 – закрыт. Если модулирующий сигнал меньше несущего, то открывается VT3, а VT1 – закрывается. Таким образом, половину периода транзисторы VT1 и VT3 работают поочередно, а другую половину периода VT1 находится в проводящем состоянии, а VT3 закрыт. Импульсы для ключей VT2 и VT4 формируются аналогично. В результате получается комбинация из состояний I, II, III и IV (см. табл. 1). Соответствующая диаграмма напряжения на нагрузке показана на рис. 4.3.

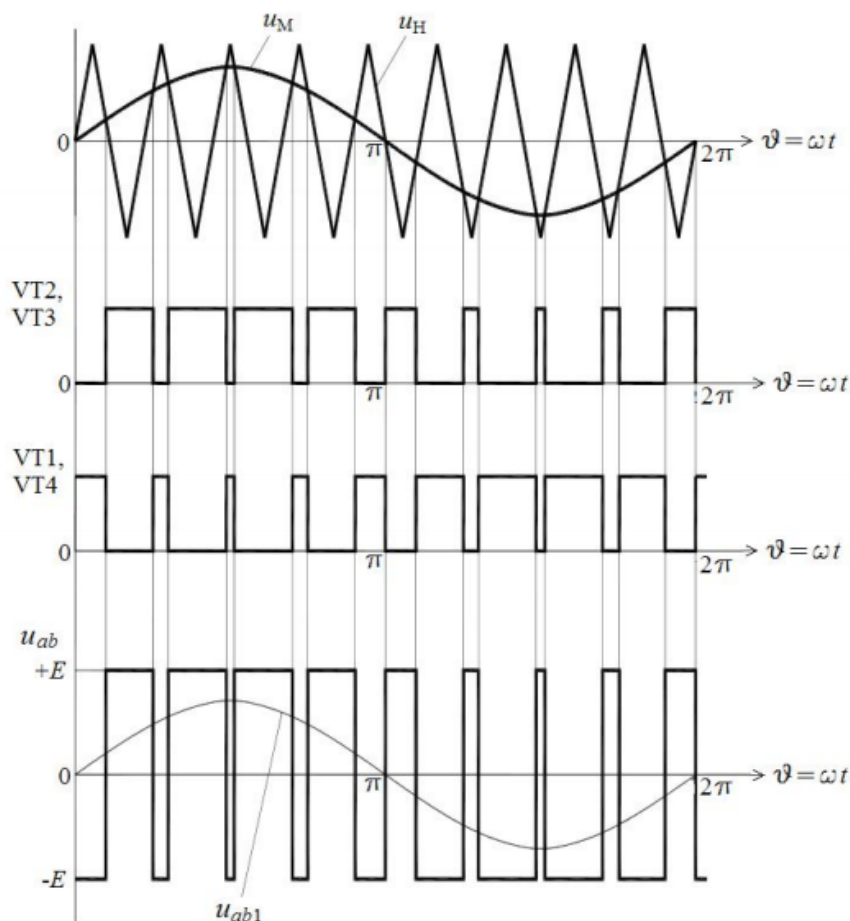


Рис. 4.2. Принцип формирования управляющих импульсов при двухполярной модуляции

Таблица. – Состояния ключей

Номер комбинации	VT1	VT2	VT3	VT4
I	1	0	0	1
II	0	1	1	0
III	1	1	0	0
IV	0	0	1	1

Как при однополярной, так и при двухполярной модуляции амплитуда первой гармоники выходного напряжения инвертора зависит от соотношения амплитуд модулирующего и несущего сигналов. Режим работы, при котором амплитуда

модулирующего сигнала больше амплитуды несущего сигнала называется перемодуляцией. При этом амплитуда первой гармоники выходного напряжения будет превышать напряжение источника (мгновенное значение напряжения на нагрузке, естественно, не может быть больше напряжения источника).

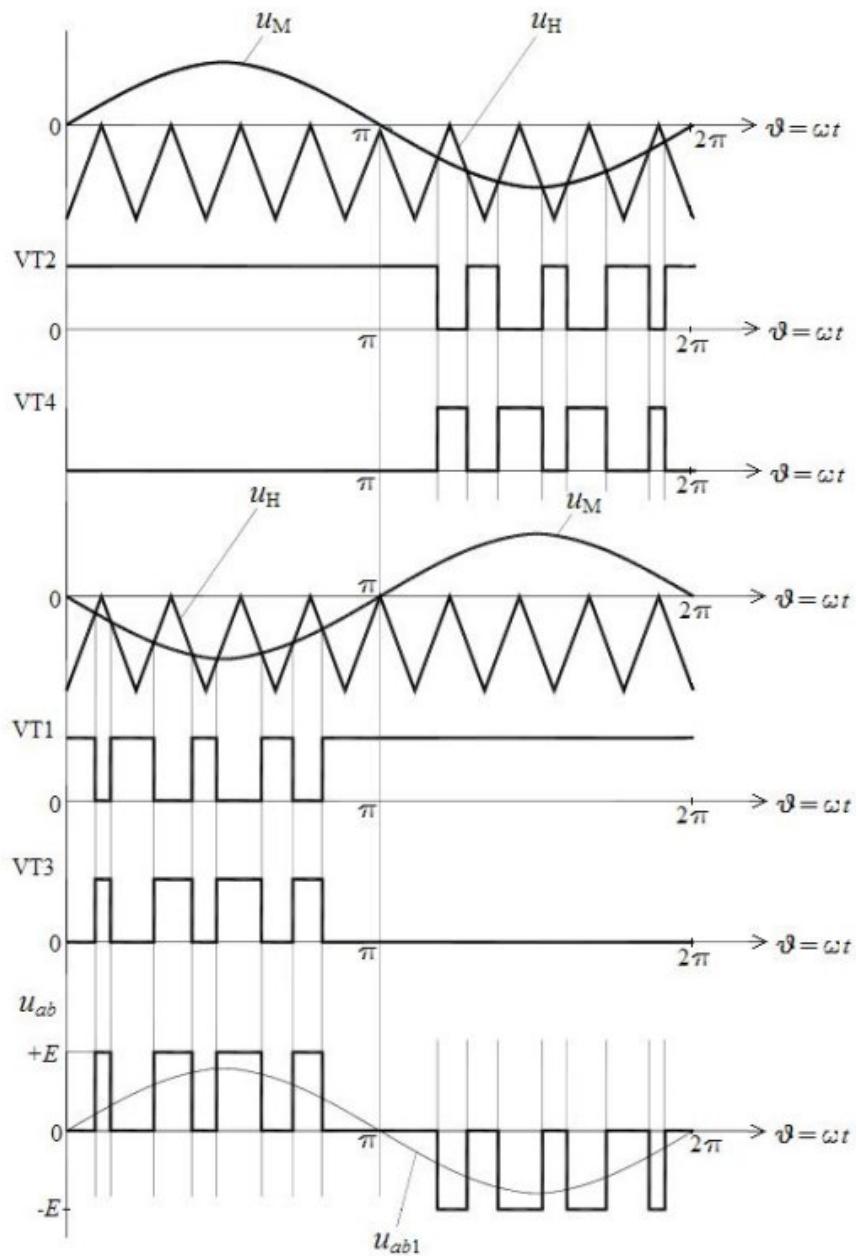


Рис. 4.3. Принцип формирования управляющих импульсов при однополярной модуляции

## 2. Выполнение работы

Модель однофазного мостового инвертора с несимметричным управлением в программе MatLab/Simulink показана на рис. 4.4.

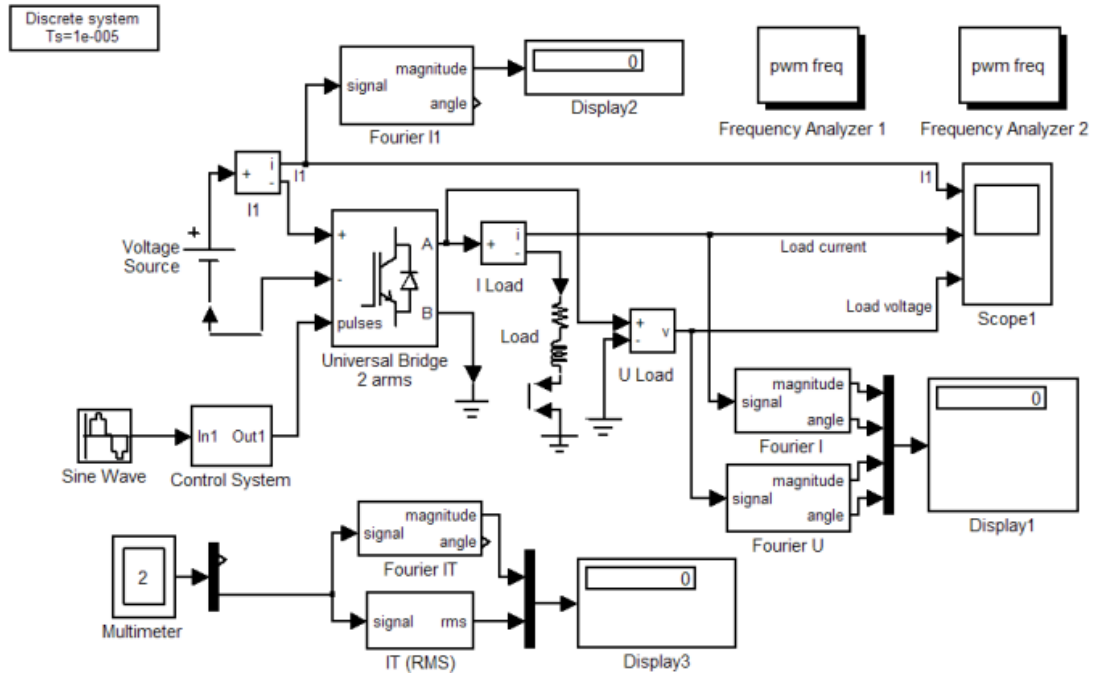


Рисунок 4.4 – Модель однофазного мостового инвертора

Транзисторный мост моделируется при помощи блока Universal Bridge, в окне настроек которого задаются следующие параметры (рис. 4.5):

- $R_{on}$  – активное сопротивление полупроводниковых элементов в проводящем состоянии;
- $V_f$  – прямое напряжение на транзисторе в открытом состоянии;
- $V_{fd}$  – прямое падение напряжения на обратном диоде в проводящем состоянии; В состав модели также входят следующие блоки:
- Voltage Source – источник постоянного напряжения UDC; □ Load – RL-нагрузка;
- Display1 – блок для отображения амплитудных значений 1-ой гармоники тока и напряжения на нагрузке, а также их начальных фаз;
- Display2 – блок для отображения среднего значения потребляемого тока;
- Display3 – блок для отображения среднего и действующего значений тока ключа инвертора;
- Display4 – блок для отображения коэффициента гармоник напряжения;



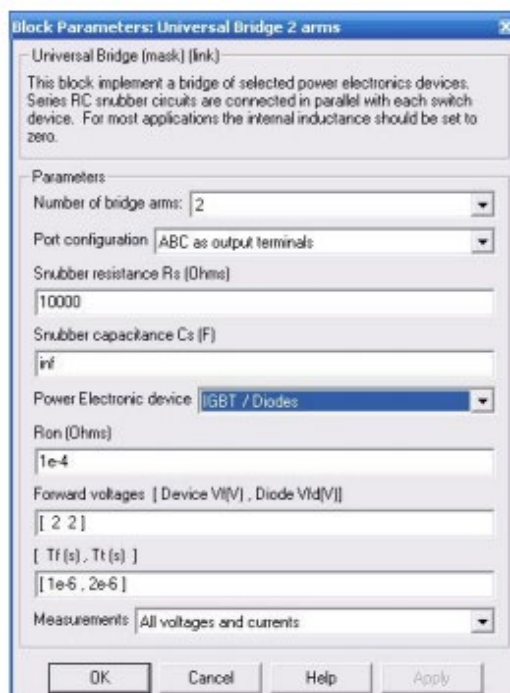


Рис. 4.5. Параметры блока Universal Bridge

### Исследование диаграмм токов и напряжений инвертора

Для проведения исследования необходимо собрать файл модели и произвести моделирование при значениях параметров нагрузки  $R_H$  и  $L_H$ , указанных в табл. 2. Моделирование проводится при пяти значениях коэффициента заполнения  $\gamma$  (задается в блоке GAMMA): 1, 2/3, 1/2, 1/3, 1/4, 1/8. Диаграммы тока и напряжения на нагрузке и тока, потребляемого от источника постоянного напряжения, снимаются с осциллографа Scope1.

Необходимо отмасштабировать диаграммы и сохранить в виде графического файла. Также необходимо сохранить диаграммы напряжения и тока на одном из ключей инвертора (блок Scope2), диаграммы импульсов управления (блок Scope3). Диаграммы сохраняются для двух значений  $\gamma$ : 1/3 и 1/2. Для всех значений  $\gamma$  необходимо сохранить гармонический состав напряжения (показания блока Harmonics\_U) и записать значение коэффициента гармоник напряжения (показания Display4).

Таблица 2. Данные для выполнения лабораторной работы

№.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UDC, В	250	260	270	280	290	300	310	320	330
$R_H$ , Ом	10	30	40	50	60	70	80	90	100
$L_H$ , Гн	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

По полученным результатам необходимо построить:

- зависимость амплитуды основной гармоники напряжения от  $\gamma$ ;

- зависимость амплитуд 3-й, 5-й, 7-й и 9-й гармоник напряжения от  $\gamma$ ; - зависимость коэффициента гармоник напряжения от  $\gamma$ .

Определить теоретическое значение коэффициента гармоник напряжения для случая  $\gamma = 0,5$  по формуле:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} U_n^2} / U_1$$

где  $U_1$  – действующее значение 1-ой (основной) гармоники,  $U_n$  – действующее значение n-ой гармоники, n – номер гармоники (отношение частоты гармоники к частоте основной гармоники).

### **Исследование инвертора с двухполярной ШИМ**

Для проведения исследования необходимо открыть в программе MatLab файл и произвести моделирование при значениях параметров нагрузки  $R_H$  и  $L_H$ , указанных в табл. 2. Моделирование проводится при 10 значениях коэффициента модуляции  $M$  (задается в блоке MOD): 0,2; 0,35; 0,5; 0,65; 0,8; 1; 1,5; 2,5; 3,5; 5. Для двух значений  $M = 1; 0,5$  необходимо сохранить диаграммы с осциллографов Score1, Score2, Score3 и показания блока Harmonics\_I. Для всех значений  $M$  необходимо сохранить показания блока Harmonics\_U и записать значение коэффициента гармоник напряжения (показания Display4).

По полученным результатам необходимо построить:

- зависимость амплитуды основной гармоники напряжения от  $M$  (регулирующую характеристику);
- зависимость коэффициента гармоник напряжения от  $M$ .

### **Исследование инвертора с однополярной ШИМ**

Для проведения исследования необходимо открыть в программе MatLab файл и произвести моделирование при значениях параметров нагрузки  $R_H$  и  $L_H$ , указанных в табл. 2. Моделирование проводится при 10 значениях коэффициента модуляции  $M$  (задается в блоке MOD): 0,2; 0,35; 0,5; 0,65; 0,8; 1; 1,5; 2,5; 3,5; 5. Для двух значений  $M = 1; 0,5$  необходимо сохранить диаграммы с осциллографов Score1, Score2, Score3 и показания блока Harmonics\_I. Для всех значений  $M$  необходимо сохранить показания блока Harmonics\_U и записать значение коэффициента гармоник напряжения (показания Display4).

По полученным данным для  $M = 1$  определить значения амплитуд наиболее значимых гармоник  $U_n$  и вычислить коэффициент гармоник напряжения:

$$K_{\bar{A}} = \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} U_{n m}^2} / U_{1 m}$$

где  $U_{1 m}$  – амплитуда 1-ой гармоники,  $U_{n m}$  – амплитуда n-ой гармоники.

По полученным результатам необходимо построить (на той же координатной плоскости, что и зависимости п. 3.2):

- зависимость амплитуды основной гармоники напряжения от  $M$  (регулирующую характеристику);
- зависимость коэффициента гармоник напряжения от  $M$ .

### **Исследование внешних и энергетических характеристик**

При снятии внешних характеристик изменяются параметры нагрузки  $R_H$ ,  $L_H$ . Необходимо взять 5 значений  $R_H$  в пределах от 10 до 100 Ом. При этом для каждого

$R_H$  рассчитывается величина  $L_H$  так, чтобы постоянная времени нагрузки оставалась неизменной и равной  $\tau = L_H / R_H = 0,01$  с. Моделирование производится для каждого

значения сопротивления нагрузки. Результаты заносятся в табл. 3. Амплитуды первых гармоник напряжения и тока нагрузки  $U_H(1)_{\max}$  и  $I_H(1)_{\max}$  и их начальные фазы  $\varphi_U$  и  $\varphi_I$  определяются по показаниям блока Display1, средний ток источника ( $I_1$ ) определяется по показаниям блока Display2. Среднее ( $I_{T0}$ ) и действующее значение ( $I_T$ ) тока ключа – по показаниям Display3.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Какие устройства называются автономными инверторами и для чего они предназначаются?
2. Какие существуют схемы автономных инверторов, чем они отличаются? 3. Что такое ШИМ?
4. Что такое несущий и опорный сигнал?
5. Чем однополярная модуляция отличается от двухполярной?
6. Опишите принцип формирования управляющих импульсов при двухполярной модуляции.
7. Опишите принцип формирования управляющих импульсов при однополярной модуляции. Почему необходимо использование двух опорных сигналов?
8. Что показывают внешние, энергетические и регулировочные характеристики инвертора?

## 5. Лабораторная работа: Цифровые силовые преобразователи энергии (на примере мостового ШИП)

**Цель работы:** Исследование регулировочной и энергетических характеристик мостового широтно-импульсного преобразователя (ШИП) с симметричным законом управления при работе на активно-индуктивную нагрузку с противо-э.д.с.

**Объект исследования:** мостовой широтно-импульсный преобразователь  
**Аппаратные средства:** Matlab/Octave.

### 1. Общие теоретические сведения

Широтно-импульсные преобразователи (ШИП) связывают источник постоянного тока с двигателем постоянного тока. Они должны обладать следующими свойствами:

- двусторонней проводимостью энергии между источником питания и
- исполнительным двигателем, являющимся нагрузкой преобразователя, для обеспечения его работы во всех квадрантах механической характеристики;
- малым и не зависящим от тока выходным сопротивлением для получения механических характеристик, близких к естественным, и, в конечном счете, для получения хороших статических и динамических характеристик электропривода;
- жесткой внешней характеристикой и малой инерционностью, высоким КПД, достаточной перегрузочной способностью для обеспечения необходимых форсировок в переходных режимах работы привода;
- высокой помехозащищенностью и надежностью, малой массой и габаритами, отсутствием влияния на сеть.

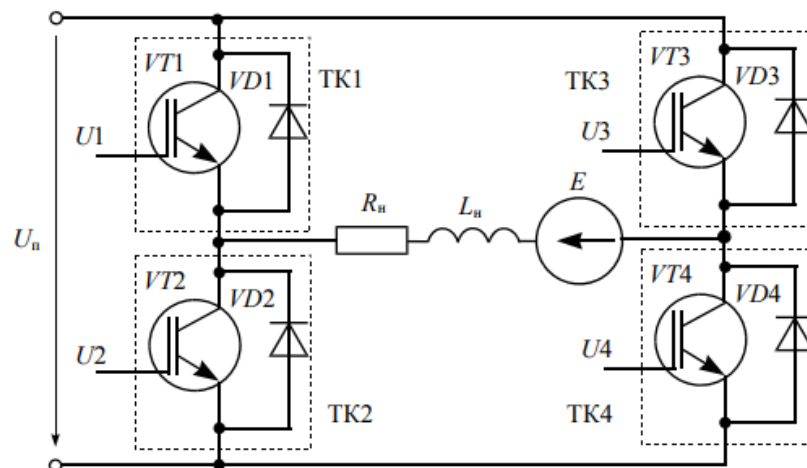


Рисунок 5.1 – Схема мостового ШИП

В области коммутируемых токов более 50 А основными приборами силовой электроники являются силовые модули на базе IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) транзисторов. В настоящее время IGBT обеспечивают коммутацию токов до 1800 А и напряжении до 4,5 кВ.

Упрощенная принципиальная схема ШИП представлена на рис.2.5.1. Она содержит четыре транзисторных ключа ТК1-ТК4. В диагональ моста образованного транзисторными ключами включена нагрузка, эквивалентная двигателю постоянного тока с регулированием по цепи якоря.

Наиболее простой способ управления ШИП по цепи якоря - симметричный, когда в состоянии переключения находятся все четыре транзистора моста, а напряжение на выходе ШИП представляет собой знакопеременные импульсы, длительность которых регулируется входным сигналом. Преимуществом симметричного метода управления является простота реализации и отсутствие зоны нечувствительности в регулировочной характеристике. К недостаткам относят двухполярное напряжение на нагрузке и связанные с этим повышенные пульсации тока нагрузки.

Временные диаграммы ШИП при симметричном способе управления приведены на рис.5.2.

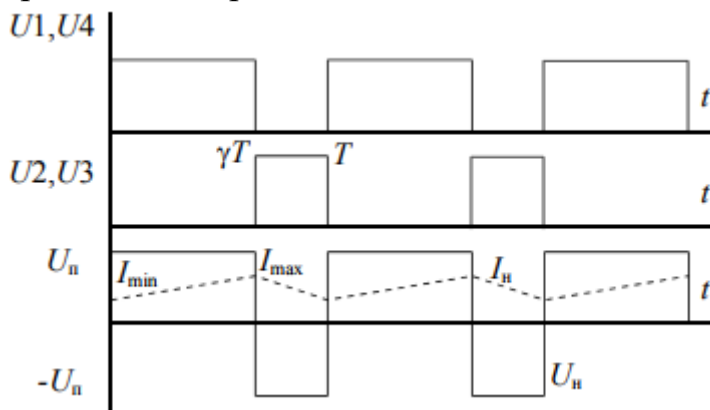


Рисунок 5.2 Временные диаграммы ШИП

При включении диагонали моста VT1, VT4 и выключении VT2, VT3, образуется цепь для протекания тока нагрузки. К нагрузке в этом интервале прикладывается напряжение  $U_{\Pi}$ , а ток увеличивается от  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$ . На транзисторах VT2, VT3 напряжение равно  $U_{\Pi}$ . Это напряжение является отрицательным для диодов VD2, VD3, и ток через них равен 0. При включении диагонали VT2, VT3 и выключении VT1, VT4 ток, поддерживаемый индуктивностью нагрузки, продолжает протекать в том же направлении по цепи  $U_{\Pi}, VD2, R_{\Pi}, L_{\Pi}, E, VD3, +U_{\Pi}$ , в которой ток нагрузки протекает навстречу э.д.с. и источнику питания. На этом интервале напряжение на нагрузке изменяет знак, а ток уменьшается.

Обобщенная функциональная схема управления транзисторным ШИП изображена на рис.5.3.

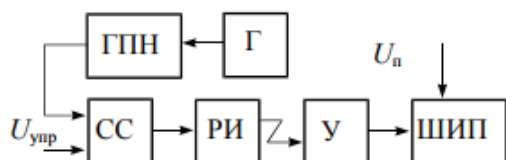


Рисунок 5.3 Функциональная схема ШИП

Генератор пилообразного напряжения (ГПН), тактируемый генератором импульсов (Г), вырабатывает пилообразное напряжение. Схема сравнения (СС) представляет собой релейный элемент, который переключается с плюса на минус и обратно, в момент равенства  $U_{\text{ГПН}} = U_{\text{упр}}$ . Для управления ШИП распределитель импульсов (РИ) имеет прямой и инверсные выходы. Эти импульсы, усиленные усилителем (У), поступают на базы транзисторов диагоналей моста в противофазе (рис.5.4).

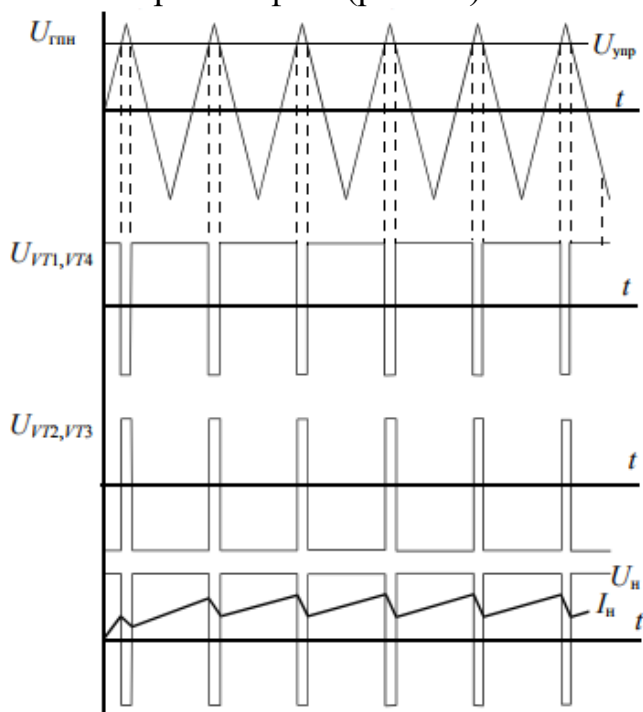


Рисунок 5.4 Временные диаграммы ШИП

## 2. Выполнение лабораторной работы

Виртуальная лабораторная установка для исследований показана на рис.5.5, она содержит:

- источник постоянного напряжения (240 В);
- активно-индуктивную нагрузку с противо-э.д.с.(R,L), (E);
- измерители мгновенных токов в источнике питания ( $I_1$ ) и нагрузке ( $I_{\text{load}}$ );
- измеритель мгновенного напряжения на нагрузке ( $U_{\text{load}}$ );
- блоки измерения сред-

них значений тока питания (Fourier I1), тока нагрузки (Fourier I0) и тока силового полупроводникового модуля (Fourier T0);

- блок для измерения среднего значения напряжения на нагрузке (Fourier U0);

- блок для измерения действующего тока силового полупроводникового модуля (RMS T)

- блок для наблюдения мгновенных значений тока в цепи питания, тока нагрузки и напряжения на нагрузке (Scope);

- блок для наблюдения и измерения мгновенных значений величин, которые выбраны в поле Measurement соответствующих блоков (Multimeter);

- блок измерения средне-Рис.2.5.6 го значения тока цепи питания (Display1);

- блок для измерения величин средних значений тока и напряжения на нагрузке, а также среднего и действующего тока в силовом полупроводниковом модуле (Display);

- однофазный мостовой транзисторный ШИП рис.5.6 (Universal Bridge);

- блок управления ШИП (Control System).

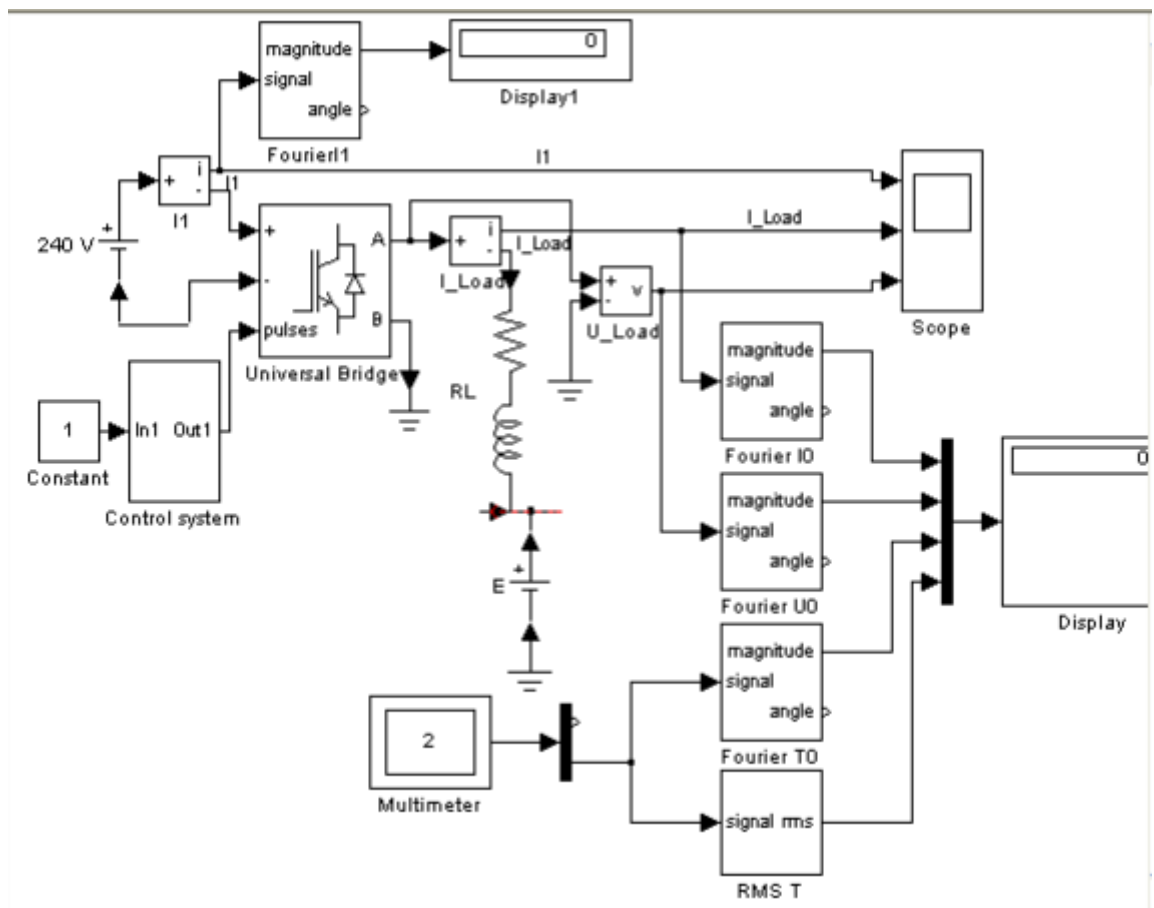


Рисунок 5.5 - Схема для моделирования мостового ШИП.

В полях блока *Universal Bridge*, вводятся:

- динамическое сопротивление полупроводникового модуля в Омах ( $R_{on}$ , Ohms);
- пороговое напряжение на транзисторе и на диоде модуля в открытом состоянии в вольтах (Forward Voltage, V);
- время спада и время затягивания выключения ( $T_f$ ,  $T_t$ ) в секундах.

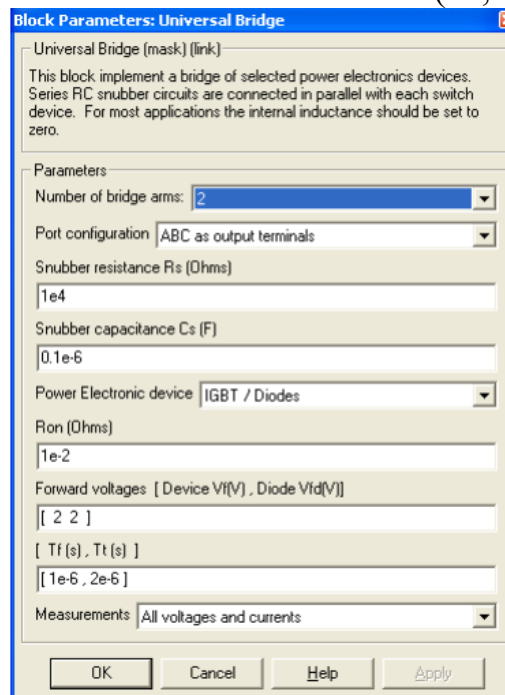


Рисунок 5.6 - Блок параметров ШИП.

Модель блока управления (Control system) показана на рис.2.5.7. Блок Repeating Sequence является ГПН. Параметры этого ГПН задаются в окне параметров рис.2.5.8:

- амплитуда пилообразного напряжения 2 В;
- период пилообразного напряжения  $T_0 = 0,002$ с. ( $f_0 = 500$ Гц). Для реализации активно-индуктивной нагрузки устанавливаем  $R = (2 * N)$  (Ohms),  $L = 20e-4$ (H).  $N$  - порядковый номер студента или компьютера.

В окнах настройки параметров блоков Fourier I1, Fourier I0, Fourier U0, Fourier T0 устанавливается частота равная частоте ГПН ( $100 * N$  Гц), и номер 0 гармоники. Для блока RMS T указывается только частота (500 Гц).

При снятии характеристик параметры  $R, L$  нагрузки остаются без изменений, изменяется напряжение управления от -2В до 2В с шагом 0,5В. Характеристики снимаются для трех значений э.д.с. нагрузки 0, 100, 200В. При этом моделирование проводится для каждого значения напряжения управления и э.д.с. Результаты моделирования и последующих расчетов заносятся в таблицы

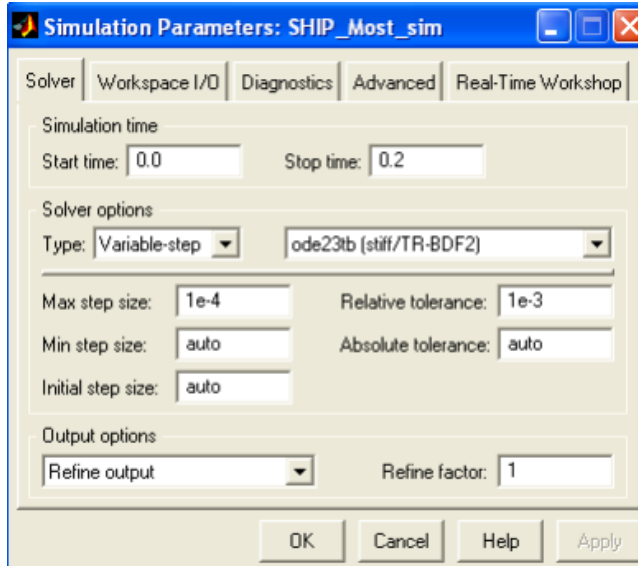
Таблица 5.1

Данные		Измерения						
$U_y$	$E$	$I_H$	$U_H$	$I_1$	$I_T$	$I_T (RMS)$	$U_{Tmax}$	$I_{Tmax}$
В	В	А	В	А	А	А	В	А



--	--	--	--	--	--	--	--	--

Средний ток в источнике питания определяется по показаниям Display1. На блоке Display измеряемые величины представлены в следующей последовательности: средний ток нагрузки; среднее напряжение на нагрузке; средний ток в силовом модуле; действующий ток в модуле. Мгновенные значения тока питания, нагрузки и напряжения на нагрузке можно наблюдать на экране осциллоскопа. Для одного из



расчетов представить эти зависимости (экран осциллоскопа) в отчете. В графическом окне блока Multimeter наблюдаются и определяются максимальные напряжения и ток силового полупроводникового модуля.

Рисунок 5.6 - Блок параметров моделирования.

Относительная продолжительность импульса напряжения на нагрузке определяется по формуле:

$$\gamma = t_{\text{н}} / T_0,$$

где  $T_0$  - период напряжения ГПН, а  $t_{\text{н}}$  - определяется по осциллограмме  $U_{\text{Load}}$  на оси абсцисс (при напряжении 0В).

Мощность в цепи источника питания рассчитывается по выражению:  $P = U_{\text{п}} I_1$  Вт ,

где  $U_{\text{п}}$  - напряжение питания.

Квазистатические потери в силовом модуле рассчитываются по уравнению:

$$P = [\gamma U_f + (1 - \gamma) U_{fd}] I_T + R_{\text{on}} [I_T (\text{RMS})]^2,$$

где  $U_f$ ,  $U_{fd}$ ,  $R_{on}$  - параметры силового модуля. Мощность в нагрузке определяется по выражению:

$$P = U_H I_H (\text{Вт}).$$

По результатам исследований в отчете строятся:

регулировочная характеристика ШИП  $U_H = f(I_H)$  ;

энергетические характеристики ШИП

$$I_1, I_T(RMS), I_T, I_{Tmax} = f(I_H).$$

## 5. Контрольные вопросы

5.1 Дайте сравнительную характеристику симметричному, несимметричному и поочередному способам управления ШИП.

5.2 Выполните анализ энергетических характеристик ШИП.

5.3 Выполните анализ регулировочной характеристики.

5.4 Объясните принцип работы системы управления ШИП.

## Рекомендуемая литература

1. [Электронный ресурс]. - URL: <http://wiki.amperka.ru> (24.01.2016).
2. [Электронный ресурс]. - URL: <http://smc.com> (24.01.2016).
3. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК.- СПб.: Учитель и ученик, Корона принт, 2002. – 304с. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение [Текст] // М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
5. Дьяконов В. *MatLab*. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.
6. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Профессия, 2004. — 747 с.