

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине

«ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»

для студентов направления подготовки

11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Направленность (профиль)

«Интеллектуальные программируемые системы и устройства»

Ставрополь
2026

УДК
ББК

Дюдюн Д.Е. Основы преобразовательной техники: Методические указания к лабораторным работам. — Ставрополь: Изд-во СКФУ, 202_. – ____ с.

Настоящие методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Основы преобразовательной техники» предназначены для студентов направления подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, профиль подготовки Интеллектуальные программируемые системы и устройства. В методических указаниях приведены разделы теоретического материала, необходимые изучения дисциплины, а также контрольные вопросы для формирования и контроля владения компетенциями. Приведён список основной литературы. В приложении представлен список дополнительной литературы, позволяющий студентам более глубоко познакомиться с изучаемым предметом.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, рабочими учебными планами и программами дисциплины «Основы преобразовательной техники».

УДК
ББК

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Методические указания к выполнению виртуальных лабораторных работ	5
1.1. Общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ	5
1.2. Краткие рекомендации по работе с математического пакетом MatLab+Simulink	5
1.3. Рекомендации по работе с графической средой Paint	13
1.4. Оформление отчетов по виртуальным лабораторным работам	16
2. Комплекс виртуальных лабораторных работ	17
Работа №1. Исследование однофазных неуправляемых выпрямителей	17
Работа №2. Исследование однофазных управляемых выпрямителей	29
Работа №3. Исследование трехфазных управляемых выпрямителей	40
Работа №4. Исследование однокомлектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования	58
Работа №5. Исследование преобразователей постоянного напряжения	74
Работа №6. Исследование трехфазных АИН с различными способами импульсной модуляции	90
Работа №7. Исследование обратимого преобразователя напряжения	104
Работа №8. Исследование двухкомлектного реверсивного преобразователя.....	119
Работа №9. Исследование двухзвенного преобразователя частоты	130
Список основной литературы.....	144
Список дополнительной литературы.....	145

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров по специальности 210100.62 «Электроника и нанoeлектроника», профиль Промышленная электроника, в котором предусмотрено изучение курса «Энергетическая электроника».

Основная задача данного цикла лабораторных работ - предоставить студентам возможность на базе виртуальных математических моделей изучить основные типы устройств энергетической электроники. Студенты должны приобрести навыки работы с электронными схемами и закрепить материал, изученный теоретически.

Виртуальные модели созданы в математическом пакете MatLab+Simulink.

В первом разделе учебного пособия приведены общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, краткие рекомендации по работе с математическим пакетом MatLab+Simulink и с графической средой Paint.

Комплекс включает в себя девять виртуальных лабораторных работ и позволяет изучить практически все виды полупроводниковых преобразователей электрической энергии, применяемых в настоящее время.

Особое внимание при выполнении лабораторных работ уделяется развитию навыков работы с компьютером и математическим пакетом MatLab+Simulink.

Для более глубокого изучения материала студенты дома до выполнения лабораторной работы проводят предварительные расчеты и построения. Каждый студент получает индивидуальное задание. Лабораторная работа в значительной степени является проверкой предварительно выполненного задания. При отсутствии домашнего задания выполнение лабораторной работы нецелесообразно.

Для проверки знаний студентов перед лабораторной работой проводится коллоквиум на основе контрольных вопросов, помещенных в пособие.

После выполнения лабораторной работы студенты составляют индивидуальные отчеты. Отчеты содержат как результаты проверки индивидуальных заданий, так и результаты общих виртуальных исследований.

Для удобства выполнения лабораторных работ нумерация рисунков и таблиц в каждой работе самостоятельная.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Виртуальное моделирование осуществляется с помощью пакета расширения *Simulink*, входящих в комплекс математического пакета *MatLab*.

Математическая модель представляет собой набор взаимосвязанных блоков, включающих в себя электрические элементы и измерительные приборы.

1.1. Общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ

Перед выполнением работ все студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к центру компьютерных технологий, для чего преподавателем проводится инструктаж. Краткий инструктаж проводится также перед каждым занятием.

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- 1) ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа;
- 2) выполнить предварительные расчеты и построения, указанные в задании для своего варианта;
- 3) изучить схему виртуальной модели и продумать методику выполнения лабораторной работы;
- 4) ответить на контрольные вопросы.

Перед выполнением каждой лабораторной работы необходимо сдать коллоквиум и представить отчет по предыдущей работе. Вопросы коллоквиума составлены на основе контрольных вопросов учебных пособий [1, 2, 3].

1.2. Краткие рекомендации по работе с математическим пакетом MatLab+Simulink

Запуск MatLab и открытие файла

Для запуска программы, необходимо щелкнуть два раза правой клавишей мыши на пиктограмму «*MatLab*» , расположенную на рабочем столе. Далее в меню «File» (Файл) выбрать пункт «Open» (открыть) (рис. 1) или нажать на кнопку «Открыть модель», расположенную на панели инструментов (рис. 2).

В открывшемся диалоговом окне найти и выбрать необходимый файл, после чего нажать кнопку «Открыть».

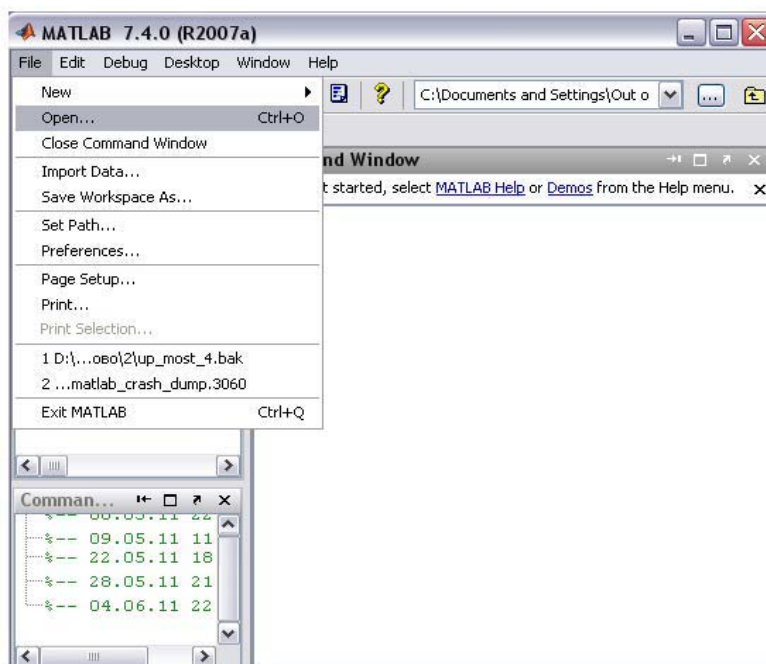


Рис. 1. Диалоговое окно программы MatLab

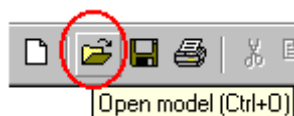


Рис. 2. Фрагмент панели инструментов

Аналогичный результат можно получить при двойном (или одинарном – в зависимости от настроек компьютера) щелчке левой кнопки мыши по выбранному файлу с расширением «.mdl».

Ввод и изменение параметров блоков Simulink и SimPowerSystems

Функции, которые выполняет любой блок из библиотек MatLab, зависят как непосредственно от назначения блока, так и от установленных значений в окне параметров этого блока. Установка этих значений осуществляется в окне настройки, которое вызывается после двойного щелчка левой кнопки мыши на изображении блока в блок-схеме [4, 5].

У каждого блока есть имя, соответствующее его функциональному назначению. С учетом возможностей математического пакета Matlab имена блоков рекомендуется давать на английском языке или латинскими буквами. Обозначения, принятые на блок-схемах, приведены в скобках при описании каждой виртуальной модели.

При вводе численных параметров в блоках MatLab дробная часть от числа отделяется точкой.

Запуск расчета модели

Запустить расчет модели позволяет кнопка «Пуск» , расположенная на панели инструментов (рис. 1). После запуска процесса моделирования данная кнопка преобразуется в кнопку – «Пауза» , а кнопка «Стоп» , расположенная рядом, становится активной. В нижней части окна моделирования при этом можно увидеть индикаторы хода расчета – секундный и графический (рис. 3). Здесь же отображается метод расчета. Например, ode23tb соответствует методу Рунге-Кутты 2 порядка [4, 5].



Рис. 3. Индикатор хода расчета

Редактирование осциллограмм в среде MatLab+ Simulink

Электронный осциллограф (блок Scope) предназначен для вывода на экран компьютера графика входного сигнала в функции времени. Если на вход прибора подается сигнал $X_{ВХ}$, то на экране представляется зависимость $X_{ВХ} = f(t)$.

Открывается окно Scope двойным щелчком левой клавиши мыши по его изображению (по аналогии с любым другим блоком). Виртуальный экран осциллографа имеет вид показанный на рис. 4.

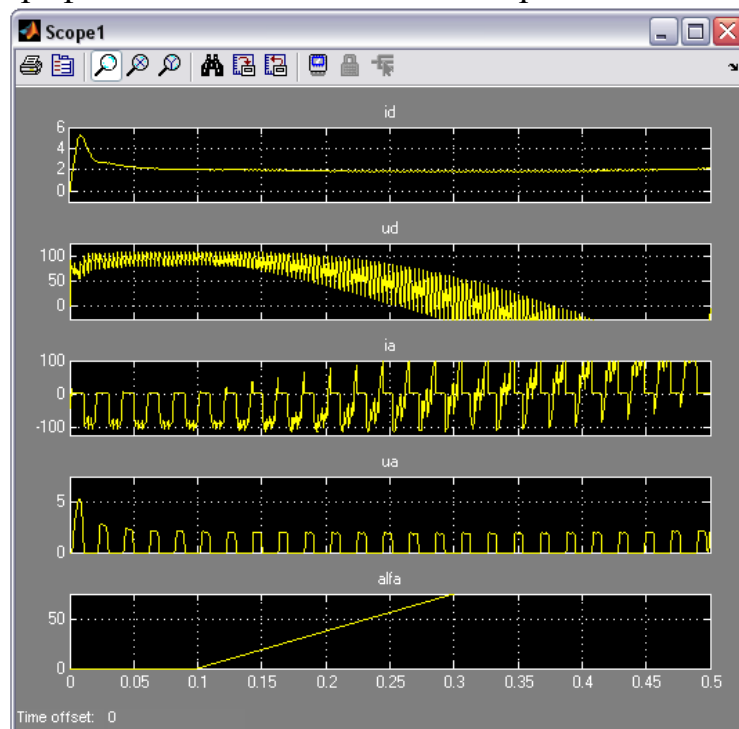


Рис. 4. Внешний вид экрана виртуального осциллографа

Размер и пропорции окна можно изменять произвольно, используя курсор мыши.

По оси ординат шкалы измерений откладываются значения наблюдаемой (входной) величины, по оси абсцисс – значения модельного времени.

Если входная величина блока Score является вектором, то в окне строятся графики изменения всех элементов этого вектора. В этом случае для каждого элемента вектора в окне строится отдельная кривая, отражающая динамику его изменения. Выводимые кривые различаются цветом, который устанавливается автоматически. Одновременно в окне Score может отображаться до 30 кривых.

Для управления параметрами окна Score в нем имеется панель меню, содержащая одиннадцать кнопок (рис. 5).

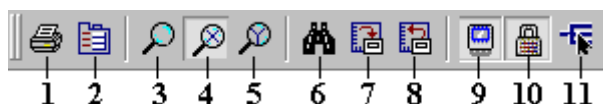


Рис. 5. Панель инструментов управления осциллографом

На рис. 5 приняты следующие обозначения кнопок управления:

- 1 – печать содержимого окна Score;
- 2 – вызов диалогового окна настройки параметров блока Score;
- 3 – изменение масштаба осей графика;
- 4 – изменение масштаба по оси абсцисс;
- 5 – изменение масштаба по оси ординат;
- 6 – автоматическая установка оптимального масштаба осей (автошкалирование);
- 7 – сохранить текущие параметры настройки осей;
- 8 – восстановить сохраненные параметры настройки осей;
- 9 – плавающая граница;
- 10 – разблокировать выбор осей;
- 11 – выбор сигнала.

Кнопки 3 – 5 являются альтернативными, т.е. в каждый момент времени может быть нажата только одна из них. Кнопки недоступны до тех пор, пока в окне Score не отобразится график.

Кнопки 10 и 11 становятся активными при нажатии кнопки 9.

Для изменения масштаба по выбранной оси координат необходимо выполнить следующие действия:

- нажать соответствующую кнопку изменения масштаба;
- подвести курсор мыши к тому участку графика, который должен быть отображен в новом масштабе;
- нажать один раз левую кнопку мыши.

Первое нажатие левой кнопки мыши приводит к четырехкратному увеличению масштаба, каждое последующее дает увеличение масштаба в два раза.

Можно также растянуть необходимый участок по любой из осей. Для этого:

- нажать соответствующую кнопку изменения масштаба (по оси X или Y)
- подвести курсор мыши к тому участку графика, который должен быть отображен в новом масштабе;
- нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, выделить отрезок (движением курсором мыши вверх/вниз или влево/вправо по оси Y или X), который необходимо растянуть.

Нажатие два раза левой кнопки мыши (в любой точке графика) приводит к возвращению автомасштаба графика, т.е. результат получается, аналогичен действию кнопки 6 (см. рис. 5).

Некоторые настройки осциллограммы (в частности уменьшение масштаба, автомасштаб, сохранение текущих параметров настроек осей, выбор сигнала и свойства осей), могут быть также выполнены с помощью команд контекстного меню, которое вызывается на экран щелчком правой кнопки мыши, курсор мыши следует устанавливать непосредственно на осциллограмму (рис. 6). Первые три команды этого окна становятся активными только после изменения масштаба графика.

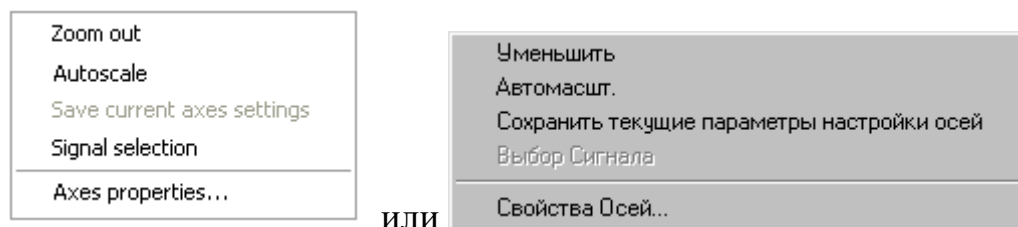


Рис. 6. Окно масштабирования и выбора свойств графика блока Scope

Причем если на экране виртуального осциллографа изображено несколько графиков один под другим (см. рис. 4), то контекстное меню и сделанные в нем настройки (см. рис. 6) отображаются непосредственно на том из графиков осциллографа, на котором был установлен курсор мыши.

Команда «Уменьшить» – при ее выборе возвращает предыдущий (последний) масштаб графика, т.е. изменяется масштаб на один шаг назад;

Действия команд «Автомасштаб», «Сохранить текущие параметры ...» и «Выбор сигнала» аналогичны нажатию кнопок 6, 7 и 11 соответственно (см. рис. 5).

Команда «Выбор Сигнала» становится активной при работе осциллографа в режиме Floating Scope (с «плавающей» границей).

Выбор команды «Свойства осей...» открывает окно представленное на рис. 7. В окне устанавливаются верхняя (Ymax) и нижняя (Ymin) границы оси ординат, а также заголовок графика. Заголовок будет отображаться (при нажатии кнопки ОК или Принять) непосредственно в окне Score над изображением соответствующего графика. Название графика следует написать вместо надписи «%<SignalLabel>».

Внимание! В названии графиков рекомендуется использовать только латинские буквы!

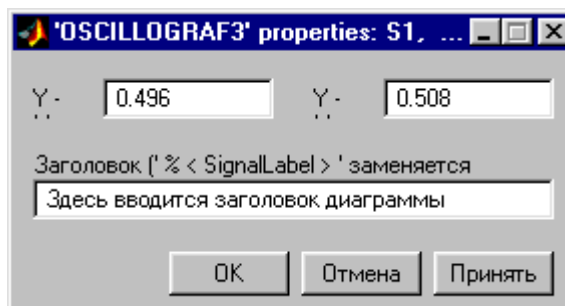
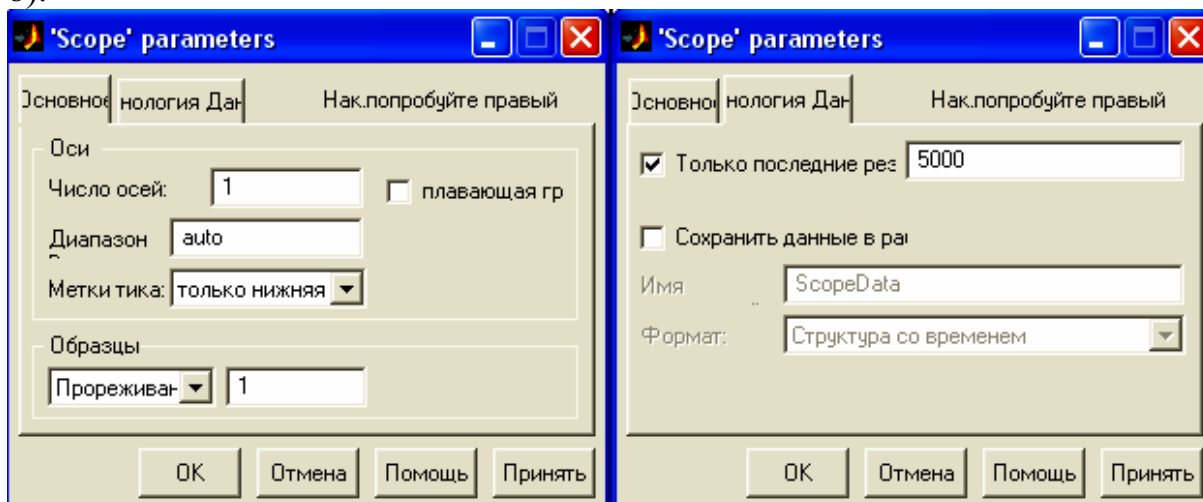


Рис. 7. Окно задания свойства осей блока Score

При щелчке по кнопке Параметры (Properties) открывается окно параметры осциллографа (Properties Scope), содержащее две вкладки (рис. 8).



а)

б)

Рис. 8. Параметры блока Score

Первая вкладка – Основное окно (General) (рис. 8 а) – содержит элементы для управления форматом вывода графиков:

- текстовое поле «Число осей» (Numbers of axes) предназначено для ввода числа подокон (графиков), создаваемых в окне Score; оси Y всех создаваемых графиков являются независимыми по отношению друг к другу, а для формирования координаты X используются одни и те же

моменты модельного времени. Одновременно с вводом этого параметра изменяется количество входов блока Score.

Внимание! Для наглядности результата рекомендуется на одном осциллографе выводить не более 5 графиков!

– текстовое поле «Диапазон» (Time range), где указывается верхнее граничное значение диапазона по оси модельного времени (оси X). Если задано не числом, а ключевым словом «auto», то граничное значение времени совпадает с конечным значением модельного времени, установленного для сеанса моделирования.

Можно также задать любой меньший диапазон. Причем если величина заданного интервала моделирования не превышает установленного в этом поле значения (то есть весь процесс «умещается» в окне Score), то под графиком в строке Time offset (Сдвиг по времени) выводится значение 0.

Если же интервал моделирования превышает установленное значение, то в окне Score отображается только график, соответствующий последнему отрезку времени. При этом в строке Time offset выводится величина «скрытого» интервала времени.

Параметр – Метки осей (Tick labels) – задает вид оформления осей в графиках окна Score. Возможны варианты:

– отображаются все оси, т.е. (деления по горизонтальным осям (X) будут наноситься вдоль каждой из осей всех графиков, хотя масштаб по осям X одинаковый);

– нет осей и надписей на них, т.е. оси графика не отображаются, и график занимает всю рабочую область окна;

– отображается только одна нижняя ось X, деления по горизонтальным осям остальных графических полей (если их несколько) будут отсутствовать.

Построение графических зависимостей в функции $Y = f(X)$

Блок XY Graph обеспечивает построение двумерных графиков произвольных величин (по осям X и Y) (рис. 9).

Блок XY Graph имеет два входа, первый из которых предназначен для ввода аргумента (ось X), второй – для ввода значений функции этого аргумента (ось Y).

Окно XY Graph, в котором непосредственно отображается зависимость $Y = f(X)$ открывается автоматически при запуске модели.

Двойной щелчок левой кнопкой мыши на изображении блока (предварительно помещенного из библиотеки в окно блок-схемы), открывает окно настройки параметров блока XY Graph (см. рис. 9).

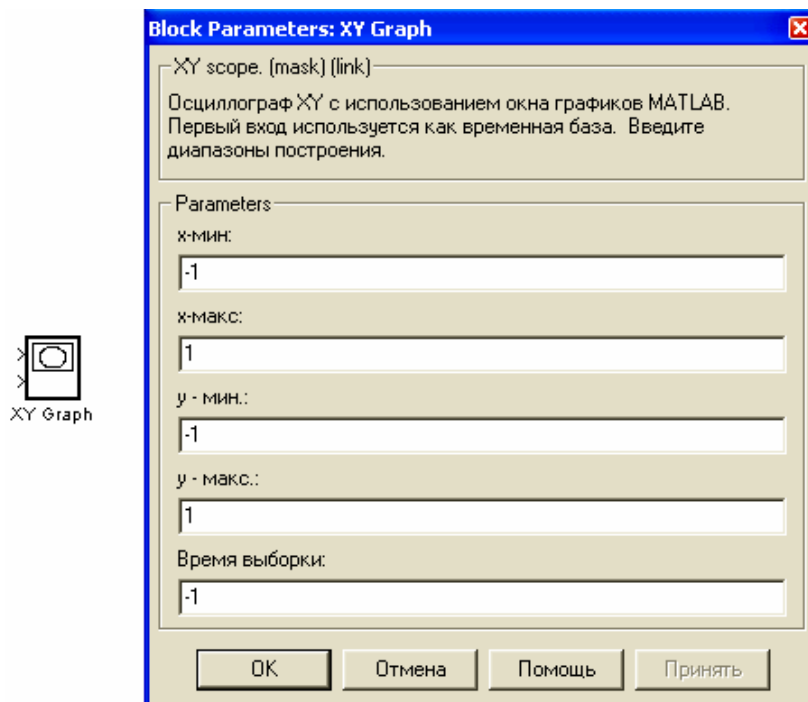


Рис. 9. Внешний вид окна настройки блока XY Graph

Окно настройки параметров блока XY Graph включает в себя:

- диапазоны осей графика (X-min, X-max – для оси абсцисс и Y-min, Y-max – для оси ординат);
- шаг модельного времени (Sample time), по умолчанию его значение равно «-1». Это обозначает, что величина шага блока XY Graph, совпадает с шагом установленным для модели в целом, либо со значением одноименного параметра предшествующего блока.

Блок Display

Блок Display предназначенный для отображения (вывода на экран) численных значений величин, фигурирующих в модели.

Блок имеет 4 параметра настройки (рис. 10):

1. Format – с помощью выпадающего меню задает формат вывода, содержащего 5 пунктов: short, long, short_e, long_e, bank;
2. Decimation (Прореживание) – определяет периодичность вывода значений в окне Display. При значении 1 блок Display выводит все данные вектора, при значении 2 – каждый второй, при 3 – каждый третий элемент вектора и т.д.;
3. Переключатель Floating display (Подвижное отображение) позволяет указывать способ использования блока Display в блок-диаграмме – аналогично блоку Floating Scope;
4. Поле Sample Time задает величину шага модельного времени, т.е. дискретность вывода данных в окно Display. Данный параметр используется только для дискретных во времени процессов. По умолчанию

его значение установлено равное «-1», для непрерывных процессов и блоков изменять не рекомендуется.

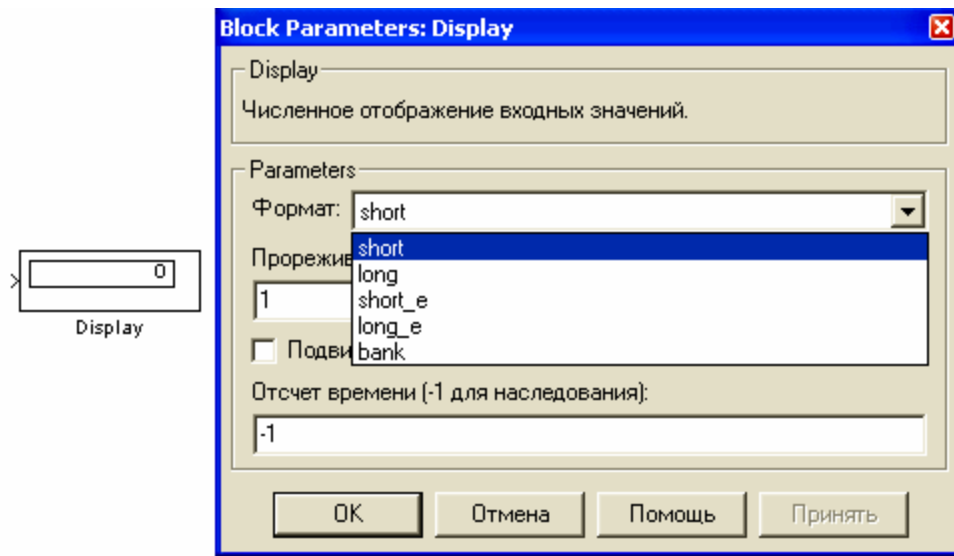


Рис. 10. Внешний вид окна настройки блока Display

Дисплей обеспечивает динамическое отображение данных, то есть можно наблюдать их изменение в процессе моделирования.

1.3. Рекомендации по работе с графической средой Paint

Полученные в процессе виртуального моделирования зависимости (временные или одной величины от другой) удобно обрабатывать в графическом редакторе Paint, который является стандартным приложением среды Windows.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. В среде MatLab преобразовать графическое изображение к необходимому виду. Менять внешний вид изображения в соответствии с рекомендациями описанными выше. Например, оставить два полных последних периода (режим близкий к установившемуся).

2. Скопировать все изображение с экрана монитора в буфер с помощью клавиши «Print Screen» на клавиатуре.

3. Открыть редактор «Paint» щелкнув на ярлычок  расположенный, на рабочем столе или зайти в меню «Пуск → Программы → Стандартные → Paint».

4. Из буфера вставить в Paint изображение, выбрав команду «Правка → Вставить», расположенную в верхней части окна редактора Paint (рис. 11).

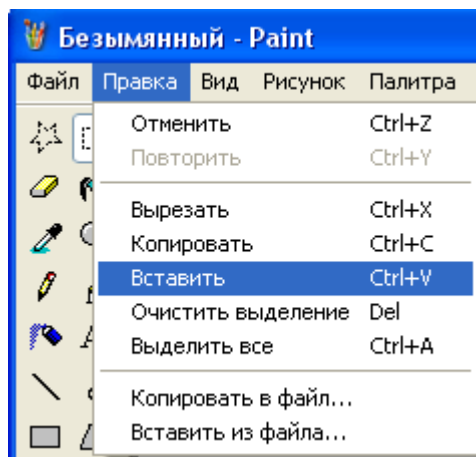


Рис. 11. Панель инструментов графической среды Paint

5. Для удобства, графическое изображение на черном фоне можно инвертировать (в первую очередь это относится к временным диаграммам). Для этого в верхней части окна редактора Paint выбрать команду «Рисунок → Обратить цвета» (рис. 12).

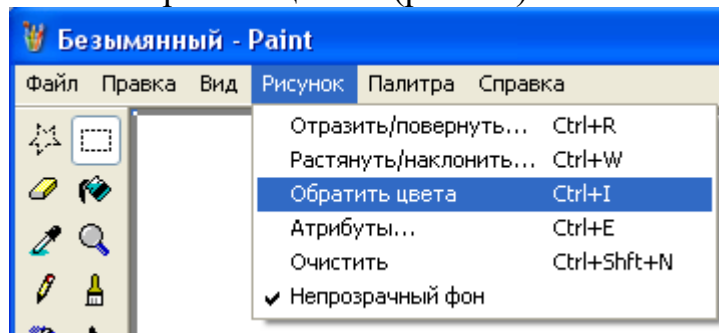


Рис. 12. Внешний вид вкладки «Рисунок» на панели инструментов

6. Оставшийся серый фон также можно сделать белым, если нажать на кнопку Заливка , расположенную на боковой панели инструментов и выбрать цвет заливки – белый, щелкнув на соответствующий цвет на палитре цветов (рис. 13), расположенной в нижней части экрана графического редактора.

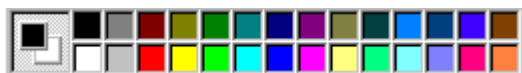


Рис. 13. Палитра цветов редактора Paint

Затем курсор мыши (преобразовавшийся к виду ) установить на область, цвет которой следует изменить и щелкнуть правой кнопкой мыши.

7. Выделить необходимую часть графического изображения можно, нажав на кнопку «Выделить»  или «Выделение произвольной области»

, которые расположены на боковой панели графического редактора Paint.

8. Скопировать выделенную часть графического изображения позволяет команда «Правка => Копировать», расположенная в верхней части окна редактора Paint.

9. Для сравнения полученных результатов в процессе разных опытов некоторые осциллограммы (по указанию преподавателя) удобно располагать на одних осях координат. С этой целью оказывается удобен прозрачный фон, который можно установить в окне графического



редактора Paint с помощью нажатия на нижнюю кнопку, расположенной на боковой панели. Для возврата к белому фону следует нажать на верхнюю кнопку. Данные кнопки становятся активны при предварительном нажатии на одну из кнопок «Выделение» или



«Выделение произвольной области».

Аналогичные действия можно выполнить, если в верхней части окна редактора Paint выбрать команду «Рисунок → Непрозрачный фон» (см. рис. 12).

10. При отсутствии необходимой панели с инструментами на экране графического редактора ее следует активизировать, пометив галочкой в меню Вид (рис. 14).

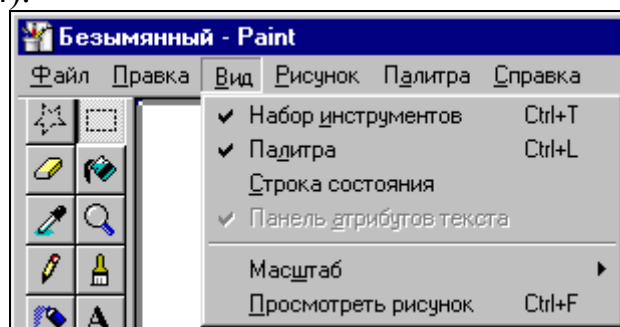


Рис. 14. Панель инструментов редактора Paint

11. Удалить часть изображения поможет кнопка «Ластик» .

При выборе какого-либо другого цвета, кроме белого, из палитры цветов, расположенной в нижней части экрана графического редактора, ластик оставляет за собой цветной след.

12. Остальные кнопки из набора инструментов имеют следующее функциональное назначение:



— выбор цветов — по выполняемым функциям это кнопка противоположна и используется в паре с кнопкой Заливка ;  —

изменение масштаба,  – ластик;  – карандаш для рисования;  – кисть;  – распылитель;  – надпись (доступна только при выбранном масштабе 1:1);   – прямая и волнистая линия;   – прямоугольник и многоугольник;   – овал и скругленный прямоугольник.

1.4. Оформление отчетов по виртуальным лабораторным работам

В отчете должна быть представлены следующие материалы:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схемы эксперимента: принципиальные схемы и виртуальные модели (для своего подварианта).
6. Обработанные осциллограммы и таблицы результатов измерений. Выводы по каждому пункту исследований.
7. Заключение. Обобщающие выводы, в том числе выводы о **причинах** различий значений рассчитанных и полученных экспериментально (анализ экспериментальных данных, вида кривых, причин погрешностей и т.д.).

Не допустимо оформлять отчет карандашом, исключение составляют графики и принципиальные схемы. Отчет может быть напечатан на принтере.

На всех графиках приводят название, обозначают, к какому опыту они относятся, и указывают постоянные величины, определяющие условия опыта. На осях координат следует указать, какая величина по ним отложена, в каких единицах она измеряется.

2. КОМПЛЕКС ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Работа №1. Исследование однофазных неуправляемых выпрямителей

Цель работы: исследование электромагнитных процессов и основных соотношений в неуправляемых выпрямителях, выполненных по однофазной однополупериодной и однофазной мостовой схемам при работе на различные виды нагрузки. Приобретение навыков анализа схем силовой электроники с помощью математического пакета MatLab+Simulink.

Описание виртуальных моделей

Принципиальная схема однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя, его схема замещения, а также виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображены на рис. 1.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС ($E2$), выпрямительный диод (*Diode*), нагрузка (R_d , L_d , E), датчики напряжения и тока ($Dat\ e2$, $Dat\ u2$, $Dat\ ia$, $Dat\ ua$, $Dat\ id$, $Dat\ ud$), осциллограф (*Scope*), блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier Ud*, *Fourier Id*, *Fourier Ia*) и дисплей (*Display*).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник синусоидальной ЭДС ($E2$) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора.

Изменяемый параметр блока:

– амплитуда ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС $E2$ в соответствии с таблицей вариантов и умножить на $\sqrt{2}$;

2) активное сопротивление (ra), позволяет учесть активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к его вторичной стороне. Вводится в схему студентами самостоятельно. Установить сопротивление $ra = 10\ \text{Ом}$;

3) выпрямительный диод (*Diode*). Изменяемые параметры блока:

– дифференциальное сопротивление вентиля во включенном состоянии r_d (*Resistance Ron (Ohms)*). Установить $r_d = 1\ \text{Ом}$;

– пороговое напряжение вентиля U_0 (*Forward voltage Vf (V)*).

Установить $U_0 = 0,8\ \text{В}$;

– начальный ток, протекающий через диод (*Initial current Ic (A)*).

Установить $I_c = 0\ \text{А}$;

– индуктивность вентиля во включенном состоянии (*Inductance Lon* (*H*)). Установить $Lon = 0$ Гн;

– демпфирующая цепь (*Snabber*) – цепь, состоящая из последовательно включенных активного сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно диоду. Установить $R_s = 10^6$ Ом, $C_s = inf$ (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме). Ввод таких параметров имитирует обратное сопротивление диода;

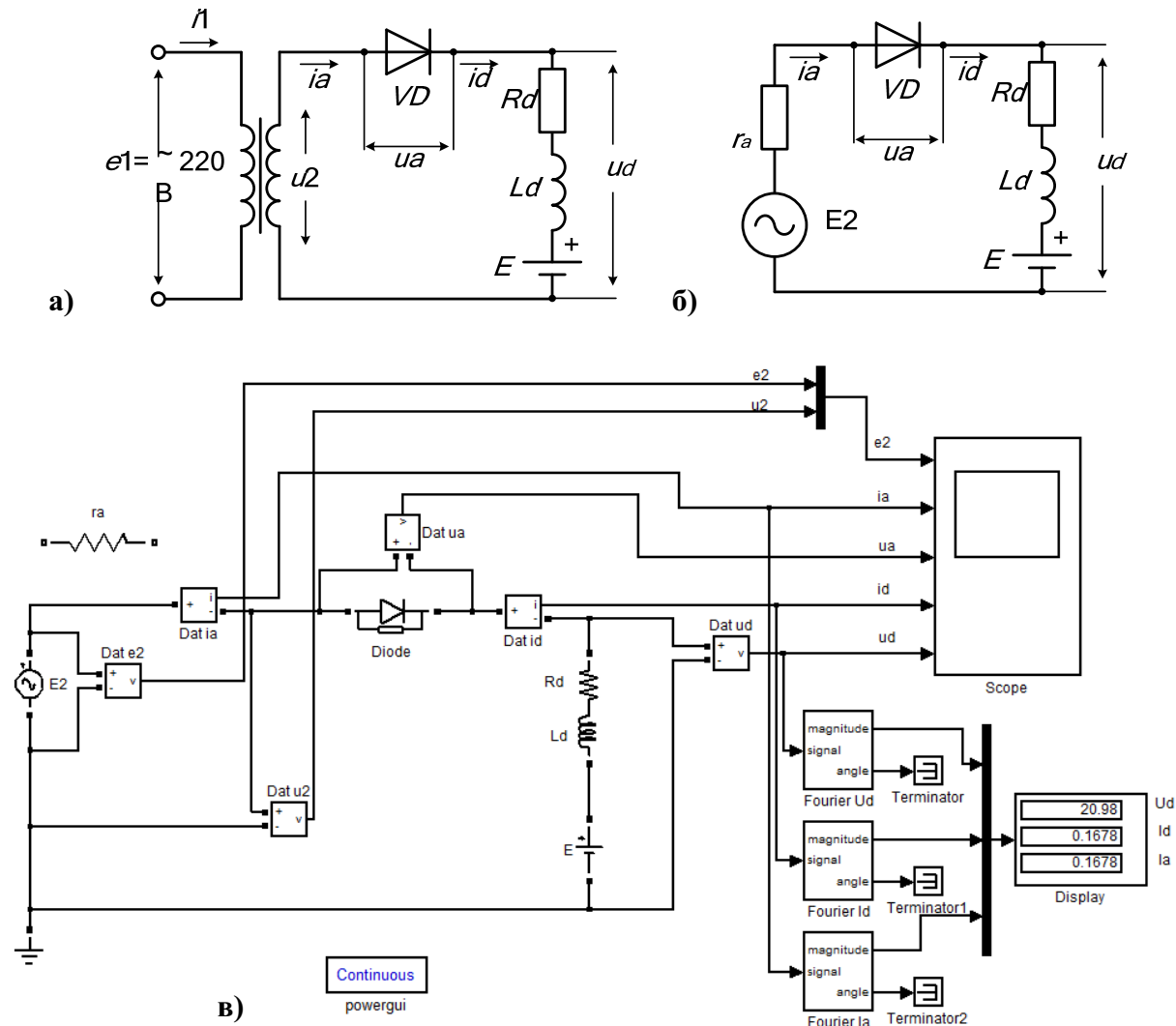


Рис. 1. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя

4) нагрузка (Rd , Ld , E) состоит из двух последовательно соединенных блоков: активно-индуктивной нагрузки (Rd , Ld) и противо-ЭДС (E). Для выбора параметра активно-индуктивной части нагрузки необходимо дважды щелкнуть по блоку Rd , Ld и в раскрывающейся вкладке «*Branch type*» установить параметры R , L . Для выбора противо-ЭДС необходимо дважды щелкнуть по блоку E .

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

- активная, если $Ld = 0$, $E = 0$; Rd – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов);

- активно-индуктивная, если $E = 0$; Rd – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов). Для расчета Ld индуктивное сопротивление X_d принять равным Rd (см. примечание 2 после таблицы вариантов);

- активно-индуктивная с противо-ЭДС – Rd , Ld , E – установить в соответствии с заданным вариантом и примечанием 3 к таблице вариантов.

5) датчик напряжения (*Dat e2*) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

6) датчик напряжения (*Dat u2*) – позволяет осциллографировать напряжение на вторичной стороне трансформатора;

7) датчик тока (*Dat ia*) и датчик напряжения (*Dat ua*) – позволяют осциллографировать анодный ток диода и напряжение на вентиле (анодное напряжение);

8) датчик тока (*Dat id*) – позволяет осциллографировать выпрямленный ток, протекающий через нагрузку;

9) датчик напряжения (*Dat ud*) – позволяет осциллографировать выпрямленное напряжение;

10) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

11) блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier Ud*, *Fourier Id*, *Fourier Ia*) – предназначенные для выделения основной составляющей (среднее значение) из мгновенных значений напряжения и токов:

Fourier Ud – среднее значение выпрямленного напряжения;

Fourier Id – среднее значение выпрямленного тока;

Fourier Ia – среднее значение анодного тока.

Для корректности работы схемы и исключения появления сообщения об ошибке в схеме не используемые выходы рекомендуется подключать к блокам *Terminator*.

12) дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока, снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье (*Ud*, *Id*, *Ia*).

Принципиальная схема однофазного неуправляемого выпрямителя, выполненного по мостовой схеме, его схема замещения, а также виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображены на рис. 2.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (*E2*), трансформатор (*TR*), диодный мост (*Universal Bridge*), нагрузка (Rd , Ld , E), датчики напряжения и тока (*Dat e2*, *Dat u2*, *Dat i2*, *Dat id*,

$Dat\ u_d$), мультиметр (*Multimeter*), осциллограф (*Scope*), блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier U_d*, *Fourier I_d*, *Fourier I_a*) и дисплей (*Display*).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник синусоидальной ЭДС (E_2) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E_2 в соответствии с таблицей вариантов и умножить на $\sqrt{2}$;

2) трансформатор (TR) – блок, реализованный на базе RL – цепи; имитируется схема замещения трансформатора, приведенного ко вторичной стороне. Изменяемые параметры блока:

- индуктивность рассеяния трансформатора установить $L_a = 0,03$ Гн;
- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить $r_a = 10$ Ом;

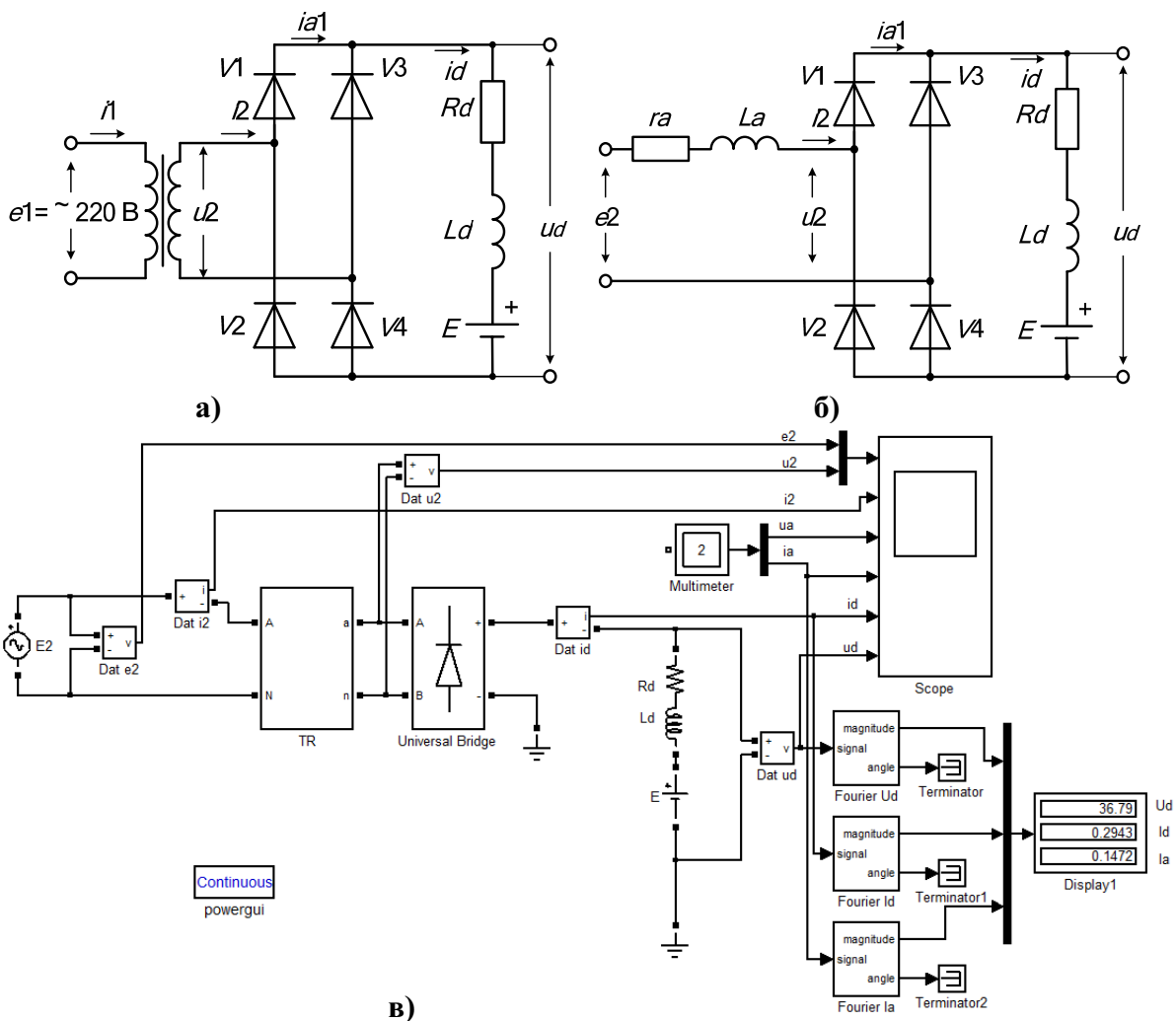


Рис. 2. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) неуправляемой однофазной мостовой схемы выпрямления

3) диодный мост (*Universal Bridge*) – блок, имитирующий однофазную мостовую схему выпрямления. Изменяемые параметры блока:

- тип силового полупроводникового элемента (*Power Electronic device*) – установить – диод (*Diodes*);

- количество плеч универсального моста (*Numbers of bridge arms*) – установить равное 2;

- демпфирующая цепь (*Snubber*) – цепь, состоящая их последовательно включенных активного сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно диодам – установить $R_s = 10^6$ Ом, $C_s = inf$ (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме). Ввод таких параметров имитирует обратное сопротивление диодов.

- дифференциальное сопротивление вентиля во включенном состоянии (*Resistance Ron (Ohms)*). Установить $r_d = 1$ Ом;

- индуктивность вентиля во включенном состоянии (*Inductance Lon (H)*). Установить $Lon = 0$ Гн;

- пороговое напряжение вентиля U_0 (*Forward voltage Vf (V)*).

Установить $U_0 = 0,8$ В;

4) нагрузка (R_d , L_d , E) состоит из двух последовательно соединенных блоков: активно-индуктивной нагрузки (R_d , L_d) и противо-ЭДС (E). Для выбора параметра активно-индуктивной части нагрузки необходимо дважды щелкнуть по блоку R_d , L_d и в раскрывающейся вкладке «*Branch type*» установить параметры R , L . Для выбора противо-ЭДС необходимо дважды щелкнуть по блоку E .

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

- активная, если $L_d = 0$, $E = 0$; R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов);

- активно-индуктивная, если $E = 0$; R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов). Для расчета L_d индуктивное сопротивление X_d принять равным R_d (см. примечание 2 после таблицы вариантов);

- активно-индуктивная с противо-ЭДС – R_d , L_d , E – установить в соответствии с заданным вариантом и примечанием 3 к таблице вариантов.

5) датчик напряжения (*Dat e2*) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

6) датчики напряжения и тока (*Dat u2*, *Dat i2*) – позволяют осциллографировать напряжение и ток на вторичной стороне трансформатора (на входе блока вентилей);

7) датчики напряжения и тока (*Dat ud*, *Dat id*) – позволяют осциллографировать выпрямленное напряжение и выпрямленный ток;

8) мультиметр (*Multimeter*) – блок, позволяющий измерять все токи и напряжения в схеме. В однофазной мостовой схеме выпрямления

измеряет все токи и напряжения блока диодный мост (*Universal Bridge*); Во вкладке «*Measurements*» выбрать «*All voltages and currents*», что обозначает измерение всех токов и напряжений в блоке *Universal Bridge*. С помощью блока мультиметр (*Multimeter*) можно передать их на осциллограф.

9) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых со всех датчиков напряжения и тока, а также мультиметра.

10) блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier Ud, Fourier Id, Fourier Ia*) – предназначенные для выделения основной составляющей (среднее значение) из мгновенных значений напряжения и токов:

Fourier Ud – среднее значение выпрямленного напряжения;

Fourier Id – среднее значение выпрямленного тока;

Fourier Ia – среднее значение анодного тока.

11) дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока, снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье (*Ud, Id, Ia*).

Предварительное домашнее задание

а) изучить темы курса «Однофазные выпрямители» [1 (4.1 – 4.2)] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) для чисто активной нагрузки построить в масштабе временные диаграммы вторичной ЭДС e_2 , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a . Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов. Вентиль считать идеальным;

в) определить значения напряжений и токов приведенные в табл. 1 для однофазной однополупериодной или мостовой схемы выпрямления в соответствии с подвариантом;

г) для активной нагрузки с противо-ЭДС построить в масштабе временные диаграммы ЭДС e_2 , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a . Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов. Вентили считать идеальными.

д) по построенным в п. г) временным диаграммам определить амплитудные значения напряжений и токов в схеме.

Таблица 1

Основные соотношения для однофазных выпрямителей

Однополупериодный выпрямитель	Мостовой выпрямитель	
Среднее значение идеального выпрямленного напряжения		
$U_{d0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} U_{2m} \cdot \cos \omega t \cdot d\omega t =$ $= \frac{U_{2m}}{\pi} = 0,45 \cdot U_2.$	$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} U_{2m} \cdot \cos \omega t \cdot d\omega t =$ $= \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} = 0,9 \cdot U_2.$	(1)
где U_{2m} – амплитуда напряжения на вторичной стороне трансформатора.		
$U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2$		(2)
U_2 – действующее значение напряжения на вторичной стороне трансформатора.		
Амплитуда выпрямленного напряжения		
$U_{d \max} = U_{2m} = \pi \cdot U_{d0}$	$U_{d \max} = U_{2m} = \pi \cdot U_{d0} / 2$	(3)
Амплитуда выпрямленного тока		
$I_{d \max} = \pi \cdot I_d$	$I_{d \max} = \pi \cdot I_d / 2$	(4)
Среднее значение выпрямленного тока		
$I_d = \frac{U_{d0}}{R_d}$		(5)
Среднее и амплитудное значение анодного тока		
$I_a = I_d, I_{a \max} = I_{d \max} = \pi \cdot I_d$	$I_a = I_d / 2,$ $I_{a \max} = I_{d \max} = \pi \cdot I_d / 2$	(6)
Амплитуда обратного напряжения на вентиле		
$U_{a \max} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{d0}$	$U_{a \max} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{d0} / 2$	(7)

Результаты предварительных расчетов занести в таблицу 2, в отчете сравнить с результатами, полученными экспериментальным путем.

Таблица 2

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Однополупериодный выпрямитель						Мостовой выпрямитель					
	Предв. расчет $R_d=$	Нагрузка			Влияние		Предв. расчет $R_d=$	Нагрузка			Влияние	
		$R_d=$	$R_d=$ $L_d=$	$R_d=$ $L_d=$ $E=$	$r_a=$	$L_d=$		$R_d=$	$R_d=$ $L_d=$	$R_d=$ $L_d=$ $E=$	$L_a=$	$L_d=$
U_{d0}												
U_{2m}												
U_{dmax}												
I_{dmax}												
I_d												
I_a												
U_{amax}												

Программа исследования схем однофазных неуправляемых выпрямителей

1. Исследование модели однополупериодного неуправляемого выпрямителя:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

1.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

2. Исследование модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя:

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

2.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. Исследование модели однополупериодного неуправляемого выпрямителя:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) запустить программу «MatLab»;

б) открыть файл «*neupr_odnopolup.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель неуправляемого выпрямителя, представленная на рис. 1 в;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для активной нагрузки. Для этого после окончания расчета модели (пусковая кнопка вновь приняла вид треугольника ) направить курсор мыши на блок (*Scope*) и щелкнуть два раза левой кнопкой мыши. После этих действий появится окно, имитирующее экран реального осциллографа, содержащего пять каналов.

Осциллограммы можно растягивать по осям X и Y или менять масштаб осей, используя методику, приведенную в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода в конце осциллограммы – в установившемся режиме), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* приведены также в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам;

Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с расчетными;

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при расчете с другим характером нагрузки: активно-индуктивным и при работе выпрямителя на противо-ЭДС. Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм. Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке;

1.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

а) включить в схему последовательно с ЭДС E_2 сопротивление r_a (по указанию преподавателя), исследовать его влияние на осциллограммы и результаты измерений;

б) увеличить индуктивность нагрузки в 2 раза и исследовать влияние на осциллограммы и результаты измерений.

2. Исследование модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) открыть файлы «*neupr_most.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель неуправляемого мостового выпрямителя, представленная на рис. 2 в;

б) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя;

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при различных видах нагрузки.

а) запустить расчет модели;

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для активной нагрузки для мостовой схемы выпрямления.

Обработать осциллограммы по аналогии с п. 1.2.б;

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при расчете с другим характером нагрузки: активно-индуктивным и/или при работе выпрямителя на противо-ЭДС (по указанию преподавателя). Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм, определить режим работы в схеме (непрерывный, граничный, прерывистый). Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке;

2.3. Исследование влияния параметров элементов схемы на вид осциллограмм и результаты измерений.

а) исследовать влияние параметров схемы L_d , L_a (см. рис. 2) на форму выпрямленного напряжения u_d и анодного тока i_a , режим работы, а также на результаты измерений;

б) назовите, какие параметры схемы нужно изменить, чтобы изменился режим работы; произвести изменение параметра (по указанию преподавателя), приводящие к изменению режима.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).

5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования однофазного неуправляемого выпрямителя (для своего подварианта).

6. Осциллограммы и таблицу результатов измерений исследованных схем:

- а) для активной нагрузки;
- б) для активно-индуктивной нагрузки;
- в) для активно-индуктивной нагрузки с противо-ЭДС;
- г) для случаев исследования влияния изменения параметров элементов схемы, которые снимали по указанию преподавателя.

На осциллограммах отметить амплитуды и сравнить с предварительными домашними расчетами (см. табл. 2).

Сделать выводы о причинах различия рассчитанных значений и полученных экспериментальным путем.

7. Обобщающие выводы.

По осциллограммам и результатам измерений сравнить однофазную однополупериодную и мостовую схемы выпрямления:

- а) по качеству выпрямленного напряжения;
- б) по величине выпрямленного напряжения;
- в) по величине обратного напряжения (по отношению к выпрямленному);

По осциллограммам и результатам измерений определить, на что влияет характер нагрузки

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируются выпрямители?
2. Какова наиболее полная структурная схема выпрямителя и почему она может упрощаться?
3. Какие схемы применяются для выпрямления однофазного тока?
4. Как работают однофазные схемы выпрямления?
5. Какие допущения принимаются при анализе схем выпрямления?
6. Какие допущения принимаются при создании схем замещения?
7. Как учитывается неидеальность вентиля?
8. Какие возможны виды нагрузок выпрямителя?
9. Как и зачем строятся временные диаграммы токов и напряжений?
10. Назовите основные величины, используемые при описании работы выпрямителей.
11. Назовите режимы работы выпрямителя и их отличия.
12. Какова частота пульсаций в изучаемых схемах?
13. Почему и как влияет характер нагрузки на форму токов в выпрямителе?

14. Как определяются основные соотношения между токами и напряжениями в схемах выпрямления?

15. Пояснить назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазный однополупериодный неуправляемый выпрямитель.

16. Пояснить назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазную мостовую схему выпрямления.

Таблица 3

Таблица вариантов

№ варианта	ЭДС на вторичной стороне трансформатора	Активное сопротивление нагрузки
	E_2 , В	R_d , Ом
1, 13	51	100
2, 14	50	120
3, 15	52	140
4, 16	49	100
5, 17	54	140
6, 18	48	120
7, 19	55	140
8, 20	47	100
9, 21	44	80
10, 22	46	90
11, 23	53	100
12, 24	45	90

Примечания:

1. Студенты, получившие подвариант А, выполняют пункты 1 а, б, в для однополупериодной схемы выпрямления; Б – пункты 1 а, б, в для мостовой схемы выпрямления; В – пункты 1а, г, д для однополупериодной схемы выпрямления.

2. При определении индуктивного сопротивления нагрузки принять $X_d = R_d$. Тогда $L_d = X_d / \omega$ Гн, где $\omega = 314$ при частоте 50 Гц.

3. При работе на активную и активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС принять $E = 0,95 E_2$, а R_d и X_d уменьшить в 10 раз по сравнению с случаем активной или активно-индуктивной нагрузки.

Работа №2. Исследование однофазных управляемых выпрямителей

Цель работы: исследование электромагнитных процессов, регулировочных и внешних характеристик управляемых выпрямителей, выполненных по однофазной однополупериодной и однофазной мостовой схемам выпрямления.

Описание виртуальных моделей

Принципиальная схема однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя, его схема замещения, а также виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображены на рис. 1.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС ($E2$), блок задания угла управления (α), система управления (SU), тиристор (*Thyristor*), нагрузка (R_d , L_d), датчики напряжения и тока ($Dat\ e2$, $Dat\ id$, $Dat\ ud$), осциллограф (*Scope*), блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier Ud*, *Fourier Id*) и дисплей (*Display*).

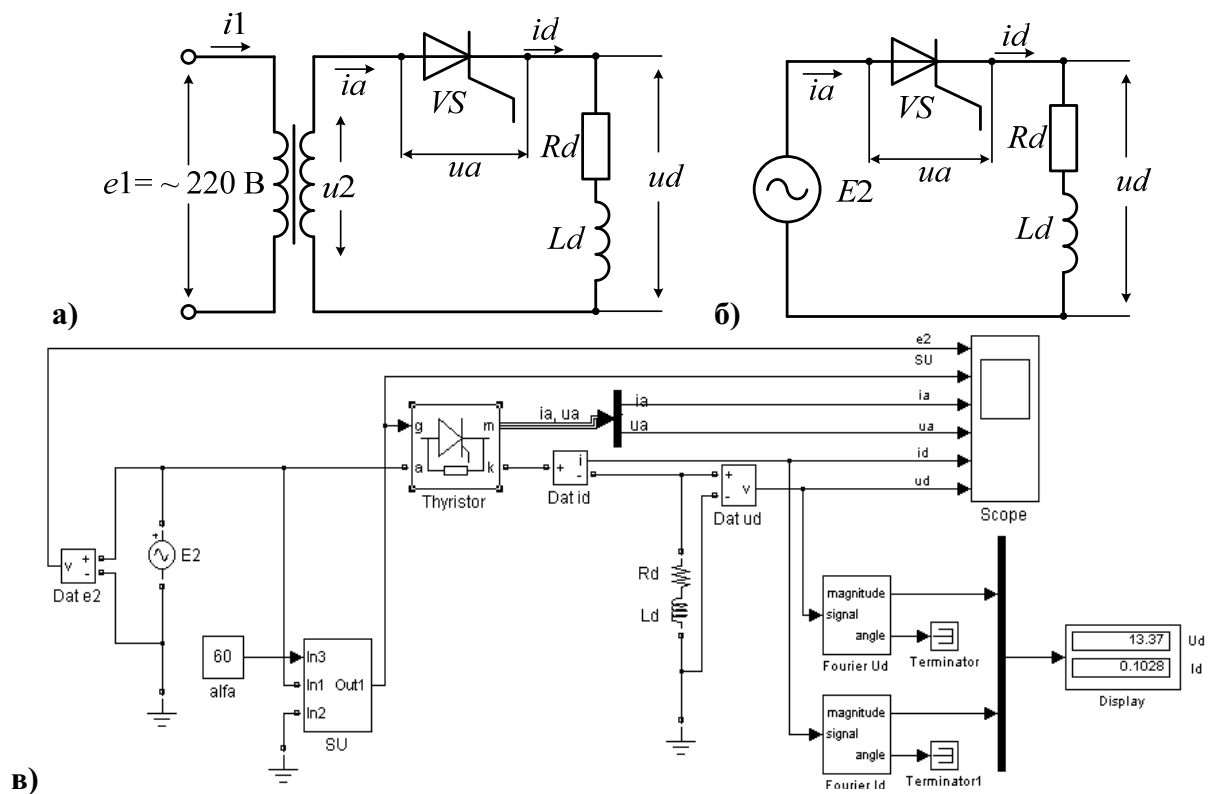


Рис. 1. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) однофазного управляемого выпрямителя

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник ЭДС ($E2$) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора.

Изменяемые параметры блока:

- амплитуда ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E_2 в соответствии с таблицей вариантов и умножить на $\sqrt{2}$;

- фазовый сдвиг (установить 0);

- частота напряжения питания (установить $f = 50$ Гц);

- типовое время – установить «0».

2) блок задания угла управления (*alfa*) – позволяющий задавать угол управления тиристором (установить в соответствии с табл. вариантов);

3) система управления (*SU*) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристором;

4) тиристор (*Thyristor*) – блок, имитирующий работу тиристора. Обозначение входов и выходов: «*a*» – анод, «*k*» – катод, «*g*» – управляющий электрод тиристора, «*m*» – демultipлексор выходных сигналов тиристора (соединение данного выхода с блоком *Mux* дает возможность выдать на разные входы осциллографа ток *ia* и напряжение *ua* на тиристоре).

Изменяемые параметры блока:

- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии r_d (Resistance Ron (Ohms)). Установить $r_d = 1$ Ом);

- индуктивность тиристора во включенном состоянии (*Inductance Lon*(H)). Установить 0 Гн;

- пороговое напряжение тиристора U_0 (*Forward voltage Vf* (V)).

Установить $U_0 = 0,8$ В;

- начальный ток, протекающий через тиристор (*Initial current Ic* (A)).

Установить $I_c = 0$ А);

- демпфирующая цепь (*Snabber*) – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристору и устраняет перенапряжения при выключении тиристора. Установить $R_s = 10^6$ Ом, $C_s = inf$ (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме).

5) Нагрузка (R_d , L_d). Для выбора параметров активно-индуктивной нагрузки необходимо дважды щелкнуть по блоку R_d , L_d и в раскрывающейся вкладке «*Branch type*» установить тип нагрузки RL .

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

- активная – $L_d = 0$, R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов);

- активно-индуктивная – R_d установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов). Индуктивность L_d установить в соответствии с примечанием 2 после таблицы вариантов;

6) датчик напряжения (*Dat e2*) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

7) датчики напряжения и тока (*Dat ud*, *Dat id*) – позволяют осциллографировать выпрямленное напряжение и выпрямленный ток, протекающий через нагрузку;

8) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений;

9) блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier Ud*, *Fourier Id*) – предназначенные для выделения постоянной составляющей (среднего значения) в напряжении и токе:

Fourier Ud – среднее значение выпрямленного напряжения;

Fourier Id – среднее значение выпрямленного тока;

Для корректности работы схемы и исключения появления сообщения об ошибке в схеме неиспользуемые выходы рекомендуется подключать к блокам *Terminator*.

10) дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока, снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье (*Ud*, *Id*).

Принципиальная схема однофазного управляемого выпрямителя, выполненного по мостовой схеме, его схема замещения, а также виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображены на рис. 2.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (*E2*), трансформатор (*TR*), блок задания угла управления (*alfa*), система управления (*SU*), тиристорный мост (*Universal Bridge*), нагрузка (*Rd*, *L*), датчики напряжения и тока (*Dat e2*, *Dat u2*, *Dat i2*, *Dat id*, *Dat ud*), мультиметр (*Multimeter*), осциллограф (*Scope*), блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier Ud*, *Fourier Id*) и дисплей (*Display*).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник синусоидальной ЭДС (*E2*) – имитирует ЭДС на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС *E2* в соответствии с таблицей вариантов и умножить на $\sqrt{2}$. Частоту установить равной 50 Гц;

2) трансформатор (*TR*) – блок, реализованный на базе *RL* – цепи, имитирует схему замещения трансформатора, приведенного ко вторичной стороне.

Изменяемые параметры блока:

– индуктивность рассеяния трансформатора. Установить $L_a = 0,06$ Гн;
– активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить $r_a = 10$ Ом.

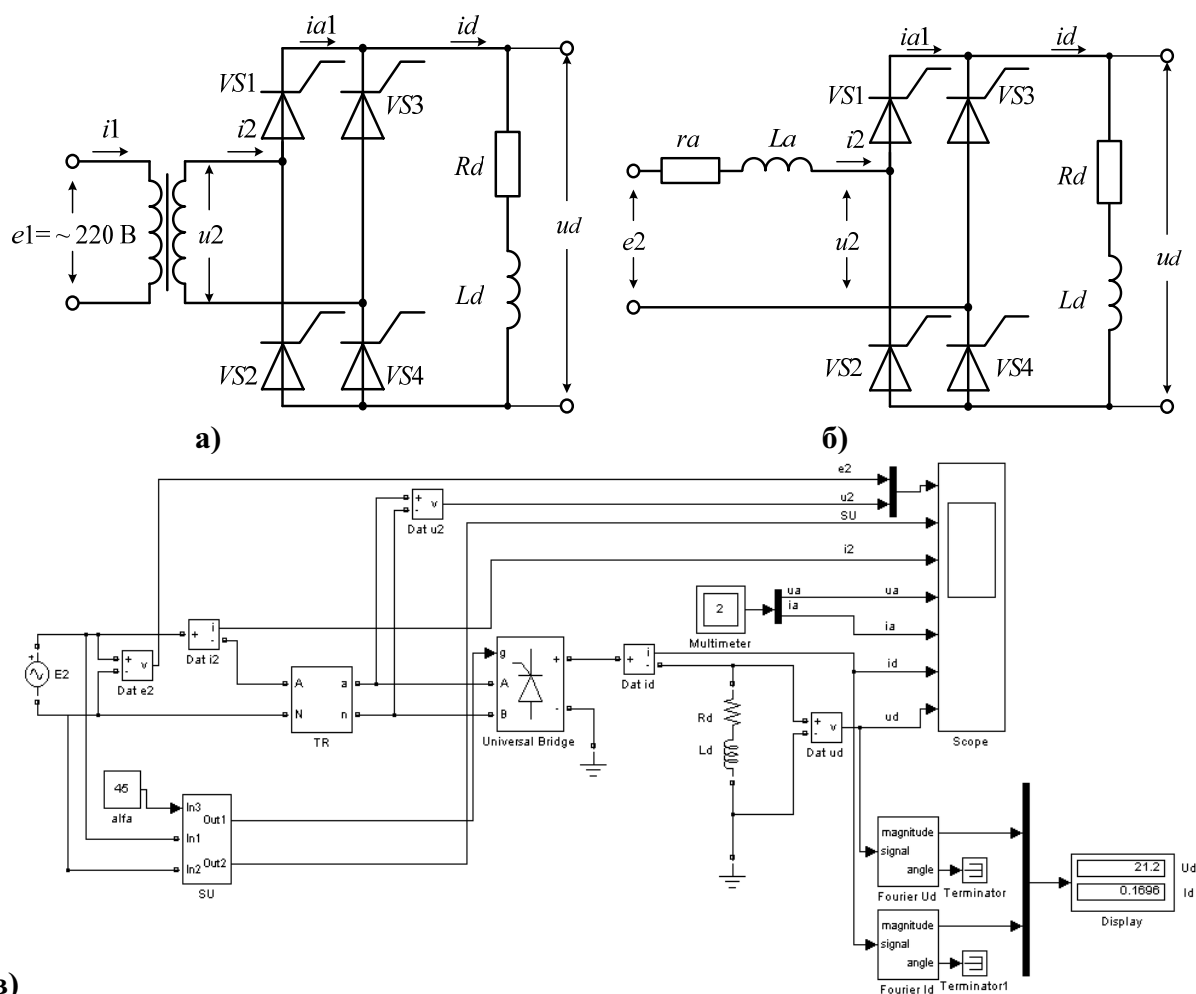


Рис. 2. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) однофазного управляемого мостового выпрямителя

3) блок задания угла управления (*alfa*) – блок, позволяющий задавать угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом);

4) система управления (*SU*) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами. Система управления (*SU*) имеет два выхода. С первого по общей шине группа импульсов подается на все тиристоры, а второй выведен для осциллографирования сигнала управления первым тиристором;

5) тиристорный мост (*Universal Bridge*) – имитирующий однофазную мостовую схему управления. Изменяемые параметры блока:

- количество плеч универсального моста (*Numbers of bridge arms*) – установить равное 2;
- тип силового полупроводникового элемента (*Power Electronic device*) – установить – тиристор (*Thyristors*);
- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии (*Resistance Ron (Ohms)*). Установить $r_d = 1 \text{ Ом}$;

– индуктивность тиристора во включенном состоянии (*Inductance Lon* (H)). Установить $Lon = 0$ Гн;

– пороговое напряжение тиристора U_0 (*Forward voltage Vf* (V)).

Установить $U_0 = 0,8$ В);

– демпфирующая цепь (*Snabber*) – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристор и устраняет перенапряжения при выключении тиристора. Установить $R_s = 10e^6$ Ом, $C_s = inf$.

Во вкладке «*Measurements*» выбрать «*All voltages and currents*», что обозначает измерение всех токов и напряжений в блоке *Universal Bridge* с помощью внешнего блока мультиметр (*Multimeter*) и их последующее осциллографирование.

6) нагрузка (R_d , L_d). Для выбора параметров активно-индуктивной нагрузки необходимо дважды щелкнуть по блоку R_d , L_d и в раскрывающейся вкладке «*Branch type*» установить параметры R , L .

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

– активная – $L_d = 0$, R_d – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов);

– активно-индуктивная – R_d установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов). Индуктивность L_d установить в соответствии с примечанием 2 после таблицы вариантов;

7) датчик напряжения (*Dat e2*) – позволяет осциллографировать ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

8) датчики напряжения и тока (*Dat u2*, *Dat i2*) – позволяют осциллографировать напряжение и ток на вторичной стороне трансформатора (на входе блока вентилей);

9) датчики тока и напряжения (*Dat id*, *Dat ud*) – для осциллографирования выпрямленного тока и напряжения;

10) мультиметр (*Multimeter*) – блок, позволяющий измерять все токи и напряжения в блоке *Universal Bridge*.

11) осциллограф (*Scope*) – блок, предназначенный для наблюдения мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых со всех датчиков тока и напряжения, а также мультиметра.

12) блоки разложения в ряд Фурье (*Fourier Ud*, *Fourier Id*, *Fourier Ia*) – предназначенные для выделения основной составляющей (среднее значение) из мгновенных значений напряжения и токов:

Fourier Ud – среднее значение выпрямленного напряжения;

Fourier Id – среднее значение выпрямленного тока;

13) дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения средних значений напряжения и тока (U_d , I_d), снимаемых с блоков разложения в ряд Фурье.

Предварительное домашнее задание

а) Изучить темы курса «Тиристоры», «Однофазные выпрямители», «Управляемые выпрямители тока», «Энергетические показатели выпрямителей» [1(5.1 – 5.3)] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) для заданного угла управления α построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичной ЭДС e_2 , выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a при чисто активной нагрузке. Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов. Вентили и трансформатор считать идеальными;

в) для однофазной мостовой схемы и заданного угла управления α построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичных ЭДС e_{2a} и e_{2b} выпрямленного напряжения u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a при активно-индуктивной нагрузке. При построении принять $x_d = \infty$. Действующее значение ЭДС E_2 взять из таблицы вариантов. Угол коммутации γ рекомендуется принять равным 10 град. Вентили считать идеальными;

г) рассчитать и построить регулировочную характеристику при активной нагрузке и идеальных вентилях и трансформаторе

$$U_{d\alpha 0} = U_{d0} \cdot \left[\frac{1 - \sin\left(\delta - \frac{\pi}{2}\right)}{2} \right],$$

где $U_{d0} = 0.45 \cdot U_2$ для однофазной однополупериодной схемы;

$U_{d0} = 0.9 \cdot U_2$ для однофазной мостовой схемы;

д) рассчитать и построить регулировочную характеристику при активно-индуктивной нагрузке в непрерывном режиме ($x_d = \infty$) и идеальных вентилях и трансформаторе

$$U_{d\alpha 0} = U_{d0} \cdot \cos \alpha .$$

Программа исследования схем однофазных управляемых выпрямителей

1. Исследование модели однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя

1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

1.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.

1.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.

2. Исследование модели однофазного мостового управляемого выпрямителя
 - 2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.
 - 2.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.
 - 2.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.
 - 2.4. Снятие внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.
3. Составление отчета.

Таблица 1

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Однополупериодный выпрямитель			Мостовой выпрямитель					
	Предв. расчет $R_d=$	Нагрузка		Предв. расчет $R_d=$	Нагрузка			Влияние	
		$R_d=$	$R_d=$ $L_d=$		$R_d=$	$R_d=$ $L_d=$	$R_d=$ $L_d=$ $E=$	$L_a=$	$L_d=$
U_{d0}									
U_{2m}									
U_{dmax}									
I_{dmax}									
I_d									
I_a									
U_{amax}									

Экспериментальное исследование

1. Исследование модели однополупериодного управляемого выпрямителя:

- 1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.
 - а) запустить программу «MatLab»;
 - б) открыть файл «*upr_odnopolup.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель управляемого однополупериодного выпрямителя, представленная на рис. 1 в;
 - в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.
- 1.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.
 - а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);
 - б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активной нагрузке.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с расчетными;

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при расчете с другим характером нагрузки: активно-индуктивным. Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке.

1.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.

а) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при чисто активной нагрузке. При построении регулировочной характеристики изменять угол управления в блоке *alfa* (диапазон изменения $\alpha = 0 \dots 180^\circ$ с шагом 30°). Величину выпрямленного напряжения U_d снимать с блока дисплей (*Display*);

б) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке. Определить требуемый диапазон изменения угла α для снижения U_d до 0.

2 Исследование модели однофазного управляемого мостового выпрямителя

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) открыть файлы «*upr_mostov.mdl*».

б) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели однофазного мостового неуправляемого выпрямителя.

2.2. Осциллографирование при различных видах нагрузки.

а) запустить расчет модели;

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для мостовой схемы выпрямления при активной нагрузке.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с расчетными;

в) аналогичным образом снять и сохранить осциллограммы, полученные при активно-индуктивной нагрузке. Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осциллограмм, определить режим работы в схеме (непрерывный, граничный, прерывистый).

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке;

2.3. Снятие регулировочной характеристики при различных видах нагрузки.

а) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при чисто активной нагрузке. При построении регулировочной характеристики изменять угол управления в блоке *alfa* (диапазон изменения $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$ с шагом 30° , см. табл. 2). Величину выпрямленного напряжения U_d снимать с блока дисплей (*Display*);

б) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке (см. табл. 2). Определить требуемый диапазон изменения угла α для снижения U_d до 0.

При каждом угле α по осциллограммам смотреть, какой режим по току в выпрямителе. На регулировочной характеристике отметить точку, соответствующую граничному режиму.

Таблица 2

Экспериментальные данные для построения регулировочных характеристик

α , град		0	30	60	90	120	150	180
нагрузка R	U_d							
нагрузка RL	U_d							

2.4. Снятие внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.

а) построить внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при заданном угле управления $\alpha_{\text{зад}}$ по трем значениям активного сопротивления нагрузки: R_d равному заданному, $R_d' = 2 \cdot R_d$ и $R_d'' = 5 \cdot R_d$; контролировать, что режим остается непрерывным;

б) построить внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при угле управления $\alpha = \alpha_{\text{зад}} - 10^\circ$ по трем значениям активного сопротивления нагрузки: R_d равному заданному, $R_d' = 2 \cdot R_d$ и $R_d'' = 5 \cdot R_d$.

Таблица 3

Экспериментальные данные для построения внешних характеристик

Параметры	$\alpha_{\text{зад}} = \underline{\hspace{2cm}}$		
	$Rd = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$	$Rd' = 2 \cdot Rd = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$	$Rd'' = 5 \cdot Rd = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$
Ud			
Id			
	$\alpha = \alpha_{\text{зад}} - 10^0 = \underline{\hspace{2cm}}$		
Ud			
Id			

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента, принципиальную схему и виртуальную модель для исследования однофазного управляемого выпрямителя (для своего подварианта).

6. Осциллограммы для исследованных схем:

- а) для активной нагрузки;
- б) для активно-индуктивной нагрузки;

Сделать выводы о влиянии характера нагрузки на вид осциллограмм.

7. Регулировочные и внешние характеристики, построенные по точкам (с приложением таблиц для построения). Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях. Сделать выводы о влиянии характера нагрузки и угла управления.

8. Обобщающие выводы.

По осциллограммам и характеристикам сравнить однофазную однополупериодную и мостовую схемы управляемых выпрямителей:

- а) по качеству выпрямленного напряжения;
- б) по величине выпрямленного напряжения;

По осциллограммам и характеристикам определить, на что влияет характер нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Как работает однополупериодный управляемый выпрямитель?
2. Что такое угол управления? По какой осциллограмме его можно определить?
3. На что влияет угол управления?

4. Что такое угол проводимости вентиля?
5. От чего зависит форма напряжения на нагрузке?
6. Назовите режимы работы выпрямителя и их отличия.
7. Что такое регулировочная характеристика? Как построить регулировочную характеристику для виртуальной модели.
8. От чего зависит вид регулировочной характеристики?
9. Чем определяется диапазон изменения угла управления, необходимый для полного регулирования выпрямленного напряжения?
10. Что такое внешняя характеристика. Как ее построить?
11. Что произойдет с внешней характеристикой, если увеличится угол управления?
12. Почему с ростом тока падает выпрямленное напряжение?
13. Поясните назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазный однополупериодный неуправляемый выпрямитель.
14. Поясните назначение блоков виртуальной модели имитирующей однофазную мостовую схему выпрямления.

Таблица 4

Таблица вариантов

№ варианта	Угол управления	ЭДС на вторичной стороне трансформатора	Активное сопротивление нагрузки
	α , град	E_2 , В	R_d , Ом
1, 13	30	48	120
2, 14	35	50	130
3, 15	40	52	140
4, 16	45	54	150
5, 17	35	48	120
6, 18	40	50	130
7, 19	45	52	140
8, 20	25	54	150
9, 21	30	48	140
10, 22	35	50	150
11, 23	40	52	120
12, 24	45	54	130

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют п. а, б; г для однофазной однополупериодной схемы; Б – выполняют п. а, в; д для однофазной мостовой схемы; В – выполняют п. а, б; г для однофазной мостовой схемы.

2. При активно-индуктивной нагрузке принять $X_d = R_d$ для однополупериодной схемы и $X_d = 5 \cdot R_d$ для однофазной мостовой.

Тогда $L_d = X_d / \omega$ Гн, где при частоте 50 Гц $\omega = 314$.

Работа №3. Исследование трехфазных управляемых выпрямителей

Цель работы: Изучение электромагнитных процессов, характеристик и режимов работы трехфазных управляемых выпрямителей, включенных по мостовой или нулевой схеме, при различных видах нагрузки.

Описание виртуальных моделей

Принципиальная схема трехфазного мостового выпрямителя, а также виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображены на рис. 1.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник напряжения (*SET*), трансформатор (*TR*), система импульсно-фазового управления (*SIFU*), блоки задания угла управления (*Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA*), вентильный блок (*WB*), нагрузочно-питающее устройство (*NPU*), задатчики тока *Id* (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), датчики тока и напряжения (*Dat i1A*, *Dat uab*), осциллограф (*Scope*), дисплей (*Display*), переключатели (*Switch1*, *Switch2*, *Switch3*, *Switch4*) и графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник напряжения (*SET*) – блок, состоящий из трех источников идеального синусоидального напряжения, имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. Напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов. Изменяемые параметры блока:

- напряжение (*Voltage*) сети установить равное 220 В.

2) Трансформатор (*TR*) – блок, состоящий из идеального трехфазного трансформатора с учетом контура намагничивания и включенных последовательно в каждой фазе *RL* – цепей. Изменяемые параметры блока:

- индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту (при частоте 50 Гц $\omega = 314$).

- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной стороне (установить $R_a = 1,65$ Ом);

- фазное напряжение на первичной стороне трансформатора *U1* (установить 220 В);

- фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора *U2* (установить в соответствии с заданным вариантом);

3) Система импульсно-фазового управления (*SIFU*) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

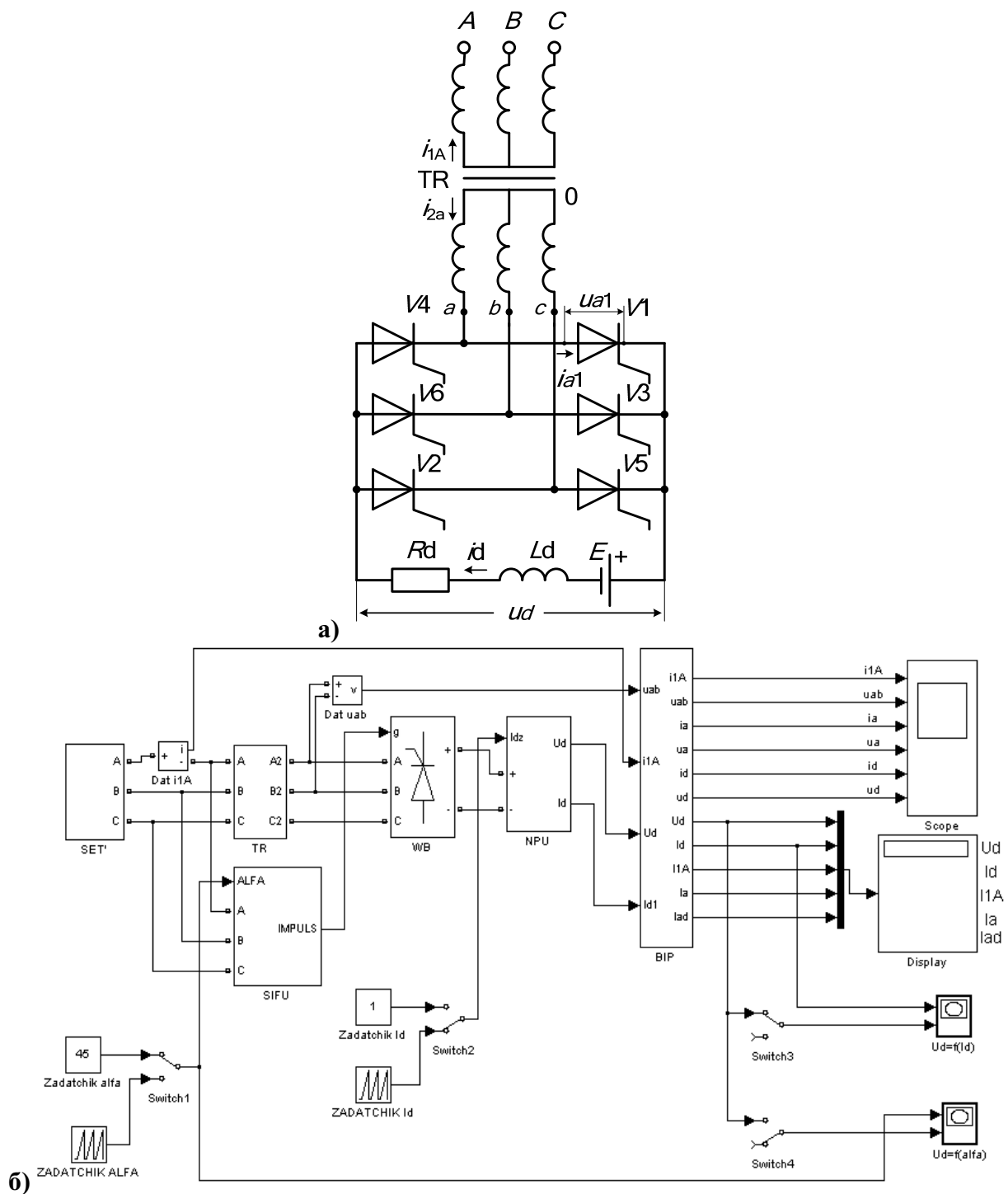


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) трехфазного мостового выпрямителя

Двойной щелчок левой кнопкой мыши позволяет раскрыть структуру блока *SIFU*.

В состав СИФУ (*SIFU*) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (*Synchronized 6-Pulse Generator*), формирующий вдвоенные импульсы для управления тиристорами вентильного блока.

Блок *Synchronized 6-Pulse Generator* имеет два изменяемых параметра:

- частота синхронизирующего напряжения, Гц (*Frequency of synchronisation voltages (Hz)*) – соответствует частоте сети 50 Гц;
- ширина импульса (*Pulse width (degrees)*) – задано 10 град.

Импульсы необходимо формировать сдвоенные (*Double pulsing*), т.к. управление тиристорами осуществляется в мостовой схеме.

4) Блоки задания угла управления (*Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA*).

Блок *Zadatchik alfa* позволяет задавать фиксированный угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом);

Блок *ZADATCHIK ALFA* позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0^0 до 120^0 и предназначен для построения регулировочной характеристики.

5) Вентильный блок (*WB*) – универсальный мостовой модуль.

Изменяемые параметры блока:

- количество плеч универсального моста (*Numbers of bridge arms*) – установить равное 3;

- тип силового полупроводникового элемента (*Power Electronic device*) – установить – тиристор (*Thyristors*);

- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии *Ron* (установить 0,2 Ом);

- индуктивность тиристора во включенном состоянии *Lon* (установить 0 Гн);

- пороговое напряжение тиристора *Uf* (установить 0,8 В);

- демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления *Rs* и конденсатора *Cs*. Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить $R_s = 5000$ Ом, $C_s = 2e^{-7}$);

6) Нагрузочно-питающее устройство (*NPU*) – блок, содержащий управляемый источник ПЭДС и реактор, имеющий активное и индуктивное сопротивление. Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление реактора *Rd* (установить 5 Ом);

- индуктивность реактора *Ld* (установить 0,2 Гн);

- вид нагрузки (*Vid nagruzki s PEDS 1, bez PEDS 0*) установить «1» для включения в схему нагрузки с ПЭДС или «0» – для активно-индуктивного характера нагрузки;

7) Задатчики тока *Id* (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*) – блоки задания по току *Id* для нагрузочно-питающего устройства.

Блок *Zadatchik Id* позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока *Id*;

Блок *ZADATCHIK Id* позволяет задавать значение выпрямленного тока, изменяющееся во времени от 0 до 1А и предназначен для построения внешней характеристики.

8) Блок измерительных преобразователей (*BIP*) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения тока на первичной стороне трансформатора фазы А (i_{1a});

- мгновенные значения линейного напряжения (u_{ab});

- мгновенные значения анодного тока (ia);

- мгновенные значения напряжения на вентиле (ua);

- мгновенные значения выпрямленного тока (id);

- мгновенные значения выпрямленного напряжения (ud);

и измерять:

- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);

- среднее значение выпрямленного тока (I_d);

- действующее значение тока на первичной стороне трансформатора фазы А (I_{1A});

- среднее значение анодного тока (I_a)

- действующее значение анодного тока (I_{ad}).

9) Датчик тока (*Dat i_{1A}*) – позволяет осциллографировать ток на первичной стороне трансформатора фазы А;

10) Датчик напряжения (*Dat u_{ab}*) – позволяет осциллографировать линейное напряжение между фазами А и В;

11) Осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений;

12) Дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов снимаемых с блока *BIP*;

13) Переключатели (*Switch1, Switch2, Switch3, Switch4*) – блоки предназначенные для переключения между блоками *Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA* (*Switch1*), *Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id* (*Switch2*), а также введения в схему графопостроителей $U_d = f(I_d)$ (*Switch3*), $U_d = f(alfa)$ (*Switch4*).

14) Графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(alfa)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_d = f(I_d)$ и регулировочной $U_d = f(\alpha)$ характеристики в автоматическом режиме.

Принципиальная схема трехфазного управляемого выпрямителя, выполненного по нулевой схеме и его виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображены на рис. 2.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник ЭДС (*E2*), трансформатор (*TR*), система импульсно-фазового управления (*SIFU*), блоки задания угла управления (*Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA*), вентильный блок (*WB*), нагрузочно-питающее устройство (*NPU*),

датчики тока I_d (*Zadatchik I_d* и *ZADATCHIK I_d*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), датчик напряжения (*Dat u_{ab}*), осциллограф (*Scope*), дисплей (*Display*), переключатели (*Switch1*, *Switch2*, *Switch3*, *Switch4*) и графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник ЭДС (E_2) – имитирует трехфазную ЭДС на вторичной стороне трансформатора.

Изменяемые параметры блока:

– амплитуда ЭДС (*Voltage*) на вторичной стороне трансформатора. Установить действующее значение ЭДС E_2 в соответствии с таблицей вариантов и умножить на $\sqrt{2}$.

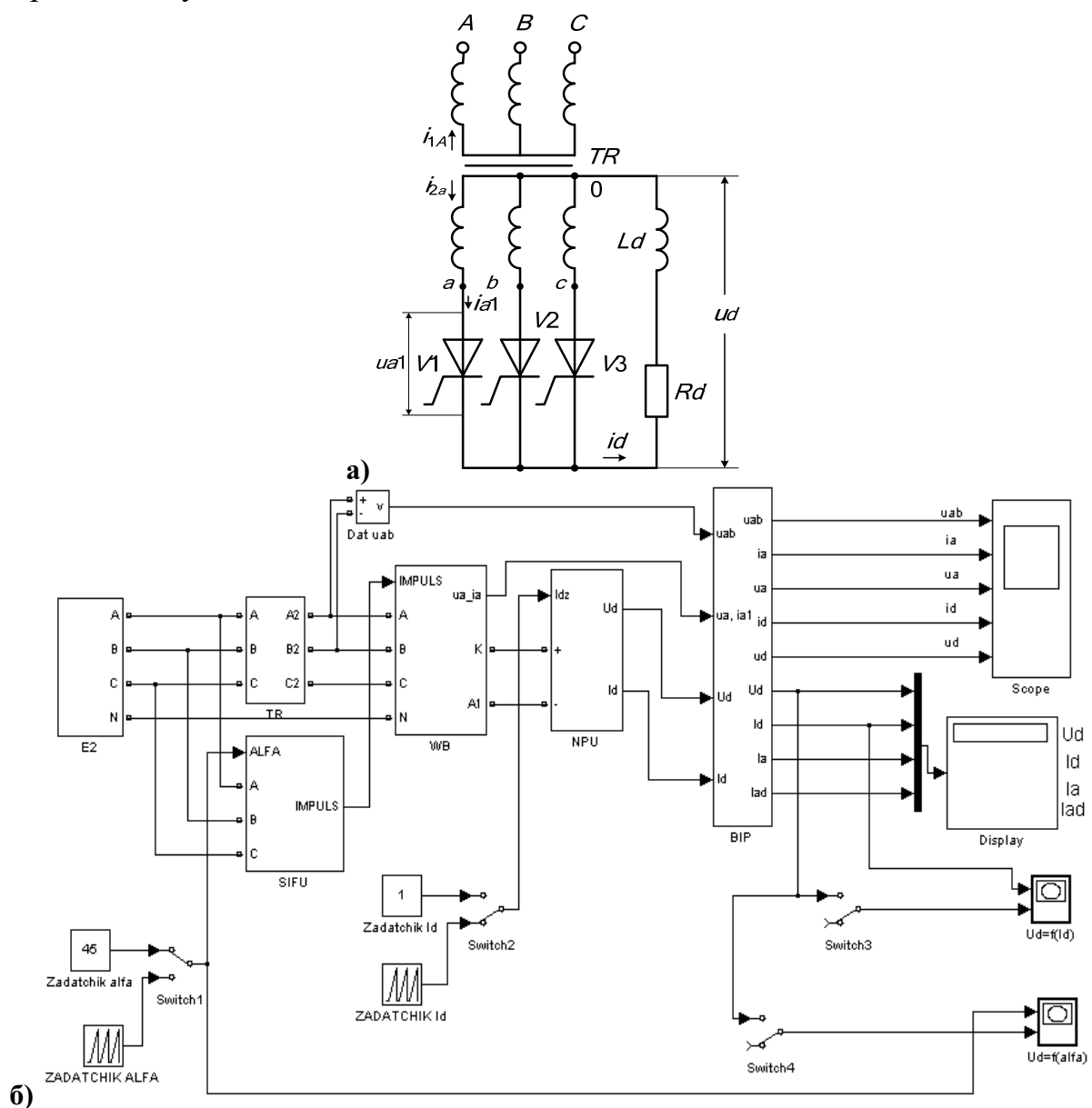


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) трехфазного нулевого выпрямителя

2) Трансформатор (*TR*) – блок, реализованный на базе *RL* – цепи, имитирует схему замещения трансформатора, приведенного ко вторичной стороне.

Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить $R_a = 1,65 \text{ Ом}$.

- индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту (при частоте 50 Гц $\omega = 314$).

3) Система импульсно-фазового управления (*SIFU*) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

Аналогично мостовой схеме в состав СИФУ (*SIFU*) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (*Synchronized 6-Pulse Generator*), у которого используется три канала для управления тиристорами вентильного блока.

Блок *Synchronized 6-Pulse Generator* имеет два изменяемых параметра:

- частота синхронизирующего напряжения, Гц (*Frequency of synchronisation voltages (Hz)*) – соответствует частоте сети 50 Гц;

- ширина импульса (*Pulse width (degrees)*) – задано 90 град.

4) Блоки задания угла управления (*Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA*).

Блок *Zadatchik alfa* позволяет задавать фиксированный угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом);

Блок *ZADATCHIK ALFA* позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0^0 до 150^0 и предназначен для построения регулировочной характеристики.

5) Вентильный блок (*WB*) – электронный блок, имитирующий работу тиристорных включенных в соответствии с трехфазной нулевой схемой. Изменяемые параметры блока:

- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии (*Resistance Ron*). Установить $R_{on} = 0,2 \text{ Ом}$;

- пороговое напряжение вентиля (*Forward voltage Vf*). Установить $U_f = 0,8 \text{ В}$;

- демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить $R_s = 5000 \text{ Ом}$, $C_s = 2e^{-7}$).

6) Нагрузочно-питающее устройство (*NPU*) – блок, содержащий управляемый источник ПЭДС и реактор, имеющий активное и индуктивное сопротивление. Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление реактора R_d (установить 5 Ом);
- индуктивность реактора L_d (установить 0,2 Гн);
- вид нагрузки (*Vid nagruzki s PEDS 1, bez PEDS 0*) установить «1» для включения в схему нагрузки с ПЭДС или «0» – для активно-индуктивного характера нагрузки;

7) Задатчики тока I_d (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*) – блоки задания по току I_d для нагрузочно-питающего устройства.

Блок *Zadatchik Id* позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока I_d ;

Блок *ZADATCHIK Id* позволяет задавать значение выпрямленного тока, изменяющееся во времени от 0 до 1А, и предназначен для построения внешней характеристики.

8) Блок измерительных преобразователей (*BIP*) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения напряжения между фазами А и В (u_{ab});
- мгновенные значения анодного тока (i_a);
- мгновенные значения напряжения на вентиле (u_a);
- мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);
- мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);
- и измерять:
- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);
- среднее значение выпрямленного тока (I_d);
- среднее значение анодного тока (I_a);
- действующее значение анодного тока (I_{ad}).

9) Датчик напряжения (*Dat uab*) – позволяет осциллографировать напряжение между фазами А и В;

10) Осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений;

11) Дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов, снимаемых с блока ВР;

12) Переключатели (*Switch1, Switch2, Switch3, Switch4*) – блоки, предназначенные для переключения между блоками *Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA* (*Switch1*), *Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id* (*Switch2*), а также введения в схему графопостроителей $U_d = f(I_d)$ (*Switch3*), $U_d = f(alfa)$ (*Switch4*).

13) Графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(alfa)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_d = f(I_d)$ и регулировочной характеристики $U_d = f(\alpha)$ в автоматическом режиме.

Предварительное домашнее задание

а) изучить темы курса: «Многофазные выпрямители», «Управляемые выпрямители», «Непрерывный, прерывистый и граничный режимы» [1(4.1, 4.3 – 4.5, 5.1 – 5.4)], содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать угол коммутации γ для заданного варианта. Угол γ рекомендуется определить из соотношения

$$\cos(\delta + \gamma) = \cos \delta - \frac{2 \cdot x_a \cdot I_d}{\sqrt{6} \cdot U_2}; \quad (1)$$

в) построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичных ЭДС, среднего значения выпрямленного напряжения u_d , тока нагрузки i_d (при $x_d = \infty$), тока вентиля i_a , напряжения на вентиле u_a и первичного тока трансформатора i_1 с учетом заданных значений E_2 , α_1 , I_d и рассчитанного γ ;

г) рассчитать среднее значение выпрямленного напряжения U_d , амплитуду обратного напряжения U_{amax} , ток вентиля I_a , вторичный I_2 и первичный I_1 токи трансформатора для заданного значения тока I_d . Формулы для расчета анодного тока вентиля I_a , действующих значений вторичного I_2 и первичного I_1 токов трансформатора и амплитуды обратного напряжения U_{amax} приведены в табл. 1.

Таблица 1

Схема	I_a	I_2	I_1	U_{amax}
Трехфазная нулевая	$\frac{I_d}{3}$	$\frac{I_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I_d}{n}$	$\sqrt{6} \cdot E_2$
Трехфазная мостовая	$\frac{I_d}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{I_d}{n}$	$\sqrt{6} \cdot E_2$

Примечание: коэффициент трансформации $n = U_1/U_2$.

Среднее значение выпрямленного напряжения при заданном значении угла управления α и тока нагрузки I_d можно определить из уравнения внешней характеристики для непрерывного режима

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - a \cdot U_{T(T0)} - \left[a \cdot r_T + a \cdot r_a + \frac{x_a}{(2\pi/m)} \right] \cdot I_d, \quad (2)$$

где $U_{T(T0)}$ – пороговое напряжение тиристора;

r_T – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии;

r_a , x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления (сопротивления схемы замещения трансформатора, приведенные к стороне вентиля).

Среднее значение выпрямленного напряжения для идеального неуправляемого выпрямителя U_{d0} , пульсность схемы m и коэффициент схемы a определяются видом схемы и приведены в табл. 2:

Таблица 2

Схема	m	U_{d0}	a	$\alpha_{гр}$	α_{min}	E_{2m}	B
Трехфазная нулевая	3	$1,17 E_2$	1	30°	60°	$\sqrt{2} E_2$	0,46
Трехфазная мостовая	6	$2,34 E_2$	2	60°	30°	$\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_2$	0,22

При расчете принять $U_{T(T0)} = 1$ В, $r_T = 0,05$ Ом, $r_a = 1,5$ Ом, $E_2 = U_2$ на холостом ходу.

Результаты расчета своего подварианта занести в табл. 3.

д) рассчитать и построить регулировочные характеристики для непрерывного и прерывистого режимов. При расчете принимать для непрерывного режима $x_d = \infty$, для прерывистых при работе на ПЭДС и на активное сопротивление $x_d = 0$. При расчете можно воспользоваться:

– для непрерывного режима при заданном токе I_d уравнением (2), которое при постоянстве I_d является уравнением регулировочной характеристики;

– для прерывистого режима при активной нагрузке уравнениями (3)

$$U_d = \begin{cases} U_{d0} \cdot \cos \alpha & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{гр} \\ U_{d0} \cdot \left[\frac{1 - \sin(\alpha - \pi/m)}{2 \cdot \sin(\pi/m)} \right] & \text{при } \alpha > \alpha_{гр} \end{cases}, \quad (3)$$

– для прерывистого режима при работе на активную нагрузку с ПЭДС уравнениями (4)

$$U_d = \begin{cases} E_{2m} & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{min} \\ E_{2m} \cdot \cos(\alpha - \alpha_{min}) & \text{при } \alpha_{min} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \alpha_{min} \end{cases}. \quad (4)$$

Здесь $\alpha_{гр}$ – граничный угол управления при работе выпрямителя на активную нагрузку,

$\alpha_{min} = \pi / m$ – минимальный угол управления при работе выпрямителя на активную нагрузку с ПЭДС;

E_{2m} – амплитуда вторичной ЭДС трансформатора, используемая в схеме;

Значения $\alpha_{гр}$, α_{min} , E_{2m} приведены в табл. 2.

е) рассчитать и построить внешнюю характеристику для заданных α , x_a , при активно-индуктивной с ПЭДС нагрузке. При построении считать режим непрерывным, тогда применимо уравнение (2).

ж) найти граничный ток для заданных x_a , x_d , α . Граничный ток можно определить по формуле

$$I_{d.гр} = \frac{B \cdot U_2}{a \cdot x_a + x_d} \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где коэффициент В приведен в табл. 2

Примечание: все характеристики строить в абсолютных единицах.

Таблица 3

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Трехфазная мостовая			Трехфазная нулевая		
	Предв. расчет (нагрузка)	Нагрузка RL+ПЭДС		Предв. расчет (нагрузка)	Нагрузка RL+ПЭДС	Нагрузка RL
		Непрерывный режим	Прерывистый режим			
угол α						
γ		см. по осцилл.	X			X
U_d						
U_{amax}						
I_a						
I_d						
$I_{dгр}$		см. по внешн. хар-ке	X			
I_1					X	X
I_2		X	X			

Программа исследования схем трехфазных управляемых выпрямителей

1. Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной мостовой схеме

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

1.3. Снятие внешних характеристик при изменении угла управления и параметров трансформатора.

1.4. Осциллографирование и измерение электрических величин в прерывистом (граничном) режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

1.5. Снятие регулировочных характеристик при различных токах нагрузки

2. Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной нулевой схеме:

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС и без ПЭДС.

2.3. Снятие регулировочных характеристики при различных токах и различных видах нагрузки.

2.4. Снятие внешних характеристик при различных видах нагрузки.

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной мостовой схеме:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) запустить программу «*MatLab*»;

б) открыть файл «*m_3f.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель управляемого мостового выпрямителя, представленная на рис. 1 б;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

Переключатели *Switch1* и *Switch2* установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки *Zadatchik alfa* и *Zadatchik Id*.

Переключатели *Switch3* и *Switch4* установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(alfa)$ из схемы.

В блоке трансформатор *TR* установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту (при частоте 50 Гц $\omega = 314$).

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

В блоке *Zadatchik Id* выпрямленный ток I_d задать по варианту.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые

пояснения к работе в *Paint* также приведены в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам;

в) записать показания с дисплея (в табл. 3) и сравнить с расчетными.

1.3. Снятие внешних характеристик при изменении угла управления и параметров трансформатора.

а) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при заданном по варианту углу управления.

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

Переключатель *Switch2* переключить в нижнее положение, подключив в схему блок *ZADATCHIK Id*.

Переключатель *Switch3* установить в верхнее положение, подключив в схему графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

Запустить расчет модели и снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

По построенной внешней характеристике $U_d = f(I_d)$ определить граничный ток и сравнить с расчетным (занести в табл. 3).

б) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при другом угле управления

$$\alpha_2 = \alpha_1 + 15^\circ.$$

В блоке *Zadatchik alfa* задать угол управления равный α_2 и повторить опыт.

Определить граничный ток и сравнить с п. 1.3 а, занести значение в табл. 3.

в) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при других параметрах трансформатора.

В блоке трансформатор *TR* установить индуктивность рассеяния трансформатора $L'_a = L_a \cdot 2$ и повторить опыт.

Все три полученные внешние характеристики (в п. 1.3 а, б, в) подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*. Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

1.4. Осциллографирование и измерение электрических величин в прерывистом (граничном) режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

а) исследовать работу трехфазного мостового управляемого выпрямителя в прерывистом режиме

В блоке *Zadatchik alfa* установить угол управления α_1 заданный по варианту.

Во всех блоках модели восстановить параметры в соответствии с описанием виртуальных моделей.

В блоке *Zadatchik Id* задать выпрямленный ток $I_d = 0,06$ А.

Переключатели *Switch1* и *Switch2* установить в верхнее положение, введя в схему блоки *Zadatchik alfa* и *Zadatchik Id*.

Переключатели *Switch3* и *Switch4* установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(\alpha)$.

Запустить модель и снять осциллограммы трехфазного мостового управляемого выпрямителя в прерывистом режиме.

Все показания с дисплея занести в табл. 3.

1.5. Снятие регулировочных характеристик при различных токах нагрузки.

Переключатель *Switch1* установить в нижнее положение, а переключатель *Switch4* установить в верхнее положение, введя в схему блок *ZADATCHIK ALFA* и графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

Переключатель *Switch2* установить в верхнее положение, а переключатель *Switch3* установить в нижнее положение, введя в схему блок *Zadatchik Id* и отключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

а) В блоке *Zadatchik Id* величину тока I_d задать по варианту.

Запустить модель и снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$.

Обратите внимание! Процесс расчета виртуальной модели можно остановить при снижении выпрямленного напряжения U_d до нуля (см. показания дисплея).

б) аналогичным образом снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при другом значении выпрямленного тока $I_d = 0.04$ А.

Обе полученные регулировочные характеристики, при разных значениях тока I_d , подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*. Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

2. Исследование модели управляемого выпрямителя по трехфазной нулевой схеме.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) закрыть файл «*m_3f.mdl*», открыть файл «*n_3f.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель управляемого выпрямителя, выполненного по нулевой схеме, представленная на рис. 2 б;

б) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

Переключатели *Switch1* и *Switch2* установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки *Zadatchik alfa* и *Zadatchik Id*.

Переключатели *Switch3* и *Switch4* установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(\alpha)$ из схемы.

В блоке трансформатор *TR* установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту (при частоте 50 Гц $\omega = 314$).

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

В блоке *Zadatchik Id* выпрямленный ток I_d задать по варианту.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС и без ПЭДС.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам;

в) записать показания с дисплея (в табл. 3) и сравнить с расчетными.

г) повторить пункты а, б, в при активно-индуктивной нагрузке без ПЭДС. Активное сопротивление нагрузки задать равное $R_{dn} = U_d / I_d$, где значение тока I_d задано по варианту, а напряжения U_d взято из эксперимента п. 2.2. в.

Записать показания с дисплея (в табл. 3) и сравнить с п. 2.2 б.

2.3. Снятие регулировочных характеристик при различных токах и различных видах нагрузки.

Переключатель *Switch1* установить в нижнее положение, а переключатель *Switch4* установить в верхнее положение, введя в схему блок *ZADATCHIK ALFA* и графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

Переключатель *Switch2* в верхнее положение и *Switch3* установить в нижнее положение, введя в схему блок *Zadatchik Id* и отключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

а) В блоке NPU вид нагрузки (*Vid nagruzki c PEPS 1, bez PEDS 0*) задать с ПЭДС, установив значение «1». В блоке *Zadatchik Id* величину тока I_d задать по варианту.

Запустить модель и снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$.

б) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при другом значении выпрямленного тока $I_d = 0.06$ А.

в) снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке без ПЭДС.

В блоке NPU вид нагрузки (*Vid nagruzki c PEPS 1, bez PEDS 0*) задать без ПЭДС, установив значение «0». Активное сопротивление нагрузки задать равное R_{dn} .

Все три регулировочные характеристики подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*. Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

2.4. Снятие внешних характеристик при различных видах нагрузки.

Переключатель *Switch1* установить в верхнее положение, подключив в схему блок *Zadatchik alfa*.

Переключатель *Switch2* установить в нижнее положение, а переключатель *Switch3* установить в верхнее положение, введя, таким образом, в схему блок *ZADATCHIK Id* и подключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

Переключатель *Switch4* установить в нижнее положение отключив графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

а) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС при заданном по варианту угле управления.

В блоке NPU вид нагрузки (*Vid nagruzki c PEPS 1, bez PEDS 0*) задать с ПЭДС, установив значение «1». В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

По построенной внешней характеристике $U_d = f(I_d)$ определить граничный ток и сравнить с расчетным (занести в табл. 3).

в) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ при активно-индуктивной нагрузке (без ПЭДС).

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

В блоке NPU вид нагрузки (*Vid nagruzki c PEPS 1, bez PEDS 0*) задать без ПЭДС, установив значение «0». Активное сопротивление нагрузки задать равное R_{dn} . Характеристику снять по точкам, увеличивая R_d в 3 и 10 раз.

Все внешние характеристики подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*. Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования трехфазного управляемого выпрямителя (для своего подварианта)ю
6. Осциллограммы для исследованных схем:

а) для активно-индуктивной нагрузки с ПЭДС в непрерывном и прерывистом режиме в мостовой схеме;

б) для активно-индуктивной нагрузки с ПЭДС и для активно-индуктивной нагрузки в непрерывном режиме в нулевой схеме.

Сделать выводы о влиянии режима, вида нагрузки и типа схемы (мостовая или нулевая) на вид осциллограмм.

Сравнить расчетные значения токов и напряжений с полученными экспериментально.

7. Внешние характеристики при изменении угла управления и параметров трансформатора для мостовой схемы и разных видах нагрузки для нулевой, построенные на одном графике

Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

Сделать выводы о влиянии угла управления, вида нагрузки и параметров трансформатора на внешние характеристики.

8. Регулировочные характеристики

а) при двух значениях выпрямленного тока;

б) при разном характере нагрузки.

Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

Сделать выводы о влиянии величины выпрямленного тока и характера нагрузки на регулировочные характеристики.

9. Обобщающие выводы.

По осциллограммам и характеристикам сравнить трехфазную нулевую и мостовую схемы управляемых выпрямителей:

а) по качеству выпрямленного напряжения;

б) по величине выпрямленного напряжения.

По осциллограммам и характеристикам определить, на что влияет характер нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные трехфазные схемы выпрямления.

2. Назовите основные величины, используемые при описании работы выпрямителей.

3. По каким признакам классифицируются выпрямители?

4. Как изменяется соотношение между приведенным индуктивным сопротивлением рассеяния трансформатора и приведенным активным сопротивлением обмоток при изменении мощности трансформатора?

5. Какова частота пульсации в изучаемых схемах?

6. Что такое непрерывный режим?

7. Что такое внешняя характеристика? От каких параметров зависит ее положение в непрерывном режиме?

8. Что такое регулировочная характеристика, от каких параметров зависит ее вид?

9. Сравнить трехфазную нулевую и трехфазную мостовую схемы по основным показателям.

10. Сравните форму токов i_a и i_2 для трехфазной нулевой схемы при $x_d = \infty$. Почему отличаются формулы для I_a и I_2 ?

11. Будут ли осциллограммы, снятые в лабораторной работе отличаться от временных диаграмм построенных дома? Почему?

12. Что влияет на величину граничного тока?

13. Как снять внешние и регулировочные характеристики выпрямителя при помощи виртуальных измерительных приборов?

Таблица 4

Таблица вариантов

№ варианта	Угол управления	Выпрямленный ток	Напряжение на вторичной стороне трансформатора	Индуктивное сопротивление рассеивания трансформатора
	α_1 , град	I_d , А	U_2 , В	x_d , Ом
1	45	1,0	48	4,3
2	55	1,0	46	4,3
3	65	1,0	50	4,3
4	75	1,0	52	6,3
5	45	1,0	48	6,3
6	55	1,0	46	6,3
7	65	0,9	50	4,3
8	75	0,9	52	4,3
9	45	0,9	48	4,3
10	55	0,9	46	6,3
11	65	0,9	50	6,3
12	75	0,9	52	6,3
13	40	0,9	48	4,3
14	50	0,9	46	4,3
15	60	0,9	50	4,3
16	70	0,9	52	6,3
17	40	1,0	48	6,3
18	50	1,0	46	6,3
19	60	1,0	50	4,3
20	70	1,0	52	4,3
21	40	0,9	48	4,3
22	50	0,9	46	6,3
23	60	1,0	50	6,3
24	70	1,0	52	6,3

Примечания:

1. Студенты, получившие подвариант А, выполняют пункты а, б, в, г, д, е, ж для трехфазной мостовой схемы при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС; Б – пункты а, б, в, г, д, е, ж для трехфазной нулевой схемы при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС; В – пункты 1а, д, е, ж для трехфазной мостовой и нулевой схем при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС и пункт д для активной нагрузки.

2. При расчете принять: $E_2 = U_2$; $U_{T(T0)} = 1,0$ В; $r_T = 0,05$ Ом, $r_a = 1,5$ Ом.

3. При построении диаграмм принимать $x_d = \infty$.

4. При определении граничного тока принять $x_d = 63$ Ом.

Работа №4. Исследование однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования

Цель работы: изучение электромагнитных процессов, характеристик и энергетических показателей однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования. Исследование влияния преобразователя на питающую сеть.

Описание виртуальных моделей

Схема однокомплектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме и его виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображены на рис. 1.

В комплект виртуальной модели (рис. 1 б) входят следующие блоки: источник напряжения (*SET'*), трансформатор (*TR*), система импульсно-фазового управления (*SIFU*), блоки задания угла управления (*Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA*), вентильный блок (*WB*), реактор (*L*), источник ЭДС (*EDS*), задатчики тока *Id* (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), датчики тока и напряжения (*Dat i1A*, *Dat u1*, *Dat u1d*), осциллографы (*Scope1*, *Scope2*, *Scope3*), дисплей (*Display*), переключатели (*Switch1*, *Switch2*, *Switch3*, *Switch4*) и графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник напряжения (*SET'*) – блок, состоящий из трех источников идеального синусоидального напряжения, имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. Напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов. Изменяемые параметры блока:

- напряжение (*Voltage*) сети установить равное 220 В.

2) Трансформатор (*TR*) – блок, состоящий из идеального трехфазного трансформатора с учетом контура намагничивания и включенных последовательно в каждой фазе *RL* – цепей. Изменяемые параметры блока:

- индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту (при частоте 50 Гц $\omega = 314$).

- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной стороне (установить $R_a = 1,65$ Ом);

- фазное напряжение на первичной стороне трансформатора *U1* (установить 220 В);

- фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора *U2* (установить в соответствии с заданным вариантом).

3) Система импульсно-фазового управления (*SIFU*) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

Двойной щелчок левой кнопкой мыши позволяет раскрыть структуру блока *SIFU*.

В состав СИФУ (*SIFU*) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (*Synchronized 6-Pulse Generator*), формирующий вдвоенные импульсы для управления тиристорами вентильного блока.

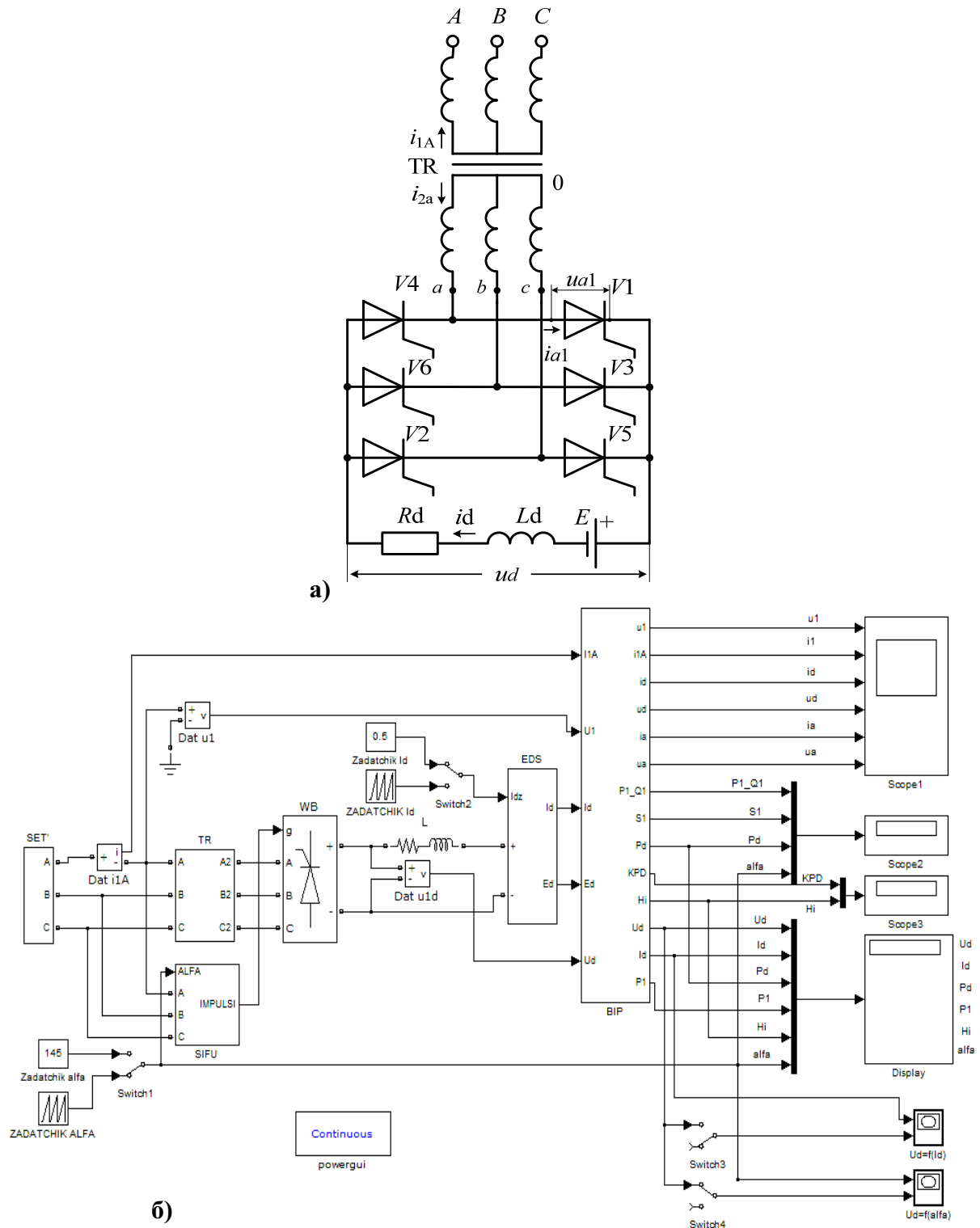


Рис. 1. Схема (а) и виртуальная модель (б) однокомплектного рекуперирующего преобразователя

4) Блоки задания угла управления (*Zadatchik alfa* и *ZADATCHIK ALFA*).

Блок *Zadatchik alfa* позволяет задавать фиксированный угол управления тиристорами (установить в соответствии с заданным вариантом);

Блок *ZADATCHIK ALFA* позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0 до 150° и предназначен для построения регулировочной характеристики.

5) Вентильный блок (*WB*) – универсальный мостовой модуль.

Изменяемые параметры блока:

- количество плеч универсального моста (*Numbers of bridge arms*) – установить равное 3;

- демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить $R_s = 6000 \text{ Ом}$, $C_s = 1e^{-7}$);

- тип силового полупроводникового элемента (*Power Electronic device*) – установить – тиристор (*Thyristors*);

- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии R_{on} (установить 0,2 Ом);

- индуктивность тиристора во включенном состоянии L_{on} (установить 0 Гн);

- пороговое напряжение тиристора U_f (установить 0,8 В).

6) Реактор (L) – блок, включаемый между преобразователем и источником ЭДС, воспринимающий разницу мгновенных значений напряжений и ЭДС (ПЭДС) Изменяемые параметры блока:

- индуктивность реактора L (установить 0,2 Гн);

- активное сопротивление реактора R (установить 5 Ом);

7) источник ЭДС (EDS) – блок, имитирующий работу источника ЭДС (например, аккумулятора или электрической машины).

8) Задатчики тока I_d (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*) – блоки задания по току I_d для нагрузочно-питающего устройства.

Блок *Zadatchik Id* позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока I_d ;

Блок *ZADATCHIK Id* позволяет задавать значение выпрямленного (инвертируемого) тока, изменяющееся во времени от 0 до 1 А и предназначен для построения внешних характеристик.

9) Блок измерительных преобразователей (*BIP*) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения напряжения на первичной стороне трансформатора в фазе А (u_1);

- мгновенные значения тока на первичной стороне трансформатора фазы А (i_{1A});

- мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);
 - мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);
 - мгновенные значения анодного тока (i_a);
 - мгновенные значения напряжения на вентиле (u_a);
 - активную мощность (P_1), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
 - полную мощность (S_1) и реактивную (Q_1), потребляемую из сети;
 - активную мощность (P_d), потребляемую из источника ЭДС или отдаваемую в него;
 - угол управления тиристорами α (α);
 - КПД преобразователя (KPD);
 - коэффициент мощности χ (Hi).
- и измерять:
- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);
 - среднее значение выпрямленного тока (I_d);
 - активную мощность (P_d), потребляемую из источника ЭДС или отдаваемую в него;
 - активную мощность (P_1), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
 - коэффициент мощности χ (Hi);
 - угол управления тиристорами α (α).

10) Датчики тока ($Dat\ i_{1A}$) и напряжения ($Dat\ u_1$) – позволяют осциллографировать ток и напряжение на первичной стороне трансформатора фазы А.

11) Датчик напряжения ($Dat\ u_{1d}$) – позволяет осциллографировать напряжение на нагрузке;

12) Осциллографы ($Scope1$, $Scope2$, $Scope3$) – блоки, позволяющие наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых с блока BIP ;

13) Дисплей ($Display$) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов, снимаемых с блока BIP ;

14) Переключатели ($Switch1$, $Switch2$, $Switch3$, $Switch4$) – блоки, предназначенные для переключения между блоками $Zadatchik\ \alpha$ и $ZADATCHIK\ ALFA$ ($Switch1$), $Zadatchik\ I_d$ и $ZADATCHIK\ I_d$ ($Switch2$), а также введения в схему графопостроителей $U_d = f(I_d)$ ($Switch3$), $U_d = f(\alpha)$ ($Switch4$).

15) Графопостроители ($U_d = f(I_d)$, $U_d = f(\alpha)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_d = f(I_d)$ и регулировочной $U_d = f(\alpha)$ характеристик в автоматическом режиме.

Виртуальная модель однокомлектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме, предназначенная для исследования влияния преобразователя на питающую сеть, изображены на рис. 2.

В комплект виртуальной модели (см. рис. 2) входят следующие блоки: источник 3-фазного напряжения (*3-Phase Source*), трансформатор (*TR*), система импульсно-фазового управления (*SIFU*), блок задания угла управления (*Zadatchik alfa*), вентильный блок (*WB*), реактор (*L*), источник ЭДС (*EDS*), задатчик тока I_d (*Zadatchik Id*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), датчики тока и напряжения (*Dat i1A*, *Dat u1ab*, *Dat u1a*, *Dat U1d*), осциллограф (*Scope*), дисплеи (*Display1*, *Display2*), блок *Continuous powergui*.

Перечисленные блоки имеют назначения и изменяемые параметры аналогичные соответствующим блокам в соответствии с рис. 1. Исключения составляют только следующие блоки:

1) Источник 3-фазного напряжения (*3-Phase Source*) – блок по аналогии с блоком *SET'* (см. рис. 1) имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. По функциональному назначению соответствует блоку. Изменяемые параметры блока:

- напряжение сети (*Phase-to-phase rms voltage, V*) установить равное $220\sqrt{3}$ В;
- фазовый сдвиг (*Phase angle of phase A, degrees*) установить равный 0 град;
- частота (*Frequency, Hz*) установить 50 Гц;
- активное (*Source resistance, Ohms*) и индуктивное (*Source inductance, H*) сопротивление источника питания установить 10 Ом и 0,1 Гн соответственно.

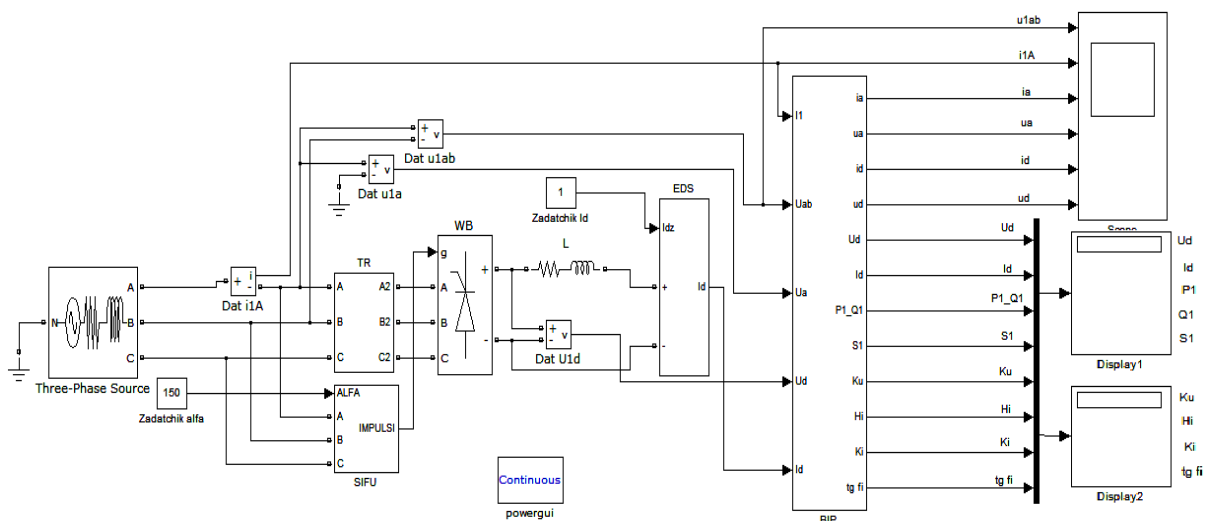


Рис. 2. Виртуальная модель однокомплектного рекуперирющего преобразователя для исследования влияния преобразователя на питающую сеть

2) Реактор (*L*) – блок, включаемый между преобразователем и источником ЭДС, воспринимающий разницу мгновенных значений напряжений и ЭДС (ПЭДС) Изменяемые параметры блока:

- индуктивность реактора *L* (установить 0,4 Гн);
- активное сопротивление реактора *R* (установить 5 Ом);

3) Блок измерительных преобразователей (*BIP*) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения анодного тока (i_a);
- мгновенные значения напряжения на вентиле (u_a);
- мгновенные значения выпрямленного тока (i_d);
- мгновенные значения выпрямленного напряжения (u_d);
- среднее значение выпрямленного напряжения (U_d);
- среднее значение выпрямленного тока (I_d);
- активную мощность (P_1), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
- реактивную (Q_1) мощность, потребляемую из сети;
- полную мощность (S_1) потребляемую из сети;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (K_u);
- коэффициент мощности χ (H_i);
- результирующий коэффициент гармоник тока (K_i);
- $\text{tg } \varphi$ ($\text{tg } f_i$)

4) Датчик тока (*Dat i1A*) позволяет осциллографировать ток на первичной стороне трансформатора фазы А;

5) Датчики напряжения (*Dat u1ab*, *Dat u1a*) – позволяют измерять напряжение на первичной стороне трансформатора между фазами А и В и напряжение фазы А;

6) Датчик напряжения (*Dat U1d*) – позволяет осциллографировать напряжение на нагрузке;

7) Осциллограф (*Scope1*) – блоки, позволяющие наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых с датчиков и блока *BIP*;

8) Дисплеи (*Display1*, *Display2*) – блоки, предназначенные для цифрового отображения значений напряжений и токов, снимаемых с блока *BIP*;

9) Блок *Continuous powergui* предназначен для спектрального анализа сигналов снимаемых с осциллографа. Двойной щелчок левой кнопкой мыши по блоку *Continuous powergui* раскрывает панель инструментов, представленную на рис. 3 а. Щелчок левой кнопкой мыши по кнопке *FFT Analysis* (см. рис. 3 а) открывает смотровое окно с временной диаграммой и разложением этого сигнала в спектр.

В правой части смотрового окна расположены строки и кнопки управления:

– *Structure*: строка выбора осциллографа с необходимыми осциллограммами. В раскрывающемся списке выбрать «*Preobrazovatel*»;

– *Input*: номер входа, для вывода соответствующей осциллограммы. Порядок и количество входов (*input 1*, *input 2* ...) соответствует сигналам на входах осциллографа *Scope*;

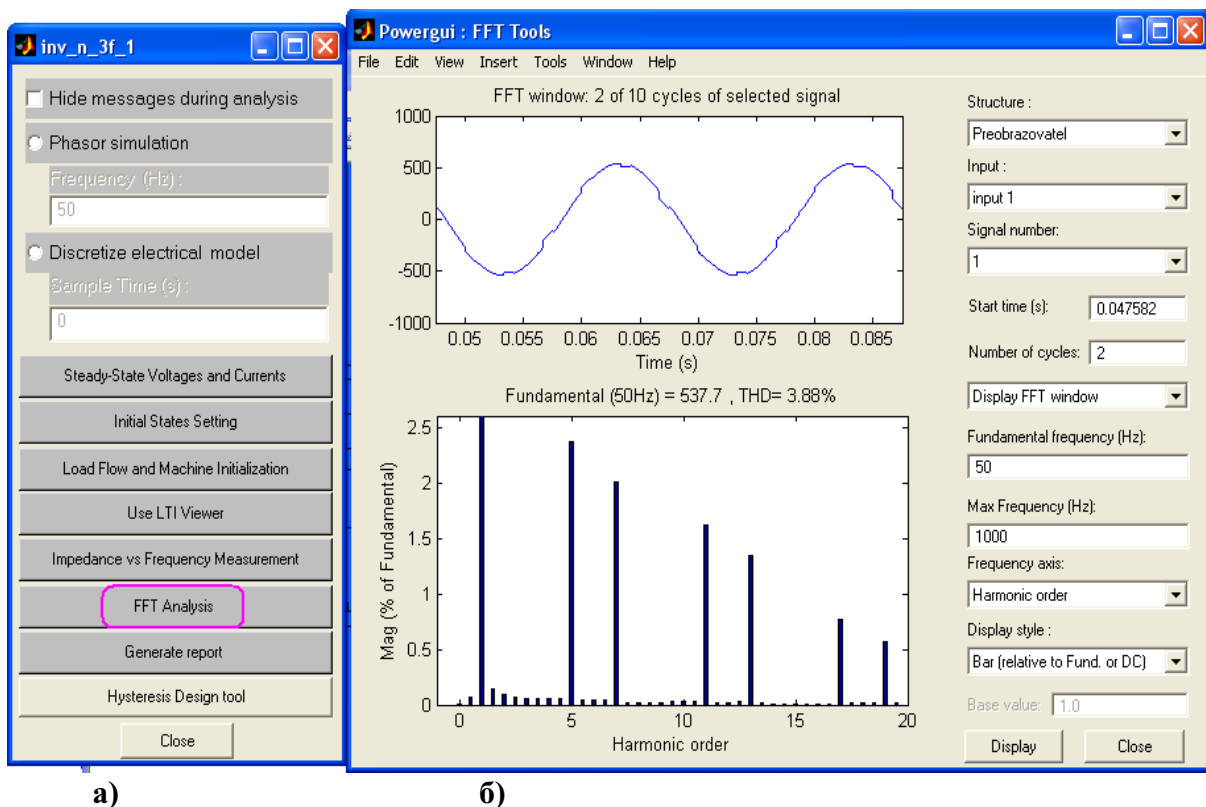


Рис. 3. Панель инструментов (а) и смотровое окно с временной диаграммой напряжения u_{1ab} и разложением напряжения u_{1ab} в спектр

– *Signal number*: номер сигнала. Раскрывающийся список данной строки становится активным, если на один вход осциллографа через мультиплексор одновременно подано несколько сигналов.

– *Start time(s)*: начальное время. Задание не с момента времени $t = 0$, позволяет исключить влияние переходного процесса на разложение сигнала в спектр.

– *Number of cycles*: число циклов, отображаемых на осциллограмме.

– *Display FFT window* – режим отображения осциллограммы с момента времени равного *Start time(s)* и в количестве циклов равном *Number of cycles*. Также возможен режим *Display entire signal*, при котором на экран смотрового окна выводится сигнал с момента времени $t = 0$ и до конца времени расчета.

– *Fundamental Frequency (Hz)* – основная частота.

– *Max Frequency (Hz)* – максимальная частота, определяет до какой гармони будет представлен спектр.

– *Frequency axis*: ось частот или горизонтальная ось. В раскрывающемся списке возможность выбора подписи горизонтальной оси: частота (*Hertz*) или номер гармоник (*Harmonic order*);

– *Display style*: стиль представления спектра: в виде графической зависимости в относительных *Bar (relative to Fund. or DC)* или абсолютных единицах *Bar (relative to specifier base)*, а также в виде матрицы в

относительных *List (relative to Fund. or DC)* или абсолютных единицах *List (relative to specifier base)*.

Предварительное домашнее задание:

а) Изучить темы курса: «Управляемые выпрямители», «Непрерывный режим», «Энергетические показатели», «Ведомые инверторы», [1(5.3 – 5.4, 6.1–6.3, 7.1–7.5, 18.1)], содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать и построить внешние характеристики для двух заданных по варианту углов управления α_1 и α_2 , принимая $x_d = \infty$. При построении воспользоваться формулой

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - a \cdot U_{T(T0)} - \left[a \cdot r_T + a \cdot r_a + \frac{x_a}{(2\pi/m)} \right] \cdot I_d, \quad (1)$$

где $U_{T(T0)}$ – пороговое напряжение тиристора;

r_T – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии;

r_a , x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления (сопротивления схемы замещения трансформатора, приведенные к стороне вентилей).

Среднее значение выпрямленного напряжения для идеального неуправляемого выпрямителя, выполненного по мостовой схеме, U_{d0} , пульсность схемы m и коэффициент схемы a приведены в табл. 1.

Таблица 1

Схема	m	U_{d0}	a
Трехфазная мостовая	6	$2,34 E_2$	2

в) рассчитать и построить регулировочную характеристику однокомлектного рекупирующего преобразователя в непрерывном режиме для заданного тока нагрузки I_d . При расчете воспользоваться формулой (1)

г) рассчитать и построить ограничительную характеристику преобразователя на том же графике, где построены внешние характеристики. Уравнение ограничительной характеристики

$$U_{dmax} = -U_{d0} \cdot \cos \delta_{min} - a \cdot U_{T(T0)} + \left[\frac{x_a}{(2\pi/m)} - a \cdot (r_a + r_T) \right] \cdot I_d, \quad (2)$$

где δ_{min} – минимальный угол, предоставляемый на выключение или восстановление управляющих свойств тиристора;

д) построить в масштабе друг под другом временные диаграммы вторичных ЭДС e_2 , инвертируемого напряжения u_d , тока нагрузки i_d (при $x_d = \infty$), тока вентиля i_a и напряжения на вентиле u_a с учетом заданных

значений U_2 , α_2 , I_d и угла коммутации $\gamma = 10^\circ$ по аналогии с диаграммами, приведенными в [1, рис. 7.4, б]. На диаграммах отметить углы α , γ , U_{amax} , I_{amax} .

Программа исследования однокомплектного рекуперирующего преобразователя

1. Исследование модели однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном и инверторном режиме.

1.3. Изучение перехода от выпрямительного к инверторному режиму, снятие регулировочной и энергетических характеристик.

1.4. Снятие внешних и энергетических характеристик при заданных углах управления.

1.5. Снятие и построение ограничительной характеристики.

2. Исследование влияния преобразователя на питающую сеть:

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном режиме.

2.3. Определение спектров гармоник и качества напряжения сети при работе преобразователя.

2.4. Исследование влияния различных факторов на напряжение питающей сети.

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. Исследование модели однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования:

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) запустить программу «*MatLab*»;

б) открыть файл «*rek_pr.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель однокомплектного рекуперирующего преобразователя, представленная на рис. 1 б;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

Переключатели *Switch1* и *Switch2* установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки *Zadatchik alfa* и *Zadatchik Id*.

Переключатели *Switch3* и *Switch4* установить в нижнее положение, отключив, таким образом, графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(alfa)$ из схемы.

В блоке трансформатор *TR* установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту (при частоте 50 Гц $\omega = 314$).

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

В блоке *Zadatchik Id* выпрямленный ток I_d задать по варианту.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном и инверторном режиме.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления α_1 в выпрямительном режиме.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам;

г) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений в инверторном режиме.

В блоке *Zadatchik alfa* задать угол управления $\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$.

1.3. Изучение перехода от выпрямительного к инверторному режиму и снятие регулировочной и энергетических характеристик

Переключатель *Switch1* установить в нижнее положение, а переключатель *Switch4* установить в верхнее положение, введя в схему блок *ZADATCHIK ALFA* и графопостроитель $U_d = f(\alpha)$.

Переключатель *Switch2* установить в верхнее положение, а переключатель *Switch3* установить в нижнее положение, введя в схему блок *Zadatchik Id* и отключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

В блоке *Zadatchik Id* величину тока I_d задать по варианту.

а) запустить модель и снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$.

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов, напряжений (*Scope1*), мощностей (*Scope2*) и энергетические характеристики (*Scope3*).

На полученных осциллограммах мощностей и энергетических характеристик подписать каждую кривую в соответствии с рис. 4 и дома в графическом редакторе *Paint* или вручную добавить вторую ось – угол α (*alfa*).

По осциллограммам и регулировочной характеристике определить точку (область) перехода от выпрямительного режима к инверторному.

Обратить внимание! на знаки выпрямленного тока i_d и напряжения u_d (*Scope1*), и мощностей (*Scope2*), а также характер изменения КПД и коэффициента мощности χ (*Scope3*).

Сравнить регулировочные характеристики, полученные экспериментальным путем и построенные дома в соответствии с подвариантом.

1.4. Снятие внешних и энергетических характеристик при заданных углах управления.

Переключатель *Switch1* установить в верхнее положение, подключив в схему блок *Zadatchik alfa*.

Переключатель *Switch2* установить в нижнее положение, а переключатель *Switch3* установить в верхнее положение, введя, таким образом, в схему блок *ZADATCHIK Id* и подключив графопостроитель $U_d = f(I_d)$.

Переключатель *Switch4* установить в нижнее положение отключив графопостроитель $U_d = f(alfa)$.

а) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ в выпрямительном режиме.

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

В блоке трансформатор *TR* установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту.

б) снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ в инверторном режиме.

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления задать $\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$.

Обе внешние характеристики (по п. а и б) подписать и расположить в одних осях (наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*). Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

Сравнить внешние характеристики, полученные экспериментальным путем (для соответствующих параметров схемы) и построенные дома в соответствии с подвариантом, разместив расчетные в тех же осях.

1.5. Снятие и построение ограничительной характеристики при $\delta_{\min} = \text{const}$.

Переключатель *Switch1* установить в верхнее положение, подключив в схему блок *Zadatchik alfa*.

Переключатель *Switch2* установить в нижнее положение, введя в схему блок *Zadatchik Id*.

Переключатели *Switch3* и *Switch4* установить в нижнее положение, отключив графопостроители $U_d = f(I_d)$ и $U_d = f(alfa)$.

Точки характеристики получить следующим образом. При токе $I_d = 0,1$ А (задать в блоке *Zadatchik Id*) установить угол $\alpha = 150^\circ$ (задать в блоке *Zadatchik alfa*) и замерить с помощью виртуального осциллографа *Scope1* угол δ (на осциллограмме напряжения u_a). Увеличить ток I_d до 0,5 А и, уменьшая угол α (ориентировочно $\alpha = 145^\circ$), добиться того же значения δ . Повторить опыт при заданном значении тока I_d . По трем полученным точкам построить ограничительную характеристику

преобразователя $U_{d\max} = f(I_d)$ и зависимость допустимого угла управления от нагрузки $\alpha_{\max} = f(I_d)$.

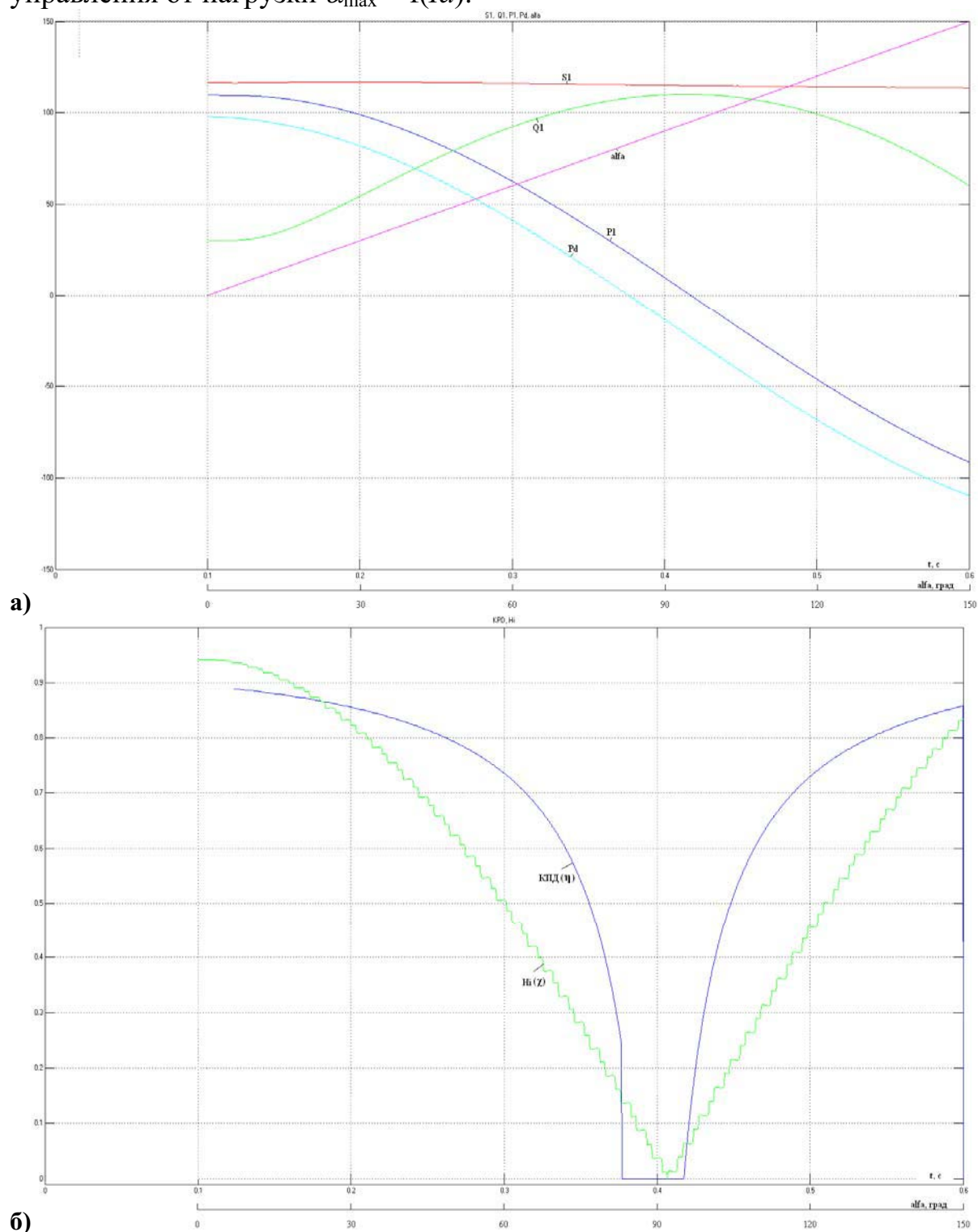


Рис. 4. Пример обработки осциллограмм мощностей (а) и энергетических характеристик (б) для отчета

Ограничительную характеристику следует построить на том же графике, где построены внешние характеристики (по п. 1.4).

2. Исследование влияния преобразователя на питающую сеть.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.

а) открыть файл «*rek_pr_spectr.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель однокомлектного рекуперировующего преобразователя, представленная на рис. 2;

б) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели виртуальной лабораторной установки.

В блоке трансформатор *TR* установить $L_a = X_a / \omega$, где X_a – задано по варианту (при частоте 50 Гц, $\omega = 314$).

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления α_1 задать по варианту.

В блоке *Zadatchik Id* выпрямленный ток I_d задать по варианту.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в выпрямительном режиме.

а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления α_1 в выпрямительном режиме.

Полученные осциллограммы можно редактировать согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам;

в) записать показания с дисплея (в табл. 3).

Таблица 3

Исследование влияния преобразователя на питающую сеть

Параметры	X_a (задано по варианту)	$2X_a$	Индуктивное сопротивление сети L_{Set} (<i>Source inductance</i>) (задано по варианту)	$2 \cdot L_{Set}$
X_a				
U_d				
I_d				
P_1				
Q_1				
S_1				
K_u				
χ (Hi)				
K_i				
$tg \varphi$ ($tg f_i$)				

2.3. Определение спектров гармоник и качества напряжения сети при работе преобразователя.

а) с помощью блока *Continuous powergui* и приведенным выше рекомендациям снять спектральный состав напряжения сети *u1ab* и тока *i1A* на входе преобразователя, а также тока *id* и напряжения на нагрузке *ud*.

Для перехода от одного сигнала к другому в смотровом окне установить номер входа: *Input1* - сигнал *u1ab*; *Input2* - сигнал *i1A*; *Input5* - сигнал *id*; *Input6* - сигнал *ud*.

Для обновления на смотровом окне сигнала осциллограммы нажать левой кнопкой мыши по строке «*Display FFT window*».

Для обновления на смотровом окне сигнала спектра нажать на кнопку «*Display*» в нижней правой части смотрового окна.

б) при других параметрах (по указанию преподавателя) снять спектральный состав напряжения сети *u1ab* и тока *i1A* на входе преобразователя, а также тока *id* и напряжения на нагрузке *ud*.

$$X_a^* = 2 \cdot X_a \text{ или } L_{Set} = 2 \cdot L_{Set}$$

Записать показания с дисплея в табл. 3 в соответствующие столбцы.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для однокомплектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме.

6. Осциллограммы для исследованных схем:

а) в выпрямительном и инверторном режиме;

б) показывающие влияния преобразователя на питающую сеть.

Сделать выводы о влиянии режима на вид осциллограмм.

Сравнить расчетные значения с полученными экспериментально.

7. Регулировочные и энергетические характеристики

Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях. Сравнить эти характеристики. Сделать выводы о причинах различия.

8. Внешние и энергетические характеристики при изменении угла управления и параметров трансформатора, построенные на одном графике.

Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях. Сравнить эти характеристики. Сделать выводы о причинах различия.

Сделать выводы о влиянии угла управления на внешние характеристики.

9. Ограничительная характеристика. Построить на одном графике с внешними характеристиками, пояснить ее назначение.

10. Осциллограммы и измеренные электрические величины, показывающие влияния преобразователя на питающую сеть, в выпрямительном режиме.

11. Спектры гармоник, характеризующие качество напряжения сети при работе преобразователя.

12. Обобщающие выводы.

Объяснить внешний вид полученных осциллограмм и характеристик:

- указать, чем отличаются осциллограммы для выпрямительного и инверторного режима;

- сравнить внешние характеристики в выпрямительном и инверторном режимах;

Объяснить, чем вызваны отклонения внешних характеристик в области малых токов от расчетных;

- сравнить энергетические характеристики при регулировании угла управления в выпрямительном и инверторном режимах.

Контрольные вопросы

1. Что такое ведомый инвертор?
2. Что такое однокомплектный рекуперирующий преобразователь?
3. Каков вид внешних и регулировочных характеристик ведомого инвертора в режиме непрерывного тока?
4. Что такое ограничительная характеристика?
5. Какие факторы и как влияют на наклон ограничительной характеристики?
6. Как снимаются внешние характеристики?
7. Как снимаются регулировочные характеристики?
8. Как снять ограничительную характеристику?
9. Что такое опрокидывание инвертора?
10. Как изменяется направление потока мощности при переходе от выпрямительного к инверторному режиму?
11. Что такое коэффициент мощности преобразователя?
12. Как определить коэффициент мощности преобразователя экспериментально?
13. При каких условиях КПД равен нулю? Почему?
14. Как зависит КПД от угла регулирования?
15. Как зависит КПД от тока нагрузки?
16. Чем определяется угол сдвига в преобразователе?
17. Как определить КПД в выпрямительном и инверторном режимах?
18. Каков спектральный состав тока, потребляемого из сети преобразователем?

19. От каких факторов зависит коэффициент гармоник напряжения сети при питании от нее преобразователей?

20. Назначение всех модулей виртуальной модели однокомплектного рекуперирующего преобразователя?

Таблица 4

Таблица вариантов

№ варианта	Угол управления	Выпрямленный ток	Напряжение на вторичной стороне трансформатора	Индуктивное сопротивление рассеивания трансформатора
	α_1 , град	I_d , А	U_2 , В	x_a , Ом
1	30	1,0	48	4,3
2	40	1,0	46	4,3
3	20	1,0	50	4,3
4	45	1,0	52	6,3
5	30	1,0	48	6,3
6	40	1,0	46	6,3
7	20	0,9	50	4,3
8	45	0,9	52	4,3
9	30	0,9	48	4,3
10	40	0,9	46	6,3
11	20	0,9	50	6,3
12	45	0,9	52	6,3
13	35	0,9	48	4,3
14	50	0,9	46	4,3
15	60	0,9	50	4,3
16	25	0,9	52	6,3
17	40	1,0	48	6,3
18	50	1,0	46	6,3
19	60	1,0	50	4,3
20	25	1,0	52	4,3
21	40	0,9	48	4,3
22	50	0,9	46	6,3
23	60	1,0	50	6,3
24	25	1,0	52	6,3

Примечания:

1. Студенты, получившие подвариант А, выполняют пункты 1а, б, г; Б – пункты 1а, в; В – пункты 1а, д.

2. При расчете принимать $E_2 = U_2$ на холостом ходу; $U_{T(0)} = 0,8$ В; $r_T = 0,2$ Ом, $r_a = 1,5$ Ом; $\delta_{\min} = 15^\circ$.

3. Все расчеты и построения выполняются для трехфазной мостовой схемы ($m = 6$).

4. При построении диаграмм принимать $x_d = \infty$.

5. Принять $\alpha_2 = \alpha_1 + 90$.

Работа № 5. Исследование преобразователей постоянного напряжения

Цель работы: изучение электромагнитных процессов и характеристик понижающего и повышающего преобразователя постоянного напряжения (ППН).

Описание виртуальных моделей

Принципиальная схема и виртуальная модель на ее основе, предназначенная для исследования понижающего преобразователя постоянного напряжения, изображена на рис. 1.

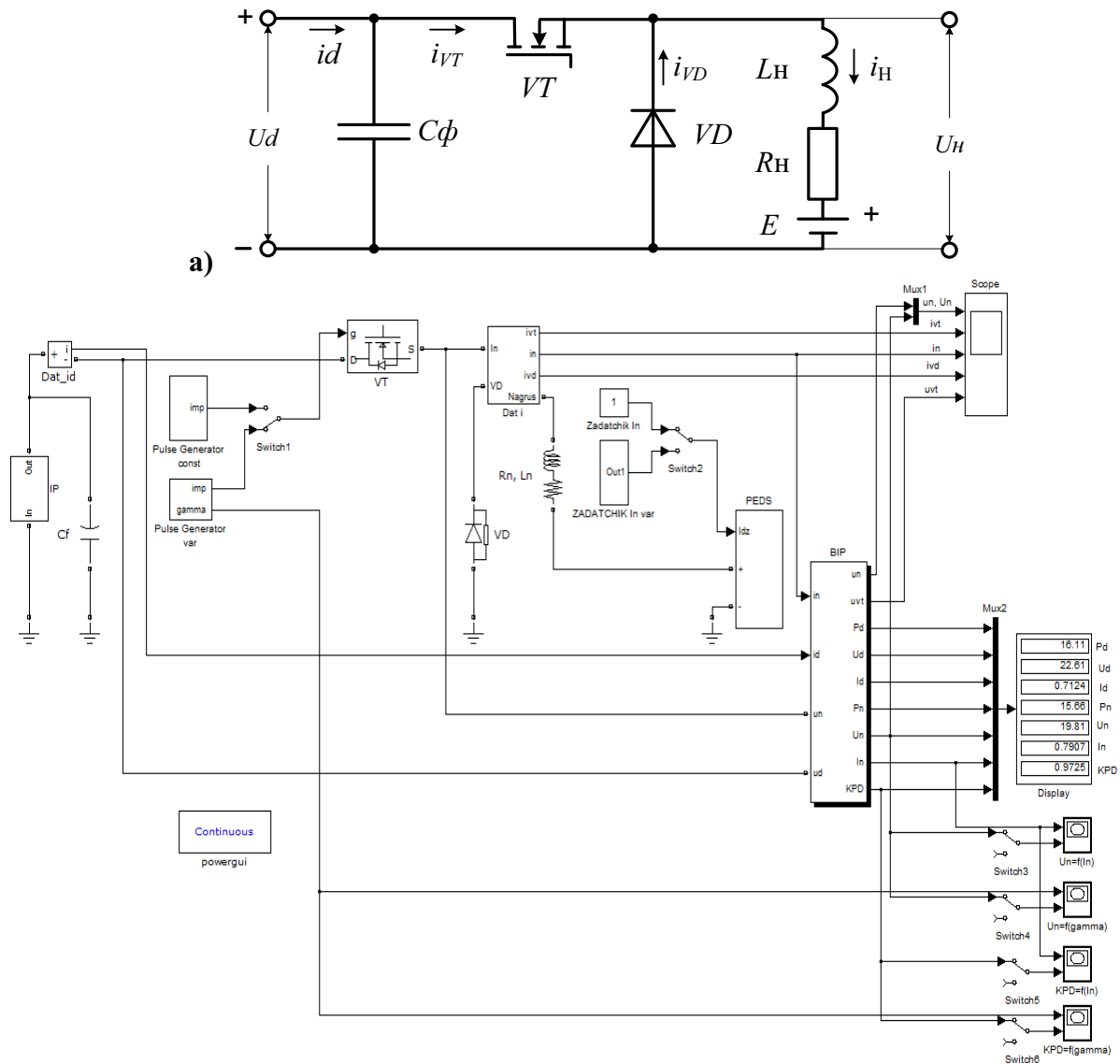
В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник питания (*IP*), конденсатор (*Cf*), транзистор (*Mosfet*), генераторы импульсов (*Pulse Generator const*, *Pulse Generator var*), датчики тока (*Dat_id*, *Dat i*), диод (*VD*), задатчик тока *In* (*Zadatchik In*, *Zadatchik In var*), нагрузка (*Rn*, *Ln*), блок ПЭДС (*PEDS*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), мультиплексоры (*Mux*, *Mux1*, *Mux2*), осциллограф (*Scope*), дисплей (*Display*), переключатели (*Switch1*, *Switch2*, *Switch3*, *Switch4*, *Switch5*, *Switch6*), графопостроители ($U_n = f(I_n)$, $U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(I_n)$, $KPD = f(\gamma)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

- 1) источник питания (*IP*). Изменяемые параметры блока:
 - ЭДС E установить в соответствии с заданным вариантом;
 - внутреннее сопротивление $R_{ip} = 2 \text{ Ом}$.
- 2) конденсатор (*Cf*) уменьшает потери в источнике питания, делая потребление энергии от него более постоянным, и устраняет перенапряжения при выключении транзистора, возникающие из-за индуктивности соединительных проводов в цепи источника питания (установить $Cf = 100 \text{ мкФ}$);
- 3) транзистор (*VT*) – блок, имитирующий работу полевого транзистора.
Изменяемые параметры блока:
 - дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии R_{on} (установить $0,5 \text{ Ом}$);
 - индуктивность транзистора во включенном состоянии L_{on} (установить $0,1 \text{ мкГн}$);
 - внутреннее сопротивление диода R_d (установить $0,5 \text{ Ом}$);
 - демпфирующая цепь – $R_s = 15 \text{ Ом}$, $C_s = 0,003 \text{ мкФ}$.
- 4) генератор импульсов (*Pulse Generator const*) – блок, формирующий импульсы управления транзистором с постоянной относительная длительность управляющего импульса (скважностью) γ .

Основные параметры блока *Pulse Generator const*:

- частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц;
- скважность γ (*The relative time of the pulse (gamma)*) – скважность – задать в соответствии с предварительным расчетом.



б)

Рис. 1. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) понижающего преобразователя постоянного напряжения

5) генератор импульсов (*Pulse Generator var*) – блок, формирующий импульсы управления транзистором со скважностью изменяемой от 0 до 1.

Основные параметры блока *Pulse Generator var*:

- частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц;
- время моделирования (*Modelling time T, c*) – задать 0,003 с.

б) датчики тока (*Dat_id, Dat i*) – позволяют осциллографировать токи, протекающие в схеме.

Dat_id – ток, потребляемый от источника питания;

$Dat\ i$ – токи, протекающие через транзистор ivt , нагрузку in и диод ivd .

7) диод (VD) – электронный блок, имитирующий работу диода.

Основные параметры блока:

– дифференциальное сопротивление диода во включенном состоянии (Ron) – установить 0,5 Ом;

– индуктивность диода во включенном состоянии Lon (установить 0 Гн);

– пороговое напряжение (Uf) – установить 0,8 В;

– демпфирующая цепь – установить $Rs = 10^4$ Ом, $Cs = inf$, что имитирует обратное сопротивление диода.

8) задатчики тока I_H (*Zadatchik In*, *ZADATCHIK In var*) – блоки задания по току нагрузки I_H для блока против-ЭДС ($PEDS$).

Блок *Zadatchik In* позволяет задавать фиксированное значение тока нагрузки In – установить по варианту $I_H = U_H/R_H$;

Блок *ZADATCHIK In var* позволяет задавать ток нагрузки, изменяющийся во времени от 0 до максимальной заданной величины $Inmax$ и предназначен для построения внешних характеристик. Параметры блока: Время моделирования (*Modeling time*, с) – установить 0,003 с; максимальный ток – установить $Inmax = 1.4$ А.

9) нагрузка (Rn , Ln). Параметры блока:

– активное сопротивление Rn задать в соответствии с заданным вариантом;

– величину индуктивности Ln задать равной 2 мГн;

– величина емкости $Cn = inf$, что имитирует перемычку в схеме;

10) блок ПЭДС ($PEDS$) – блок, имитирующий работу против-ЭДС.

Параметры блока:

Вид нагрузки «1» соответствует введению в схему ПЭДС;

Вид нагрузки «0» соответствует работе без ПЭДС.

Частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц.

11) блок измерительных преобразователей (BIP) – блок позволяющий измерять:

– мгновенное значение напряжения на нагрузке (un);

– мгновенное значение напряжения на транзисторе (ivt);

– мощность на входе ППН (Pd);

– постоянное напряжение на входе ППН (Ud)

– среднее значение тока на входе ППН (Id);

– мощность на выходе ППН (Pn);

– среднее значение напряжения на нагрузке (Un);

– среднее значение тока нагрузки (In);

– КПД ППН (KPD).

Изменяемые параметры блока BIP :

– частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц;

– время моделирования (*Modeling time*, с) установить 0,003 с.

12) мультиплексоры (*Mux1*, *Mux2*) – блоки, служащие для подачи на один вход осциллографа или дисплея нескольких сигналов.

13) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы токов и напряжений, снимаемых со всех датчиков и блока *BIP*:

- мгновенное и среднее значение напряжения на нагрузке (u_n , U_n);
- мгновенное значение тока на входе ППН (i_d) и тока, протекающего через транзистор (i_d , i_{vt});
- мгновенное значение тока нагрузки (i_n);
- мгновенное значение тока протекающего через диод (i_{vd});
- мгновенное значение напряжения на транзисторе i_{vt} .

14) дисплей (*Display*) – блок, служащий для регистрации измеренных величин с блока *BIP*.

15) переключатели (*Switch1*, *Switch2*, *Switch3*, *Switch4*, *Switch5*, *Switch6*) – блоки, предназначенные для переключения между блоками *Pulse Generator const* и *Pulse Generator var* (*Switch1*), *Zadatchik In* и *ZADATCHIK In var* (*Switch2*), а также введения в схему графопостроителей $U_n = f(I_n)$ (*Switch3*), $U_n = f(\gamma)$ (*Switch4*), $KPD = f(I_n)$ (*Switch5*), $KPD = f(\gamma)$ (*Switch6*);

16) графопостроители ($U_n = f(I_n)$, $U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(I_n)$, $KPD = f(\gamma)$) – блоки, предназначенные для построения внешней $U_H = f(I_H)$, регулировочной $U_H = f(\gamma)$ и энергетических $\eta = f(I_H)$, $\eta = f(\gamma)$ характеристик в автоматическом режиме.

Принципиальная схема и виртуальная модель на ее основе для исследования повышающего преобразователя постоянного напряжения имеет вид, изображенный на рис. 2.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник питания (*IP*), дроссель (*L*), транзистор (*VT*), генераторы импульсов (*Pulse Generator const*, *Pulse Generator var*), датчики тока (*Dat_id*, *Dat_ivt*, *Dat_in*, *Dat_ivd*), датчики напряжения (*Dat_ud*, *Dat_uvt*, *Dat_un*), диод (*VD*), активная нагрузка (*Rn*), конденсатор (*Cn*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), осциллограф (*Scope*), мультиплексоры (*Mux1*, *Mux2*), дисплей (*Display*), графопостроители ($U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$).

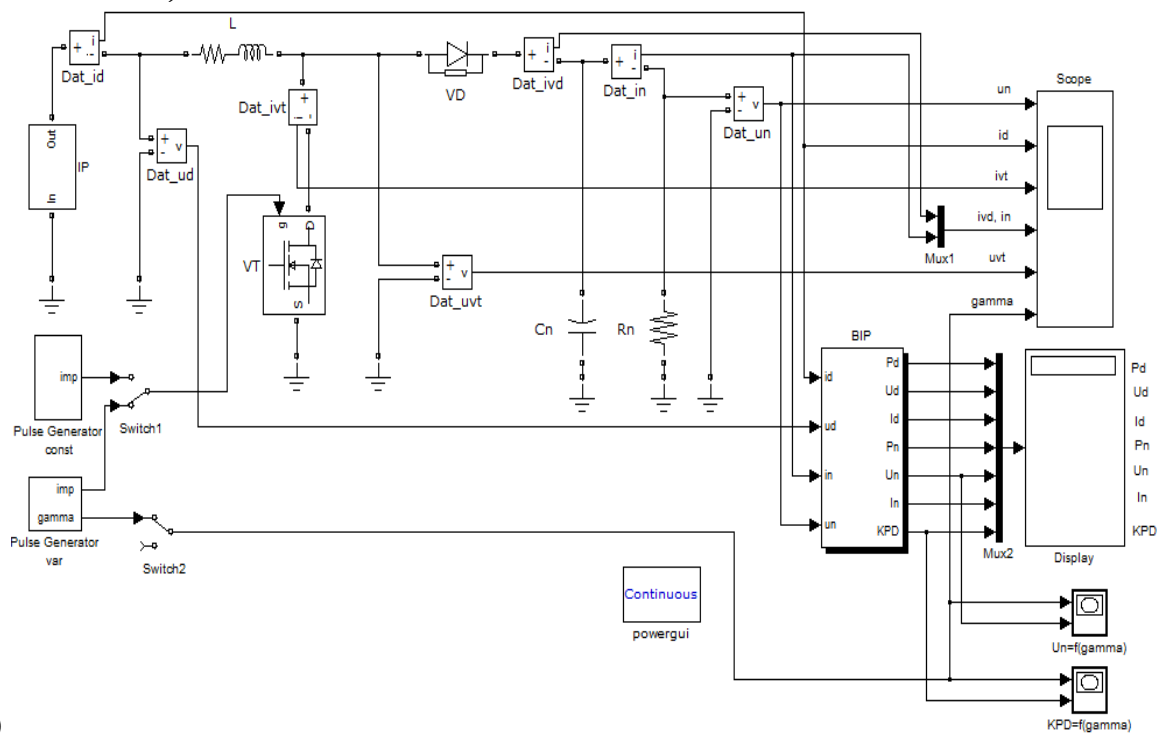
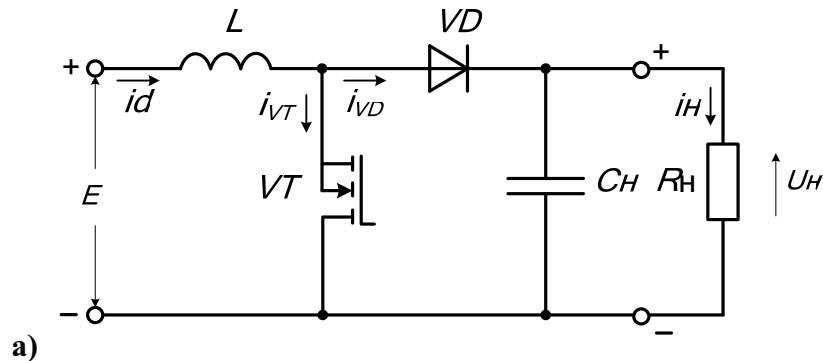
Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

- 1) источник питания (*IP*). Изменяемые параметры блока:
 - ЭДС E установить в соответствии с заданным вариантом;
 - внутреннее сопротивление $R_{ip} = 2$ Ом.
- 2) дроссель (*L*). Параметры блока:
 - активное сопротивление $R = 4$ Ом;
 - величина индуктивности $L = 20$ мГн.

3) транзистор (VT) – блок, имитирующий работу полевого транзистора.

Изменяемые параметры блока:

- дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии R_{on} (установить 0,5 Ом);
- индуктивность транзистора во включенном состоянии L_{on} (установить 0,1 мкГн);
- внутреннее сопротивление диода R_d (установить 0,5 Ом);
- демпфирующая цепь – $R_s = 15$ Ом, $C_s = 0,003$ мкФ.



б)

Рис. 2. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) повышающего преобразователя постоянного напряжения

4) генератор импульсов (*Pulse Generator var*) – блок, формирующий импульсы управления транзистором со скважностью изменяющейся от 0 до 0,96.

Основные параметры блока *Pulse Generator var*:

- частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц;

– время моделирования (*Modelling time T, c*) – задать 0,02 с.

5) генератор импульсов (*Pulse Generator const*) – блок, формирующий импульсы управления транзистором с постоянной относительная длительность управляющего импульса (скважностью) γ .

Основные параметры блока *Pulse Generator const*:

– частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц;

– скважность γ (*The relative time of the pulse (gamma)*) – скважность – задать в соответствии с предварительным расчетом.

6) датчики тока (*Dat_id, Dat_ivt, Dat_ivd, Dat_in*) – позволяют осциллографировать токи, протекающие в схеме.

Dat_id – ток, потребляемый от источника питания;

Dat_ivt – ток, протекающий через транзистор.

Dat_ivd – ток протекающий через диод.

Dat_in – ток нагрузки.

7) датчики напряжения (*Dat_ud, Dat_uvt, Dat_un*) – позволяют измерять напряжение в схеме.

Dat_ud – напряжение источника питания;

Dat_uvt – напряжение на транзисторе;

Dat_un – напряжение на нагрузке.

8) диод (*VD*) – электронный блок, имитирующий работу диода.

Основные параметры блока:

– дифференциальное сопротивление диода во включенном состоянии (*Ron*) – установить 0,5 Ом;

– индуктивность диода во включенном состоянии *Lon* (установить 0 Гн);

– пороговое напряжение (*Uf*) – установить 0,8 В;

– демпфирующая цепь – установить $R_s = 10^4$ Ом, $C_s = 0,01$ мкФ, уменьшает перенапряжение.

9) активная нагрузка (*Rn*). Параметры блока:

– активное сопротивление *Rn* задать в соответствии с вариантом.

10) фильтр (*Cn*). Емкость фильтра задать в соответствии с вариантом.

11) блок измерительных преобразователей (*BIP*) – блок позволяющий измерять:

– мощность на входе ППН (*Pd*);

– постоянное напряжение на входе ППН (*Ud*)

– среднее значение тока на входе ППН (*Id*);

– мощность на выходе ППН (*Pn*);

– среднее значение напряжения на нагрузке (*Un*);

– среднее значение тока нагрузки (*In*);

– КПД ППН (*KPD*).

Изменяемые параметры блока *BIP*:

– частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц;

12) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы токов и напряжений, снимаемых с датчиков:

- мгновенное значение напряжения на нагрузке (*un*);
- мгновенное значение тока на входе ППН и тока, протекающего через транзистор (*id*, *ivt*);
- мгновенное значение тока протекающего через диод (*ivd*) и тока нагрузки (*in*);
- мгновенное значение напряжения на транзисторе *ivt*.
- скважность γ (*gamma*).

13) мультиплексоры (*Mux1*, *Mux2*) – блоки, служащие для подачи на один вход осциллографа или дисплея нескольких сигналов.

14) дисплей (*Display*) – блок, служащий для регистрации измеренных величин с блока ВР.

15) графопостроители ($U_H = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$) – блоки, предназначенные для построения регулировочной $U_H = f(\gamma)$ и энергетической $\eta = f(\gamma)$ характеристик в автоматическом режиме.

Предварительное домашнее задание:

а) Изучить и повторить темы курса: «Ключевой режим работы транзисторов», «Преобразователи постоянного напряжения» [1(2.4.2, 2.4.4, 10.1 – 10.3)], содержание данной работы и быть готовым ответить на контрольные вопросы. Подготовить формы с таблицами (см. табл. 1, табл. 2, табл. 3) для занесения в них экспериментальных данных. Занести данные предварительного расчета в табл. 1;

б) для понижающего преобразователя постоянного напряжения рассчитать и построить регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ при заданной по варианту ЭДС источника питания E (при допущении идеальности источника питания и элементов ППН)

$$U_H = \gamma E, \quad (1)$$

где γ – относительная длительность включенного состояния транзистора;

в) определить коэффициент γ , соответствующий заданным значениям U_H и E , а также среднее значение тока нагрузки I_H при сопротивлении нагрузки R_H

$$I_H = \frac{U_H}{R_H}. \quad (2)$$

Результаты расчета своего подварианта занести в табл. 1;

г) определить граничный ток для заданных значений ЭДС источника питания E , скважности γ и несущей частоты f

$$I_{H.гр} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{L_H f}, \quad (3)$$

где L_H – индуктивность нагрузки. Результаты расчета своего подварианта занести в табл. 1;

д) определить коэффициент пульсаций тока нагрузки q_i для заданных значений ЭДС источника питания E , тока нагрузки I_H , скважности γ и несущей частоты f

$$q_i = \frac{\Delta I_H}{2I_H} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2L_H f I_H}. \quad (4)$$

Результаты расчета своего подварианта занести в табл. 1;

е) построить в масштабе диаграммы напряжений на нагрузке u_H и на ключе u_K , а также токов через ключ i_K , нагрузку i_H и через диод i_{VD} при заданных значениях E , U_H , R_H и f . Для упрощения принять, что ток нагрузки нарастает и спадает по линейному закону, а падение напряжения на транзисторе VT и диоде VD равно нулю;

ж) определить минимальное значение напряжения питания $E_{\min}$, при котором еще может обеспечиваться заданное значение U_H , если падение напряжения на транзисторе VT равно нулю, а источник питания идеален.

Результаты расчета своего подварианта занести в табл. 1.

Таблица 1
Результаты предварительных расчетов и измерений для понижающего ППН

	Предв. расчет	Эксперимент	
		Нагрузка RL	Нагрузка RL+ПЭДС
Pd	X		
E			
Id	X		
P_H	X		
U_H			
I_H			
η	X		
γ			
$I_{Hгр}$			
q_i			
$E_{\min}$			

Программа исследования схем ППН

1. Исследование модели понижающего ППН с активно-индуктивной и активно-индуктивной с ПЭДС нагрузкой.

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке. Определение коэффициента пульсаций.

1.3. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС и заданном токе нагрузки. Определение коэффициента пульсаций.

1.4. Построение внешних характеристик и зависимостей КПД от тока нагрузки при различной скважности. Определение граничного тока.

1.5. Построение регулировочных характеристик и зависимости КПД от скважности при разных токах нагрузки.

1.6. Определение минимального напряжения на входе для обеспечения заданного напряжения на выходе при активно-индуктивной нагрузке.

2 Исследование модели повышающего ППН.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме и при изменении емкости фильтра.

2.3. Построение регулировочных характеристик и зависимостей КПД от скважности при разных сопротивлениях нагрузки.

2.4. Построение внешних характеристик и зависимостей КПД от тока нагрузки при разных скважностях (по точкам).

3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. Исследование модели понижающего ППН с активно-индуктивной и активно-индуктивной с ПЭДС нагрузкой.

1.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) запустить программу «*MatLab*»;

б) открыть файл «*ppn_pro*». После открытия на экране появится модель понижающего преобразователя постоянного напряжения, представленная на рис. 1;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели и таблицей вариантов.

Переключатели *Switch1* и *Switch2* установить в верхнее положение, при этом в схему введены блоки *Pulse Generator const* и *Zadatchik In*.

В блоке *PEDS* установить ПЭДС равное 0, что соответствует активно-индуктивной нагрузке.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке. Определение коэффициента пульсаций.

а) запустить расчет модели.

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

Методика работы с виртуальным осциллографом приведена в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам в начале пособия.

По осциллограммам и по формуле (4) определить коэффициент пульсаций тока q_i , записать в табл. 1.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с расчетными. Полученное значение тока I_H считать заданным для последующих опытов (I_{H3}).

1.3. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС и заданном токе нагрузки I_{H3} . Определение коэффициента пульсаций.

а) в блоке *PEDS* установить ПЭДС равное 1, что соответствует активно-индуктивной нагрузке с противо-ЭДС.

В нагрузке установить $R_H^* = 0,1 \cdot R_H$.

В блоке *Zadatchik In* установить ток нагрузки I_H равный току I_{H3} , полученному при активно-индуктивной нагрузке.

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

По осциллограммам и по формуле (4) определить коэффициент пульсаций тока q_i , записать в табл. 1.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с результатами предыдущего опыта (по п.1.2).

1.4. Построение внешних характеристик и зависимостей КПД от тока нагрузки при различной скважности. Определение граничного тока.

а) снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость КПД от тока нагрузки $\eta = f(I_H)$ для понижающего ППН при скважности γ , определенной в соответствии с предварительным расчетом.

Переключатель *Switch2* установить в нижнее положение, что соответствует введению в схему блока *ZADATCHIK In var*.

Переключатели *Switch3* и *Switch5* установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему графопостроителей $U_H = f(I_H)$ и $KPD = f(I_H)$;

В нагрузке установить $R_H^* = 0,1 \cdot R_H$.

Запустить расчет модели и снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость $\eta = f(I_H)$.

По внешней характеристике определить граничный ток $I_{Hгр}$.

б) снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость КПД от тока нагрузки $\eta = f(I_H)$ при другой скважности;

В блоке *Pulse Generator const* задать $\gamma^* = 0,5 \cdot \gamma$.

Запустить расчет модели и снять внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$ и зависимость $\eta = f(I_H)$.

По внешней характеристике определить граничный ток $I_{Hгр}$.

Внешние характеристики $U_H = f(I_H)$ (полученные в п. 1.4 а, б) подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*. Аналогично обработать зависимости $\eta = f(I_H)$. Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

1.5. Построение регулировочных характеристик и зависимостей КПД от скважности при разных токах нагрузки.

а) снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при фиксированном токе нагрузки I_{H3} .

Переключатель *Switch1* установить в нижнее положение, что соответствует введению в схему блока *Pulse Generator var*.

Переключатель *Switch2* установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему блока *Zadatchik In*.

В блоке *Zadatchik In* установить ток нагрузки $I_H = I_{H3}$.

Переключатели *Switch3* и *Switch5* установить в нижнее положение, отключив из схемы графопостроителей $U_H = f(I_H)$, $KPD = f(I_H)$.

Переключатели *Switch4* и *Switch6* установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему графопостроителей $U_H = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$.

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

б) снять регулировочную $U_H = f(\gamma)$ характеристику и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при другом токе нагрузки I_H .

В блоке *Zadatchik In* задать ток нагрузки $I_H^* = I_{H3}/2$ (или другим, заданном преподавателем).

Обе регулировочные характеристики $U_H = f(\gamma)$ (полученные в п. 1.5 а, б) подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*. Аналогично обработать зависимости $\eta = f(\gamma)$. Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

1.6. Определение минимального напряжения на входе E для обеспечения заданного на выходе U_H при заданной активно-индуктивной нагрузке.

С этой целью, задать максимальное $\gamma = 0.95$ и уменьшать значение E , контролировать по показаниям дисплея напряжение на нагрузке U_H .

2 Исследование модели повышающего ППН

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) запустить программу «*MatLab*»;

б) открыть файл «*ppn_pro*». После открытия на экране появится модель понижающего преобразователя постоянного напряжения, представленная на рис. 2;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели.

Переключатель *Switch1* установить в верхнее положение, при этом в схему введен блок *Pulse Generator const*.

Переключатель *Switch2* установить в нижнее положение, отключив при этом графопостроители $U_n = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в заданном режиме и при изменении емкости фильтра.

а) запустить расчет модели

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

Методика работы с виртуальным осциллографом приведена в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осциллограммы с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам в начале пособия.

По осциллограммам определить коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке q_u , записать в табл. 2.

$$q_u = \frac{\Delta U_H}{2U_H}$$

Записать показания измерительных приборов (в табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерений для повышающего ППН

Параметры	Емкость фильтра	
	C	$0,1 \cdot C$
P_d		
U_d		
I_d		
P_H		
U_H		
I_H		
η		
q_u		

в) в блоке фильтр уменьшить емкость C в 10 раз.

Снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений и записать показания с дисплея в табл. 2 в соответствующий столбец. Сравнить результаты опытов по п. 2.2 б и п. 2.2 в.

2.3. Построение регулировочных характеристик и зависимостей КПД от скважности γ .

а) снять регулировочную $U_H = f(\gamma)$ характеристику и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при заданных параметрах.

Переключатель *Switch1* установить в нижнее положение, что соответствует введению в схему блока *Pulse Generator var*.

Переключатель *Switch2* установить в верхнее положение, что соответствует введению в схему графопостроителей $Un = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$.

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

б) снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при изменении параметров нагрузки.

В нагрузке задать $R_H = 3 R_H$.

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

в) снять регулировочную $U_H = f(\gamma)$ характеристику и зависимость $\eta = f(\gamma)$ при изменении параметров дросселя.

В блоке L увеличить R в 3 раза при заданном R_H .

Запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику $U_H = f(\gamma)$ и зависимость $\eta = f(\gamma)$.

Все регулировочные подписать и наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*. Аналогично обработать зависимости $\eta = f(\gamma)$. Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

2.4. Построение внешней характеристики и зависимости КПД в функции тока нагрузки.

Переключатель *Switch1* установить в верхнее положение, при этом в схему введен блок *Pulse Generator const*.

Переключатель *Switch2* установить в нижнее положение, отключив при этом графопостроители $Un = f(\gamma)$, $KPD = f(\gamma)$.

Построение выполнить по точкам: не изменяя величину скважности ($\gamma = const$ задать по варианту) в блоке *Pulse Generator const*, изменять ток нагрузки за счет R_H . Построить характеристики $U_H = f(I_H)$ и $\eta = f(I_H)$ по трем точкам: $R = R_H$, $R = 2R_H$ Ом и $R = 3R_H$ Ом. Значения токов, напряжений и мощностей записывать по показаниям дисплея в табл. 3. Для ускорения процесса выполнения опыта можно останавливать расчет модели, если показания на дисплее не изменяются.

Таблица 3

Данные для построения внешней и энергетической характеристик

Параметры	R_H	$2R_H$	$3R_H$
U_H			
I_H			
η			

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования (для своего подварианта).
6. Осциллограммы для исследованных схем:
 - а) для активно-индуктивной нагрузки и активно-индуктивной нагрузки с ПЭДС в непрерывном режиме для понижающего ППН;
 - б) для повышающего ППН.

Сделать выводы о влиянии вида нагрузки и режима на вид осциллограмм для понижающего ППН, а также о величине пульсаций.

Сравнить расчетные значения токов и напряжений с полученными экспериментально.

7. Внешние характеристики и зависимости КПД от тока нагрузки для понижающего ППН. Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях. Определить граничные токи.

Выводы о влиянии скважности на внешние характеристики.

8. Регулировочные характеристики и зависимости КПД от скважности для понижающего ППН при двух значениях тока. Выводы о влиянии величины тока;

9. Определить минимальное напряжение на входе понижающего ППН для обеспечения заданного на выходе.

10. Внешние характеристики и зависимости КПД от тока нагрузки для повышающего ППН. Вывод об отличии внешних характеристик повышающего ППН от понижающего.

11. Регулировочные характеристики и зависимости КПД от скважности для повышающего ППН, построенные на одном графике. Выводы о влиянии сопротивления нагрузки и сопротивления дросселя. Объяснить вид полученных характеристик.

Контрольные вопросы

1. Сравните ключевой и линейный режимы работы транзистора.
2. Преимущества ключевого режима.
3. Каково назначение ППН?
4. Какие виды ППН вы знаете?
5. Зачем включается конденсатор на входе понижающего ППН?
6. Зачем включается индуктивность на входе повышающего ППН?
7. В чем сходство между трансформатором и ППН?
8. Что такое регулировочная характеристика преобразователя постоянного напряжения?
9. Каков вид регулировочных характеристик понижающих ППН?
10. Сравнить регулировочные характеристики понижающего и повышающего преобразователя постоянного напряжения.
11. Объяснить вид регулировочной характеристики повышающего преобразователя постоянного напряжения.
12. Что такое внешняя характеристика ППН?
13. От чего зависит наклон внешних характеристик понижающих ППН?
14. Как влияет внутреннее сопротивление источника питания на характеристики ППН?
15. От чего зависит КПД понижающего ППН?
16. На что влияет изменение несущей частоты?
17. Как определить коэффициенты пульсаций тока и напряжения на нагрузке?
18. Можно ли выполнить ППН на обычных тиристорах?

Таблица 4

Таблица вариантов

№ вар	ЭДС источника питания	Понижающий ППН		Повышающий ППН		
		Напряжение нагрузки	Активное сопротив- ление нагрузки	Активное сопротив- ление нагрузки	Емкость фильтра	Скваж- ность
		$U_H, В$	$R_H, Ом$	$R_H, Ом$	$C_H, мкФ$	γ
1	27	10	36	200	10	0,5
2	27	12	40	180	5	0,55
3	24	14	45	210	20	0,6
4	27	16	42	170	15	0,65
5	27	18	38	220	10	0,7
6	26	10	39	200	5	0,65
7	26	12	40	180	20	0,6
8	26	14	45	210	15	0,55
9	27	10	36	170	10	0,5
10	25	12	40	220	5	0,55
11	26	11	45	200	20	0,6
12	26	13	40	180	15	0,65
13	26	15	39	210	10	0,7
14	25	14	42	170	5	0,65
15	25	16	44	220	20	0,6
16	25	18	48	200	15	0,55
17	24	12	36	180	10	0,5
18	24	11	40	210	5	0,5
19	24	13	38	170	20	0,6
20	24	15	39	220	15	0,7
21	27	17	40	200	10	0,55
22	26	14	36	180	5	0,65
23	25	11	45	210	20	0,5
24	24	13	48	170	15	0,7

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А выполняют п. 1 а, б, в, г; подвариант Б – п. 1 а, в, д, ж; подвариант В – п. 1 а, в, д, е.

2. Индуктивность нагрузки в понижающем ППН $L_H = 2 \text{ мГн}$.

3. Несущая частота 10000 Гц.

4. При выполнении предварительного расчета принять, что все элементы идеальны.

Работа №6. Исследование трехфазных АИН с различными способами импульсной модуляции

Цель работы: Исследование электромагнитных процессов, характеристик и энергетических показателей автономного инвертора напряжения (АИН), выполненного по трехфазной мостовой схеме при трех способах импульсной модуляции (ИМ).

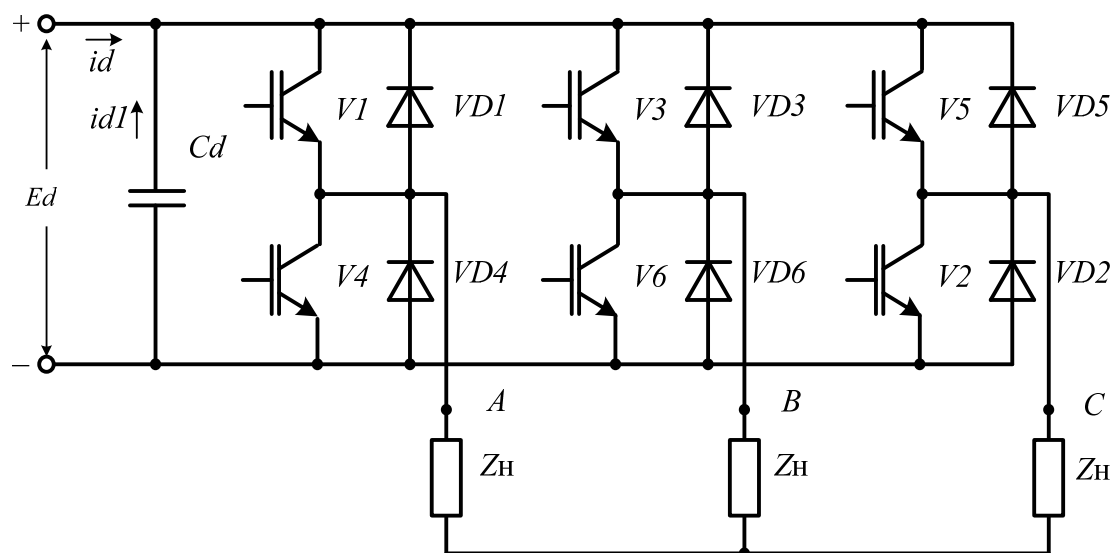
Описание виртуальных моделей

Принципиальная схема силовых цепей трехфазного автономного инвертора напряжения и его виртуальная модель, предназначенная для снятия осциллограмм и характеристик при трех способах импульсной модуляции, изображены на рис. 1.

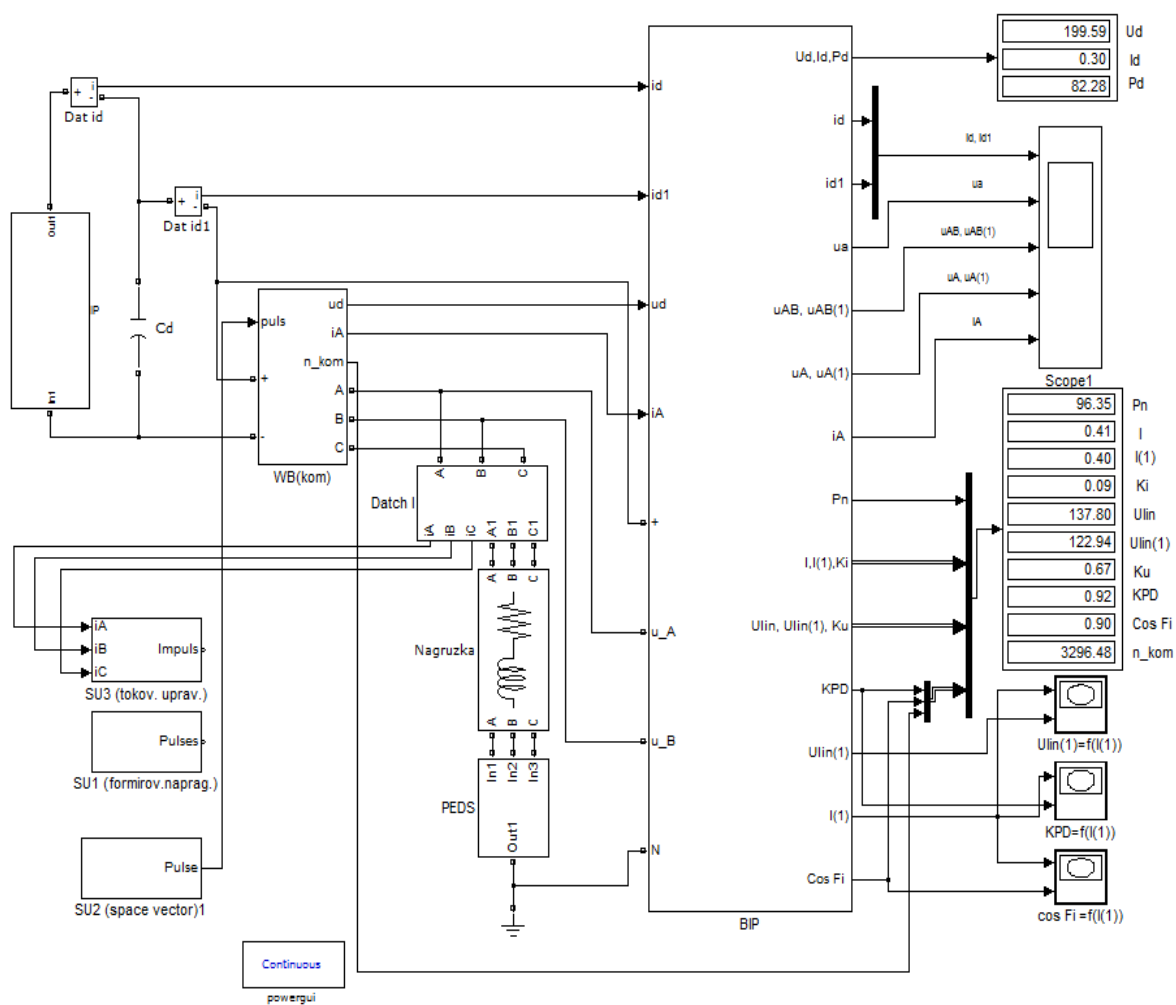
В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: источник питания (*IP*), конденсатор (*Cd*), датчик тока (*Dat id1*), система управления (*SU (space vector)*), вентильный блок (*WB(kom)*), нагрузка (*Nagruzka*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), осциллограф (*Scope*), дисплеи и графопостроители ($U_{lin}(1) = f(I(1))$; $KPD = f(I(1))$; $\cos \Phi = f(I(1))$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

- 1) источник питания (*IP*). Изменяемые параметры блока:
 - ЭДС E_d установить в соответствии с заданным вариантом;
 - внутреннее сопротивление $R_{ip} = 2 \text{ Ом}$.
- 2) конденсатор (*Cd*) – уменьшает потери в источнике питания, делая потребление энергии от него более постоянным (установить $Cd = 1000 \text{ мкФ}$);
- 3) датчики тока (*id*, *id1*, *Datch I*) – позволяют осциллографировать токи, протекающие в схеме:
 - Dat_id* – ток, потребляемый от источника питания;
 - Dat id1* – ток на входе инвертора (после конденсатора);
 - Datch I* – токи, протекающие в каждой фазе нагрузки.
- 4) системы управления (*SU1(formirov.naprag.)*, *SU2 (space vector)*, *SU3(tokov.uprav.)*) реализуют три способа импульсной модуляции:
 - а) *SU1(formirov.naprag.)* – формирование напряжений на выводах по отношению к средней точке источника питания с помощью ШИМ. Изменяемые параметры блока:
 - несущая частота, Гц (*Carrier frequency, (Hz)*) – установить $f = 5000 \text{ Гц}$;



a)



б)

Рис. 1. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) силовых цепей трехфазного автономного инвертора напряжения

– коэффициент модуляции¹ (*Modulation index*, $(0 < m < 1)$) – установить равным 0.9, $(\mu = \frac{U_{\text{мод max}}}{U_{\text{ГПН max}}} \approx \frac{U_{\text{л(1)}}$);

– частота выходного напряжения, Гц (*Frequency of output voltage*, (Hz)) и фазовый сдвиг выходного напряжения (град.) (*Phase of output voltage*, (degrees)) – установить равными 50 Гц и 27 град соответственно.

б) *SU2 (space vector)* – формирование фазных напряжений с помощью пространственного вектора и ШИМ. Основные параметры блока:

– несущая частота, Гц (*Carrier frequency*, (Hz)) – установить равной $f = 5000$ Гц;

– частота выходного напряжения, Гц (*Frequency of output voltage*, (Hz)) установить равной 50 Гц.

– коэффициент модуляции (*Modulation index*, $(0 < m < 1)$) – установить равным 0.9).

в) *SU3(tokov.uprav.)* – формирование фазных токов на основе релейного регулирования (ЧШИМ). Основные параметры блока:

– амплитуда тока (*Amplitude of the current*, A) – установить равной амплитуде тока $I_{\phi(1)m}$;

– частота выходного напряжения, Гц (*Frequency of output voltage*, (Hz)) и фазовый сдвиг выходного напряжения (*Phase of output voltage*, (degrees)) – установить равными 50 Гц и 0 град соответственно;

– ширина токового коридора ШТК (*Width of the current corridor*, A) – установить равной 0.08 А.

5) вентильный блок (*WB(kom)*) – содержит вентильный блок (*WB*) в комплекте с блоком коммутационных потерь (*BKP*), позволяющим учесть коммутационные потери в транзисторах.

Подключив на выход *WB(kom)* дисплей, можно наблюдать число включений (коммутаций) одного транзистора (n_kom) в секунду.

Вентильный блок (*WB*) представляет собой универсальный мостовой модуль, состоящий из шести *IGBT*-транзисторов, шунтированных встречными диодами (*IGBT/Diodes*).

Изменяемые параметры блока:

– суммарное время включения+выключения транзистора ($tw_{kl}+tw_{kl}$) – установить $t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} = 2 \cdot 10^{-6}$ с;

– пороговое напряжение транзистора и диода ($U0\ transistor$) и диода ($U0\ diod$) – установить $U_{0transistor} = 2$ В, $U_{0diod} = 2$ В;

– дифференциальное сопротивление транзистора и диода во включенном состоянии R_{dif} (установить $R_{dif} = 0,5$ Ом).

¹ Здесь и далее по тексту принято условное обозначение коэффициента модуляции « m » – в среде *MatLab*; в теории [1 (11.5)] – принято условное обозначение « μ »

6) нагрузка (*Nagruzka*) – блок, содержащий активно-индуктивную нагрузку RL во всех фазах. Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление *Resistans* $R(Ohms)$ установить в соответствии с заданным вариантом;
- индуктивность *Inductance* $L(H)$ установить в соответствии с предварительным расчетом;
- емкость *Capacitance* $C(F)$ установить равное *inf*, что соответствует бесконечно большой емкости или перемычке в схеме.

7) противо-ЭДС (*PEDS*) – блок, необходимый для изменения тока нагрузки.

Изменяемые параметры блока:

- начальное (*PEDS nach (otnosit = E_m/Ed)*) и конечное (*PEDS konech (otnosit = E_m/Ed)*) значение величины противо-ЭДС (в относительных единицах). При снятии осциллограмм установить равное нулю. При построении внешних характеристик и зависимости КПД от тока, установить следующие параметры:

- для АИН с формированием средних напряжений на выводах с помощью ШИМ (управление от *SU1*) установить $(E_m/Ed)_{нач} = 0$ и $(E_m/Ed)_{кон} = 0,48$;
- для схемы АИН с формированием фазных напряжений с помощью пространственного вектора (управление от *SU2*) установить $(E_m/Ed)_{нач} = 0$ и $(E_m/Ed)_{кон} = 0,55$.
- число периодов моделирования (*chislo periodov modelirovania*) – установить 10;
- ЭДС источника питания (*Voltage Source (Ed)*) установить в соответствии с заданным вариантом;
- коэффициент модуляции (*Modulation index* ($0 < m < 1$)) установить равный 0.9;
- частота выходного напряжения (*Frequency of output voltage, (Hz)*) – установить равной 50 Гц.

8) блок измерительных преобразователей (*BIP*) – позволяет определять следующие величины:

- среднее значение напряжения на фильтре U_d ,
- среднее значение тока потребляемого от источника питания АИН I_d ;
- активную мощность, потребляемую от источника постоянного тока P_d ;
- мгновенное значение тока, потребляемого от источника питания АИН i_d ;
- мгновенное значение тока на входе АИН (после конденсатора) i_{d1} в цепи постоянного тока (источника питания);
- мгновенное значение напряжения на вентиле u_a ;
- мгновенное значение линейного напряжения u_{AB} и его первой гармоники $u_{AB(1)}$;

- мгновенное значение фазного напряжения uA и его первой гармоники $uA(1)$;
- мгновенное значение фазного тока i (соответствует I_{ϕ});
- активную мощность, передаваемую в нагрузку P_n ;
- действующее значение фазного тока I и амплитуду его первой гармоники ($I(1)$);
- результирующий коэффициент гармоник тока K_i (K_I);
- действующее значение линейного напряжения U_{lin} и его первой гармоники $U_{lin}(1)$;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_u (K_U);
- коэффициент полезного действия KPD (η);
- $\cos \varphi_i$ ($\cos \varphi_n$).

Изменяемые параметры блока ВІР:

- частота выходного напряжения, Гц (*Frequency of output voltage, (Hz)*)
- установить равной 50 Гц;

9) осциллограф (*Scope1*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных и средних значений токов и напряжений (id , $id1$, ua , uAB , $uAB(1)$, uA , $uA(1)$, iA);

10) дисплей – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжений и токов, снимаемых с блока ВІР.

11) графопостроители ($U_{lin}(1) = f(I(1))$; $KPD = f(I(1))$; $\cos \varphi_i = f(I(1))$) – блоки, предназначенные для построения внешней характеристики $U_{л(1)} = f(I_{\phi})$, а также зависимостей $\eta = f(I_{\phi})$ и $\cos \varphi = f(I_{\phi})$ в автоматическом режиме.

Предварительное домашнее задание:

а) Изучить и повторить тему курса: «Автономные инверторы напряжения» [1, (11.1, 11.4, 11.5, 11.7, 11.8)], содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы. Подготовить формы с таблицами (см. табл. 2, табл. 3) для занесения в них экспериментальных данных. Занести данные предварительного расчета в табл. 2;

б) рассчитать для заданного варианта напряжения источника питания E_d максимальные действующие значения первой гармоники линейного $U_{л(1)\max}$ и фазного $U_{\phi(1)\max}$ напряжений на нагрузке при разных способах модуляции (вентили принимать идеальными):

- при формировании напряжений на выводах относительно средней точки источника питания:

$$U_{\phi(1)\max} = U_d \cdot k_m, \quad (1)$$

$$U_{л(1)\max} = \sqrt{3} \cdot U_d \cdot k_m; \quad (2)$$

– при формировании напряжений с помощью пространственного вектора:

$$U_{л(1)\max} = \frac{U_d}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$U_{ф(1)\max} = U_d \cdot k_m; \quad (4)$$

– коэффициент k_m зависит от способа модуляции (табл. 1).

Таблица 1

Способ реализации ИМ	k_m
Формирование напряжений на выводах относительно средней точки источника питания	$\frac{1}{2\sqrt{2}}$
Формирование фазных напряжений с помощью пространственного вектора;	$\frac{1}{\sqrt{6}}$

в) рассчитать при заданном способе и коэффициенте модуляции действующие значения первой гармоники фазного напряжения $U_{ф(1)}$ и тока фазы $I_{ф(1)}$, принимая, что источник питания и вентили идеальны. Коэффициент модуляции μ и параметры нагрузки активное сопротивление фазы $r_{нф}$ и $\cos\varphi_n$ взять из таблицы вариантов и примечаний к ней.

$$U_{ф(1)\text{ид}} = \mu U_{ф(1)\max}; \quad (5)$$

$$I_{ф(1)} = \frac{U_{ф(1)\text{ид}}}{z_{нф}}, \quad (6)$$

$$z_{нф} = \frac{r_{нф}}{\cos\varphi_n}; \quad (7)$$

Определить индуктивность фазы нагрузки

$$L_{нф} = \frac{z_{нф} \sin\varphi_n}{\omega}, \quad (8)$$

где $\omega = 50$ Гц.

г) рассчитать для заданного варианта действующие значения первой гармоники линейного $U_{л(1)}$ и фазного $U_{ф(1)}$ напряжений на нагрузке при неидеальном источнике питания, неидеальных ключах, рассчитанном токе нагрузки (по формуле 6) и коэффициенте модуляции μ :

$$U_{ф(1)} = \mu U_{ф(1)\max} - I_{ф(1)} \cos\varphi_n (3\mu^2 k_m^2 r_{м\text{ип}} + r_k), \quad (9)$$

$$U_{л(1)} = \sqrt{3} U_{ф(1)} \quad (10)$$

где r_k – сопротивление транзистора (диода) в проводящем состоянии. Так как ток фазы нагрузки всегда проходит либо через транзистор, либо через

диод. Примем для упрощения, что их сопротивления в проводящем состоянии одинаковы и равны:

$$r_k = \frac{U_0}{I_{\phi(1)}}. \quad (11)$$

– внутреннее сопротивление источника питания $r_{ип} = 1$ Ом;

– падение напряжение на транзисторе $U_0 = 2$ В;

Результаты предварительного расчета занести в таблицу 2.

д) рассчитать внешнюю характеристику при изменении I_ϕ и постоянстве $\cos \varphi$ по уравнению.

$$U_{л(1)} = \sqrt{3}(\mu U_{\phi(1)\max} - I_{\phi(1)} \cos \varphi_n (3\mu^2 k_m^2 r_{ип} + r_k)) \quad (12)$$

е) рассчитать зависимость КПД АИН от глубины регулирования μ при рассчитанном токе $I_{\phi(1)}$ (по формуле 6) и постоянстве $\cos \varphi$:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu k_m \cos \varphi_n} \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_0}{U_d} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (t_{вкл} + t_{выкл}) \cdot n_{ком} + \frac{I_{\phi(1)} r_\partial}{U_d} \right)}, \quad (13)$$

где: r_∂ – дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии (принять $r_\partial = 0,5$ Ом);

$n_{ком}$ – число включений (коммутаций) одного транзистора в секунду, зависящее от способа модуляции:

– при формировании напряжений на выводах относительно средней точки источника питания:

$$n_{ком} = f_{нec}, \quad (14)$$

– при формировании фазных напряжений с помощью пространственного вектора:

$$n_{ком} = f_{нec} \cdot 0,66. \quad (15)$$

Принять, что несущая частота $f_{нec} = 5000$ Гц, а суммарное время включения-выключения транзистора $t_{вкл.} + t_{выкл.} = 2$ мкс.

Зависимости КПД АИН от глубины регулирования построить по трем точкам (по аналогии с экспериментом):

- заданная величина $\mu = 0,9; f = 50$ Гц;
- $\mu' = 0,45; f' = 25$;
- $\mu' = 0,18; f' = 10$.

Рассчитанные значения для $\mu = 0,9$ занести в табл. 2

Программа исследования АИН с различными способами ИМ

1. Исследование модели трехфазного АИН с формированием напряжений на выводах по отношению к средней точке источника питания с помощью ШИМ.

1.1. Изучение модели, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин в номинальном режиме.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при понижении несущей частоты.

2. Исследование модели трехфазного АИН с формированием фазных напряжений с помощью пространственного вектора и ШИМ.

2.1. Изменение модели, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин в номинальном режиме.

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при понижении несущей частоты.

3. Исследование модели трехфазного АИН с формированием фазных токов на основе релейного регулирования (ЧШИМ).

3.1. Изменение модели, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин в номинальном режиме.

3.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при увеличении ширины токового коридора.

4. Построение внешних характеристик и зависимости КПД от тока для АИН с лучшим вариантом ИМ.

5. Построение регулировочных и энергетических характеристик в функции глубины регулирования (при выполнении закона $U/f = \text{const}$ или $\mu/f = \text{const}$).

6. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. Исследование модели трехфазного АИН с формированием напряжений на выводах по отношению к средней точке источника питания с помощью ШИМ (1 способ ИМ).

1.1. Изучение модели, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин в номинальном режиме.

а) запустить программу «*MatLab*»;

б) открыть файл «ain_3f». После открытия на экране появится модель трехфазного АИН, представленная на рис. 1 б;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели.

Выход системы управления *SU1 (formirov.naprag.)* подключить на вход «*puls*» вентильного блока *WB (kom)*. Выходы систем управления *SU2* и *SU3* оставить неподключенными.

1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин для заданного режима и при понижении несущей частоты.

а) запустить расчет модели.

б) снять осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений.

Методика работы с виртуальным осциллографом приведена в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эту осциллограмму с помощью графической среды «Paint». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам в начале пособия.

Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с расчетными.

Таблица 2

**Исследование автономного инвертора напряжения
при 3 способах реализации ИМ для одной точки**

Параметры	Предварит. расчет		Эксперимент					
			Вид ИМ					
			1		2		3	
	Вид ИМ		Заданный режим	$f_{\text{нес}} \downarrow$ 10 раз	Заданный режим	$f_{\text{нес}} \downarrow$ 10 раз	Заданный режим	ШТК $\uparrow n$ раз
	1	2						
$r_{\text{нф}}$								
μ							X	X
$f_{\text{нес}}$							X	X
$n_{\text{ком}}$								
ШТК			X	X	X	X		
U_d , В								
I_d , А		X						
P_d , Вт		X						
I_{ϕ} , А		X						
$I_{\phi(1)}$, А								
$I_{\phi(1)m}$, А			X	X	X	X		
K_I		X						
U_L , В								
$U_{L(1)}$, В								
P_n , Вт								
K_U		X						
η		X						
$\cos\varphi_n$		X						

в) исследование влияния несущей частоты $f_{\text{нес}}$ на синусоидальность кривой тока и на КПД. Для этого в параметрах блока *SU1 (formirov.naprag.)* несущую частоту уменьшить в 10 раз $f_{\text{нес}}^* = 0.1 \cdot f_{\text{нес}}$ (параметр *Carrier frequency*, Hz).

Повторить пункт 1.2 б. По показаниям дисплеев заполнить соответствующую часть таблицы 2.

2. Исследование модели трехфазного АИН с формированием фазных напряжений с помощью пространственного вектора и ШИМ (2 способ ИМ).

2.1. Изменение модели, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин в номинальном режиме.

а) выход системы управления *SU2 (space vector)* подключить на вход «*puls*» вентильного блока *WB (kom)*. Выходы систем управления *SU1* и *SU3* оставить неподключенными.

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

Записать показания измерительных приборов (в соответствующую часть табл. 2) и сравнить их с предыдущими значениями (для 1 способа).

2.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при понижении несущей частоты.

а) исследование влияния несущей частоты $f_{\text{нec}}$ на синусоидальность кривой тока и на КПД. Для этого в параметрах блока *SU2 (space vector)* несущую частоту уменьшить в 10 раз $f_{\text{нec}}^* = 0.1 \cdot f_{\text{нec}}$ (параметр *Carrier frequency, Hz*).

Повторить пункт 2.1 б. По показаниям дисплеев заполнить соответствующую часть таблицы 2.

3. Исследование модели трехфазного АИН с формированием фазных токов на основе релейного регулирования (ЧШИМ) (3 способ ИМ).

3.1. Изменение модели, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин в номинальном режиме.

а) Выход системы управления *SU3 (tokov. uprav.)* подключить на вход «*puls*» вентильного блока *WB (kom)*. Выходы систем управления *SU1* и *SU2* оставить не подключенными.

В блоке *SU3 (tokov. uprav.)* установить следующие параметры:

– амплитуду тока (параметр «*Amplitude of the current, A*») I_{A1m} равную амплитуде тока I_{A1m} , полученной для схемы трехфазного АИН с формированием напряжений на выводах по отношению к средней точке источника питания (см. табл. 2, 1 способ, базовый режим).

– параметр ширина токового корридора (ШТК) «*Width of the current corridor, A*» установить таким, чтобы полученное число коммутаций $n_{\text{ком}}$ было между $n_{\text{ком}}$ двух других способов (ориентировочно ШТК = 0,08).

б) снять осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений.

Записать показания измерительных приборов (в соответствующую часть табл. 2) и сравнить их с предыдущими значениями (для 1 и 2 способа).

3.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при увеличении ширины токового коридора.

а) В блоке $SU3$ (*tokov. uprav.*) параметр ширина токового коридора «*Width of the current corridor, A*» увеличить таким образом, чтобы $n_{\text{ком}}$ уменьшилась примерно в 10 раз (по сравнению с результатами п. 3.1).

б) снять осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений.

По показаниям дисплеев заполнить соответствующую часть таблицы 2.

4. Построение внешних характеристик и зависимости КПД от тока для АИН с лучшим вариантом ИМ.

а) сравнить по показаниям в табл. 2 три способа импульсной модуляции с точки зрения K_u , K_i , η , $n_{\text{ком}}$. Выбрать лучший;

б) по результатам сравнения подключить выход соответствующей системы управления SU на вход «*puls*» вентильного блока WB (*kom*).

в) В блоке SU все параметры установить для заданного режима.

Снять характеристики $\eta = f(I_{A(1)})$, $U_{л(1)} = f(I_{A(1)})$ с помощью соответствующих графопостроителей.

По характеристике $\cos\varphi = f(I_{A(1)})$ убедиться, что $\cos\varphi$ изменяется не очень существенно.

5. Построение регулировочных и энергетических характеристик в функции глубины регулирования (при выполнении закона $U/f = \text{const}$ или $\mu/f = \text{const}$).

При исследовании выполняем закон $U/f = \text{const}$ или $\mu/f = \text{const}$, одновременно меняя коэффициент модуляции μ (в блоках SU и $PEDS$) и частоту выходного напряжения f (в блоках SU , $PEDS$ и BIP). По показаниям с дисплеев снять характеристики по точкам при трех значениях, данные занести в табл. 3:

- базовая величина $\mu = 0,9$; $f = 50$ Гц;
- $\mu' = 0,45$; $f' = 25$;
- $\mu' = 0,18$; $f' = 10$.

Таблица 3

**Исследование регулировочных и энергетических характеристик в функции
глубины регулирования**

$f, \text{Гц}$	50	25	10
μ	0,9	0,45	0,18
$f_{\text{нec}}$			
$n_{\text{ком}}$			
$U_d, \text{В}$			
$I_d, \text{А}$			
$P_d, \text{Вт}$			
$I_{\phi}, \text{А}$			
$I_{\phi(1)}, \text{А}$			
K_I			
$U_{\text{л}}, \text{В}$			
$U_{\text{л}(1)}, \text{В}$			
$P, \text{Вт}$			
η			
$\cos\varphi$			
K_U			

По данным таблицы 3 построить зависимости $U_{\text{л}(1)} = F(f)$, $\frac{U_{\text{л}(1)}}{f} = F(f)$,
 $K_I = F(f)$, $K_U = F(f)$, $\eta = F(f)$.

Проверить насколько при регулировании частоты обеспечивается закон постоянства $\frac{U_{\text{л}(1)}}{f}$.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования.
6. Осциллограммы для исследованных схем (всего 6 шт.) и таблица 2:
 - а) для модели трехфазного АИН с формированием напряжений на выводах по отношению к средней точке источника питания с помощью ШИМ для базового режима и при изменении одного из параметров (1 способ ИМ) – 2 шт;

б) для модели трехфазного АИН с формированием фазных напряжений с помощью пространственного вектора с помощью ШИМ (2 способ ИМ) – 2 шт.

в) для модели трехфазного АИН с формированием фазных токов на основе релейного регулирования (ЧШИМ) (3 способ) – 2 шт.

Сделать выводы о влиянии способа импульсной модуляции и изменения параметров на вид осциллограмм и показатели АИН.

Сравнить расчетные значения токов и напряжений с полученными экспериментально.

7. Внешние характеристики и зависимости КПД в функции тока с лучшим вариантом ИМ. Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

8. Регулировочные характеристики и зависимости КПД в функции глубины регулирования. Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

9. Сравнить и пояснить полученные результаты по всем характеристикам.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие ведомого и автономного инвертора?
2. Чем отличается автономный инвертор напряжения от автономного инвертора тока?
3. Зачем в инверторах напряжения включаются обратные диоды?
4. Зачем на входе АИН стоит конденсатор?
5. Как изменить частоту выходного напряжения автономного инвертора?
6. Что зависит от несущей частоты?
7. Покажите пути протекания токов в трехфазном АИН.
8. Как регулируется форма и величина напряжения в АИН?
9. Сравните способы формирования фазных напряжений в трехфазных АИН по предельно-достижимым напряжениям и коммутационным потерям.
10. Какие автономные инверторы наиболее перспективны в электроприводе в настоящее время?
11. Каков вид внешней характеристики АИН? От чего зависит наклон характеристики?
12. Как снять внешнюю характеристику?
13. Что такое регулировочная (частотная) характеристика автономного инвертора?
14. Какой вид и почему имеет регулировочная (частотная) характеристика АИН для электропривода?
15. Как снять регулировочную (частотную) характеристику?

16. От чего зависит коэффициент несинусоидальности кривой тока нагрузки?

17. Как определить КПД АИН?

18. Пояснить назначение всех блоков входящих в виртуальную модель АИН.

Таблица 4

Таблица вариантов

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_d, В$	200	220	240	250	200	220	240	250	230	220	240	250
$r_{нф}, Ом$	25	30	30	32	20	25	32	35	30	25	28	34
№ вар	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$E_d, В$	200	220	240	250	200	220	240	250	200	220	230	240
$r_{нф}, Ом$	27	32	28	35	22	26	31	33	28	26	28	33

Примечания:

1. Студенты, получившие подвариант А, выполняют пункты а, б, в, г, д (для ИМ – формирование средних напряжений на выводах), Б – пункты а, б, в, г, д (для ИМ – формирование фазных напряжений с помощью пространственного вектора); В – пункты 1а, б, в, е (для обоих способов ИМ).

2. Для всех вариантов:

- коэффициент модуляции $\mu = 0,9$;
- $\cos\varphi = 0,8$.

Работа №7. Исследование обратимого преобразователя напряжения

Цель работы: Исследование электромагнитных процессов, характеристик и энергетических показателей обратимого преобразователя напряжения (ОПН) при симметричном и несимметричном управлении в выпрямительном и инверторном режимах.

Описание виртуальной модели

Принципиальная схема и виртуальная модель на ее основе, предназначенная для исследования обратимого преобразователя напряжения, выполненного по однофазной мостовой схеме, приведены на рис. 1.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: сеть (*Set*), сетевой фильтр (*Rf*, *Cf*), индуктивный накопитель (*R*, *L*), системы управления (*SU sim*, *SU nesim*), переключатель (*Switch*), вентильный блок (*WB(kom)*), конденсатор фильтра (*Cd*), нагрузка-противо-ЭДС с внутренним сопротивлением (*Rd*, *PEDS*), датчики тока (*Dat_i1*, *Dat_i1L*, *Dat_id*), датчик напряжения (*Dat_ud*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), осциллографы (*Scope1*, *Scope2*), дисплей (*Display*) и графопостроители ($U_d = f(I_d)$; $KPD = f(I_d)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) сеть (*Set*) – блок, имитирующий работу источника синусоидального напряжения. Изменяемые параметры блока:

- амплитуда синусоидальной ЭДС – установить *Peak Amplitude E*, $U = 310$ В;

- частота сети – установить *Frequency f (Hz)* $f = 50$ Гц;

- активное сопротивление сети (*rc*, *Om*) установить 0,1 Ом;

- индуктивность сети (*Lc*, *Hn*) установить 0,005 Гн.

2) сетевой фильтр (*Cf*, *Rf*) – обеспечивает защиту сети от ШИМ сигнала. Изменяемые параметры блока:

- емкость фильтра установить $Cf = 0.1$ мкФ;

- активное сопротивление установить $Rf = 3$ Ом.

3) индуктивный накопитель (*RL*) – блок, имитирующий активно-индуктивное сопротивление реактора в цепи переменного тока. Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление $R = 2$ Ом;

- величина индуктивности $L = 0.02$ Гн.

4) системы управления (*SU sim*, *SU nesim*) обеспечивают логику работы транзисторов ОПН при симметричном и несимметричном управлении:

- а) *SU sim* – для симметричного управления. Изменяемые параметры блока:
- амплитуда тока (*Amplitude of the current I_m , A*) – установить по варианту.
 - заданная фаза (*Zadannaj faza (grad)*) – установить 0^0 для изучения выпрямительного режима и фазу 180^0 – для изучения инверторного режима;
 - ширина токового коридора ШТК (*Width of the current corridor, A*) – установить равной 1 А.
 - частота сети (*Frequency, f (Hz)*) – установить 50 Гц.
- б) *SU nesim* – для несимметричного управления. Изменяемые параметры блока:
- амплитуда тока (*Amplitude of the current I_m , A*) – установить по варианту;
 - заданная фаза (*Zadannaj faza (grad)*) – установить 0^0 для изучения выпрямительного режима и фазу 180^0 – для изучения инверторного режима;
 - ширина токового коридора ШТК (*Width of the current corridor, A*) – установить равной 1 А.
 - частота сети (*Frequency, f (Hz)*) – установить 50 Гц.
- 5) переключатель (*Switch*) – блок, предназначенный для переключения между блоками *SU sim* и *SU nesim* и осуществления, таким образом, в схеме соответствующего управления;
- 6) вентильный блок (*WB(kom)*) – содержит вентильный блок (*WB*) в комплекте с блоком коммутационных потерь (*BKP*), позволяющим учесть коммутационные потери в транзисторах.
- Подключив на выход *WB(kom)* дисплей, можно наблюдать число включений (коммутаций) одного транзистора (*n_kom*) в секунду.
- Вентильный блок (*WB*) представляет собой мостовой модуль, состоящий из четырех *IGBT*-транзисторов, шунтированных встречными диодами (*IGBT/Diodes*).
- Изменяемые параметры блока:
- контроль режима управления (*Control mode*):
 - Вид режима «1» соответствует несимметричному управлению;
 - Вид режима «2» соответствует симметричному управлению.
 - частота сети (*Frequency, f (Hz)*) – установить 50 Гц.
 - суммарное время включения+выключения транзистора (*twkl+twikl*) – установить $t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} = 2 \cdot 10^{-6}$ с;
 - пороговое напряжение транзистора и диода (*U0 transistor*) и диода (*U0 diod*) – установить $U_{0\text{transistor}} = 2$ В, $U_{0\text{diod}} = 2$ В;
 - дифференциальное сопротивление транзистора и диода во включенном состоянии *Rdif* (установить $R_{\text{dif}} = 0.05$ Ом).
- 7) Конденсатор фильтра (*Cd*) установить равным 10 мкФ;

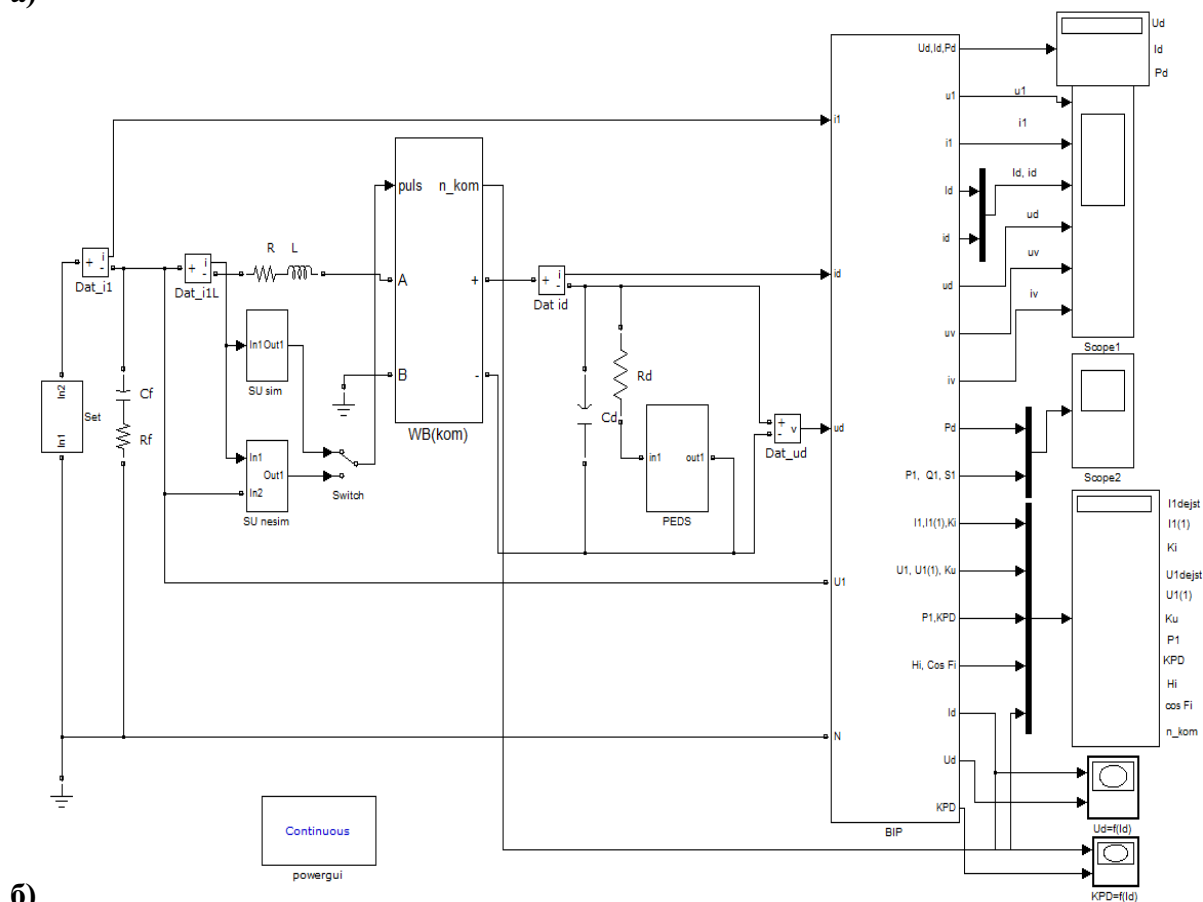
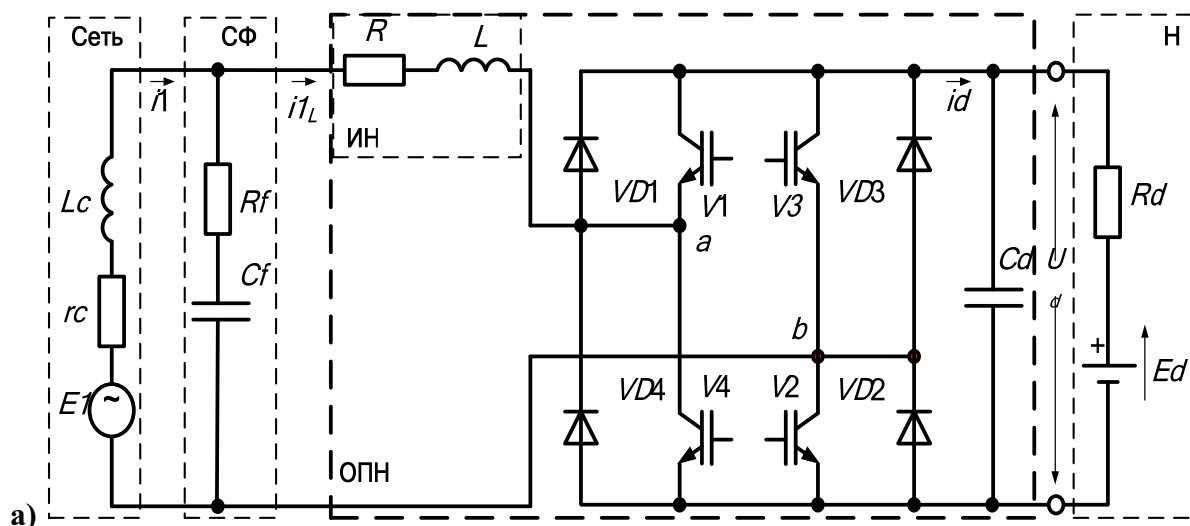


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) обратимого преобразователя напряжения

8) Нагрузка против-ЭДС с внутренним активным сопротивлением (R_d , $PEDS$). Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление (R_d) – установить равным 1 Ом;
- относительная величина против-ЭДС ($PEDS$) U_d/E_{1m} . Начальное значение ПЭДС ($PEDS_{nach}(otnosit)$) и конечное значение ПЭДС ($PEDS_{konech}(otnosit)$) установить одинаковыми в соответствии с заданным вариантом.

– амплитуду напряжения питания (*Peak amplitude, E, V*) – установить $E_{1m} = 310$ В (см. блок *Сеть*);

9) датчики тока (*Dat_i1, Dat_i1L, Dat_id*) – позволяют осциллографировать токи, протекающие в схеме:

- *Dat_i1* – ток, потребляемый или отдаваемый в сеть;
- *Dat_i1L* – ток, протекающий через индуктивный накопитель;
- *Dat_id* – ток, на выходе вентильного моста, протекающий в нагрузку и емкостной фильтр – в выпрямительном режиме, и в обратном направлении – в инверторном;

10) датчик напряжения (*Dat_ud*) – блок, предназначенный для осциллографирования напряжения на нагрузке;

11) блок измерительных преобразователей (*BIP*) – позволяет определять следующие величины:

- среднее значение напряжения на нагрузке *Ud*;
- среднее значение выпрямленного или инвертируемого тока *Id*;
- активную мощность, передаваемую в нагрузку (или в обратном направлении) *Pd*;
- мгновенное значение напряжения питающей сети *u1*;
- мгновенное значение тока, потребляемого или отдаваемого в сеть *i1*;
- мгновенное значение выпрямленного или инвертируемого тока *id*;
- мгновенное значение напряжения на нагрузке *ud*;
- мгновенные значения напряжения на вентиле *uv* и мгновенное значение тока протекающего через вентиль *iv*;
- мощность *Pd* в цепи постоянного тока;
- активную мощность потребляемую или отдаваемую в сеть *P1*;
- реактивную *Q1* мощность, потребляемую или отдаваемую в сеть;
- полную мощность *S1*, передаваемую через сеть.
- действующее значение тока на входе ОПН *I1*, амплитуду его первой гармоники *I1(1)* и результирующий коэффициент гармоник тока *Ki* (K_I);
- действующее значение напряжения на входе ОПН *U1*, его первая гармоника *U1(1)* и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения *Ku* (K_U);
- коэффициент полезного действия *KPD* (η);
- коэффициент мощности *Hi* (χ),
- $\cos \varphi_i$ ($\cos \varphi_n$).

12) осциллографы (*Scope1, Scope2*) – блоки, позволяющие наблюдать осциллограммы мгновенных и средних значений токов и напряжений (*u1, i1, Id, id, ud, uv, iv*), а также мощностей (*Pd, P1, Q1, S1*);

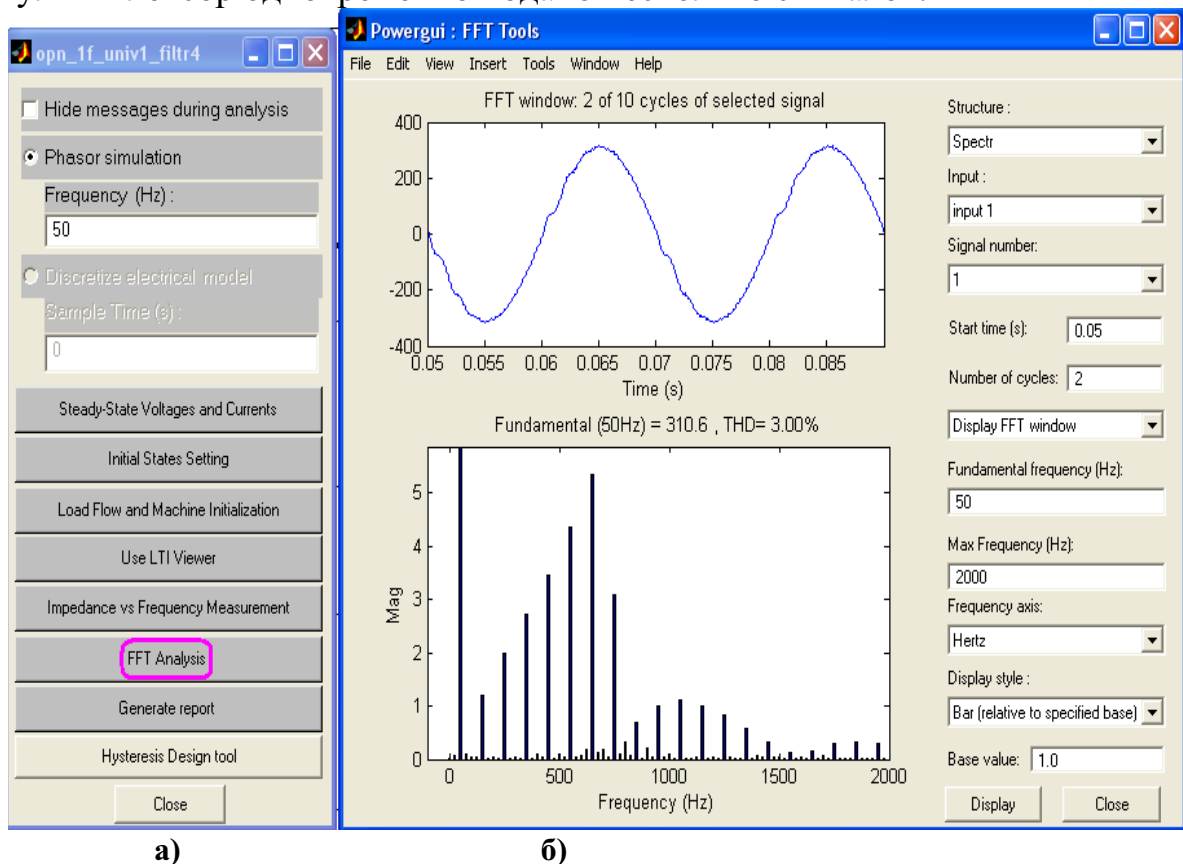
13) дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения числа включений одного транзистора (*n_kom*) и значений напряжений и токов, снимаемых с блока *BIP*;

14) графопостроители ($U_d = f(I_d)$; $KPD = f(I_d)$) – блоки, предназначенные для построения внешних характеристик $U_d = f(I_d)$, а также зависимостей $\eta = f(I_d)$ в автоматическом режиме.

15) блок *Continuous powergui* предназначен для спектрального анализа сигналов снимаемых с осциллографа. Двойной щелчок левой кнопкой мыши по блоку *Continuous powergui* раскрывает панель инструментов, представленную на рис. 2 а. Щелчок левой кнопкой мыши по кнопке *FFT Analysis* (см. рис. 2 а) открывает смотровое окно с временной диаграммой и разложением этого сигнала в спектр.

В правой части смотрового окна расположены строки и кнопки управления:

- *Structure*: строка выбора осциллографа с необходимыми осциллограммами. В раскрывающемся списке выбрать «*Spectr*»;
- *Input*: номер входа, для вывода соответствующей осциллограммы. Порядок и количество входов (*input 1*, *input 2*...) соответствует сигналам на входах осциллографа *Scope*. Выбрать *input 1*, что соответствует осциллограмме напряжения питающей сети *u1*.
- *Signal number*: номер сигнала. Раскрывающийся список данной строки становится активным, если на один вход осциллографа через мультиплексор одновременно подано несколько сигналов.



а) б)
Рис. 2. Панель инструментов (а) и смотровое окно с временной диаграммой напряжения сети *u1* и его разложением в спектр

- *Start time(s)*: начальное время. Задание не с момента времени $t = 0$, позволяет исключить влияние переходного процесса на разложение сигнала в спектр.
- *Number of cycles*: число циклов, отображаемых на осциллограмме.
- *Display FFT window* – режим отображения осциллограммы с момента времени равного *Start time(s)* и в количестве циклов равном *Number of cycles*. Также возможен режим *Display entire signal*, при котором на экран смотрового окна выводится сигнал с момента времени $t = 0$ и до конца времени расчета.
- *Fundamental Frequency (Hz)* – основная частота.
- *Max Frequency (Hz)* – максимальная частота, определяет до какой гармоники будет представлен спектр.
- *Frequency axis*: ось частот или горизонтальная ось. В раскрывающемся списке возможность выбора подписи горизонтальной оси: частота (*Hertz*) или номер гармоник (*Harmonic order*);
- *Display style*: стиль представления спектра: в виде графической зависимости в относительных *Bar (relative to Fund. or DC)* или абсолютных единицах *Bar (relative to specifier base)*, а также в виде матрицы в относительных *List (relative to Fund. or DC)* или абсолютных единицах *List (relative to specifier base)*. Выбрать абсолютные единицы *Bar (relative to specifier base)*.

Предварительное домашнее задание:

а) Изучить и повторить тему курса: «Управляемые выпрямители напряжения. Обратимые преобразователи напряжения» [1(12.1 – 12.3, 12.5)], содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы. Подготовить формы с таблицами (см. табл. 1, табл. 2) для занесения в них расчетных и экспериментальных данных.

б) построить внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$ для выпрямительного и инверторного режима при заданном по варианту токе I_1 , воспользовавшись уравнением баланса мощностей (1)

$$\pm U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = U_d \cdot I_d + I_1^2 \cdot R. \quad (1)$$

Здесь R – активное сопротивление индуктивного накопителя.

В уравнении (1) верхние знаки соответствуют выпрямительному режиму, а нижние – инверторному;

в) построить зависимость $I_l = f(I_d)$ для выпрямительного и инверторного режима при заданных по варианту напряжениях U_d и U_1 , воспользовавшись уравнением баланса мощностей (1). При расчете удобнее задавать значения I_1 ;

г) определить КПД η для заданного режима.

КПД в выпрямительном режиме

$$\eta = 1 - r_* \cdot I_{1m}^* . \quad (2)$$

КПД в инверторном режиме

$$\eta = \frac{1}{1 + r_* \cdot I_{1m}^*} . \quad (3)$$

Здесь

$$I_{1m}^* = \frac{I_{1m}}{I_{1m.\max}}, \quad r_* = \frac{R}{Z}, \quad (4)$$

где Z – полное внутреннее сопротивление фазы,

$I_{1m.\max}$ – амплитуда тока, потребляемого из сети при коротком замыкании за реактором;

I_{1m} – амплитуда заданного тока.

$$I_{1m} = \sqrt{2}I_1,$$

(5)

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (6)$$

$$I_{1m.\max} = U_{1m} / Z . \quad (7)$$

Результаты расчета своего подварианта занести в табл. 1.

Программа исследования ОПН

1. Исследование модели ОПН при несимметричном и симметричном управлении при заданных параметрах в выпрямительном и инверторном режимах.

2. Обеспечение одинакового качества напряжения сети при двух способах управления изменением ширины токового коридора (в выпрямительном режиме).

2.1. Выбор по таблице способа управления и K_U обеспечивающего достаточное качество напряжения сети.

2.2. Обеспечение такого же качества напряжения при другом способе управления изменением ШТК; измерение электрических величин.

2.3. Определение спектров гармоник для сравниваемых вариантов управления.

2.4. Сравнение показателей и выбор лучшего варианта.

3. Построение характеристик для ОПН при выбранном (лучшем) по показателям варианте управления.

3.1. Построение внешних характеристик ОПН $U_d = f(I_d)$ и зависимостей КПД от тока нагрузки $\eta = f(I_d)$ при постоянстве тока I_1 в выпрямительном и инверторном режимах.

3.2. Построение зависимостей $I_1 = f(I_d)$ при постоянстве ПЭДС (ЭДС) в выпрямительном и инверторном режимах.

4. Изучение влияния ОПН на напряжение сети при отсутствии фильтра.

5. Составление отчета.

Таблица 1

Результаты предварительных расчетов и измерений

Пара- метры	Предварит. расчет	Результаты эксперимента						упр.
		Несимметричное управление			Симметричное управления			
		Выпрямит. режим		Инверт. режим	Выпрямит. режим		Инверт. режим	без фильтра
		Заданный режим	Режим с изменен. ШТК		Заданный режим	Режим с изменен. ШТК		
U_d								
I_d	X							
P_d	X							
P_1	X							
U_1								
$U_1(1)$	X							
I_{1m}								
$I_1(1)$	X							
I_1								
P_1	X							
η								
ШТК								
K_U	X							
K_I	X							
χ	X							
$\cos\varphi$	X							
$n_{ком}$	X							

Экспериментальное исследование

1. Исследование модели ОПН при несимметричном и симметричном управлении при заданных параметрах в выпрямительном и инверторном режимах.

1.1. Изучение модели ОПН, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин при несимметричном управлении в выпрямительном режиме.

а) запустить программу «*MatLab*»;

б) открыть файл «*orn_1f*». После открытия на экране появится модель обратимого преобразователя напряжения, представленная на рисунке 1 б;

в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели для работы в выпрямительном режиме и несимметричном способе управления ОПН.

Переключатель *Switch* установить в нижнее положение, при этом в схему введен блок *SU nesim*.

В блоке *SU nesim* установить амплитуду тока I_{1m} (*Amplitude of the current I_{1m} , A*) в соответствии с заданным вариантом (см. примечание к табл. вариантов), фазу (*Zadannaj faza (grad)*) 0^0 – для изучения выпрямительного режима.

В блоке *WB* параметр Вид режима (*Control mode*) выбрать «1», что соответствует несимметричному управлению.

г) запустить расчет модели;

д) снять осциллограммы работы ОПН при несимметричном управлении в выпрямительном режиме.

Методика работы с виртуальным осциллографом приведена в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

По окончании расчета с помощью клавиши «Print Screen» и редактора «Paint» сохранить и обработать осциллограммы в специально созданной к этой лабораторной работе папке.

Записать показания с дисплея (в табл. 1) и сравнить их с расчетными.

1.2. Изучение модели ОПН, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин при несимметричном управлении в инверторном режиме.

а) установить все необходимые параметры в блоках, для работы в инверторном режиме и несимметричном способе управления ОПН.

В блоке *SU nesim* установить фазу (*Zadannaj faza (grad)*) 180^0 – для изучения инверторного режима.

б) запустить расчет модели;

д) снять осциллограммы работы ОПН при несимметричном управлении в инверторном режиме.

Записать показания с дисплея (в табл. 1) и сравнить их с предыдущими значениями.

1.3. Изучение модели ОПН, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин при симметричном управлении в выпрямительном режиме.

а) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели для работы в выпрямительном режиме и симметричном способе управления ОПН.

Переключатель *Switch* установить в верхнее положение, при этом в схему введен блок *SU sim*.

В блоке *SU sim* установить амплитуду тока I_{1m} (*Amplitude of the current I_{1m} , A*) в соответствии с заданным вариантом (см. примечание к табл. вариантов), фазу (*Zadannaj faza (grad)*) 0^0 – для изучения выпрямительного режима.

В блоке *WB* параметр Вид режима (*Control mode*) выбрать «2», что соответствует симметричному управлению.

- б) запустить расчет модели;
- в) снять осциллограммы работы ОПН при симметричном управлении в выпрямительном режиме.

Записать показания с дисплея (в табл. 1) и сравнить их с предыдущими значениями.

1.4. Изучение модели ОПН, ввод параметров, осциллографирование и измерение электрических величин при симметричном управлении в инверторном режиме.

- а) установить все необходимые параметры в блоках, для работы в инверторном режиме и симметричном способе управления ОПН.

В блоке *SU sim* установить фазу (*Zadannaj faza (grad)*) 180^0 – для изучения инверторного режима.

- б) запустить расчет модели;
- д) снять осциллограммы работы ОПН при симметричном управлении в инверторном режиме.

Записать показания с дисплея (в табл. 1) и сравнить их с предыдущими значениями.

2. Обеспечение одинакового качества напряжения сети при двух способах управления изменением ширины токового коридора (в выпрямительном режиме).

2.1. Выбор по таблице способа управления и K_U обеспечивающего достаточное качество напряжения сети.

По данным из табл. 1 сравнить несимметричный и симметричный способ управления ОПН (выпрямительный режим) и выбрать более экономичный вариант, (более близкий к допустимому $K_U = 5\%$).

2.2. Обеспечение такого же качества напряжения при другом способе управления изменением ШТК; измерение электрических величин.

Переключатель *Switch* установить в верхнее положение, при этом в схему введен блок *SU sim*.

В блоке *WB* параметр Вид режима (*Control mode*) выбрать «2», что соответствует симметричному управлению.

В блоке *SU sim* установить:

- амплитуду тока I_{1m} (*Amplitude of the current I_{1m} , A*) в соответствии с заданным вариантом (см. примечание к табл. вариантов);
- фазу (*Zadannaj faza (grad)*) 0^0 – выпрямительный режим.
- ШТК (*Width of the current corridor, A*) увеличивая значение ШТК, добиться того же значения K_U , что и при несимметричном управлении в выпрямительном режиме (см. показания в табл. 1).

Проделать несколько опытов, уточняя требуемую величину ШТК, для обеспечения заданного K_U .

Ориентировочно ШТК (параметр «*Width of the current corridor, A*» в блоке *SU sim*) задать около 2,15 А.

2.3. Определение спектров гармоник для сравниваемых вариантов управления.

а) снять спектральный состав напряжения сети u_1 для симметричного способа управления.

Для уточненной величины ШТК (по результатам опыта 2.2) с помощью блока *Continuous powergui* и приведенным выше рекомендациям снять спектральный состав напряжения сети u_1 для симметричного способа управления.

В смотровом окне установить номер входа: *Input1* – сигнал u_1 .

Для обновления на смотровом окне сигнала осциллограммы нажать левой кнопкой мыши по строке «*Display FFT window*».

Для обновления на смотровом окне сигнала спектра нажать на кнопку «*Display*» в нижней правой части смотрового окна.

Для симметричного способа управления сохранить осциллограммы и спектр, отображенные в смотровом окне (*Powergui: FFT Tools*).

б) снять спектральный состав напряжения сети u_1 для несимметричного способа управления.

В блоке *WB* параметр Вид режима (*Control mode*) выбрать «1», что соответствует несимметричному управлению.

Переключатель *Switch* установить в нижнее положение, при этом в схему введен блок *SU nesim*.

В блоке *SU nesim* проверить и при необходимости установить следующие параметры:

- амплитуду тока I_{1m} (*Amplitude of the current I1m, A*) в соответствии с заданным вариантом (см. примечание к табл. вариантов);

- фазу (*Zadannaj faza (grad)*) 0^0 – выпрямительный режим.

- ШТК (*Width of the current corridor, A*) равным 1 А.

Запустить расчет модели. По окончании расчета с помощью блока *Continuous powergui* снять спектральный состав напряжения сети u_1 для несимметричного способа управления.

В смотровом окне установить номер входа: *Input1* – сигнал u_1 .

Для обновления на смотровом окне сигнала осциллограммы нажать левой кнопкой мыши по строке «*Display FFT window*».

Для обновления на смотровом окне сигнала спектра нажать на кнопку «*Display*» в нижней правой части смотрового окна.

Для несимметричного способа управления сохранить осциллограммы и спектр, отображенные в смотровом окне (*Powergui: FFT Tools*).

в) сравнить осциллограммы u_1 и спектральные характеристики для симметричного и несимметричного способа управления ОПН, и сделать выводы о наличии высокочастотных или низкочастотных гармоник.

2.4. Сравнение показателей и выбор лучшего варианта.

а) По результатам п. 2.1 – 2.3 сделать выводы о лучшем способе управления ОПН, сравнивая спектры, осциллограммы и величины K_U , η и $n_{\text{ком}}$.

3. Построение характеристик для ОПН при выбранном (лучшем) по показателям варианте управления.

3.1. Построение внешних характеристик ОПН $U_d = f(I_d)$ и зависимостей КПД от тока нагрузки $\eta = f(I_d)$ при постоянстве тока I_1 в выпрямительном и инверторном режимах.

а) ввод параметров и снятие характеристики $U_d = f(I_d)$ и $\eta = f(I_d)$ для выпрямительного режима.

По результатам сравнения (п. 2.4) переключателем *Switch* подключить соответствующую систему управления *SU* на вход «*puls*» вентильного блока *WB (kom)*.

В блоке *WB* параметр Вид режима (*Control mode*) выбрать «1» – несимметричное или «2» – симметричное, в соответствии с выбранным (лучшим) вариантом управления.

В блоке *SU* установить фазу 0^0 (*Zadannaj faza (grad)*), что соответствует выпрямительному режиму.

В блоке против-ЭДС (*PEDS*) установить:

а) начальное значение ПЭДС в относительных единицах (*PEDS nach (otnosit)*) установить равное заданному по варианту;

б) конечное значение ПЭДС в относительных единицах (*PEDS konech (otnosit)*) увеличить в 2,5 раза.

Снять характеристики $U_d = f(I_d)$ и $\eta = f(I_d)$, с помощью соответствующих графопостроителей для выпрямительного режима.

б) ввод параметров и снятие характеристики $U_d = f(I_d)$ и $\eta = f(I_d)$ для инверторного режима.

В блоке *SU* установить фазу 180^0 (*Zadannaj faza (grad)*), что соответствует инверторному режиму.

Снять характеристики $U_d = f(I_d)$ и $\eta = f(I_d)$, с помощью соответствующих графопостроителей для инверторного режима.

Соответствующие характеристики для выпрямительного и инверторного режимов наложить на один график.

Результаты предварительного расчета нанести на график полученный экспериментально.

Сравнить все полученные характеристики для ОПН для несимметричного и симметричного управления.

3.2. Построение зависимостей $I_1 = f(I_d)$ при постоянстве ЭДС (ПЭДС) в выпрямительном и инверторном режимах.

Снять зависимость $I_1 = f(I_d)$ по трем точкам. Показания с дисплея занести в табл. 2. Построить характеристики $I_1 = f(I_d)$ для выпрямительного и инверторного режимов.

Для перехода от выпрямительного к инверторному режиму в блоке *SU* изменять параметр *Zadannaj faza (grad)*: установить фазу 0^0 – для обеспечения выпрямительного режима, и фазу 180^0 – для инверторного режима.

Таблица 2

Данные для построения зависимости $I_1 = f(I_d)$ при двух режимах

I_{1m}		$I_{1m3} = \underline{\hspace{2cm}}$	$0.5I_{1m3} = \underline{\hspace{2cm}}$	$0,25I_{1m3} = \underline{\hspace{2cm}}$
Выпрямит. режим	I_d			
	U_d			
Инверт. режим	I_d			
	U_d			

4. Изучение влияния ОПН на напряжение сети при отсутствии сетевого фильтра.

Снять осциллограммы при симметричном управлении ОПН в выпрямительном режиме при отключенном фильтре на входе и записать по показаниям дисплея величину K_U .

Переключатель *Switch* установить в верхнее положение, при этом в схему введен блок *SU sim*.

В блоке *WB* параметр Вид режима (*Control mode*) выбрать «2», что соответствует симметричному управлению.

В блоке *SU sim* параметр *Zadannaj faza (grad)* установить фазу 0^0 – для обеспечения выпрямительного режима.

Сравнить результаты с осциллограммами и данными полученными в опыте п.

5. Сделать выводы о влиянии сетевого фильтра на работу ОПН.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования (для своего подварианта).
6. Осциллограммы для исследованных схем (всего 4 шт.) и таблица 1:
 - а) для модели ОПН при несимметричном управлении – 2 шт;
 - б) для модели ОПН при симметричном управлении – 2 шт.

Сделать выводы о влиянии способа управления и режима (выпрямительный, инверторный) на вид осциллограмм и показатели ОПН.

Сравнить расчетные значения токов и напряжений с полученными экспериментально.

7. Осциллограммы и спектральный состав напряжения сети u_1 для двух способов управления при изменении ширины токового коридора (в выпрямительном режиме).

Сделать вывод о качестве питающего напряжения.

8. Внешние характеристики $U_d = f(I_d)$ и зависимости КПД в функции тока нагрузки $\eta = f(I_d)$ при постоянстве ПЭДС для лучшего способа управления ОПН работающего в выпрямительном режиме. Экспериментальные характеристики и рассчитанные предварительно должны быть совмещены в одних осях.

9. Зависимость $I_1 = f(I_d)$ при постоянстве ЭДС (ПЭДС) в выпрямительном и инверторном режимах для лучшего способа управления ОПН. Таблица 2.

10. По осциллограммам и показателям с дисплея сделать выводы о влиянии ОПН на напряжение сети при отсутствии фильтра.

11. Сравнить и пояснить полученные результаты по всем характеристикам.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие управляемых выпрямителей тока и управляемых выпрямителей напряжения?

2. На каких элементах выполняются управляемые выпрямители напряжения?

3. По каким схемам выполняются управляемые выпрямители напряжения?

4. В каких пределах изменяется напряжение на выходе управляемого выпрямителя напряжения и управляемого выпрямителя тока?

5. Поясните процессы, происходящие в различных схемах УВН.

6. Каково назначение реакторов на входе УВН?

7. Каково главное преимущество УВН?

8. Что такое обратимый преобразователь напряжения АИН–УВН?

9. В чем особенность работы АИН в ОПН, питающемся от сети?

10. В чем состоят энергетические преимущества ОПН?

11. В каких случаях могут применяться ОПН?

12. Какие допущения принимаются при анализе ОПН?

13. Как происходит переход от выпрямительного режима к инверторному при релейном регулировании?

14. Какие сигналы требуются для работы ОПН при стабилизации выпрямленного напряжения при релейном регулировании?

Таблица 3

Таблица вариантов

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E_d/E_{1m}	1,2	1,1	1,15	1,2	1,1	1,15	1,2	1,25	1,1	1,15	1,2	1,25
I_{13}, A	5	6	7	6	7	5	6	5	7	5	6	5
$R, Ом$	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
№ вар	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
E_d/E_{1m}	1,2	1,25	1,1	1,2	1,1	1,15	1,2	1,15	1,1	1,15	1,25	1,2
I_{13}, A	5	6	7	6	6,5	5	6	7	7	5	6	5,5
$R, Ом$	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2

Примечание:

1. Студенты, получившие подвариант А, выполняют пункты 1а, б, в (для ОПН в выпрямительном режиме); Б – пункты 1а, б, в (для – ОПН в инверторном режиме; В – пункты 1 а, г (для обоих режимов).

2. E_d/U_{1m} – ПЭДС в относительных единицах по отношению к амплитуде напряжения сети.

3. Напряжение сети $U_l = 220 В$, $U_{1m} = 1.41 U_l$, $I_{1m3} = \sqrt{2} I_{13}$.

4. $L = 0.02 Гн$.

5. При расчете сеть считается бесконечной мощности ($U_l = E_l$), вентили идеальными, а сетевой фильтр не учитывается.

Работа № 8. Исследование двухкомплектного реверсивного преобразователя

Цель работы: Изучение электромагнитных процессов и характеристик реверсивного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме.

Описание виртуальных моделей

Принципиальная схема реверсивного преобразователя и его виртуальная модель, предназначенная для снятия осциллограмм и внешних характеристик, изображены на рис. 1.

В комплект виртуальной модели входят следующие блоки: сеть (*SET'*), трансформатор (*TR*), система импульсно-фазового управления (*SIFU*), логическое переключающее устройство (*LPU*), блок задания угла управления (*Zadatchik alfa*), вентильные блоки (*komplekt NAZAD* и *komplekt VPERED*), реактор (*L*), источник ЭДС (*EDS*), задатчики тока *Id* (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), датчики тока и напряжения (*Dat id*, *Dat ud*), осциллограф (*Scope*), дисплей (*Display*), переключатели (*Switch*) и графопостроитель ($U_d = f(I_d)$).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) источник напряжения (*SET'*) – блок, состоящий из трех источников идеального синусоидального напряжения, имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. Напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов. Изменяемые параметры блока:

- напряжение (*Voltage*) сети установить равное 220В.

2) трансформатор (*TR*) – блок, состоящий из идеального трехфазного трансформатора с учетом контура намагничивания и включенных последовательно в каждой фазе *RL* – цепей. Изменяемые параметры блока:

- индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне, установить $L_a = X_a / 314$ (значение X_a см. в приложении к таблице вариантов).

- активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной стороне (установить $R_a = 1,65$ Ом, см. приложение к табл. вариантов).

- фазное напряжение на первичной стороне трансформатора *U1* (установить 220 В);

- фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора *U2* (установить 48 В).

3) система импульсно-фазового управления (*SIFU*) – электронный блок, формирующий импульсы управления тиристорами.

Двойной щелчок левой кнопкой мыши позволяет раскрыть структуру блока *SIFU*. В состав СИФУ (*SIFU*) входит синхронизированный шестиканальный импульсный генератор (*Synchronized 6-Pulse Generator*), формирующий сдвоенные импульсы для управления тиристорами вентильного блока.

4) блок задания угла управления (*Zadatchik alfa*) позволяет задавать фиксированные углы управления тиристорами (α_1 и α_2 установить в соответствии с заданным вариантом).

5) логическое переключающее устройство (*LPU*) – электронный блок для подачи управляющих импульсов либо на комплект «Вперед», либо на комплект «Назад» и исключения подачи управляющих импульсов на соседний комплект.

6) вентильный блок (*komplekt NAZAD* и *komplekt VPERED*) – универсальные мостовые модули, имитирующие работу комплекта «Назад» и «Вперед».

Изменяемые параметры блоков:

- количество плеч универсального моста (*Numbers of bridge arms*) – установить равное 3;

- демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_s и конденсатора C_s . Эта схема подключается параллельно тиристорам и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить $R_s = 6000 \text{ Ом}$, $C_s = 1e^{-7}$);

- тип силового полупроводникового элемента (*Power Electronic device*) – установить – тиристор (*Thyristors*);

- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии R_{on} (установить 0,2 Ом);

- индуктивность тиристора во включенном состоянии L_{on} (установить 0 Гн);

- пороговое напряжение тиристора U_f (установить 0,8 В).

7) реактор (*L*) – блок, включаемый между преобразователем и источником ЭДС, воспринимающий разницу мгновенных значений напряжений и ЭДС (ПЭДС) Изменяемые параметры блока:

- индуктивность реактора L (установить 0,2 Гн);

- активное сопротивление реактора R (установить 5 Ом);

8) источник ЭДС (*EDS*) – блок, имитирующий работу источника ЭДС (например, аккумулятора или электрической машины).

9) задатчики тока I_d (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*) – блоки задания по току нагрузки I_d за счет автоматического регулирования величины ЭДС (ПЭДС).

Блок *Zadatchik Id* позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока I_d (установить по варианту) и предназначен для снятия осциллограмм;

Блок *ZADATCHIK Id* позволяет задавать значение выпрямленного (инвертируемого) тока, изменяющееся во времени от 0 до 1 А и предназначен для построения внешних характеристик.

10) блок измерительных преобразователей (*BIP*) – блок, позволяющий осциллографировать:

- мгновенные значения выпрямленного тока (*id*);
- мгновенные значения выпрямленного напряжения (*ud*);
- мгновенные значения анодного тока (*ila*);
- мгновенные значения напряжения на вентиле (*u1a*);
- напряжение источника ЭДС (*E*);
- угол управления тиристорами α (*alfa*).

и измерять:

- среднее значение выпрямленного напряжения (*Ud*);
- среднее значение выпрямленного тока (*Id*);
- напряжение источника ЭДС (*E*).

11) датчики тока (*Dat id*) и напряжения (*Dat ud*) – позволяют осциллографировать ток и напряжение на нагрузке.

12) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых с блока *BIP*;

13) дисплей (*Display*) – блок, предназначенный для цифрового отображения значений напряжения и токов, снимаемых с блока *BIP*.

14) переключатель (*Switch*) – блок, предназначенный для переключения между блоками *Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*.

15) графопостроитель ($U_d = f(I_d)$) – блок, предназначенный для построения внешней $U_d = f(I_d)$ характеристики в автоматическом режиме.

Виртуальная модель реверсивного преобразователя, предназначенная для снятия осциллограмм и регулировочных характеристик изображена на рис. 2.

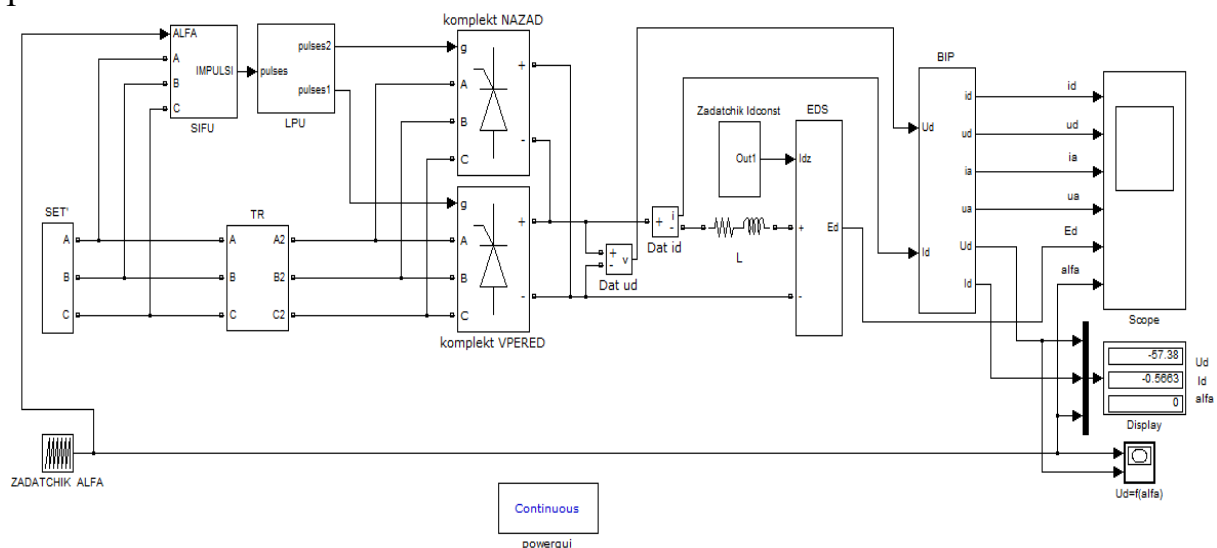


Рис. 2. Виртуальная модель реверсивного преобразователя, предназначенная для снятия осциллограмм и регулировочных характеристик

В комплект виртуальной модели (см. рис. 2) входят следующие блоки: сеть (SET'), трансформатор (TR), система импульсно-фазового управления (SIFU), логическое переключающее устройство (LPU), блок задания угла управления (ZADATCHIK ALFA), вентильные блоки (*komplekt NAZAD* и *komplekt VPERED*), реактор (L), источник ЭДС (EDS), задатчик тока I_d (Zadatchik I_d), блок измерительных преобразователей (BIP), датчики тока и напряжения ($Dat\ id$, $Dat\ ud$), осциллограф (Scope), дисплей (Display) и графопостроитель ($Ud = f(alfa)$).

Перечисленные блоки имеют назначения и изменяемые параметры аналогичные соответствующим блокам в соответствии с рис. 1. Исключения составляют только следующие блоки:

1. Блок задания угла управления (ZADATCHIK ALFA) позволяет задавать угол управления тиристорами изменяющийся во времени от 0^0 до 150^0 и предназначен для построения регулировочной характеристики.

2. Графопостроитель ($Ud = f(alfa)$) – блок, предназначенный для построения регулировочной $Ud = f(\alpha)$ характеристики в автоматическом режиме.

Предварительное домашнее задание

а) Изучить темы курса: «Реверсивные преобразователи», «Системы управления», [1 (8.2 – 8.4, 8.6; 9.2 – 9.6)], содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать и построить регулировочные характеристики комплектов «Вперед» и «Назад» реверсивного преобразователя $U_{dv} = f(\alpha)$ и $U_{dn} = f(\alpha)$ в абсолютных единицах для непрерывного режима при заданном токе нагрузки I_d .

Расчет регулировочной характеристики реверсивного преобразователя выполнить по уравнениям внешних характеристик для непрерывного режима

$$U_{dv} = U_{d0} \cdot \cos \alpha - a \cdot U_{T(T0)} - \left[a \cdot r_T + a \cdot r_a + \frac{x_a}{(2\pi/m)} \right] \cdot I_{dv}, \quad (1)$$

$$U_{dn} = -U_{dv};$$

в) рассчитать и построить регулировочные характеристики реверсивного преобразователя $Ud = f(\alpha)$ (уравнения 1), регулировочные характеристики системы управления реверсивного преобразователя $\alpha = f(U_{упр})$, и реверсивного преобразователя вместе с системой управления $Ud = f(U_{упр})$ в абсолютных единицах для непрерывного режима при заданном токе нагрузки I_d , а также заданных параметрах регулировочной характеристики системы управления.

Пример построения регулировочной характеристики системы управления по значениям α_0 и $\frac{\Delta\alpha}{\Delta U_{упр}}$ представлен на рис. 3. Углы α_{max} и α_{min} определяются при выполнении пункта е).

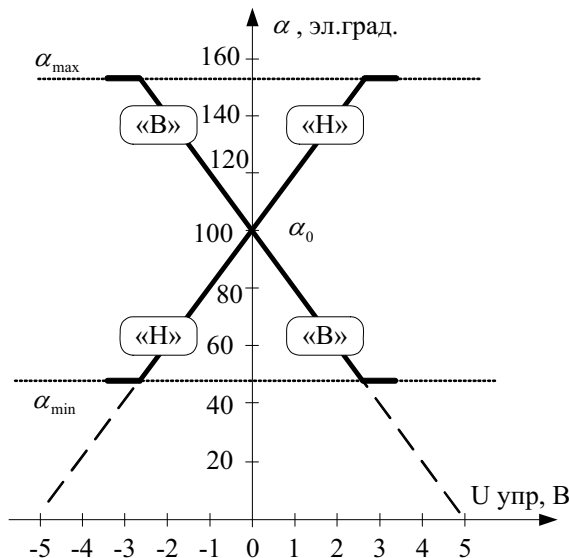


Рис. 3. Пример регулировочной характеристики системы управления реверсивного преобразователя

г) рассчитать и построить внешние характеристики реверсивного преобразователя $U_d = f(I_d)$ в абсолютных единицах для углов управления α_1 (выпрямительный режим комплектов вентилей «Вперед» и «Назад») и α_2 (инверторный режим комплектов вентилей «Вперед» и «Назад»). Расчет выполнить по формуле (1);

д) рассчитать и построить ограничительные характеристики реверсивного преобразователя для заданного варианта. При расчете воспользоваться формулой

$$U_{dmaxв} = -U_{d0} \cdot \cos \delta_{min} - a \cdot U_{T(T0)} + \left[\frac{x_a}{(2\pi/m)} - a \cdot (r_a + r_T) \right] \cdot I_{dв}, \quad (2)$$

$$U_{dmaxн} = -U_{dmaxв}, \text{ при } I_{дн} = -I_{дв};$$

е) определить максимально допустимый угол α_{max} и нанести ограничения на регулировочные характеристики, построенные в п.1 б, в

$$\alpha_{max} = \arccos \left(\frac{2 \cdot x_a \cdot I_d}{\sqrt{6} \cdot E_2} - \cos \delta_{min} \right). \quad (3)$$

Определить по регулировочным характеристикам преобразователя соответствующий угол α_{min} , чтобы максимальное напряжение в выпрямительном режиме было не больше, чем в инверторном. Нанесите эти ограничения на регулировочные характеристики.

Программа исследования

1. Исследование электромагнитных процессов и внешних характеристик реверсивного преобразователя

- 1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.
- 1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин в непрерывном режиме при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС при работе комплекта «Вперед» и комплекта «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах.
- 1.3. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.
- 1.4. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке.
2. Исследование регулировочных характеристик реверсивного преобразователя
 - 2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.
 - 2.2. Снятие регулировочных характеристик при различных токах и различных видах нагрузки и выбор угла α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик.
3. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

1. Исследование электромагнитных процессов и внешних характеристик реверсивного преобразователя.
 - 1.1. Изучение модели и ввод параметров для номинального режима.
 - а) запустить программу «*MatLab*»;
 - б) открыть файл «*rev_preobr_wh.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель двухкомплектного преобразователя, представленная на рис. 1 б;
 - в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели реверсивного преобразователя.
 - В блоке *Zadatchik alfa* углы управления α_1 и α_2 комплектами «Вперед» и «Назад» задать по варианту.
 - В блоке *Zadatchik Id* задать выпрямленный ток I_d по варианту.
 - Ключ *Switch* установить в верхнее положение, подключив в схему блок *Zadatchik Id*.
- 1.2. Осциллографирование и измерение электрических величин при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.
 - а) запустить расчет модели (см. общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ, приведенные в главе 1);
 - б) снять осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений для заданных углов управления α_1 и α_2 при работе комплекта «Вперед» и комплекта «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах.
- На осциллограмме отметить участки работы комплектов в выпрямительном и инверторном режимах. Показать бестоковые паузы. Обратить внимание на участок переходного процесса при активно-

индуктивной нагрузке с ПЭДС при переходе от комплекта к комплекту (от комплекта «Вперед» к комплекту «Назад»).

Полученные осциллограммы можно редактировать с помощью графической среды «*Paint*» согласно методике приведенной в общих рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.

Во время моделирования при установлении тока нажимать на паузу и записывать показания с дисплея в таблицу 1. Объяснить соотношение U_d и E_d .

Таблица 1

Результаты предварительных расчетов и измерений

Комплект «В» или «Н»				
Режим «В» или «Н»				
α				
U_d				
I_d				
E_d				

1.3. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

Ключ *Switch* установить в нижнее положение, подключив в схему блок *ZADATCHIK Id*.

а) запустить модель и снять внешнюю характеристику $U_d = f(I_d)$.

По окончании расчета с помощью клавиши «*Print Screen*» и редактора «*Paint*» сохранить и обработать изображения полученных внешних характеристик в созданной ранее папке.

1.4. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке

В блоке *EDS* установить вид нагрузки «0» – без противо-ЭДС.

В блоке реактор (L) изменять величину активного сопротивления нагрузки R :

– первая точка – установить $R_d = U_d/I_d$ (значение U_d взять из табл. 2, для комплекта вперед, работающего в выпрямительном режиме; I_d из таблицы вариантов).

– вторая точка установить $R_d^* = R_d \cdot 2$.

– третья точка установить $R_d^{**} = R_d \cdot 10$.

На полученных в п. 1.3 а внешних характеристиках нанести снятые по точкам внешние характеристики при R-L нагрузке для комплекта «Вперед» и «Назад».

Обратить внимание, в каких квадрантах находятся внешние характеристики для комплекта «Вперед» и «Назад».

На построенные экспериментально внешние характеристики (по п. 1.3 и 1.4) нанести построенные дома (в соответствии с подвариантом). Сравнить внешние характеристики, полученные экспериментальным путем и построенные дома (в соответствии с подвариантом).

2. Исследование регулировочных характеристик реверсивного преобразователя.

2.1. Изучение модели и ввод параметров для заданного режима.

а) открыть файл «*rev_preobr_vh.mdl*».

В блоке *Zadatchik Idconst* задать выпрямленный ток Id по варианту.

2.2. Снятие регулировочных характеристики при различных токах и различных видах нагрузки, и выбор угла α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик.

а) запустить расчет модели и снять регулировочную характеристику в непрерывном режиме при токе Id при работе преобразователя на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС.

б) снять регулировочную характеристику в прерывистом режиме при токе Id_1 .

В блоке *Zadatchik Idconst* задать выпрямленный ток $Id_1 = 0,05$ А.

Запустить расчет модели.

в) выбрать угол α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик. По регулировочной характеристике, снятой при малом токе (п. 2.2 б), найти при каком угле управления α напряжение Ud близко к нулю.

Записать полученное значение угла α_0 и отметить эту точку на регулировочной характеристике.

г) снять регулировочную характеристику при активно-индуктивной нагрузке

В блоке EDS установить параметр в «0», что соответствует работе преобразователя на нагрузку без противо-ЭДС.

В блоке реактор (L) установить $Rd = Ud/Id$ (значение Ud взять из табл. 2, для комплекта «Вперед» работающего в выпрямительном режиме; значение Id взять по варианту).

Все регулировочные характеристики (по п. 2 и построенные дома, в соответствии с подвариантом) подписать и расположить в одних осях (наложить друг на друга в графическом редакторе *Paint*). Рекомендации по работе с *Paint* приведены в главе 1.

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.

3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования двухкомплектного реверсивного преобразователя.

6. Осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений для заданных углов управления α_1 и α_2 при работе комплекта «Вперед» и комплекта «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах. На осциллограмме отметить участки работы комплектов в выпрямительном и инверторном режимах. Показать бестоковые паузы. Обратить внимание на участок переходного процесса при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС при переходе от комплекта к комплекту (от комплекта «Вперед» к комплекту «Назад»).

Сделать выводы о знаках напряжения и направлении тока в выпрямительном и инверторном режимах для комплектов «Вперед» и «Назад». Объяснить соотношение U_d и E_d .

7. Внешние характеристики преобразователя:

- а) при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС;
- б) при активно-индуктивной нагрузке.
- в) расчетные для своего подварианта.

8. Регулировочные характеристики реверсивного преобразователя

- а) при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС в непрерывном режиме;
- б) при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС в прерывистом режиме;

Обосновать выбор угла α_0 для остановки двигателя и согласования характеристик

- в) при активно-индуктивной нагрузке
- г) расчетные для своего подварианта.

Сделать выводы об особенностях регулировочных характеристик при различных токах и различных видах нагрузки.

9. Обобщающие выводы.

По осциллограммам и результатам измерений сравнить работу комплектов «Вперед» и «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах

По осциллограммам и результатам измерений определить, на что влияет характер нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Почему в реверсивном преобразователе предусматривается два комплекта клапанов?
2. В чем отличие совместного и раздельного управления?
3. Какие отличительные признаки силовых схем при раздельном и совместном управлении?

4. Чем отличаются системы управления при совместном и раздельном управлении?

5. Как располагаются внешние характеристики при различных способах согласования?

6. Каков вид регулировочных характеристик реверсивного преобразователя при различных формах опорных напряжений СИФУ и различных способах согласования?

7. Почему применяют нелинейное согласование характеристик?

8. Почему при раздельном управлении при $U_{BX} = 0$ угол управления α_0 должен быть больше 90° ?

9. Для чего вводятся ограничения в регулировочной характеристике системы управления и в регулировочной характеристике всего преобразователя вместе с системой управления?

10. Как снимаются регулировочные и внешние характеристики реверсивного преобразователя?

Таблица 2

Таблица вариантов

№ варианта	$I_{дн},$ А	$\alpha_1,$ град	$\alpha_0,$ град	№ варианта	$I_{дн},$ А	$\alpha_1,$ град	$\alpha_0,$ град
1	1	30	90	13	0,8	60	90
2	1	60	105	14	0,8	60	105
3	1	50	100	15	0,8	70	110
4	1	50	95	16	0,8	60	105
5	1	60	90	17	0,8	30	90
6	0,9	30	105	18	0,9	70	105
7	0,9	40	95	19	0,9	50	100
8	0,9	50	95	20	0,9	60	95
9	0,9	60	90	21	0,9	30	90
10	0,9	60	105	22	0,9	65	105
11	1	40	90	23	1	50	90
12	1	50	95	24	1	60	95

Примечания:

1. Студенты, получившие подвариант А, выполняют пункты а, в, е; Б – пункты а, г, д; В – пункты а, б, е.

2. При расчете принимать $U_1 = 220$ В; $U_2 = 48$ В; $x_a = 4,71$ Ом; $r_a = 1,65$ Ом; $x_d = \infty$; $U_{T(T0)} = 0,8$ В; $r_T = 0,2$ Ом; $\delta_{\min} = 15^\circ$; $\alpha_2 = 2\alpha_0 - \alpha_1$.

3. Регулировочная характеристика СИФУ линейная;

Угол наклона характеристики $\frac{\Delta\alpha}{\Delta U_{упр}} = 20 \frac{\text{град}}{\text{В}}$ (см. рис. 3).

4. Условия согласования $\alpha_0 = \frac{\alpha_в + \alpha_н}{2}$.

Работа №9. Исследование двухзвенного преобразователя частоты

Цель работы: исследование электромагнитных процессов, характеристик и энергетических показателей двухзвенного преобразователя частоты (ДПЧ) с неуправляемым выпрямителем (НВ) на входе.

Описание виртуальной модели

Принципиальная схема двухзвенного транзисторного преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем (НВ) на входе и автономным инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией на выходе (АИН с ШИМ) приведена на рис. 1 а. Виртуальная модель, предназначенная для исследования, изображена на рис. 1 б.

НВ работает на емкостной фильтр. Для ограничения пусковых токов на входе НВ включен токоограничивающий резистор $r_{огр}$, либо может применяться предварительный заряд конденсатора фильтра с помощью зарядного устройства ЗУ.

В комплект виртуальной модели (см. рис. 1 б) входят следующие блоки: неуправляемый выпрямитель (NW), датчик тока ($Dat\ id1$), система управления (SU (*space vector*)), вентильный блок ($WB(kom)$), нагрузка ($Nagruzka$), блок измерительных преобразователей (BIP), осциллограф ($Scope$), дисплей.

В состав неуправляемого выпрямителя (NW) (рис. 2) входят следующие блоки: сеть (Set), датчики тока ($Dat\ u1$, $Dat\ id$, $Dat\ id1$, $Dat\ ud$), ограничивающий резистор ($Rogr$), выпрямительный мост (WB), зарядное устройство ($Charger + Rcharger$), фильтр (Cd), блок измерительных преобразователей ($BIP1$), осциллограф ($Scope1$), выходные клеммы блока (1, 2 ... 5).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) неуправляемый выпрямитель (NW) обеспечивает выпрямление переменного напряжения. Состав блока подробно раскрыт ниже по тексту.

2) датчик тока ($Dat\ id1$) – позволяют осциллографировать ток на входе АИН;

3) система управления (SU (*space vector*)) – формирует импульсы управления вентильным блоком, осуществляя широтно-импульсное регулирование трехфазного АИН с формированием фазных напряжений с помощью пространственного вектора. Основные параметры блока:

– несущая частота, Гц (*Carrier frequency, (Hz)*) – установить равной $f = 5000$ Гц;

– частота выходного напряжения, Гц (*Frequency of output voltage, (Hz)*) установить в соответствии с заданным вариантом.

– коэффициент модуляции (*Modulation index*, $(0 < m < 1)$) – установить в соответствии с заданным вариантом по формуле (6) (см. предварительное домашнее задание).

4) вентильный блок ($WB(kom)$) – содержит вентильный блок (WB) в комплекте с блоком коммутационных потерь (BKP), позволяющим учесть коммутационные потери в транзисторах.

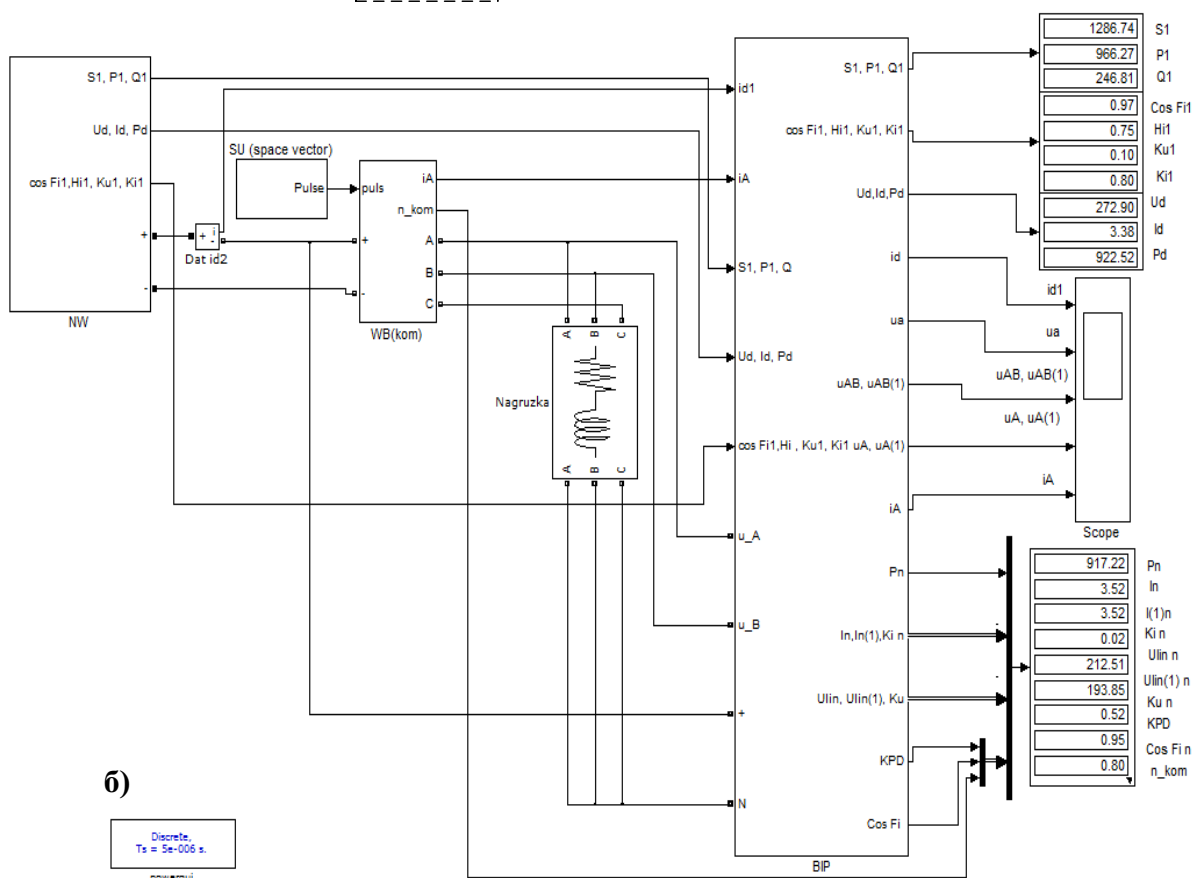
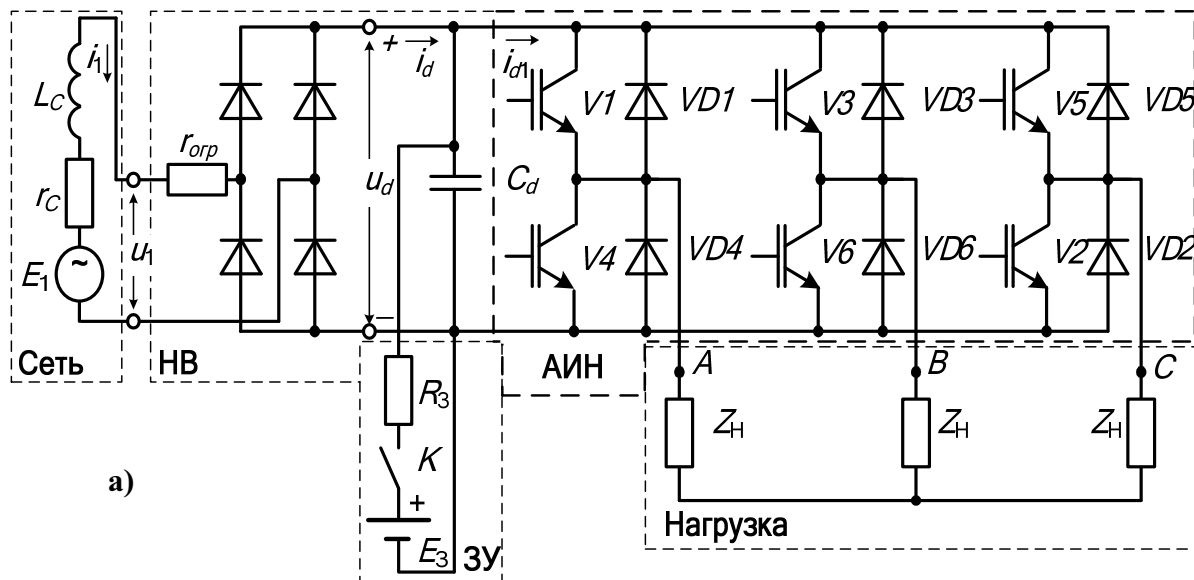


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) двухзвенного преобразователя частоты

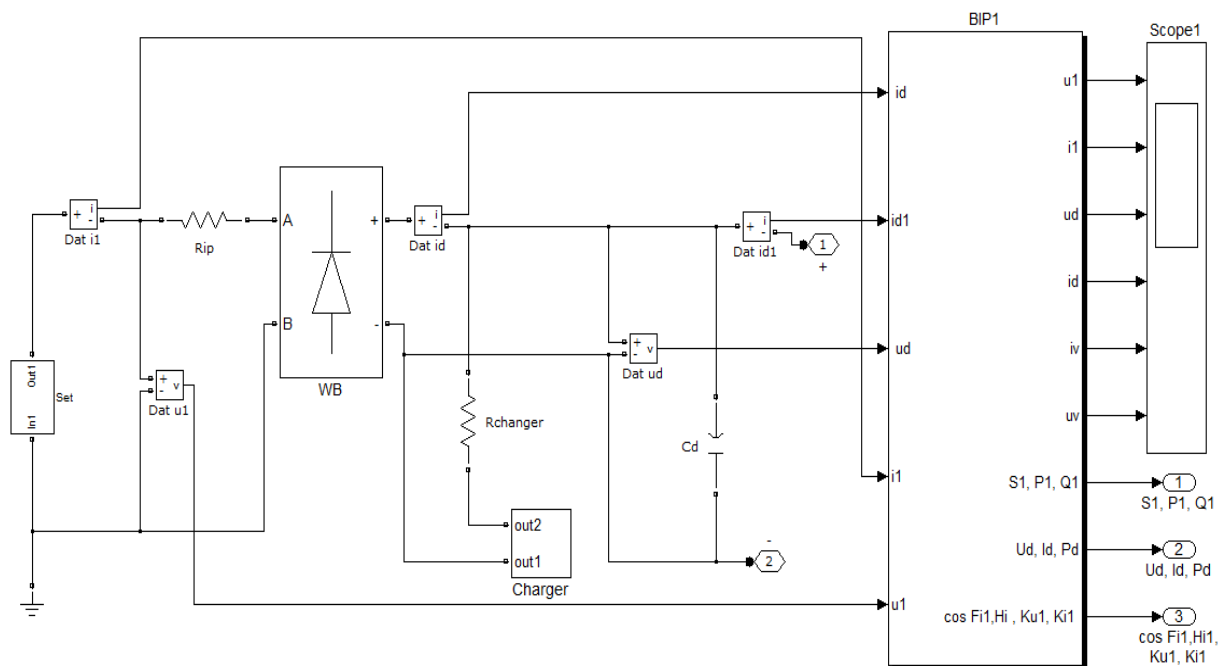


Рис. 2. Виртуальная модель неуправляемого выпрямителя (блок NW виртуальной модели)

Подключив на выход $WB(kom)$ дисплей, можно наблюдать число включений (коммутаций) одного транзистора (n_{kom}) в секунду.

Вентильный блок (WB) представляет собой универсальный мостовой модуль, состоящий из шести $IGBT$ -транзисторов, шунтированных встречными диодами ($IGBT/Diodes$).

Изменяемые параметры блока:

- суммарное время включения+выключения транзистора ($twkl+twikl$) – установить $t_{вкл} + t_{выкл} = 2 \cdot 10^{-6}$ с;

- пороговое напряжение транзистора и диода ($U0 transistor$) и диода ($U0 diod$) – установить $U_{0transistor} = 2$ В, $U_{0diod} = 2$ В;

- дифференциальное сопротивление транзистора и диода во включенном состоянии $Rdif$ (установить $R_{dif} = 0,1$ Ом).

5) нагрузка ($Nagruzka$) – блок, содержащий трехфазную активно-индуктивную нагрузку RL . Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление $Resistans R$ ($Ohms$) установить в соответствии с заданным вариантом;

- индуктивность $Inductance L$ (H) установить из таблицы вариантов.

- емкость $Capacitance C$ (F) установить равное inf , что соответствует бесконечно большой емкости или перемычке в схеме.

6) блок измерительных преобразователей (BIP) – позволяет передать следующие величины:

- полная (S_1), активная (P_1) и реактивная (Q_1) мощности, потребляемые от источника переменного напряжения;

– $\cos \varphi$ ($\cos \varphi$), коэффициент мощности Hi (χ), и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения Ku (K_U) и результирующий коэффициент гармоник тока Ki (K_I).

– среднее значение напряжения U_d , среднее значение тока I_d , мощности P_d и среднее значение тока ($id1$) на входе АИН (после конденсатора);

А также определить следующие величины:

– напряжение на вентиле u_a ;
– линейное напряжение u_{AB} и значение первой гармоники линейного напряжения $u_{AB(1)}$;

– фазное напряжение u_A и значение первой гармоники фазного напряжения $u_{A(1)}$;

– ток фазы i_A ;

– активную мощность цепи переменного тока P_n (P_H);

– действующее значение тока нагрузки I_n (I_H), значение его первой гармоники I_{n1} (I_{H1}), коэффициент гармоник тока Ki (K_I);

– линейное напряжение нагрузки $U_{lin\ n}$ ($U_{ЛН}$), его первая гармоника $U_{lin(1n)}$ ($U_{ЛН(1)}$) и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения Ku (K_U);

– коэффициент полезного действия η (КПД);

– значения $\cos \varphi$ ($\cos \varphi_H$) нагрузки.

7) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений ($ud1$, u_a , u_{AB} , $u_{AB(1)}$, i_A)

8) дисплеи – блок, предназначенный для цифрового отображения числа включений одного транзистора $n_{ком}$ (n_kom) и значений напряжений и токов, снимаемых с блока *BIP*.

Блоки в составе неуправляемого выпрямителя (*NW*) (рис. 2):

1) сеть (*Set*) – блок, имитирующий работу источника синусоидального напряжения. Изменяемые параметры блока:

– амплитуда синусоидальной ЭДС – установить *Peak Amplitude E*, $V = 310$ В;

– частота сети – установить *Frequency f (Hz)* = 50 Гц;

– активное сопротивление сети (*rc*, *Om*) установить в соответствии с приложением к таблице вариантов;

– индуктивность сети (*Lc*, *Hn*) установить в соответствии с приложением к таблице вариантов.

2) датчики тока (*Dat i1*, *Dat u1*, *Dat id*, *Dat id1*, *Dat ud*) – позволяют осциллографировать напряжения и токи, протекающие в схеме:

– *Dat i1* – ток, на входе выпрямительного моста;

– *Dat u1* – напряжение, на входе выпрямительного моста;

– *Dat id* – ток, протекающий до фильтра *Cd*;

- $Dat\ id1$ – ток, протекающий в АИН после фильтра Cd ;
- $Dat\ ud$ – напряжение на емкостном фильтре (Cd) на входе АИН.
- 3) ограничивающий резистор ($Rogr$) – активное сопротивление для ограничения входного тока;
- 4) выпрямительный мост (WB). Изменяемые параметры блока:
 - шунтирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления Rs и конденсатора Cs . Установить $Rs = 10^5$ Ом, $Cs = inf$ (бесконечности, что соответствует перемычке). Ввод таких параметров имитирует обратное сопротивление диода.
 - дифференциальное сопротивление вентиля во включенном состоянии Ron (установить $1 \cdot 10^{-2}$ Ом);
 - индуктивность вентиля во включенном состоянии Lon (установить 0 Гн);
 - пороговое напряжение вентиля Vf (установить $U_{оп} = 0,8$ В);
- 5) зарядное устройство ($Charger + Rcharger$) – блок, предназначенный для ограничения броска тока при включении. Изменяемые параметры блока:
 - сопротивление $Rcharger$ установить 1 Ом.
- 6) фильтр (Cd) – обеспечивает постоянное потребление энергии от выпрямителя и защищает транзисторы от перенапряжений. Установить параметры фильтра равными: $Cd = 1000$ мкФ ($R = 0$ Ом, $L = 0$ Гн);
- 7) блок измерительных преобразователей ($BIP1$) – позволяет определять следующие величины:
 - мгновенное значение напряжения питания u_1 ;
 - мгновенное значение тока, потребляемого от источника переменного напряжения i_1 ;
 - мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d ;
 - мгновенное значение выпрямленного тока i_d ;
 - ток диода и напряжение на диоде (iv, uv);
 - полную мощность S_1 , потребляемую от источника переменного напряжения;
 - активную P_1 и реактивную мощность Q_1 , потребляемую от источника переменного напряжения;
 - выпрямленное напряжение U_d и ток I_d ;
 - активную мощность P_d в цепи постоянного тока.
 - $\cos \varphi$ сети ($Cos\ Fi\ 1$);
 - коэффициент мощности χ (Hi);
 - коэффициент гармоник напряжения $Ku1$ (K_{U1}) и коэффициент гармоник тока Kil (K_{I1}).
- 8) осциллограф ($Scope1$) – блок, позволяющий наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений ($u1, i1, ud, id, uv, iv$);

9) выходные клеммы блока (1, 2 ... 5) – предназначены для подключения неуправляемого выпрямителя (*NW*) к внешним блокам основной модели (в соответствии с рис. 1 б).

Предварительное домашнее задание

а) Изучить темы курса «Однофазные выпрямители», «Автономные инверторы напряжения», «Преобразователи частоты» [1 (4.1 – 4.2, 11.7, 13.2)], и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы. Подготовить формы с таблицами (см. табл. 1, табл. 2, табл. 3) для занесения в них экспериментальных данных. Занести данные предварительного расчета в табл. 1;

б) рассчитать максимально возможное выпрямленное напряжение $U_{d\max}$ и ожидаемое его значение под нагрузкой U_d

$$U_{d\max} = \sqrt{2} \cdot E_1, \quad (1)$$

$$U_d = k U_{d\max}, \quad (2)$$

где E_1 – ЭДС сети,

k – коэффициент снижения выпрямленного напряжения под нагрузкой (для ориентировочных расчетов можно принимать $k = 0,8 - 0,9$).

Значения E_1 и k взять из таблицы вариантов и примечаний к ней;

в) построить в масштабе временные диаграммы ЭДС сети e_1 , напряжения сети u_1 , выпрямленного напряжения u_d , выпрямленного тока i_d , тока, потребляемого из сети i_l , тока вентиля i_a , напряжения на вентиле u_a . Построение провести по аналогии с рис. 3. При построении вентили считаются идеальными, сопротивление в цепи активным, а емкость фильтра C_d бесконечно большой. По построенным временным диаграммам определить амплитудные значения напряжений и токов в схеме. Амплитуду тока, потребляемого из сети, можно приближенно («с запасом») оценить по формуле

$$I_{1\max} = \frac{\sqrt{2}E_1 - U_d}{\sqrt{x_c^2 + (r_c + r_T)^2}}, \quad (3)$$

где x_c и r_c – индуктивное и активное сопротивление сети,

r_T – сопротивление токоограничивающего резистора;

г) определить амплитуду тока, потребляемого из сети в момент включения. Если вентили считать идеальными, а емкость фильтра C_d бесконечно большой, тогда весьма приближено («с запасом»):

$$I_{1\max \text{ пуск}} = \frac{\sqrt{2}E_1}{\sqrt{x_c^2 + (r_c + r_T)^2}}, \quad (4)$$

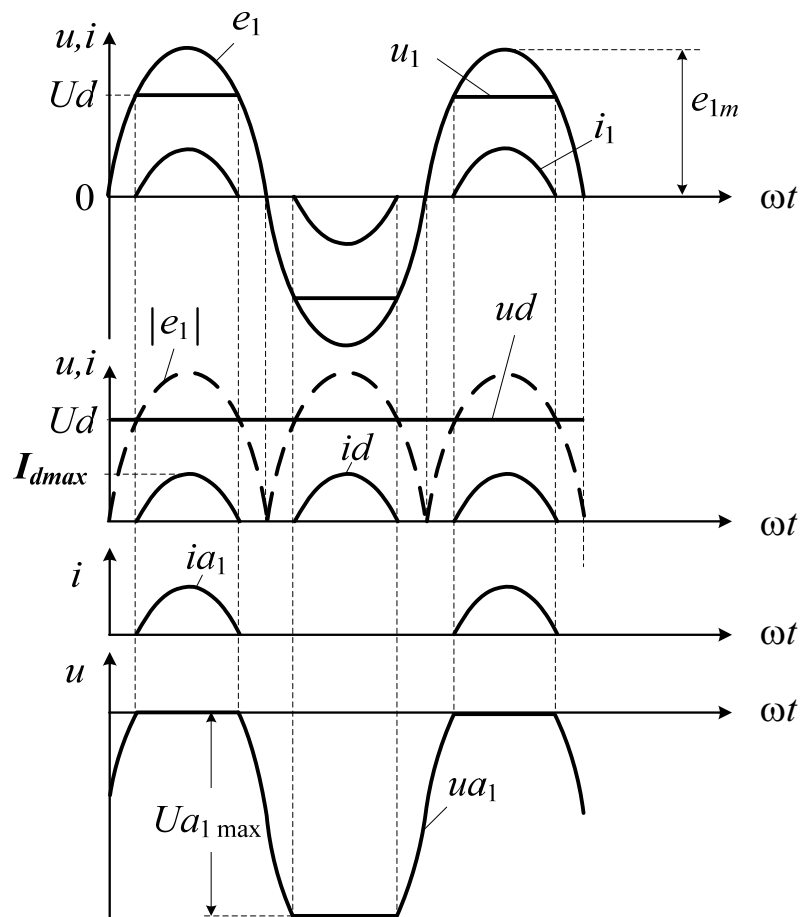


Рис. 3. Временные диаграммы

д) рассчитать для заданного варианта максимальное действующее значение первой гармоники линейного напряжения на нагрузке ДПЧ $U_{\text{нл}(1)\text{max}}$:

$$U_{\text{нл}(1)\text{max}} = \frac{U_d}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

е) рассчитать коэффициент модуляции μ для заданного варианта. Коэффициент модуляции μ рекомендуется определить из соотношения

$$\mu = \frac{f}{f_{\text{max}}}. \quad (6)$$

Здесь f , f_{max} – заданная и максимальная частота на выходе ДПЧ соответственно;

ж) рассчитать для заданного варианта действующее значение первой гармоники линейного напряжения на нагрузке $U_{\text{нл}(1)\text{max}}$

$$U_{\text{нл}(1)} = \mu U_{\text{нл}(1)\text{max}}, \quad (7)$$

и $\cos\varphi_{\text{н}}$ при заданной частоте f (по варианту)

$$\cos \varphi_{\text{H}} = \frac{R_{\text{H}}}{\sqrt{R_{\text{H}}^2 + (2\pi f L_{\text{H}})^2}}. \quad (8)$$

Таблица 1

Результаты предварительных расчетов и измерений

Параметры	Предварительный расчет	Эксперимент		
		Заданный режим	Изменение L_{ogr}	Изменение C_d
S_1	X			
P_1	X			
Q_1	X			
$\cos \varphi_1$	X			
χ_1	X			
K_{U1}	X			
K_{Π}	X			
U_d				
I_d	X			
$I_{d \max}$				
P_d	X			
P_n	X			
$\eta_{\text{НВ}}$	X			
$\eta_{\text{АИН}}$	X			
I_{H}	X			
$I_{\text{H}}(1)$	X			
$K_{\text{ЛH}}$	X			
$U_{\text{ЛH}}$	X			
$U_{\text{НЛ}}(1)$				
$K_{\text{УH}}$	X			
$\eta_{\text{ПЧ}}$	X			
$\cos \varphi_{\text{H}}$				
$n_{\text{КОМ}}$	X			

Расчетные значения КПД в таблице 1 определять по формулам (9) – (10).

Коэффициент полезного действия НВ:

$$\eta_{\text{НВ}} = \frac{P_d}{P_1}. \quad (9)$$

Коэффициент полезного действия АИН:

$$\eta_{\text{АИН}} = \frac{P_n}{P_d}. \quad (10)$$

Программа исследования ДПЧ

1. Исследование модели ДПЧ в заданном режиме:
 - 1.1 Изучение модели, ввод параметров.
 - 1.2 Осциллографирование электрических величин в блоке выпрямления.
 - 1.3 Осциллографирование и измерение электрических величин в блоке АИН и в ДПЧ.
2. Поиск путей повышения коэффициента мощности и уменьшения вредного влияния на качество напряжения сети (предложения и частично моделирование).
3. Исследования влияния устройства предварительного заряда конденсатора на процессы при пуске.
4. Построение внешних и энергетических характеристик в зависимости от тока нагрузки.
5. Построение регулировочных и энергетических характеристик в функции глубины регулирования (при выполнении закона $U/f = \text{const}$ или $\mu/f = \text{const}$).
6. Составление отчета.

Экспериментальное исследование

- 1. Исследование модели ДПЧ в заданном режиме:**
 - 1.1. Изучение модели, ввод параметров.
 - а) запустить программу «*MatLab*»;
 - б) открыть файл «*pch.mdl*». После открытия на экране появится виртуальная модель двухзвенного преобразователя частоты, представленная на рис. 1 б и модели НВ (представленная на рис. 2).
 - в) установить все необходимые параметры в блоках, в соответствии с приведенным выше описанием модели ДПЧ.
 - 1.2. Осциллографирование в блоке выпрямления (*NW*).
 - а) запустить расчет модели.
 - б) двойным щелчком левой кнопки мыши открыть блок *NW*.
 - в) снять осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений в блоке выпрямления (*NW*).
- Методика работы с виртуальным осциллографом приведена в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам.
- Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эту осциллограмму с помощью графической среды «*Paint*». Полученный рисунок нужно сохранить в предварительно созданной папке. Некоторые пояснения к работе в *Paint* также приведены в рекомендациях к виртуальным лабораторным работам в начале пособия.
- Обратить внимание на формы тока и напряжения, оценить приближенно сдвиг по фазе тока относительно напряжения;

1.3. Осциллографирование и измерение электрических величин в блоке АИН и в ДПЧ.

а) снять осциллограмму мгновенных значений токов и напряжений в основной модели (соответствует рис. 1 б).

Записать показания измерительных приборов (в табл. 1) и сравнить их с расчетными.

2. Поиск путей повышения коэффициента мощности и уменьшения вредного влияния на качество напряжения сети (предложения и частично моделирование).

а) предложить пути повышения коэффициента мощности и обсудить влияние схемы и ее параметров на качество напряжения сети;

б) в блоке NW добавить индуктивную составляющую к ограничивающему сопротивлению R_{ogr} на входе. Установить $Logr = 10 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Снять осциллограммы в блоке выпрямления (NW). Сравнить с осциллограммами сделанными в п. 1.2. Показания с дисплеев занести в табл. 1 в соответствующую колонку.

Сделать выводы о влиянии $Logr$ на внешний вид осциллограмм и энергетические показатели (K_L , K_{U1} , $\eta_{НВ}$, χ , $\cos\varphi_1$).

в) в блоке NW установить $Logr = 0$ Гн. Изменить величину емкости входного фильтра, установить $C_d = 100$ мкФ.

Снять осциллограммы в блоке выпрямления (NW). Сравнить с осциллограммами сделанными в п. 1.2. Показания с дисплеев занести в табл. 1 в соответствующую колонку.

Сделать выводы о влиянии C_d на внешний вид осциллограмм и энергетические показатели (K_L , K_{U1} , $\eta_{НВ}$, χ , $\cos\varphi_1$).

3. Исследования влияния устройства предварительного заряда конденсатора на процессы при пуске.

а) Для имитации отключения зарядного устройства, установить параметр $Rchanger = 1 \cdot 10^6$ Ом (в *MatLab* соответствует записи «1*е6»).

Снять осциллограммы в блоке выпрямления (WB). Сравнить с осциллограммами сделанными в п. 1.2.

Сделать выводы о влиянии зарядного устройства на внешний вид осциллограмм.

Определить по снятым осциллограммам $I_{dmaxmax}$ и $U_{dmaxmax}$ (самые большие максимумы, возникающие при переходном процессе включения) и сравнить со значениями при наличии зарядного устройства.

4. Построение внешних и энергетических характеристик в зависимости от тока нагрузки.

а) исследование внешней $U_{H\Phi(1)} = F(I_{H\Phi(1)})$ и энергетических $P_1 = F(I_{H\Phi(1)})$, $S_1 = F(I_{H\Phi(1)})$, $\cos\varphi_1 = F(I_{H\Phi(1)})$, $\chi = F(I_{H\Phi(1)})$, $P_d = F(I_{H\Phi(1)})$, $P_n = F(I_{H\Phi(1)})$, $K_I = F(I_{H\Phi(1)})$, $\cos\varphi_n = F(I_{H\Phi(1)})$, $\eta_{H\Phi} = F(I_{H\Phi(1)})$, $\eta_{AИH} = F(I_{H\Phi(1)})$, $\eta_{ПЧ} = F(I_{H\Phi(1)})$ характеристик ДПЧ, при заданном по варианту значении частоты f .

В блоке NW установить $Logr = 0$ Гн.

Величину емкости входного фильтра установить $C_d = 1000$ мкФ.

Характеристики снять по трем точкам: изменять значение активного сопротивления нагрузки R_H :

1) R_H – задано по варианту; использовать данные из табл. 1.

2) $R_H^* = R_H/2$;

3) $R_H^* = 2R_H$.

Заполнить соответствующую часть таблицы 2;

Таблица 2

Исследование внешних и энергетических характеристик

Параметры	$f = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Гц}$		
	$R_H^* = R_H/2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$	$R_H = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$	$R_H^{**} = 2R_H = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$
S_1			
P_1			
Q_1			
$\cos\varphi_1$			
χ_1			
K_{U1}			
K_L			
U_d			
I_d			
P_d			
P_n			
I_H			
$I_H(1)$			
$K_{ЛH}$			
$U_{ЛH}$			
$U_{HЛ}(1)$			
K_{UH}			
η			
$\cos\varphi_H$			
$n_{ком}$			

5. Построение регулировочных и энергетических характеристик в функции глубины регулирования (при выполнении закона $U/f = \text{const}$ или $\mu/f = \text{const}$).

а) исследование регулировочной $U_{\text{нф}(1)} = F(f)$ и энергетических $P_1 = F(f)$, $S_1 = F(f)$, $\cos\varphi_1 = F(f)$, $\chi = F(f)$, $P_d = F(f)$, $P_n = F(f)$, $K_I = F(f)$, $\cos\varphi_H = F(f)$, $\eta_{\text{НВ}} = F(f)$, $\eta_{\text{АИН}} = F(f)$, $\eta_{\text{ПЧ}} = F(f)$ характеристик ДПЧ при регулировании по закону $U/f = \text{const}$ (меняя коэффициент модуляции μ и частоту f одновременно) и заданном значении R_H . Частоту изменять в диапазоне 10 – 50 Гц. Заполнить соответствующую часть таблицы 3.

Коэффициент модуляции μ устанавливать в блоке система управления SU (*space vector*).

Частоту f устанавливать в блоке SU (*space vector*).

Таблица 3

Исследование регулировочных и энергетических характеристик

Параметры				
f	10 Гц	25 Гц	40 Гц	50 Гц
μ	0,2	0,5	0,8	1
S_1				
P_1				
Q_1				
$\cos\varphi_1$				
χ_1				
K_{U1}				
K_H				
U_d				
I_d				
P_d				
P_n				
I_H				
$I_H(1)$				
$K_{\text{ЛН}}$				
$U_{\text{НЛ}}$				
$U_{\text{НЛ}}(1)$				
K_{UH}				
η				
$\cos\varphi_H$				
$n_{\text{ком}}$				

Рекомендации к оформлению отчета

Отчет к лабораторной работе в соответствии с программой исследования должен содержать:

1. Заголовок.
2. Цель работы.
3. Исходные данные по варианту.
4. Предварительное домашнее задание (для своего подварианта).
5. Схему эксперимента: принципиальную схему и виртуальную модель для исследования.
6. Осциллограммы для блока выпрямления, всего ДПЧ и таблицу 1.
7. Сравнение расчетных значений токов и напряжений и временных диаграмм с осциллограммами и экспериментальными значениями.
8. Анализ (по осциллограммам) влияния параметров схемы на коэффициент мощности и качество напряжения сети,
9. Анализ (по осциллограммам) влияния зарядного устройства на переходные процессы при включении.
10. Таблицу 2, внешние характеристики и зависимости КПД от тока. Таблицу 3, регулировочные характеристики и зависимости КПД от глубины регулирования.
11. Выводы. О виде характеристик. О путях повышения коэффициента мощности и качества напряжения сети.

Контрольные вопросы

1. Пояснить назначение элементов силовой схемы преобразователя частоты.
2. Пояснить назначение всех блоков входящих в виртуальную модель АИН.
3. Пояснить особенности работы выпрямителя на емкостной фильтр.
4. Какие неприятности возникают в момент включения выпрямителя с емкостным фильтром?
5. Как облегчить условия работы выпрямителя с емкостным фильтром в момент включения?
6. Каково максимальное выпрямленное напряжение на выходе выпрямителя с емкостным фильтром?
7. Как изменить частоту выходного напряжения ДПЧ?
8. Каков вид внешней характеристики ДПЧ? От чего зависит наклон характеристики?
9. Как снять внешнюю характеристику?
10. Что такое регулировочная (частотная) характеристика ДПЧ?
11. Какой вид и почему имеет регулировочная (частотная) характеристика ДПЧ для электропривода?

12. Как снять регулировочную (частотную) характеристику?
13. Как определить КПД ДПЧ?
14. Сравните двухзвенный и непосредственный преобразователи частоты.
15. Какие ДПЧ наиболее перспективны в электроприводе в настоящее время?

Таблица 4

Таблица вариантов

№ вар	R_H , Ом	L_H , Гн	f , Гц	№ вар	R_H , Ом	L_H , Гн	f , Гц
1	25	0,06	45	13	25	0,06	48
2	30	0,07	40	14	30	0,07	45
3	33	0,07	50	15	33	0,07	40
4	30	0,08	40	16	30	0,08	45
5	33	0,075	50	17	33	0,075	45
6	25	0,06	50	18	25	0,06	50
7	30	0,07	40	19	30	0,07	50
8	33	0,085	45	20	33	0,085	45
9	25	0,65	45	21	25	0,65	45
10	30	0,07	48	22	30	0,07	40
11	32	0,08	40	23	32	0,08	50
12	28	0,08	43	24	28	0,08	45

Примечания:

1. Студенты, получившие подвариант А выполняют пункты а, б, в; Б – пункты а, б, г, е; В – пункты а, б, д, е ж.
2. ЭДС сети $E_1 = 220$ В.
3. L_c и r_c – индуктивное и активное сопротивление сети: для нечетных вариантов $L_c = 0,05$ Гн, $r_c = 0,2$ Ом; для четных вариантов $L_c = 0,1$ Гн, $r_c = 0,4$ Ом.
4. Коэффициент снижения выпрямленного напряжения под нагрузкой принять: для нечетных вариантов $k = 0,9$, для четных вариантов $k = 0,8$.
5. Максимальная частота управления $f_{\max} = 50$ Гц. При этом коэффициент модуляции $\mu = 1$.
6. Фазные напряжения формируются с помощью пространственного вектора.

Список основной литературы

1. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / Мелешин В.И., Овчинников Д.А.— М.: Техносфера, 2011.— 576 с.— [Электронный ресурс]
2. Семенов Б.Ю. Силовая электроника. Профессиональные решения / Семенов Б.Ю.— М.: ДМК Пресс, 2011.— 416 с [Электронный ресурс]
3. Джеймс Рег Промышленная электроника / Джеймс Рег— М.: ДМК Пресс, 2011.— 1136 с [Электронный ресурс]

Список дополнительной литературы

1. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : полный курс : учебное пособие / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкий, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. - М. : Горячая Линия - Телеком, 2002. - 768 с. - Библиогр.: с. 763. - ISBN 5-93517-002-7.
2. Лачин, В. И. Электроника : учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. - 4-е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д : Феникс, 2010. - 572 с. : ил. - (Высшее образование). - Библиогр. с. 565. - ISBN 5-222-02718-X
3. Горбачёв, Г. Н. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. Н. Горбачёв, Е. Е. Чаплыгин ; под ред. В. А. Лабунцова. - М. : Энергоиздат, 1988. - 320 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 314-315. - Предм. указ.: с. 315-318. - ISBN 5-283-00517-8
4. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1991. - 622 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Прил.: с. 610-614. - Библиогр.: с. 615-616. - Предм. указ.: с. 617-619. - ISBN 5-06-00
5. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. - М. : Высш. шк., 1982. - 496 с. : ил. - Библиогр.: с. 486-488. - Предм. указ.: с. 480-494
6. Грабовецкий Г.В. Непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией для электромеханических систем: учебное пособие / Грабовецкий Г.В., Куклин О.Г., Харитонов С.А.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2009.— 376 с [Электронный ресурс]
7. Редди, С. Р. Основы силовой электроники / С. Рама Редди ; пер. с англ. В. В. Маслова ; под ред. Д. П. Приходько. — М. : Техносфера, 2006. — 288 с. : ил. — Библиогр.: с. 287. — ISBN 5-94836-055-5. — ISBN 1-84265-056-4(англ.)
8. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.

ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

по направлению подготовки

11.03.04 Электроника и наноэлектроника
направленность (профиль)
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Составитель: Дюдюн Дмитрий Евгеньевич

Редактор: _____

Формат _____	Подписано в печать _____	Уч.-изд. л. – ____.
Бумага _____.	Усл. п. л. – ____	Заказ _____
Печать _____.	Тираж ____ экз.	

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

Издательство Северо-Кавказского федерального университета
Отпечатано в типографии СКФУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине

«ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»

для студентов направления подготовки

11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Направленность (профиль)

«Интеллектуальные программируемые системы и устройства»

Ставрополь
2026

УДК
ББК

Дюдюн Д.Е. Основы преобразовательной техники: Методические указания к практическим занятиям. — Ставрополь: Изд-во СКФУ, 203_. – ____ с.

Настоящие методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Основы преобразовательной техники» предназначены для студентов направления подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, профиль подготовки Интеллектуальные программируемые системы и устройства. В методических указаниях приведены разделы теоретического материала, необходимые изучения дисциплины, а также контрольные вопросы для формирования и контроля владения компетенциями. Приведён список основной литературы. В приложении представлен список дополнительной литературы, позволяющий студентам более глубоко познакомиться с изучаемым предметом.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, рабочими учебными планами и программами дисциплины «Основы преобразовательной техники».

УДК
ББК

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2 Решение разноуровневых задач	5
2.1 Задачи по работе однофазных идеальных выпрямителей на активную нагрузку.....	5
2.2 Задачи по работе многофазных идеальных выпрямителей на активную нагрузку	14
2.3 Задачи по работе выпрямителей на активно-индуктивную нагрузку.....	18
2.4 Задачи по работе выпрямителей на противо-ЭДС, активно-емкостную нагрузку.....	23
2.5 Задачи по выпрямителям с умножением напряжения (умножители напряжения).....	39
2.6 Задачи по фильтрам для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения	52
2.7 Задачи по явлению коммутации в выпрямителях, по падению напряжения от коммутации, по внешним характеристикам выпрямителей при различных нагрузках	58
2.8 Задачи по управляемым выпрямителям	63
2.9 Задачи по инверторам, ведомым сетью (зависимым инверторам).....	75
3 Литература	85
Приложение 1	86
Приложение 2	89
Список основной литературы.....	92
Список дополнительной литературы.....	93

1 ВВЕДЕНИЕ

Электроника в целом охватывает обширный раздел науки и техники, связанный с изучением и использованием различных физических явлений, основанных на протекании электрического тока, и может быть укрупнено разделена на две части: информационную электронику и силовую электронику, называемую еще и преобразовательной техникой.

Электрическая энергия вырабатывается в основном в виде переменного тока частотой 50 или 60 Гц, а также в виде постоянного тока, переменного тока повышенной частоты или токов специальной формы.

Потребители электрической энергии требуют в зависимости от отрасли техники обычно электроэнергию с параметрами, отличающимися от параметров питающей сети по роду тока, уровню напряжения, частоте, стабильности и т.д.

Свои требования к параметрам электроэнергии предъявляют и средства транспортирования энергии от первичного источника к потребителю.

Вопросы взаимодействия устройств генерирования, транспортирования и потребления электроэнергии и решаются в рамках силовой электроники путем преобразования параметров электроэнергии на интервале от генератора до потребителя.

Цель дисциплины «Основы преобразовательной техники» сформулировать представление о возможностях преобразования параметров электрической энергии. Задачами изучения дисциплины является освоение схемотехники устройств (на неуправляемых и не полностью управляемых полупроводниковых приборах) преобразования параметров электрической энергии.

2 Решение разноуровневых задач

Примеры решения типовых задач приведены ниже.

2.1 Задачи по работе однофазных идеальных выпрямителей на активную нагрузку

2.1.1 Рассчитать однофазный мостовой выпрямитель, работающий на активную нагрузку по следующим исходным данным и нарисовать временные диаграммы основных токов и напряжений.

Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора $U_2 = 200$ В.

Соппротивление нагрузке $R_d = 10$ Ом.

Потери в выпрямителе отсутствуют.

Формализуем исходные данные.

Дано:

Схема — однофазная мостовая.

Элементы схемы — идеальны.

$U_2 = 200$ В;

$R_d = 10$ Ом

$U_d, I_d, P_d, k_{тр}, I_2, S_2, I_1, S_1, S_{тр}, I_{V\text{эф}}, I_V, I_{V\text{м}}, U_{\text{мообр}}, \Delta P_V$ — ?

Временные диаграммы основных токов и напряжений — ?

1. Рассчитать выпрямитель — значит найти все перечисленные величины, которые обозначают соответственно:

U_d, I_d — среднее значение выпрямленного напряжения и тока;

P_d — мощность выпрямленного тока;

$$\frac{I_V}{I_d} = 0,5 \Rightarrow I_V = I_d \cdot 0,5 = 18 \cdot 0,5 = 9 \text{ А. } k_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2} \text{ — коэф-}$$

фициент трансформации;

I_1, I_2 — действующие значения токов первичной и вторичной обмоток;

$S_1, S_2, S_{\text{тр}}$ — габаритная (типовая) мощность соответственно первичной, вторичной обмоток и трансформатора в целом;

$I_V, I_{V\text{эф}}, I_{V\text{м}}$ — ток вентиля (диода, тиристора) — соответственно среднее значение, действующее значение и максимальное.

$U_{\text{мообр}}$ — обратное максимальное напряжение, прикладываемое к вентилю.

ΔP_V — потери мощности на вентиле.

2. Прежде чем перейти к решению задачи, заметим, что не все указанные величины можно найти, потому что не задано напряжение на первичной обмотке. В связи с этим возможны два варианта решения задачи:

- доопределить задачу, задавая, например, $U_1 = 220 \text{ В, } 50 \text{ Гц}$;
- исключить из определяемых величин те, которые определить невозможно (в нашем случае это $k_{\text{тр}}, I_1$).

Выбираем первый вариант, т.е. доопределяем задачу.

3. По словесному описанию идентифицируем схему, если она не приведена в исходных данных, и обозначим все токи и напряжения так, как представлено на рис. 1.

4. Дальнейшее решение задачи возможно двумя способами:

4.1. Табличным — воспользовавшись для этого таблицей «Расчетные соотношения для выпрямительных схем» (см. приложение).

4.2. Аналитическим — воспользовавшись выведенными в теории выражениями.

Выберем табличный способ решения.

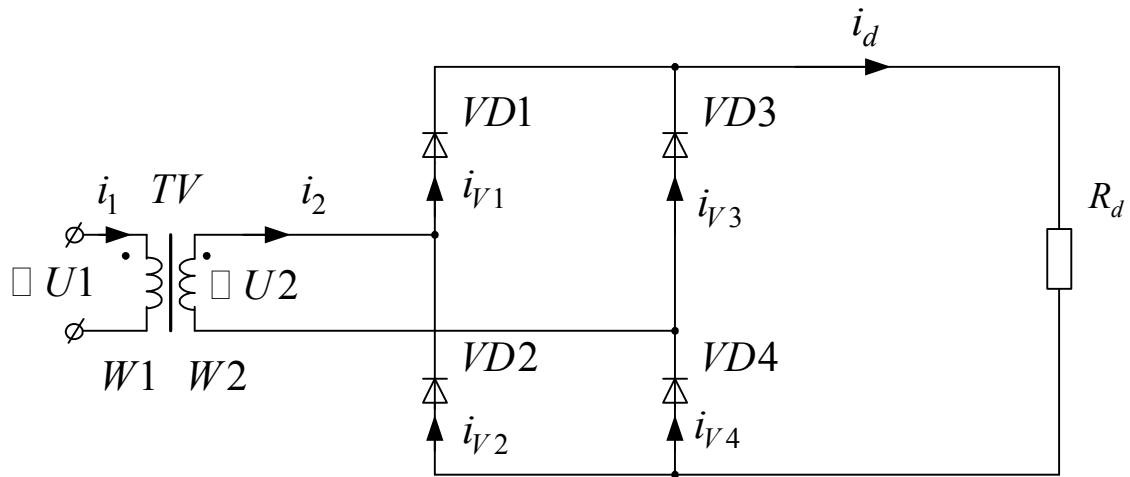


Рис. 1

5. В таблице находим схему однофазную мостовую (схема Греча), работающую на активную нагрузку, для идеального (без потерь) выпрямителя и далее находим необходимые величины.

6. Выпрямленное напряжение из соотношения

$$\frac{U_2}{U_d} = 1,11 \Rightarrow U_d = \frac{U_2}{1,11} = \frac{200}{1,11} = 180 \text{ В.}$$

7. Выпрямленный ток (среднее значение)

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{180}{10} = 18 \text{ А.}$$

8. Мощность выпрямленного тока

$$P_d = U_d \cdot I_d = 180 \cdot 18 = 3240 \text{ Вт.}$$

9. Коэффициент трансформации

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{200} = 1,1.$$

10. Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора найдем из табличного соотношения

$$\frac{I_2}{I_d} = 1,11 \Rightarrow I_2 = 1,11 I_d = 1,11 \cdot 18 = 20 \text{ А.}$$

11. Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора из таблицы

$$\frac{I_1 \cdot k_{\text{тр}}}{I_d} = 1,11 \Rightarrow I_1 = \frac{1,11 \cdot I_d}{k_{\text{тр}}} = \frac{1,11 \cdot 18}{1,1} = 18,2 \text{ А.}$$

12. Габаритные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора для мостовой схемы

$$\frac{S_1}{S_d} = \frac{S_2}{S_d} = \frac{S_{\text{тр}}}{S_d} = 1,23 \Rightarrow$$

$$S_1 = S_2 = S_{\text{тр}} = 1,23 \cdot S_d = 1,23 \cdot 3240 = 3986 \text{ ВА.}$$

Рассчитанных данных достаточно, чтобы выбрать подходящий трансформатор по каталогу или составить техническое задание на его проектирование.

13. Для выбора диодов выпрямителя рассчитаем максимальное обратное напряжение, которое прикладывается к выключенному диоду

$$\frac{U_{\text{мобр}}}{U_d} = 1,57 \Rightarrow U_{\text{мобр}} = 1,57 \cdot 180 = 283 \text{ В.}$$

Допустимое обратное напряжение, которое должен выдерживать диод, выбирается с некоторым запасом:

$$U_{\text{обр.доп}} = \frac{U_{\text{мобр}}}{k_{\text{зп}}},$$

где $k_{\text{зп}} = 0,5 \div 0,9$ — некоторый коэффициент запаса по напряжению, причем меньшее значение берется для более надежного преобразователя.

15. Действующее значение тока диода (вентилля):

$$\frac{I_{V\text{эф}}}{I_d} = 0,785 \Rightarrow I_{V\text{эф}} = 0,785 \cdot I_d = 0,785 \cdot 18 = 14,1 \text{ А.}$$

16. Максимальное значение тока диода:

$$\frac{I_{V\text{м}}}{I_d} = 1,57 \Rightarrow I_{V\text{м}} = 1,57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 18 = 28,3 \text{ А.}$$

17. Потери мощности в одном диоде:

$$\Delta P_V = I_V \cdot \Delta U_0 + I_V^2 \cdot r_{\text{дин}},$$

где ΔU_0 , $r_{\text{дин}}$ — параметры аппроксимированной ВАХ, соответственно остаточное падение напряжения (при нулевом токе) и динамическое сопротивление диода в рабочей точке. В данном случае диоды идеальны — $\Delta U_0 = 0$; $r_{\text{дин}} = 0$.

18. Далее из той же таблицы берем другие параметры выпрямителя, которые понадобятся нам, например, при выборе фильтра.

Число пульсаций напряжения на периоде сети $m_{\Pi} = 2$.

Частота первой гармоники $f_1 = m_{\Pi} \cdot f_c = 2 \cdot 50 = 100$ Гц.

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения по первой гармонике

$$k_{\Pi} \% = \frac{U_{1m} \cdot 100\%}{U_d} = 66,7\%.$$

Временные диаграммы основных токов и напряжений, к которым относятся U_1 , U_2 , U_d , i_d , i_2 , i_V , U_V , представлены на рис. 2.

Их построение должно вестись в следующей последовательности:

18.1. Нам известно, что действующее значение напряжения на вторичной обмотке 200 В. При этом мы дополнили задачу и конкретизировали, что первичное напряжение — напряжение промышленной сети 220В, 50 Гц. Форма напряжения сети синусоидальная. С него и начнем наши построения, задавшись масштабом по оси ординат и абсцисс. Для удобства построения полупериод синусоиды делим на 6 равных частей (30 электрических градусов).

18.2. На первом полупериоде, когда напряжение U_2 положительно, проводят ток диодов VD1 и VD4. Так как нагрузка активная, то форма тока будет повторять форму напряжения (синусоида) с амплитудой $I_{Vm} = 28,3$ А. Аналогично для диодов VD2 и VD3 на втором полупериоде.

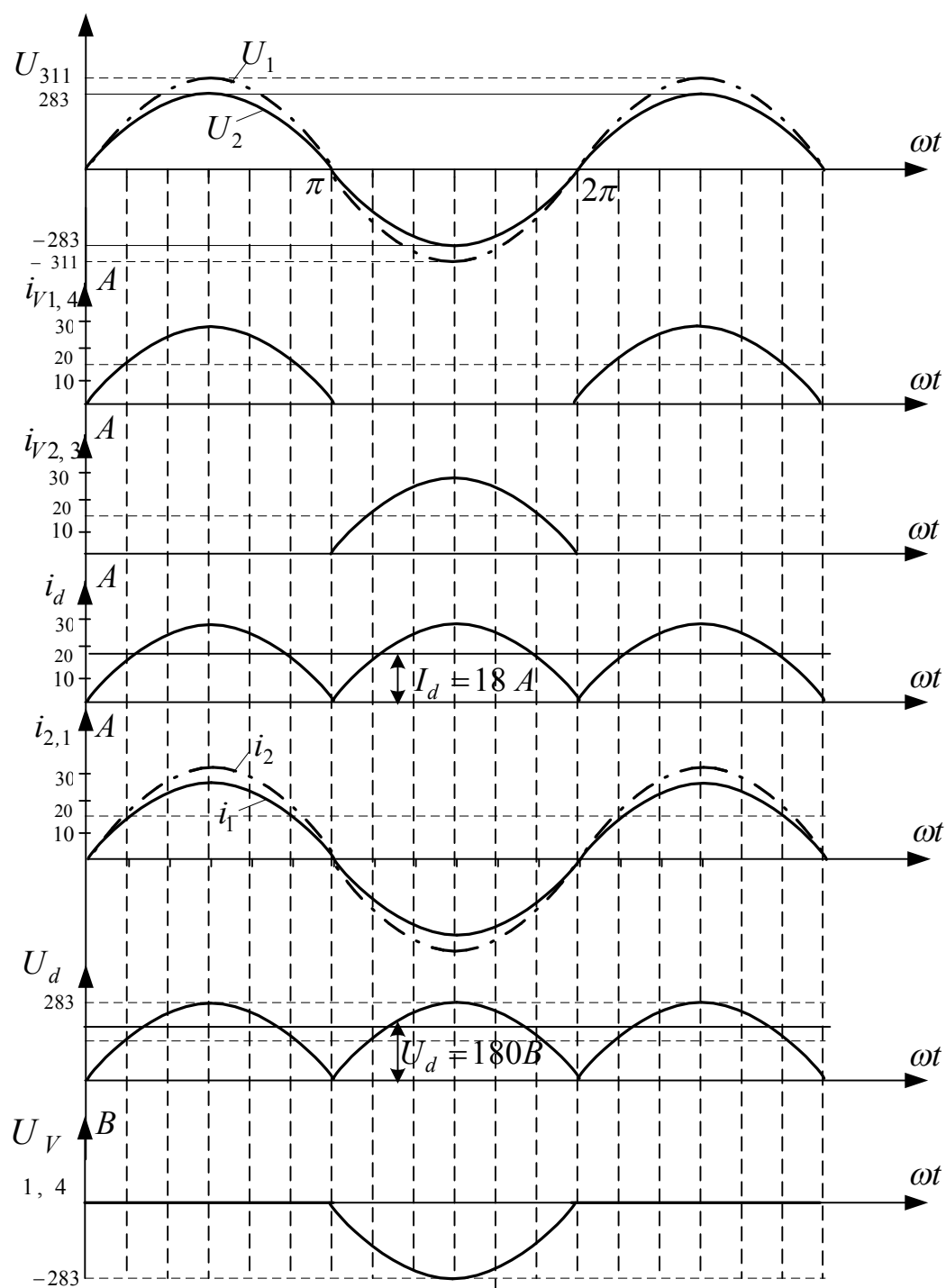


Рис. 2

18.3. Мгновенное значение выпрямленного тока нагрузки $i_d(t)$ будет равно сумме токов вентилях $i_{V1,4}$ и $i_{V2,3}$. Среднее значение I_d выпрямленного тока равно 18 А (прямая линия).

18.4. Ток i_2 вторичной обмотки трансформатора численно будет равен току вентилях, но на первом полупериоде он будет положительный, а на втором — отрицательный.

18.5. Мгновенное значение выпрямленного напряжения $u_d(t)$ численно равно напряжению $u_2(t)$ вторичной обмотки, но оно будет однополярное. Среднее значение U_d выпрямленного напряжения будет постоянным и численно равно 180 В.

18.6. Напряжение, которое прикладывается к вентилям VD1, VD4, на первом полупериоде равно нулю (вентили VD1, VD4 включены), на втором полупериоде равно напряжению вторичной обмотки и приложено к вентилям VD1, VD4 в обратном (выключающем) направлении, так как на втором полупериоде включены вентили VD2 и VD3. Напряжение на VD2 и VD3 будет иметь такую же форму, но будет сдвинуто на один полупериод.

2.1.2. Рассчитать и сравнить однофазный выпрямитель со средней точкой и однофазный однополупериодный выпрямитель, работающие на активную нагрузку без фильтра, если выпрямленное напряжение на нагрузке равно 180 В, мощность постоянного тока в нагрузке равно 3240 Вт, напряжение питающей сети 220 В, частота сети 50 Гц.

1. Формулируем исходные данные:

Дано:

Схема — однофазная со средней точкой (нулевая) и однофазная однополупериодная.

$$P_d = 3240 \text{ Вт};$$

$$U_d = 180 \text{ В};$$

$$U_1 = 220 \text{ В};$$

$$f = 50 \text{ Гц}$$

Определить I_d , R_d , $k_{тр}$, U_2 , I_2 , S_2 , I_1 , S_1 , $S_{тр}$, $I_{V\text{эф}}$, I_V , I_{Vm} , $U_{мобр}$, ΔP_V .

2. Схемы выпрямителей представлены на рис. 3.

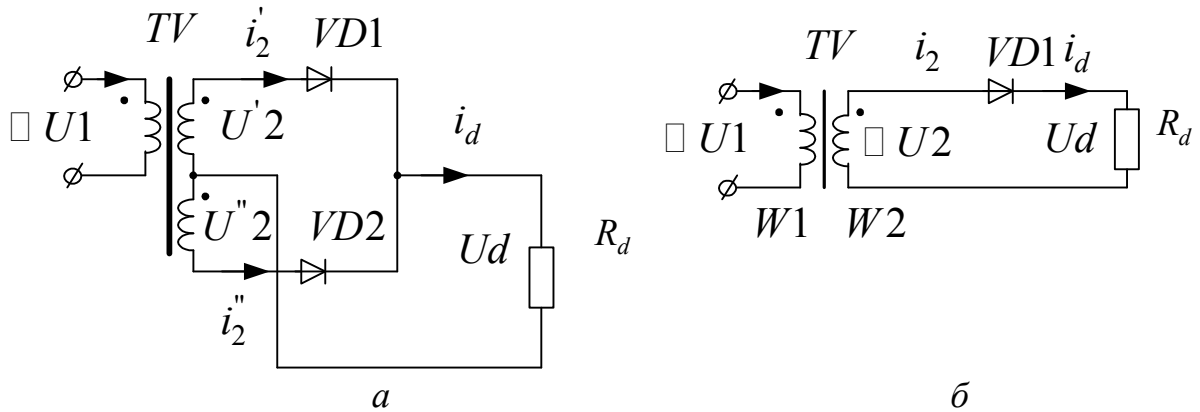


Рис. 3

3. Определяем выпрямленный ток (среднее значение) из равенства

$$P_d = U_d \cdot I_d \Rightarrow I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{3240}{180} = 18 \text{ А.}$$

4. Определяем сопротивление нагрузки

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{180}{18} = 10 \text{ Ом.}$$

5. Замечаем, что по выходным параметрам P_d , U_d , I_d , R_d рассчитываемые выпрямители полностью идентичны мостовому, рассмотренному в п. 3.1.1, что позволит корректно сравнить все выпрямители между собой.

6. Расчет выпрямителей проведем также табличным способом, выбирая из таблицы приложения 4.2 нужную схему, нагрузку и строку — идеальный выпрямитель (коэффициенты в скобках).

7. Для однофазного нулевого выпрямителя (со средней точкой):

$$\frac{U_2}{U_1} = 1,11 \Rightarrow U_2 = 1,11 \cdot 180 = 200 \text{ В.}$$

$$\frac{I_2}{I_d} = 0,785 \Rightarrow I_2 = 0,785 \cdot 18 = 14,1 \text{ А.}$$

$$\frac{I_2}{I_d} = 0,5 \Rightarrow I_2 = 0,5 \cdot 18 = 9 \text{ A.}$$

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{200} = 1,1.$$

$$\frac{I_1 \cdot k_{\text{тр}}}{I_d} = 1,11 \Rightarrow I_1 = \frac{1,11 \cdot I_d}{k_{\text{тр}}} = \frac{1,11 \cdot 18}{1,1} = 18,2 \text{ A.}$$

$$\frac{S_2}{P_d} = 1,74 \Rightarrow S_2 = 1,74 \cdot P_d = 1,74 \cdot 3240 = 5638 \text{ ВА.}$$

$$\frac{S_1}{P_d} = 1,23 \Rightarrow S_1 = 1,23 \cdot P_d = 1,23 \cdot 3240 = 3985 \text{ ВА.}$$

$$S_{\text{тр}} = 1,48 \Rightarrow S_{\text{тр}} = 1,48 \cdot P_d = 1,48 \cdot 3240 = 4795 \text{ ВА.}$$

$$\frac{U_{\text{мобр}}}{U_d} = 3,14 \Rightarrow U_{\text{мобр}} = 3,14 \cdot U_d = 3,14 \cdot 180 = 565 \text{ В.}$$

$$\frac{I_{\text{Vэф}}}{I_d} = 0,785 \Rightarrow I_{\text{Vэф}} = 0,785 \cdot I_d = 0,785 \cdot 18 = 14,1 \text{ A.}$$

$$\frac{I_V}{I_d} = 0,5 \Rightarrow I_V = 0,5 \cdot I_d = 0,5 \cdot 18 = 9 \text{ A.}$$

$$\frac{I_{\text{Vm}}}{I_d} = 1,57 \Rightarrow I_{\text{Vm}} = 1,57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 18 = 28,2 \text{ A.}$$

8. Для однофазного однополупериодного выпрямителя:

$$\frac{U_2}{U_1} = 2,22 \Rightarrow U_2 = 2,22 \cdot U_d = 2,22 \cdot 180 = 400 \text{ В.}$$

$$\frac{I_2}{I_d} = 1,57 \Rightarrow I_2 = 1,57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 18 = 28,3 \text{ A.}$$

$$\frac{I_2}{I_d} = 1 \Rightarrow I_2 = I_d = 18 \text{ A.}$$

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{400} = 0,55.$$

$$\frac{I_1 \cdot k_{\text{тр}}}{I_d} = 1,21 \Rightarrow I_1 = \frac{1,21 \cdot I_d}{k_{\text{тр}}} = \frac{1,21 \cdot 18}{0,55} = 39,6 \text{ A.}$$

$$\frac{S_2}{P_d} = 3,48 \Rightarrow S_2 = 3,48 \cdot P_d = 3,48 \cdot 3240 = 11275 \text{ ВА.}$$

$$\frac{S_1}{P_d} = 2,69 \Rightarrow S_1 = 2,69 \cdot P_d = 2,69 \cdot 3240 = 8715 \text{ ВА.}$$

$$\frac{S_{\text{тр}}}{P_d} = 3,09 \Rightarrow S_{\text{тр}} = 3,09 P_d = 3,09 \cdot 3240 = 10012 \text{ ВА.}$$

$$\frac{U_{\text{мообр}}}{U_d} = 3,14 \Rightarrow U_{\text{мообр}} = 3,14 \cdot U_d = 3,14 \cdot 180 = 565 \text{ В.}$$

$$\frac{I_{V\text{эф}}}{I_d} = 1,57 \Rightarrow I_{V\text{эф}} = 1,57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 18 = 28,3 \text{ А.}$$

$$\frac{I_V}{I_d} = 1 \Rightarrow I_V = I_d = 18 \text{ А.}$$

$$\frac{I_{V\text{м}}}{I_d} = 3,14 \Rightarrow I_{V\text{м}} = 3,14 \cdot 18 = 56,5 \text{ А.}$$

9. Сравнение произведем таблично.

Выпрямитель Параметр	Мостовой	Со средней точкой	Однополупери- одный
U_d [В]	180	180	180
I_d [А]	18	18	18
P_d [Вт]	3240	3240	3240
U_2 [В]	200	200	400
I_2 [А]	20,0	14,1	28,3
$\kappa_{\text{тр}}$	1,1	1,1	0,55
I_2 [А]	–	9	18
I_1 [А]	18,2	18,2	39,6
S_2 [ВА]	3986	5638	11275
S_1 [ВА]	3986	3986	8715
$S_{\text{тр}}$ [ВА]	3986	4795	10012
$U_{\text{мообр}}$ [В]	283	565	565
$I_{V\text{эф}}$ [А]	14,1	14,1	28,3
$I_{V\text{м}}$ [А]	28,3	28,3	56,5
I_V [А]	9	9	18

Из таблицы видно, что при одной и той же мощности в нагрузке требуемая мощность трансформатора в мостовой схеме минимальна 3986 ВА, а в однополупериодной схеме выпрямителя мощность — 10012 ВА. Число вентиля в мостовой схеме — 4, в нулевой — 2, в однополупериодной — 1. Обратное напряжение, прикладываемое к вентилю, в мостовой 283 В, а в нулевой и однополупериодной — 565 В. Максимальный ток вентиля в мостовой и нулевой — 28,3 А, а в однополупериодной — 56,5 А.

2.2 Задачи по работе многофазных идеальных выпрямителей на активную нагрузку

2.2.1 Определить величину среднего значения напряжения на активной нагрузке и действующее значение фазного потребляемого тока идеального трехфазного мостового выпрямителя, если фазное напряжение первичной обмотки трансформатора 220 В; частота 50 Гц; коэффициент трансформации 5,15; среднее значение тока нагрузки 25 А. Нарисовать основные временные диаграммы.

1. Формализуем задачу.

Дано:

Схема — трехфазная мостовая;

нагрузка — активная;

$$U_{1\phi} = 220 \text{ В};$$

$$f_c = 50 \text{ Гц};$$

$$k_{тр} = 5,15;$$

$$I_d = 25 \text{ А}$$

$$U_d = ? \quad I_1 = ?$$

2. Прежде чем нарисовать схему, обращаем внимание, что в исходных данных не оговорено соединение первичных и вторичных обмоток трансформатора. Поэтому нужно доопределить соединение обмоток. Пусть будет схема

трансформатора звезда-звезда ($\Delta-\Delta$). Такая схема, называемая схемой Ларионова, представлена на рис. 4.

3.

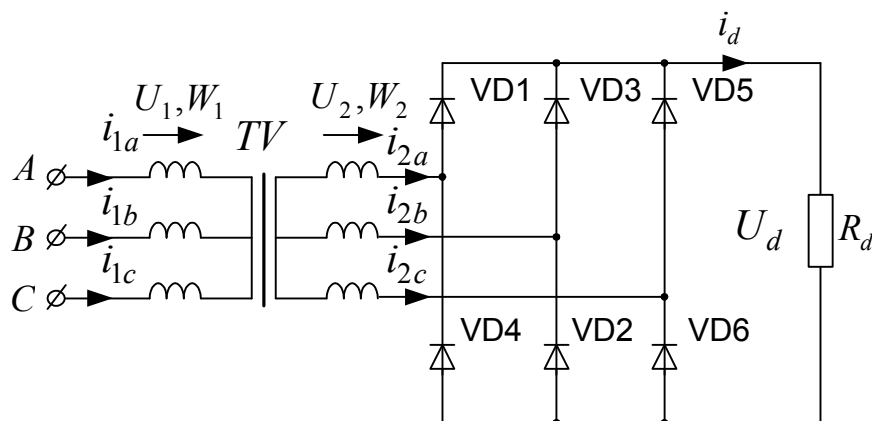


Рис. 4

3. Вторичное напряжение (действующее значение) найдем из соотношения

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow U_2 = \frac{U_1}{k_{\text{тр}}} = \frac{220}{5,15} = 42,72 \text{ В.}$$

4. Средне значение выпрямленного напряжения определим из соотношения

$$U_d = 2,34 \cdot 42,72 = 100 \text{ В.}$$

5. Найдем ток первичной обмотки, воспользовавшись табличным соотношением

$$I_1 = \frac{0,82 I_d}{k_{\text{тр}}} = 3,98 \text{ А,}$$

6. Временные диаграммы представлены на рис. 5.

Временные диаграммы

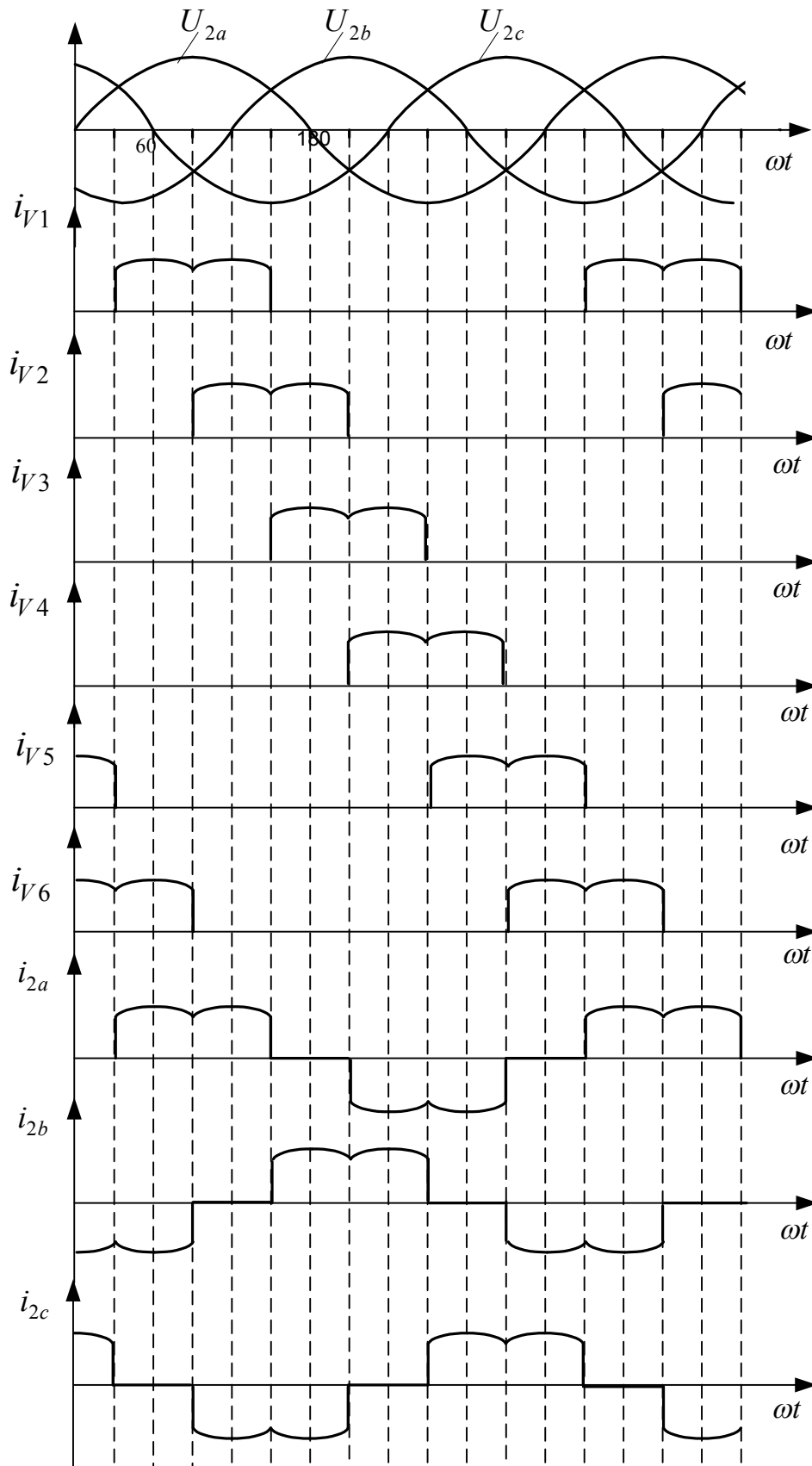


Рис. 5

Порядок их построения следующий:

6.1. Строим трехфазную систему переменных напряжений U_{2a} , U_{2b} , U_{2c} , сдвигая синусоиду фазы «b» на 120° электрических градусов относительно фазы «a», а синусоиду фазы «с» сдвигая еще на 120° относительно фазы «b». При этом делим период напряжения на 12 равных частей, что очень облегчает построение синусоиды по точкам ($\sin 0^\circ = 0$, $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$, $\sin 90^\circ = 1$, и т.д.).

6.2. Определяем интервалы проводимости диодов, помня, что диоды верхней (катодной) группы проводят в тот момент, когда соответствующая фаза самая положительная, а диоды нижней (анодной) группы, — когда соответствующая фаза самая отрицательная. При этом включение — выключение диодов осуществляется в моменты равенства напряжений «соседних» фаз, которые называются точками естественной коммутации.

6.3. Обратим внимание, что форма импульса тока при активной нагрузке определяется формой линейного напряжения, которое действует на текущем интервале времени.

Например, ток диода VD1 на интервале от 30° до 90° определяется напряжением $U_{2ab} = U_{2a} - U_{2b}$, а на интервале от 90° до 150° — напряжением $U_{2ac} = U_{2a} - U_{2c}$ и так далее.

6.4. Форму фазного тока можно определить через токи диодов. Например, $i_{2a} = i_{V1} - i_{V4}$, $i_{2b} = i_{V3} - i_{V6}$, $i_{2c} = i_{V5} - i_{V2}$.

2.3 Задачи по работе выпрямителей на активно-индуктивную нагрузку

2.3.1 Рассчитать однофазный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора, работающей на активно-индуктивную нагрузку.

Исходные данные:

напряжение питающей сети $U_1 = 220$ В;

коэффициент трансформации $\kappa_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2} = 2,2$;

сопротивление нагрузки $R_d = 10 \text{ Ом}$;

индуктивное сопротивление нагрузки X_d много больше активного, потери в элементах схемы отсутствуют.

Методика решения задачи.

Сначала формализуем исходные данные.

Дано:

$$U_1 = 220 \text{ В};$$

$$\kappa_{\text{тр}} = 2,2;$$

$$R_d = 10 \text{ Ом};$$

$$X_d \gg R_d;$$

$\eta = 1$ — коэффициент полезного действия выпрямителя

$$U_d, I_d, P_d, I_2, P_2, I_1, P_1, P_{\text{тр}}, I_V, I_{V\text{эф}}, I_{V\text{м}}, U_{\text{мобр}}, \Delta P_V = ?$$

Анализ исходных данных.

Итак, рисуем схему однофазного выпрямителя со средней точкой при работе на активно-индуктивную нагрузку R_d , $X_d = \omega L_d$ и обозначаем все токи и напряжения, как на рис. 6.

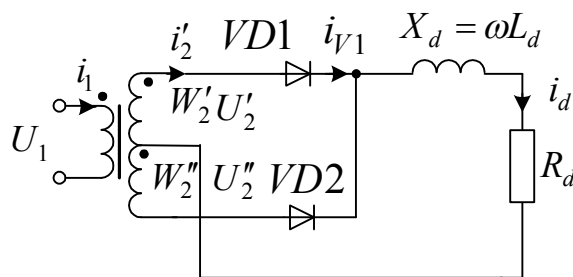


Рис. 6

Особенность выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку при $X_d \gg R_d$, состоит в том, что ток i_d нагрузки идеально сглажен, причем $I_d = I_{\text{дм}} = I_{V\text{м}}$. Это приводит к то-

му, что соотношения, из которых находятся искомые величины, изменяются.

1. Находим фазное напряжение U_2 , т.е. напряжение вторичной полуобмотки:

$$\frac{U_1}{U_2} = \kappa_{\text{тр}} \quad \Rightarrow \quad U_2 = \frac{U_1}{\kappa_{\text{тр}}} = \frac{220}{2,2} = 100 \text{ В.}$$

2. Выпрямленное напряжение для однополупериодных схем определим из формулы

$$U_d = 0,9U_2 = 90 \text{ В.}$$

3. Выпрямленный ток

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{90}{10} = 9 \text{ А.}$$

4. Мощность выпрямленного тока

$$P_d = U_d \cdot I_d = 90 \cdot 9 = 810 \text{ Вт.}$$

5. Действующее значение тока вторичной обмотки находим из табличного соотношения

$$I_2 = 0,707I_d = 6,36 \text{ А.}$$

6. Действующее значение тока первичной обмотки найдем из условия, что амплитудное значение тока в обеих полуобмотках вторичной цепи равно току I_d , а подмагничивающего постоянного тока нет. Тогда

$$I_{1,\kappa_{\text{тр}}} = I_d \quad \Rightarrow \quad I_1 = \frac{I_d}{\kappa_{\text{тр}}} = \frac{9}{2,2} = 4,1 \text{ А.}$$

7. Габаритная мощность вторичных обмоток определяется по формуле

$$P_2 = 2 \cdot U_2 \cdot I_2 = 2 \cdot 100 \cdot 6,36 = 1272 \text{ ВА.}$$

8. Относительная габаритная мощность вторичных обмоток

$$\frac{P_2}{P_d} = \frac{1272}{810} = 1,57,$$

т.е. превышает мощность нагрузки в 1,57 раза.

9. Габаритная мощность первичной обмотки соответственно

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 200 \cdot 4,1 = 902 \text{ ВА.}$$

$$\frac{P_1}{P_d} = \frac{902}{810} = 1,11.$$

10. Габаритная мощность трансформатора в целом

$$P_{\text{тр}} = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1272 + 902}{2} = 1087 \text{ ВА.}$$

$$\frac{P_{\text{тр}}}{P_d} = \frac{1087}{810} = 1,34.$$

Таким образом, габаритная мощность трансформатора в 1,34 раза превышает мощность постоянного тока.

11. Среднее значение тока через вентиль в силу симметричной работы всех вентилях

$$I_V = \frac{I_d}{2} = \frac{9}{2} = 4,5 \text{ А.}$$

12. Действующее значение тока через вентиль равно действующему значению тока через вторичную обмотку

$$I_{V\text{эф}} = I_2 = 6,36 \text{ А.}$$

13. Максимальное значение тока через вентиль при $X_d \gg R_d$ равно выпрямленному току, т.к. ток считается идеально сглаженным:

$$I_{Vm} = I_d = 9 \text{ А.}$$

14. Обратное максимальное напряжение, прикладываемое к диоду, определим как

$$U_{\text{мобр}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 = 2\sqrt{2} \cdot 100 = 283 \text{ В.}$$

Это видно из схемы — при одном включенном диоде к другому приложено амплитудное напряжение двух полуобмоток.

15. Потери в одном венти́ле

$$\Delta P_V = I_V \cdot \Delta U_0 + I_V^2 \cdot r_{\text{дин}},$$

по условию задачи венти́ль идеален, т.е. $\Delta U_0 = 0$; $r_{\text{дин}} = 0$.

16. Временные диаграммы представлены на рис. 7.

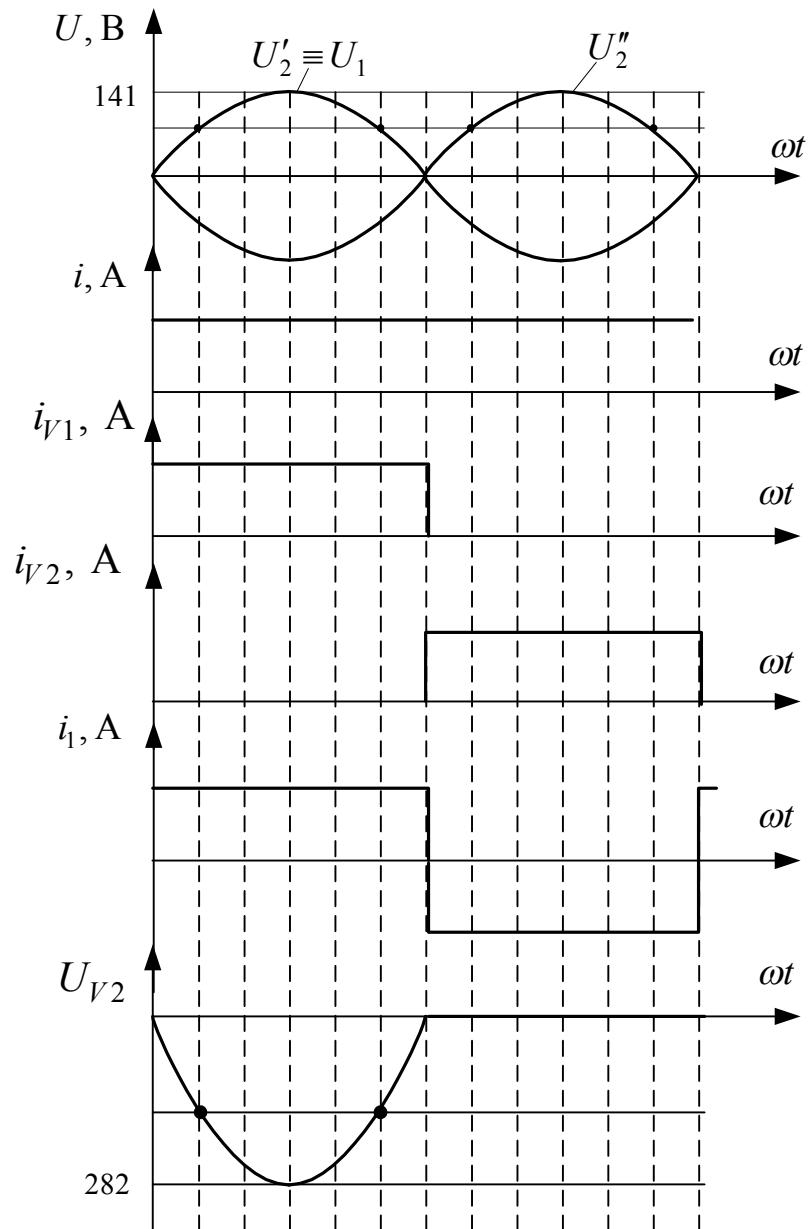


Рис. 7

Построение диаграмм ведем в следующем порядке:

16.1. Строим синусоидальные вторичные напряжения U'_2 и U''_2 , помня, что U'_2 совпадает по фазе с U_1 и отличается только амплитудой, на что указывает знак $\equiv$ пропорциональности на диаграмме.

16.2. Строим ток $i_d = \text{const}$ нагрузки, так как мы допустили, что $X_d = \omega L_d \rightarrow \infty$. Для напряжения на дросселе это дает

$$L_d \frac{di_d}{dt} = U_{\text{др}} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{U_{\text{др}}}{L_d} = \frac{U_{\text{др}}}{\infty} = 0 \Rightarrow i_d = \text{const}.$$

16.2. При открытом вентиле VD1 (на первом полупериоде входного напряжения) ток i_d течет через VD1, а при открытом VD2 (на втором полупериоде) ток течет через VD2, поэтому сразу рисуем токи i_{V1} и i_{V2} .

16.3. Ток первичной обмотки трансформатора можно найти из уравнения, справедливого на периоде

$$i_1 W_1 = i_{V1} \cdot W'_2 - i_{V2} \cdot W''_2 \Rightarrow \\ i_1 = i_{V1} \cdot \frac{W'_2}{W_1} - i_{V2} \cdot \frac{W''_2}{W_1} = \frac{1}{\kappa_{\text{тр}}} (i_{V1} - i_{V2}).$$

16.4. Напряжение на вентиле VD2 при включенном VD1 равно сумме напряжений $U'_2 + U''_2$ и равно нулю при включении VD2.

2.4 Задачи по работе выпрямителей на противо-ЭДС, активно-емкостную нагрузку

2.4.1 Определить токоограничивающее сопротивление и время «вступления» в работу вентиля однофазного выпрямителя с нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора, работающего на встречную ЭДС (противо-ЭДС).

Исходные данные:

действующее значение напряжения вторичной обмотки —
 $U_2 = 220 \text{ В}$;

напряжение противо-ЭДС — $E_0 = 220 \text{ В}$;

максимальное значение тока диода не более 10 А .

Методика решения задачи.

Дано:

1. Схема однофазная со средней точкой трансформатора;
2. $U_2 = 220 \text{ В}$;
3. $E_0 = 220 \text{ В}$;
4. $I_{Vm} \leq 10 \text{ А}$

Определить время «вступления» диода в работу — ?

1. Прежде чем перейти к решению задачи, необходимо уточнить ее постановку. Во-первых, речь идет о выпрямителе, работающем на противо-ЭДС. Как известно, для ограничения тока в диодах в этом случае используют активные или индуктивные сопротивления. В качестве ограничивающих сопротивлений можно использовать активное и индуктивное сопротивления трансформатора, сопротивления диодов. Но для их расчета требуется знать ток выпрямителя I_d , частоту сети f_c , выпрямленное напряжение U_d и некоторые конструктивные параметры трансформатора. В этом случае нужно провести доопределение задачи.

2. Можно пойти по другому пути, а именно, предположить, что трансформатор и диоды идеальные, а ограничение амплитуды тока диодов достигается активным сопротивлением r , величину которого можно будет определить исходя из амплитудного значения тока диодов $I_{Vm} \leq 10 \text{ А}$.

3. И, наконец, время «вступления» диода в работу — это время, отсчитанное от точки естественной коммутации, которая для однофазных выпрямителей совпадает с точкой перехода на-

пряжения через нуль, до момента включения диода и начала протекания через него тока.

4. Теперь нарисуем схему рис. 8 и временные диаграммы, характерные для работы выпрямителя на противо-ЭДС, рис. 9.

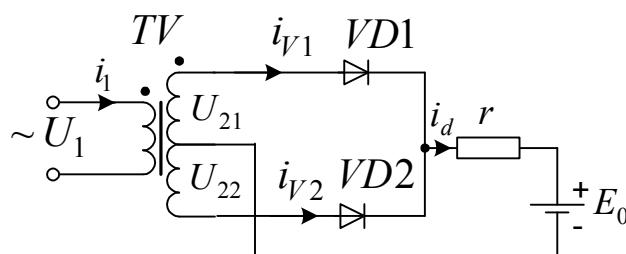


Рис. 8

Для построения временных диаграмм сделаем следующие допущения:

4.1. Напряжение на выходе диодов VD1, VD2 выпрямителя без противо-ЭДС будет равно U_{21} при включенном VD1 и U_{22} при включенном VD2.

4.2. Противо-ЭДС — постоянная величина E_0 .

4.3. Напряжение U_r на сопротивлении r равно

$$U_r = U_{21(2)} - E_0.$$

Эта величина равна участку синусоиды при напряжении, большем чем E_0 .

4.4. Диоды VD1 или VD2 могут открываться только при $U_{21(2)} > E_0$. И когда один из диодов, например, VD1 откроется, то по контуру $U_{21} - VD1 - r - E_0$ потечет ток. Так как в этом контуре только активное сопротивление r , то ток в нем будет повторять напряжение U_r («верхний» участок синусоиды). Тогда мы сразу можем нарисовать токи диодов i_{V1} , i_{V2} .

4.5. Ток первичной обмотки найдем из уравнения

$$i_1 = \frac{1}{K_{тр}} (i_{V1} - i_{V2}).$$

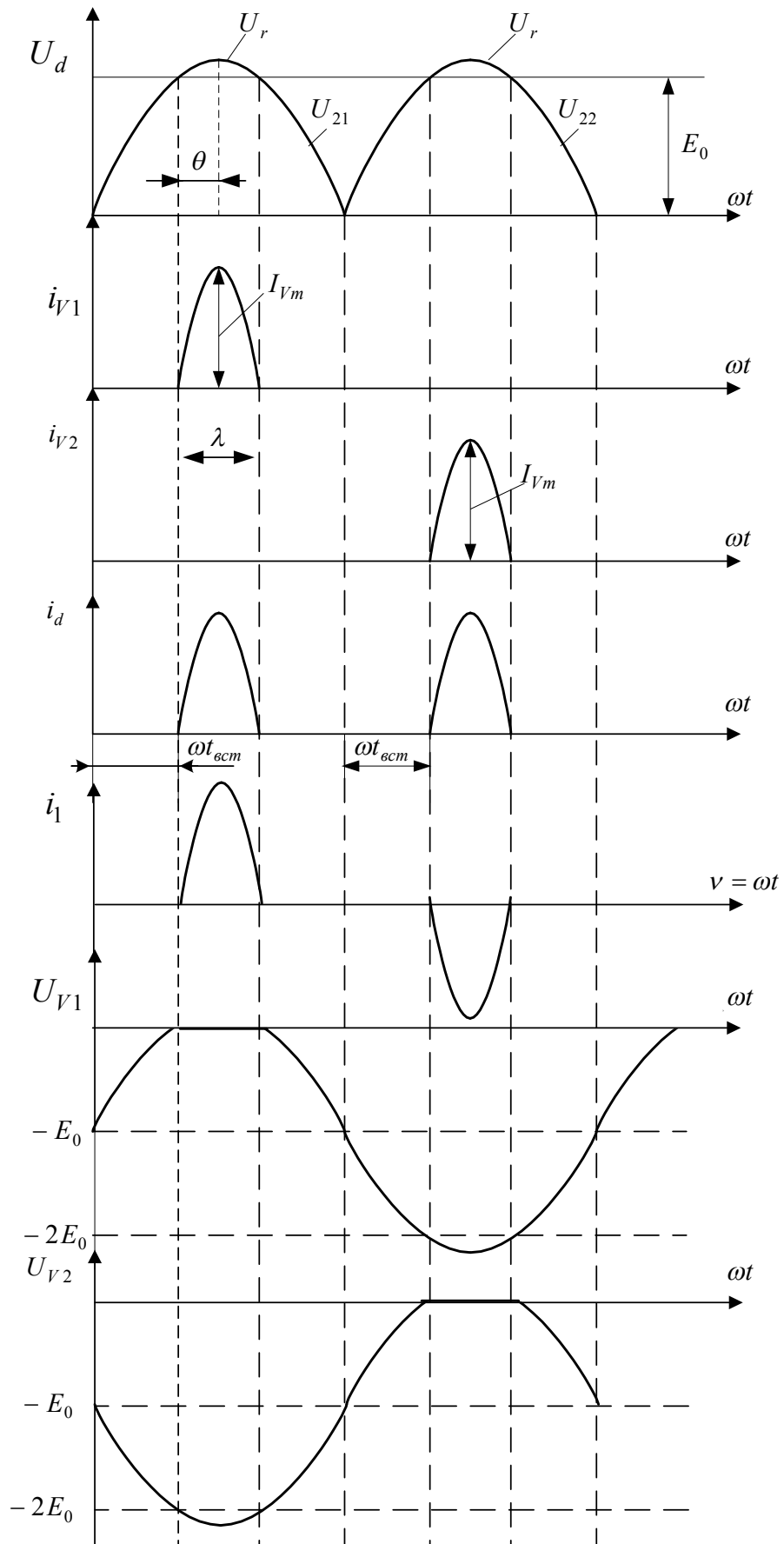


Рис. 9

4.6. Напряжение на вентилях VD1, VD2 найдем из следующих соображений:

- на положительном полупериоде U_{21} к диоду VD1 прикладывается напряжение $U_{V1} = E_0 - U_{21}$, а к диоду VD2 — $U_{V2} = E_0 + U_{21}$ до момента включения диода при угле отсечки Θ ;
- на интервале проводимости $\lambda = 2\Theta$ на диоде VD1 напряжение равно 0 (диод включен), а на диоде VD2 напряжение $U_{V2} = 2U_2$.

$$5. \quad I_{Vm} = \frac{U_{2m} - E_0}{r} = 10 \text{ A} \Rightarrow$$

$$r = \frac{U_2 \sqrt{2} - E_0}{I_{Vm}} = \frac{220\sqrt{2} - 220}{10} = 9,1 \text{ Ом.}$$

$$6. \quad U_{2m} \cos \theta = E_0 \Rightarrow$$

$$\theta = \arccos \frac{E_0}{U_{2m}} = \arccos \frac{220}{220\sqrt{2}} = \frac{\pi}{4}.$$

$$7. \quad \omega t_{\text{вст}} + \theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow$$

$$\omega t_{\text{вст}} = \frac{\pi}{2} - \theta = \frac{\pi}{4}.$$

$$t_{\text{вст}} = \frac{\pi}{4\omega}.$$

Для нахождения времени нам необходимо знать круговую частоту напряжения сети. Например, для $f_c = 50$ Гц $\omega_c = 2\pi f_c = 314$ рад/сек.

$$t_{\text{вст}} = \frac{\pi}{4 \cdot 2\pi \cdot f_c} = \frac{1}{8 \cdot 50} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ сек,}$$

а при частоте $f_{c1} = 400$ Гц

$$t_{\text{вст.1}} = \frac{\pi}{4 \cdot 2\pi \cdot f_{c1}} = \frac{1}{8 \cdot 400} = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

2.4.2 Рассчитать параметры трансформатора и диодов трехфазного мостового выпрямителя, работающего на активную нагрузку с емкостным фильтром по следующим исходным данным:

напряжение на нагрузке $U_d = 200$ В;

коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке по первой гармонике $\kappa_{\Pi}' = 3\%$. Мощность нагрузки $P_d = 1200$ Вт;

фазное напряжение сети $U_1 = 220$ В;

частота напряжения сети $f_c = 50$ Гц.

Методика решения задачи.

1. Формализуем исходные данные и примем соответствующие обозначения величин.

Дано:

1.1. Схема — трехфазная мостовая (Ларионова) с емкостным фильтром;

1.2. $U_d = 200$ В;

1.3. $P_d = 1200$ Вт;

1.4. $\kappa_{\Pi}' = 0,03$;

1.5. $U_1 = 220$ В;

1.6. $f_c = 50$ Гц

Определить: I_d , C , U_2 , $\kappa_{\text{тр}}$, I_2 , P_2 , I_1 , P_1 , $P_{\text{тр}}$, I_V , $I_{V\text{эф}}$, $I_{V\text{м}}$, $U_{\text{мобр}}$, ΔP_V , нарисовать временные диаграммы характерных величин.

2. Схема выпрямителя и основные допущения.

2.1. Так как в задаче не указана схема соединения первичных обмоток трансформатора, то принимаем их (по своему усмотрению), соединенными в звезду (рис. 10).

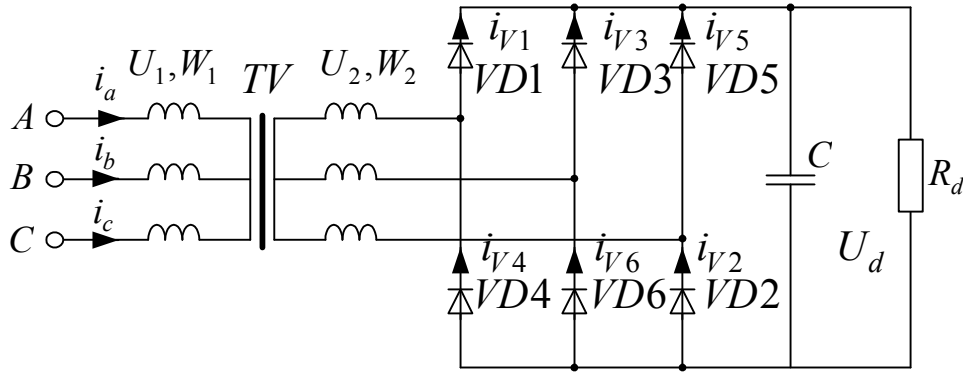


Рис. 10

2.2. Так как нагрузка с емкостным фильтром, то необходимо учесть в схеме параметры, ограничивающие ток диодов. По этому поводу в задаче ничего не сказано. Будем считать, что ток в диодах ограничивается активным и индуктивным сопротивлениями трансформатора (индуктивное сопротивление соответствует индуктивному сопротивлению рассеяния магнитного потока трансформатора), приведенными к вторичной обмотке. Тогда схема принимает вид, представленный на рис.11:

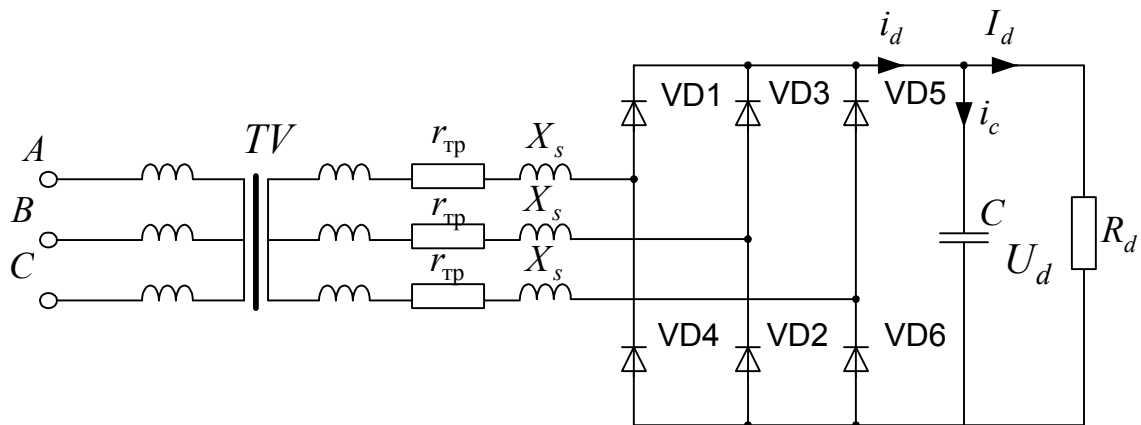


Рис. 11

3. Ток в диодах и в обмотках будет ограничиваться приведенными ко вторичной стороне активными и индуктивными сопротивлениями фазы трансформатора, которые ориентировочно можно рассчитать по формуле

$$r_{\text{тр}} = r_1' + r_2 = K_r \frac{U_d}{I_d \cdot f_c \cdot B_m} \cdot \sqrt[4]{\frac{S \cdot f_c \cdot B_m}{U_d \cdot I_d}},$$

где $K_r = 4,5$ — для мостовой трехфазной (▲—▲);

$$U_d = 200 \text{ В};$$

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{1200}{200} = 6 \text{ А};$$

$$f_c = 50 \text{ Гц};$$

$$B_m = 1,5 \text{ Тл (для 50 Гц)};$$

$$S = 3 \text{ (для трехфазного трансформатора).}$$

Тогда

$$r_{\text{тр}} = 4,5 \cdot \frac{200}{6 \cdot 50 \cdot 1,5} \cdot \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 50 \cdot 1,5}{200 \cdot 6}} = 1,32 \text{ Ом.}$$

4. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы трансформатора

$$X_S = \omega L_S = K_L \cdot \frac{\omega \cdot S \cdot U_d}{(p-1)^2 I_d \cdot f_c \cdot B_m} \sqrt[4]{\frac{U_d \cdot I_d}{S \cdot f_c \cdot B_m}},$$

где $K_L = 1,9 \cdot 10^{-3}$;

$p = 2$ — для простой двухобмоточной конструкции на одном стержне трансформатора;

$S = 3$ — для трехфазного трансформатора;

$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/сек}$ — круговая частота напряжения сети.

Тогда

$$X_S = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{314 \cdot 3 \cdot 200}{1 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 1,5} \sqrt[4]{\frac{200 \cdot 6}{3 \cdot 50 \cdot 1,5}} = 1,21 \text{ Ом.}$$

5. Рассчитываем параметр A по формуле

$$A = \frac{\pi r}{m \cdot R_d} = \frac{\pi \cdot 2,64}{6 \cdot 33,3} = 0,041,$$

где $r = 2r_{\text{тр}} = 2 \cdot 1,32 = 2,64 \text{ Ом};$

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{U_d \cdot U_d}{P_d} = \frac{200^2}{1200} = 33,3 \text{ Ом};$$

$m = m_{\text{п}} = 6$, $m_{\text{п}}$ — число пульсаций для мостовой схемы равно $m_{\text{п}} = 2m_2 = 2 \cdot 3 = 6$, где m_2 — число вторичных фаз.

6. По кривой для графического расчета $\theta = f(A)$ определяем угол отсечки $\theta = 22^\circ$ или $0,384 \text{ рад.}$

Определяем угол проводимости диода

$$\lambda^\circ = 2\theta = 44^\circ \text{ или } \lambda = 0,768 \text{ рад.}$$

7. Проверяем условие, чтобы угол проводимости диода не превышал периодичности кривой выпрямленного напряжения, что соответствует

$$\lambda^\circ < \frac{360^\circ}{m_{\text{п}}} \quad (44^\circ < 60^\circ)$$

или в радианах

$$\lambda < \frac{2\pi}{m_{\text{п}}} \quad (0,768 < 1,05).$$

Условие выполняется, значит графоаналитический расчет правомочен, ток в диодах будет иметь приближенно синусоидальную форму на угле λ проводимости диода.

Тогда можно нарисовать характерные диаграммы токов и напряжений в схеме, представленные на рисунке 12.

Здесь представлены U_a, U_b, U_c — фазные напряжения сети; U_d — напряжение на конденсаторе фильтра; U'_d — выпрямленное напряжение, действующее в контуре заряда конденсатора фильтра; $i_{B1}, i_{B2}, i_{B3}, i_{B4}, i_{B5}, i_{B6}$ — токи вентилях; i_a, i_b, i_c — токи первичных обмоток трансформатора.

8. Определяем коэффициент

$$x = \operatorname{tg} \varphi = \frac{2X_s}{2 \cdot r} = \frac{2 \cdot 1,21}{2 \cdot 1,32} = 0,92 \approx 1$$

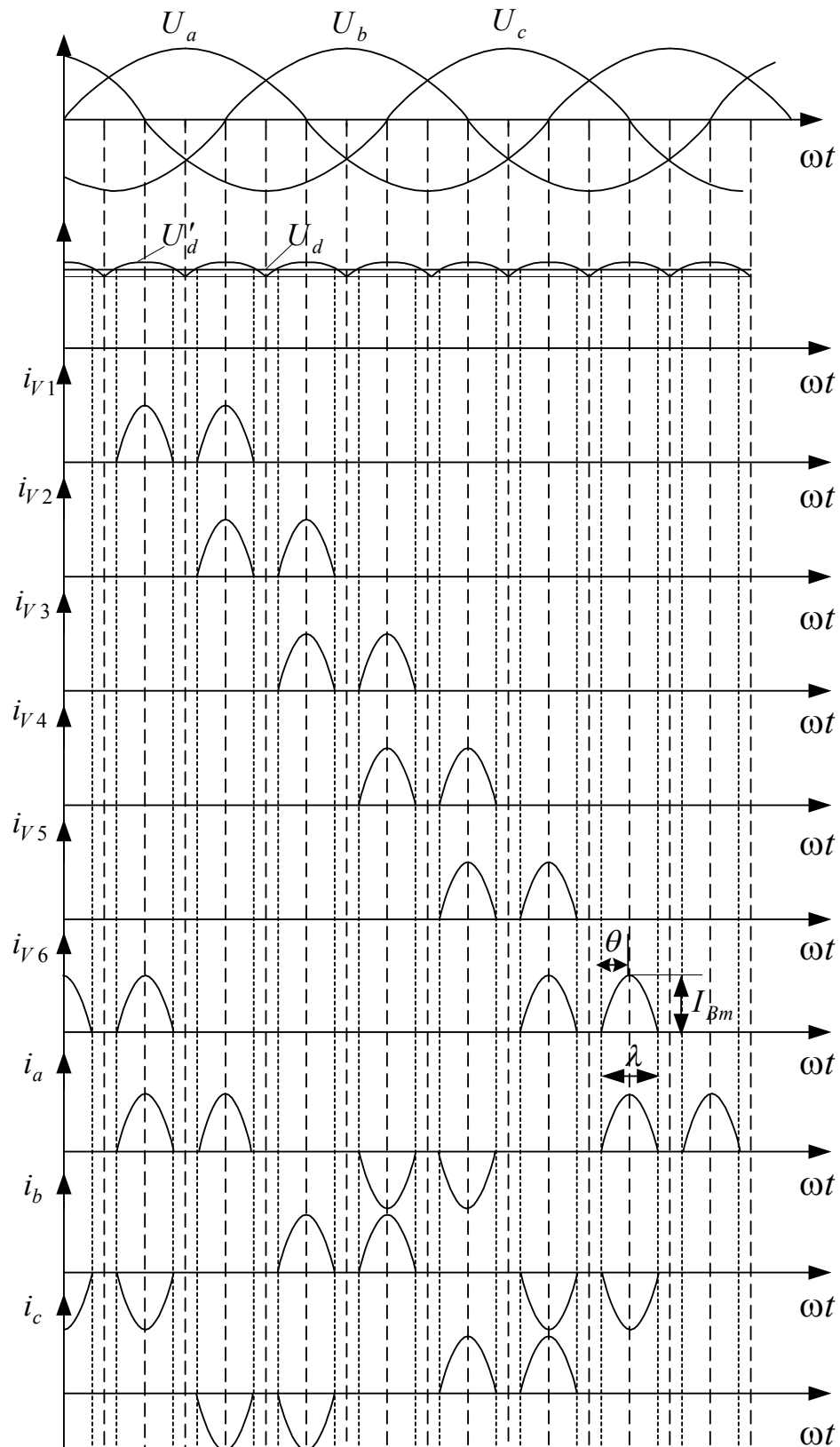


Рис. 12

9. Временные диаграммы токов и напряжений, характерные для трехфазного выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку приведены на рисунке 12.

10. По кривым $B = f(A)$ для $A = 0,041$, $x = 1$ определяем коэффициент фазной ЭДС:

$$B = 0,85.$$

Причем $B = \frac{U_{2\text{лин}}}{U_d} = \frac{\sqrt{3}U_2}{U_d}$, так как выпрямляется линейное вторичное напряжение (всегда включено два диода моста). Отсюда определяем

$$U_2 = \frac{BU_d}{\sqrt{3}} = \frac{0,85 \cdot 200}{\sqrt{3}} = 98,3 \text{ В.}$$

11. Коэффициент формы фазного тока по графикам $D = f(A)$ при $x=1$, $m = 2m_2 = m_{\pi} = 6$ и $A = 0,041$ для однофазного шестифазного выпрямителя

$$D(A) = 2,5, \text{ но}$$

$$D(A) = \frac{I'_2 \cdot m}{I_d} \Rightarrow$$

$$I'_2 = \frac{D(A) \cdot I_d}{m_{\pi}} = \frac{2,5 \cdot 6}{6} = 2,5 \text{ А.}$$

Но у нас трехфазный мостовой выпрямитель, через обмотку которого протекает четыре импульса тока, соответствующих одному однофазному, следовательно

$$I_2 = \sqrt{4} \cdot I'_2 = 2 \cdot I'_2 = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ А.}$$

12. Среднее значение тока через вторичную обмотку за период в мостовой схеме равно нулю, т.е. подмагничивания нет.

13. Коэффициент M постоянной составляющей тока вентилля для шестифазного однофазного выпрямителя определяем по графику: $M = f(A)$ при $x = 1$ и $A = 0,041$

$$M = \frac{I_{Vm}}{I_V} = \frac{I_{Vm} \cdot m}{I_d} = 7,3.$$

Тогда амплитудное значение тока диода

$$I_{Vm} = \frac{M \cdot I_d}{m_2} = \frac{7,3 \cdot 6}{3} = 14,6 \text{ А.}$$

Здесь мы подставили $m = m_2 = 3$, т.к. периодичность тока в диоде мостового выпрямителя равна числу фаз вторичной обмотки. В нашем случае $m = m_2 = 3$.

14. Коэффициент трансформации определяется как

$$K_{тр} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{98,3} = 2,24.$$

15. Как мы уже говорили, в мостовой схеме подмагничивания нет, а это значит, что ток первичной обмотки будет повторять по форме ток вторичной обмотки, а из этого следует

$$\begin{aligned} \frac{I_2}{I_1} &= K_{тр} \Rightarrow \\ I_1 &= \frac{I_2}{K_{тр}} = \frac{5}{2,24} = 2,23 \text{ А.} \end{aligned}$$

16. Габаритная мощность обмотки

$$P_2 = m_2 \cdot U_2 \cdot I_2 = 3 \cdot 98,3 \cdot 5 = 1474 \text{ ВА.}$$

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 = 3 \cdot 220 \cdot 2,23 = 1472 \text{ ВА.}$$

$$P_{тр} = \frac{P_1 + P_2}{2} = 1473 \text{ ВА.}$$

14. Коэффициент завышения мощности трансформатора

$$\frac{P_{тр}}{P_d} = \frac{1472}{1200} = 1,23.$$

Таким образом, использование трансформатора хорошее, его мощность завышена только на 23 %.

17. Коэффициент $H(A)$ для расчета пульсаций напряжения на нагрузке найдем по графикам $H = f(A)$ при $A = 0,041$, $m_2 = m_{\Pi} = 6$, $x = 1$.

$$H(A) \approx 600.$$

18. Тогда коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке определяем по формуле

$$\kappa_{\Pi 1} = \frac{H(A)}{r \cdot f \cdot C [\text{мкФ}]},$$

откуда можно найти емкость C [мкФ] при известном $\kappa_{\Pi 1} = 0,03$:

$$C [\text{мкФ}] = \frac{H(A)}{r \cdot f \cdot \kappa_{\Pi 1}} = \frac{600}{2,64 \cdot 50 \cdot 0,03} = 152 [\text{мкФ}].$$

19. Среднее значение тока диода

$$I_{V_{\text{ср}}} = \frac{I_d}{m_2} = \frac{6}{3} = 2 \text{ А.}$$

20. Действующее значение тока диода $\sqrt{2}$ раз меньше тока вторичной обмотки, т.к. через обмотку ток протекает дважды за период, а через диод — один раз.

$$I_{V_{\text{эф}}} = \frac{I_2}{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,54 \text{ А.}$$

21. Амплитудное значение тока диода, равное амплитудному значению тока вторичной обмотки, нами уже найдено в п.10:

$$I_{V_m} = I_{2m} = 14,6 \text{ А.}$$

22. Максимальное обратное напряжение, прикладываемое к выключенному диоду:

$$U_{\text{мообр}} = U_{2\text{лин.м}} = \sqrt{3} \cdot U_{2m} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 = \sqrt{6} \cdot 98,3 = 241 \text{ В.}$$

23. Потери в одном диоде можно найти, если выбрать конкретный диод и аппроксимировать его вольтамперную характеристику.

По расчетным параметрам:

$$U_{\text{мобр}} = 215 \text{ В},$$

$$I_V = 2 \text{ А},$$

$$I_{V\text{м}} = 14,6 \text{ А}$$

выбираем диод Т112-10-4 класса с параметрами $U_y = 4 \times 100 = 400 \text{ В}$, $I_{\text{мсп}} = 10 \text{ А}$ (при использовании без обдува радиатора можно использовать по току примерно на 30 %, что близко к нашей нагрузке).

24. Вольтамперная характеристика диода, приведенная на рисунке 13 — из справочника.

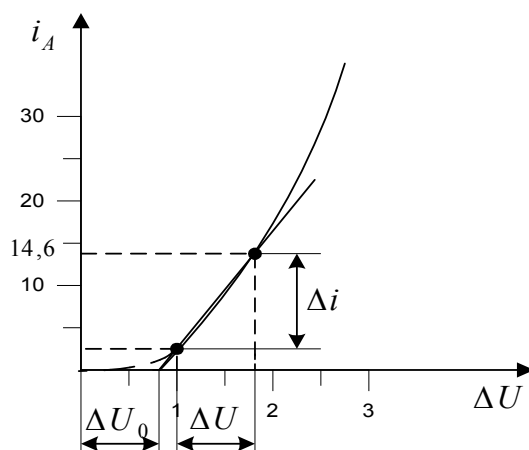


Рис. 13

Аппроксимируем ее прямой линией, проводя ее через две точки

$$i = I_{V\text{м}} = 14,6 \text{ А и } i = I_{\text{ср}} = 2 \text{ А};$$

$$\text{при } I_{V\text{м}1} = 14,6 \quad \Delta U_{V1} = 1,7 \text{ В};$$

$$\text{при } I_{V\text{м}2} = 2 \quad \Delta U_{V2} \cong 1 \text{ В}.$$

Аппроксимирующая кривая пересекает ось абсцисс при $\Delta U = \Delta U_0 = 0,7 \text{ В}$.

Динамическое сопротивление диода

$$r_{\text{дин}} = \frac{\Delta U}{\Delta i} = \frac{\Delta U_{V1} - \Delta U_{V2}}{I_{V\text{м}1} - I_{V\text{м}2}} = \frac{1,7 - 1}{14,6 - 2} = \frac{0,7}{12,6} = 55,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

25. Потери мощности на одном диоде

$$\Delta P_{V1} = I_V \cdot \Delta U_0 + I_{V\text{эф}}^2 \cdot r_{\text{дин}} = 2 \cdot 0,7 + 5^2 \cdot 55,6 \cdot 10^{-3} = 2,79 \text{ Вт.}$$

26. Потери мощности на всех диодах

$$\Delta P_V = 2m_2 \cdot \Delta P_1 = 6 \cdot 2,79 = 16,8 \text{ Вт.}$$

27. Выбираем конденсатор фильтра по следующим исходным данным:

постоянная составляющая напряжения равна напряжению на нагрузке $U_d = 200 \text{ В}$;

амплитуду переменной составляющей напряжения найдем из условия

$$\kappa_{\Pi 1} = \frac{U_{\text{км}\sim}}{U_d} = 0,03 \Rightarrow$$

$$U_{\text{км}\sim} = 0,03 \cdot U_d = 0,03 \cdot 400 = 12 \text{ В};$$

частота переменной составляющей

$$f_1 = m_{\Pi} \cdot f_c = 6 \cdot 50 = 300 \text{ Гц};$$

емкость фильтра $C = 152 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

По этим данным из справочника [7. стр.131] выбираем оксидный алюминиевый полярный конденсатор с фольговыми обкладками К50-27, предназначенный для работы в цепях постоянного и пульсирующего токов и в импульсных режимах.

Параметры и характеристики конденсатора:

номинальное постоянное напряжение — 300 В;

емкость одного конденсатора $C_1 = 100 \text{ мкФ}$;

количество конденсаторов

$$N = \frac{C}{C_1} = \frac{152}{100} = 2 \text{ шт.};$$

28. Амплитуда переменной составляющей на частоте 50 Гц (см. [1]) для $C_1 = 100 \cdot 10^{-6}$ Ф, $U_{мд50} = 20$ В.

29. Амплитуда допустимой переменной составляющей на частоте 300 Гц при температуре 50 °С

$$U_{мд} = U_{мд50} \cdot \kappa(f)n(T^{\circ}\text{C}) = 20 \cdot 0,25 \cdot 0,8 = 4 \text{ В.}$$

Итак, выбранный конденсатор по допустимым пульсациям не проходит.

Возможно несколько вариантов решения этой задачи:

29.1. Увеличить емкость фильтра до такой степени, чтобы коэффициент пульсаций уменьшился до 0,01, т.е. из п.18

$$C[\text{мкФ}] = \frac{600}{2,64 \cdot 50 \cdot 0,01} = 456 \text{ мкФ}$$

и выберем количество конденсаторов $N = 5$ шт., что даст суммарную емкость $500 \cdot 10^{-6}$ Ф.

29.2. Взять конденсатор меньшей емкости (см. [7]), например, $C_1 = 2,2$ мкФ, у которого $U_{мд50} = 70$ В, тогда

$$N = \frac{C}{C_1} = \frac{152}{2,2} = 69 \text{ штук.}$$

$$U_{мд} = U_{мд50} \cdot \kappa(f)n(T^{\circ}\text{C}) = 70 \cdot 0,25 \cdot 0,8 = 14 \text{ В.}$$

2.9.3. Выбрать другой тип конденсаторов.

30. Остановим свой выбор на первых двух вариантах. Но при этом надо иметь в виду, что окончательный выбор можно осуществить, если применить какой-либо критерий выбора, например, минимум стоимости, массы или объема.

2.5 Задачи по выпрямителям с умножением напряжения (умножители напряжения)

2.5.1 Рассчитать параметры трансформатора, диодов и конденсаторов в схеме несимметричного умножителя напряжения по следующим исходным данным:

напряжение сети $U_1 = 220$ В;

напряжение на вторичной обмотке $U_2 = 141$ В;

число ступеней умножения $p = 8$;

сопротивление нагрузки — $100 \cdot 10^3$ Ом;

коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке $\kappa'_n = 0,03$.

1. Формализуем задачу.

Схема — несимметричный умножитель напряжения с четным числом ступеней умножения;

$$R_n = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$U_1 = 220 \text{ В};$$

$$U_2 = 141 \text{ В};$$

$$p = 8;$$

$$\kappa'_n = 0,03;$$

$$f_c = 50 \text{ Гц}$$

$$U_n, I_y, P_n, \kappa_{тр}, I_2, P_2, I_1, P_1, P_{тр}, I_{Vi}, I_{Vmi}, \Delta P_{Vi},$$

$$U_{тобр}, U_{ci}, \Delta U_{ci} = ?$$

Здесь обозначения приняты такие, как и раньше, индекс $i = 1, 2, 3 \dots p$ в токах и напряжениях диодов и конденсаторов предполагает, что нужно найти параметры всех диодов и конденсаторов.

2. Схема несимметричного умножителя напряжения с четным числом ступеней представлена на рис. 14.

$$\left. \begin{aligned}
 i_{V1} &= -\frac{U_{2m} \cos \omega t - U_{C1}}{r_{\text{тр}} + r_{V1}} = \frac{U_{2m} \cos \omega t - U_{d1}}{r_{\text{тр}} + r_{V1}}; \\
 i_{V2} &= +\frac{U_{2m} \cos \omega t + U_{C1} - U_{C2}}{r_{\text{тр}} + r_{V2}} = \frac{U_{2m} \cos \omega t - U_{d1}}{r_{\text{тр}} + r_{V2}}; \\
 i_{V3} &= -\frac{U_{2m} \cos \omega t + U_{C2} - U_{C3} - U_{C1}}{r_{\text{тр}} + r_{V3}} = \frac{U_{2m} \cos \omega t - U_{d1}}{r_{\text{тр}} + r_{V3}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 i_{V8} &= +\frac{U_{2m} \cos \omega t - U_{d1}}{r_{\text{тр}} + r_{V8}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Приведенные выражения показывают, что токи всех диодов, в пределах принятых допущений, одинаковы и имеют такую же форму, как и ток диода в однополупериодном выпрямителе, для которого известна следующая форма записи:

$$\begin{aligned}
 i_{V\text{эф}} &= +\frac{U_{2m} \cos \omega t - U_{2m} \cos \theta}{r_{\text{тр}} + r_V} = \frac{U_{2m}}{r_{\text{тр}} + r_V} \cdot (\cos \omega t - \cos \theta) = \\
 &= \frac{U_{d1}}{r_{\text{тр}} + r_V} \cdot \left(\frac{\cos \omega t - \cos \theta}{\cos \theta} \right), \quad (3)
 \end{aligned}$$

где θ — угол отсечки.

5. Найдем средние значения токов заряда и разряда конденсаторов с учетом того, что средние значения токов всех диодов равны между собой, а средний ток заряда конденсаторов равен среднему току разряда (последнее следует из установившегося значения напряжения на конденсаторах):

для конденсатора C_8

$$\begin{cases} I_{\text{зар.}C8} = I_{V8} = I_V, \\ I_{\text{разр.}C8} = I_H, \end{cases} \quad (4)$$

$$I_{\text{зар.}C8} = I_{\text{разр.}C8} \Rightarrow I_V = I_H;$$

для конденсатора C_7

$$\begin{cases} I_{\text{зар.}C7} = I_{V7} = I_V = I_H, \\ I_{\text{разр.}C7} = I_{V8} = I_V = I_H; \end{cases} \quad (5)$$

для конденсатора C_6

$$\begin{cases} I_{\text{зар.}C6} = I_{V6} + I_{V8} = 2I_H, \\ I_{\text{разр.}C6} = I_{V7} + I_H = 2I_H; \end{cases} \quad (6)$$

для конденсатора C_5

$$\begin{cases} I_{\text{зар.}C5} = I_{V5} + I_{V7} = 2I_H, \\ I_{\text{разр.}C5} = I_{V6} + I_{V8} = 2I_H; \end{cases} \quad (7)$$

аналогично для конденсаторов C_4, C_3

$$\begin{cases} I_{\text{зар.}C4} = I_{\text{зар.}C3} = 3I_H, \\ I_{\text{разр.}C4} = I_{\text{разр.}C3} = 3I_H; \end{cases} \quad (8)$$

для конденсаторов C_2, C_1

$$\begin{cases} I_{\text{зар.}C2} = I_{\text{зар.}C1} = 4I_H, \\ I_{\text{разр.}C2} = I_{\text{разр.}C1} = 4I_H. \end{cases} \quad (9)$$

В общем случае для конденсаторов с четными номерами справедливо выражение

$$I_{\text{зар.}Ci} = I_{\text{разр.}Ci} = \left[\left(\frac{p+1}{2} \right) - \frac{1}{2} \cdot i \right] I_H, \quad (10)$$

где $i = 2, 4, 6, \dots, 2j \dots p$.

Для конденсаторов с нечетными номерами

$$I_{\text{зар.}Ci} = I_{\text{разр.}Ci} = \left[\left(\frac{p+2}{2} \right) - \frac{1}{2} \cdot i \right] I_H, \quad (11)$$

где $i = 1, 3, 5, \dots, (2j+1), \dots, (p-1)$.

7. Напряжение на нагрузке будет равно

$$U_H = U_{C2} + U_{C4} + U_{C6} + U_{C8} = 4 \cdot 2 \cdot U_{d1} = 8U_{d1}.$$

В общем случае

$$U_H = p \cdot U_{d1}. \quad (12)$$

8. Среднее значение тока диода, равное среднему значению тока нагрузки, найдем из (3):

$$\begin{aligned} I_{\text{H}} = I_{\text{V}} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} \frac{U_{\text{dl}}}{(r_{\text{тр}} + r_{\text{V}}) \cos \theta} (\cos v - \cos \theta) dv = \\ &= \frac{U_{\text{dl}}}{\pi(r_{\text{тр}} + r_{\text{V}})} [\operatorname{tg} \theta - \theta]. \end{aligned} \quad (13)$$

Выражая U_{dl} из (12) и подставляя его в (13), получаем

$$I_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}}}{\pi \cdot p(r_{\text{тр}} + r_{\text{V}})} [\operatorname{tg} \theta - \theta],$$

откуда следует, что расчетный параметр A , по аналогии с однополупериодным выпрямителем, работающим на емкость,

$$A = \operatorname{tg} \theta - \theta = \frac{\pi p(r_{\text{тр}} + r_{\text{V}}) \cdot I_{\text{H}}}{U_{\text{H}}} = \frac{\pi p(r_{\text{тр}} + r_{\text{V}})}{R_{\text{H}}}. \quad (14)$$

Выражение (14) для параметра A показывает, что он в множителе в p раз больше, чем в однополупериодном выпрямителе, что можно трактовать как увеличение внутреннего сопротивления умножителя в p раз.

9. Максимальное обратное напряжение, прикладываемое к диодам на холостом ходу, будет равно

$$U_{\text{мообр}} = 2U_{2\text{м}} = 2U_2 \sqrt{2} = 400 \text{ В.}$$

10. Напряжение на нагрузке по (12) мы пока найти не можем, т.к. нам неизвестно активное сопротивление трансформатора $r_{\text{тр}}$ и диода r_{V} . Но мы можем его оценить ориентировочно:

$$U'_{\text{H}} \leq p \cdot U_{2\text{м}} = pU_2 \sqrt{2} = 8 \cdot 200 = 1600 \text{ В.}$$

11. Ток нагрузки, ориентировочно,

$$I'_{\text{H}} \leq \frac{U_{\text{H}}}{R_{\text{H}}} = \frac{1600}{100 \cdot 10^3} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

12. Выбираем диоды типа 2Д215Б с параметрами [8].
Максимально допустимое обратное напряжение диода

$$U_{\text{мдоп.}} = 600 \text{ В.}$$

Максимально допустимый постоянный ток
при $T^{\circ}\text{K}=333^{\circ}\text{K}$ ($T^{\circ}\text{C}=60^{\circ}\text{C}$)

$$I_{\text{пр.мах}} = 1 \text{ А,}$$

при $T^{\circ}\text{K}=398^{\circ}\text{K}$ ($T^{\circ}\text{C}=125^{\circ}\text{C}$)

$$I_{\text{пр.мах}} = 0,2 \text{ А.}$$

Максимальный импульсный ток при $T^{\circ}\text{C}=125^{\circ}\text{C}$ и длительности импульса тока $\tau = 1,3 \cdot 10^{-3}$ сек

$$I_{\text{пр. имп}} = 3 \text{ А.}$$

Пересчитаем импульсный ток на длительность импульса $T = 10 \cdot 10^{-3}$ сек, что соответствует рабочей частоте 50 Гц.

$$I_{\text{пр. имп.доп}}^2 \cdot T = I_{\text{пр. имп}}^2 \cdot \tau \Rightarrow$$

$$I_{\text{пр. имп.доп}} = \sqrt{\frac{I_{\text{пр. имп}}^2 \cdot \tau}{T}} = \sqrt{\frac{3^2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}}} \cong 1 \text{ А.}$$

Прямое падение напряжения на диоде при максимальном токе

$$\Delta U_{\text{пр.мах}} = 1,2 \text{ В.}$$

Падение напряжения на диоде при токе, стремящемся к нулю, ориентировочно

$$\Delta U_0 \approx 0,6 \text{ В.}$$

Тогда динамическое сопротивление диода приблизительно

$$r_V = \frac{\Delta U_{\text{пр.мах}} - \Delta U_0}{I_{\text{пр.мах}}} = \frac{1,2 - 0,6}{1} = 0,6 \text{ Ом.}$$

13. Активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке для схемы удвоения напряжения (схемы Латтура) ориентировочно найдем по выражению

$$r_{\text{тр.Л}} = K_r \cdot \frac{U'_H}{I'_H \cdot f_c B_m} \cdot \sqrt[4]{\frac{S \cdot f_c \cdot B_m}{U'_H \cdot I'_H}}, \quad (15)$$

при $K_r = 0,9$; $U_H = 1600 \text{ В}$; $I_H = 16 \cdot 10^{-3} \text{ А}$; $S = 1$; $f_c = 50 \text{ Гц}$; $B_m = 1,5 \text{ Тл}$,

$$r_{\text{тр.Л}} = 0,9 \cdot \frac{1600}{16 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 1,5} \cdot \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1,5}{1600 \cdot 16 \cdot 10^{-3}}} = 1570 \text{ Ом.}$$

Так как коэффициент трансформации в схеме удвоения будет в четыре раза меньше, чем в нашей схеме умножения с $p = 8$, то активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичному напряжению умножителя, будет в $\left(\frac{p}{2}\right)^2$ раз меньше, что составит

$$r_{\text{тр}} = \frac{r_{\text{тр.Л}} \cdot 4}{p^2} = \frac{1570 \cdot 4}{8^2} = 98,1 \text{ Ом.}$$

14. Теперь можно рассчитать параметр A по выражению (14)

$$A = \frac{\pi p (r_{\text{тр}} + r_{\text{В}})}{R_{\text{н}}} = \frac{\pi \cdot 8 \cdot (98,1 + 0,6)}{100 \cdot 10^3} = 0,025.$$

15. По известному параметру A и зависимости $\theta = f(A)$ определяем угол отсечки

$$\theta^\circ = 20^\circ \text{ или } (\theta_{\text{рад}} = 0,35 \text{ рад})$$

и угол проводимости диода

$$\lambda^\circ = 2\theta^\circ = 2 \cdot 20^\circ = 40^\circ \quad (\lambda_{\text{рад}} = 0,7 \text{ рад}).$$

16. По известному параметру A и зависимости $B = f(A)$ определяем коэффициент фазной ЭДС

$$B(A) = 0,725$$

и рассчитываем напряжение на нагрузке по выражению

$$\begin{aligned} \frac{U_2}{U_{\text{н}}} &= \frac{B(A)}{p} \Rightarrow \\ U_{\text{н}} &= \frac{U_2 \cdot p}{B(A)} = \frac{141 \cdot 8}{0,725} = 1556 \text{ В.} \end{aligned} \tag{16}$$

17. Ток нагрузки уточненный

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} = \frac{1556}{100 \cdot 10^3} = 15,56 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Видно, что ток практически не отличается от ранее определенного.

18. Ток вторичной обмотки трансформатора в положительный период напряжения равен сумме токов «четных» диодов, а в отрицательный — «нечетных», что дает при четном числе ступеней умножения p

$$i_2 = \frac{p}{2} \cdot i_v. \quad (17)$$

При нечетном числе ступеней умножения в токе вторичной обмотки появится постоянная составляющая, равная среднему току одного диода, что приведет к подмагничиванию трансформатора. Это явление нужно учитывать, как и в однополупериодном выпрямителе, помня, что постоянная составляющая тока в первичную обмотку трансформатора не передается. Естественно, что подмагничивание приведет к увеличению габаритной мощности вторичной обмотки. Однако с увеличением ступеней умножения это явление ослабевает, и при $p > 5$ его можно не учитывать.

Действующее значение тока, протекающего через диод, по аналогии с однополупериодным выпрямителем

$$I_V = D(A) \cdot I_n, \quad (18)$$

где $D(A)$ — коэффициент формы тока диода.

Для $A = 0,025$ находим по кривым $D = f(A)$, $D(A) = 3,3$.

19. Так как ток через вторичную обмотку в $\frac{p}{2}$ раз больше тока диода и протекает в оба полупериода, то

$$I_2 = \frac{p}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_V = \frac{p}{\sqrt{2}} \cdot D(A) \cdot I_n, \quad (19)$$

что при известном $D(A) = 3,3$ и $I_n = 15,6 \cdot 10^{-3}$ дает

$$I_2 = \frac{8}{\sqrt{2}} \cdot 3,3 \cdot 15,6 \cdot 10^{-3} = 0,29 \text{ А.}$$

20. Максимальное значение тока диода найдем через коэффициент $M = f(A)$ при $A = 0,025$, что дает

$$M = \frac{I_{Vm}}{I_H} \cong 10,5 \Rightarrow$$

$$I_{Vm} = 10,5 \cdot I_H = 10,5 \cdot 15,6 \cdot 10^{-3} = 0,16 \text{ А},$$

что для выбранных диодов допустимо.

21. Ток первичной обмотки трансформатора при четном числе ступеней умножения будет повторять собой форму тока вторичной обмотки, а, значит, его можно найти по выражению

$$I_1 = \frac{I_2}{\kappa_{тр}}, \quad (20)$$

где $\kappa_{тр} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{141} = 1,56$ — коэффициент трансформации,

откуда

$$I_1 = \frac{0,29}{1,56} = 0,19 \text{ А}.$$

22. Габаритная мощность трансформатора,

$$S_{тр} = S_2 = S_1 = U_2 \cdot I_2 = 141 \cdot 0,29 = 40,9 \text{ ВА}.$$

23. Зная средние значения токов заряда и разряда конденсаторов C_1 , C_4 , C_6 и C_8 (4)÷(9), можно найти размах пульсаций на них соответственно:

для конденсатора C_8

$$\Delta U_{C8} = \frac{I_H \cdot \frac{T}{2}}{C} = \frac{I_H \cdot T}{2C} = \frac{I_H}{2f_c \cdot C}; \quad (21)$$

для конденсатора C_6

$$\Delta U_{C6} = 2 \cdot \frac{I_H}{2f_c \cdot C}, \quad (22)$$

потому что ток заряда-разряда равен $2I_H$

$$\Delta U_{C4} = 3 \cdot \frac{I_H}{2f_c \cdot C}, \quad (23)$$

$$\Delta U_{C2} = 4 \cdot \frac{I_H}{2f_c \cdot C}. \quad (24)$$

24. Тогда полный размах пульсаций напряжения на нагрузке будет равен сумме пульсаций напряжений на каждом из конденсаторов, т.е.

$$\Delta U_H = U_{C8} + U_{C6} + U_{C4} + U_{C2} = (1 + 2 + 3 + 4) \frac{I_H}{2f_c \cdot C} = \frac{10 \cdot I_H}{2f_c \cdot C}. \quad (25)$$

25. В общем случае размах пульсаций напряжения на нагрузке

$$\begin{aligned} \Delta U_H &= \sum_{k=1}^{\left(\frac{p}{2}\right)} k \cdot \frac{I_H}{2f_c C} = \frac{\left(\frac{p}{2} + 1\right) \frac{p}{2}}{2} \cdot \frac{I_H}{2f_c \cdot C} = \frac{\left(\frac{p}{2} + 1\right) \cdot p \cdot I_H}{8f_c \cdot C} = \\ &= \frac{(p+2) \cdot p \cdot I_H}{16f_c \cdot C}. \end{aligned} \quad (26)$$

26. Коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке, определенный как

$$\kappa'_H = \frac{\Delta U_H}{2 \cdot U_H} = \frac{p(p+2) \cdot I_H}{32f_c \cdot C \cdot U_H} = \frac{p(p+2)}{32f_c \cdot C \cdot R_H}, \quad (27)$$

можно найти, зная емкость конденсатора одной ступени, которую в нашем случае нужно найти.

27. Тогда емкость конденсатора одной ступени будет равна

$$C = \frac{p(p+2)}{32f_c \cdot \kappa'_H \cdot R_H} = \frac{8(8+2)}{32 \cdot 50 \cdot 0,03 \cdot 100 \cdot 10^3} = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Суммарная емкость всех конденсаторов умножителя будет равна

$$C_\Sigma = pC = \frac{p^2(p+2)}{32f_c \cdot \kappa'_H \cdot R_H} = 8 \cdot 16,7 \cdot 10^{-6} = 133,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.} \quad (28)$$

28. Размах пульсаций напряжения на каждом из конденсаторов в соответствии с (21)÷(24)

$$\Delta U_{C8} = \frac{I_n}{2f_c \cdot C} = \frac{15,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 50 \cdot 16,7 \cdot 10^{-6}} = 9,4 \text{ В};$$

$$\Delta U_{C6} = 2 \cdot \Delta U_{C8} = 18,8 \text{ В};$$

$$\Delta U_{C4} = 3 \cdot \Delta U_{C8} = 28,2 \text{ В};$$

$$\Delta U_{C2} = 4 \cdot \Delta U_{C8} = 37,6 \text{ В}.$$

29. Выбираем конденсаторы по следующим исходным данным:

максимальное постоянное напряжение, прикладываемое к конденсатору,

$$U_{C\max} = 2U_{2m} = 2\sqrt{2}U_2 = 2\sqrt{2} \cdot 141 = 400 \text{ В};$$

частота переменной составляющей напряжения

$$f_1 = f_c = 50 \text{ Гц};$$

амплитуда переменной составляющей максимальна на втором конденсаторе

$$U_{C\sim m} \cong \frac{\Delta U_2}{2} = \frac{37,6}{2} = 18,8 \text{ В}.$$

Выбираем конденсаторы типа К50-29 [7], предназначенные для работы в цепях постоянного и пульсирующего токов, со следующими электрическими параметрами:

номинальная емкость и допускаемое отклонение

$$C_{\text{ном}} = 22 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$\Delta C = +50\%; -20\%;$$

номинальное постоянное напряжение

$$U_{\text{ном}} = 450 \text{ В};$$

наибольшая допустимая амплитуда переменного напряжения с частотой 50 Гц при $T \leq +40 \text{ }^\circ\text{C}$

$$U_{mV50} = 10 \text{ В};$$

интервал рабочих температур

от минус $60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+85 \text{ }^\circ\text{C}$;

тангенс угла потерь

$$\operatorname{tg} \delta = 0,1;$$

ток утечки при максимальной температуре

$$I_{\text{ym}(+85^{\circ}\text{C})} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

30. Из приведенных данных по конденсаторам К50-29 видно, что он не проходит по максимально допустимому значению переменной составляющей 50 Гц, т.к.

$$U_{C\sim m} = 18,8 \text{ В} > U_{mV50} = 10 \text{ В},$$

причем этот параметр превышен в конденсаторах C_1, C_2, C_3, C_4 .

Перераспределим емкости конденсаторов пропорционально их токам заряда-разряда (4) ÷ (11), что даст для всех конденсаторов $C_1 \div C_8$ одинаковый размах пульсаций. В общем случае размах пульсаций на последней ступени умножения

$$\Delta U = \Delta U_p = \frac{I_n}{2f_c \cdot C_p}. \quad (29)$$

31. Тогда размах напряжения на нагрузке

$$\Delta U_{n1} = \frac{p}{2} \Delta U = \frac{p \cdot I_n}{4f_c \cdot C_p}, \quad (30)$$

что дает для коэффициента пульсаций на нагрузке

$$\kappa'_n = \frac{\Delta U_{n1}}{2 \cdot U_n} = \frac{p \cdot I_n}{8f_c \cdot C_8 \cdot U_n} = \frac{p}{32f_c \cdot C_p \cdot R_n}, \quad (31)$$

где C_p — емкость последней ступени умножения.

Из выражения (30) можно определить емкость последней ступени умножения

$$C_p = \frac{p}{8f_c \cdot \kappa'_n \cdot R_n}. \quad (32)$$

33. Для конденсаторов с четными номерами

$$\left. \begin{aligned} C_p &= C_p, \\ C_{p-2} &= 2C_p, \\ C_{p-4} &= 3C_p, \\ &\dots \dots \dots \\ C_p &= \frac{p}{2} C_p, \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

аналогично для конденсаторов с нечетными номерами

$$\left. \begin{aligned} C_{p-1} &= C_p, \\ C_{p-3} &= 2C_p, \\ C_{p-5} &= 3C_p, \\ &\dots \dots \dots \\ C_1 &= \frac{p}{2} C_p. \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

34. Тогда суммарная емкость C_Σ конденсаторов будет равна

$$\begin{aligned} C_{\Sigma 1} &= 2 \sum_{\kappa=1}^{\left(\frac{p}{2}\right)} \kappa \cdot C_p = 2 \frac{\left(\frac{p}{2} + 1\right) \cdot \frac{p}{2}}{2} \cdot C_p = \\ &= \left(\frac{p}{2} + 1\right) \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{p}{8f_c \cdot \kappa'_\Pi \cdot R_H} = \frac{p^2 (p+2)}{32f_c \cdot \kappa'_\Pi \cdot R_H}. \end{aligned} \quad (35)$$

Выражение (35) показывает, что суммарная емкость конденсаторов умножителя при этом не изменилась.

35. По выражениям (32) ÷ (34) рассчитаем емкости ступеней:

$$C_8 = C_p = \frac{p}{8f_c \cdot \kappa'_\Pi \cdot R_H} = \frac{8}{8 \cdot 50 \cdot 0,03 \cdot 100 \cdot 10^3} = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_7 = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_6 = C_5 = 2C_8 = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_4 = C_3 = 3C_8 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_2 = C_1 = 4C_8 = 26,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

36. По выражению (29) рассчитываем размах пульсаций напряжения на каждом из конденсаторов

$$\Delta U = \Delta U_8 = \frac{I_H}{2f_c \cdot C_8} = \frac{15,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 50 \cdot 6,7 \cdot 10^{-6}} = 23,3 \text{ В}.$$

Тогда амплитуда переменной составляющей

$$U_{C\sim m} = \frac{\Delta U}{2} = 11,7 \text{ В.}$$

Выбираем конденсатор К50-29-450 В-10 мкФ, у которого допустимая амплитуда пульсаций на 50 Гц — 14 В.

37. В связи с увеличением емкости C_8 с $6,7 \cdot 10^{-6}$ Ф до $10 \cdot 10^{-6}$ Ф коэффициент пульсаций уменьшается, уменьшится и ΔU .

Допустим даже, что все конденсаторы имеют минимальную емкость с отклонением емкости -20% (см. п. 28).

Тогда $C_8 = C_{8\min} = C_{\text{ном}} \cdot (1 - 0,2) = 8 \cdot 10^{-6}$ Ф.

По выражению (29)

$$\Delta U = \frac{15,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 19,5;$$

$$U_{C\sim m} = \frac{\Delta U}{2} = \frac{19,5}{2} = 9,75.$$

Коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке по (31)

$$\kappa'_{\Pi} = \frac{8 \cdot 1}{8 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3} = 0,025;$$

$$\kappa'_{\Pi} (\%) = 2,5\%, \text{ т.е. меньше заданного.}$$

2.6 Задачи по фильтрам для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения

2.6.1 Рассчитать параметры сглаживающего Г-образного LC-фильтра, установленного на выходе трехфазного выпрямителя с нулевой точкой.

Исходные данные:

1. Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_2 = 440 \text{ В}$.
2. Частота питающей сети $f_c = 50 \text{ Гц}$.
3. Коэффициент пульсаций на нагрузке $\kappa'_{\Pi} = 2\%$.
4. Сопротивление нагрузки $R_H = 315 \text{ Ом}$.

5. Потери в выпрямителе отсутствуют.

1. Формализуем задание.

Дано:

$$U_2 = 440 \text{ В};$$

$$f_c = 50 \text{ Гц};$$

$$\kappa'_\Pi = 2\%;$$

$$R_H = 315 \text{ Ом};$$

$$\eta = 1$$

$$L, I_d, I_{d\sim}, U_{d\sim}, f_1, P_{др}, r_{др}, I_{др}, C, U_{C\sim}, U_{СНОМ} = U_d, U_{Сmax} = ?$$

Рассчитать параметры LC-фильтра это значит:

для дросселя найти величину индуктивности L , величину тока подмагничивания дросселя I_d , переменную составляющую тока дросселя $I_{d\sim}$, эффективное значение тока $I_{др}$ дросселя, переменную составляющую напряжения $U_{d\sim}$, определяющую габаритную мощность дросселя $P_{др}$ и частоту f_1 первой гармоники, активное сопротивление $r_{др}$ обмотки дросселя;

для конденсатора нужно найти емкость C , переменную составляющую напряжения $U_{C\sim}$ на конденсаторе и ее частоту f_1 , номинальное напряжение U_C и его максимальное $U_{Сmax}$ значение.

1. Схема выпрямителя с фильтром представлена на рис. 15.

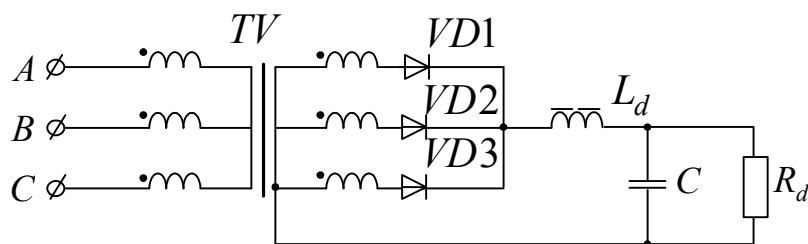


Рис. 15

2. Выпрямленное напряжение

$$U_d = 1,17U_2 = 630 \text{ В.}$$

3. Коэффициент пульсаций на входе фильтра, начинающегося с дросселя, $\kappa' = 25\%$.

4. Коэффициент сглаживания, который должен обеспечить фильтр,

$$\kappa_{\text{сгл.}} = \frac{\kappa_{\Pi}}{\kappa'_{\Pi}} = \frac{25}{2} = 12,5.$$

5. Ток подмагничивания дросселя равен выпрямленному току

$$I_d = \frac{I_d}{R_d} = \frac{630}{315} = 2 \text{ А.}$$

6. Чтобы обеспечить режим непрерывного тока в дросселе, величину индуктивности необходимо выбрать больше некоторой критической величины:

$$L_{\text{кр}} = \frac{2R_d}{(m_{\Pi}^2 - 1)m_{\Pi}\omega_c} = \frac{2 \cdot 315}{(9 - 1) \cdot 3 \cdot 314} = 83,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,}$$

выбираем $L = 100 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} > L_{\text{кр}}$.

7. Произведение $[LC]$ определяем по формуле

$$[LC] = \frac{\kappa_{\text{сгл.}} + 1}{m_{\Pi}^2 \cdot \omega_c^2} = \frac{12,5 + 1}{3^2 \cdot 314^2} = 15,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{Ф.}$$

8. Тогда величина емкости определяется как

$$C = \frac{[LC]}{L_{\text{кр}}} = \frac{15,2 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-3}} = 152 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

9. Индуктивное сопротивление дросселя на частоте первой гармоники

$$X_L = m_{\Pi} \omega_c L = 3 \cdot 314 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 94,2 \text{ Ом.}$$

10. Емкостное сопротивление конденсатора на частоте первой гармоники

$$X_c = \frac{1}{m_{\pi} \omega_c C} = \frac{1}{3 \cdot 314 \cdot 152 \cdot 10^{-6}} = 6,98 \text{ Ом.}$$

11. Сравнение X_L , X_C с R_d позволяет сделать вывод, что фильтрация осуществляется в основном емкостью, т.к. $X_C = 6,98 \ll R_d = 315$, $X_L = 94,2 < R_d = 315$.

12. Волновое сопротивление фильтра

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{100 \cdot 10^{-3}}{152 \cdot 10^{-6}}} = 25,6 \text{ Ом.}$$

Определяем максимальное значение тока при включении выпрямителя

$$I_{L\max} \cong \frac{U_d}{\rho} = \frac{630}{25,6} = 24,6 \text{ А}$$

и максимальное напряжение на конденсаторе при отключении нагрузки

$$U_{C\max} \cong U_d + I_d \cdot \rho = 630 + 2 \cdot 25,6 = 682 \text{ В.}$$

13. Резонансную круговую частоту фильтра найдем по выражению

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{100 \cdot 10^{-3} \cdot 152 \cdot 10^{-6}}} = 256,2 \text{ рад/сек.}$$

Если $\omega_p \leq \frac{1}{2} m_{\pi} \omega_c = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 314 = 471 \text{ рад/сек}$, то резонансные явления в сглаживающем фильтре исключены.

14. Критическое значение сопротивления нагрузки, при котором ток дросселя станет прерывистым, можно найти из соотношения

$$R_{d \text{ кр.}} = \frac{1}{2} L \cdot (m_{\pi}^2 - 1) m_{\pi} \omega_c = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot (9 - 1) \cdot 3 \cdot 314 = 376 \text{ Ом.}$$

Если сопротивление R_d нагрузки возрастет от $R_{d \text{ ном.}} = 315 \text{ Ом}$ до $R_{d \text{ кр.}} = 376 \text{ Ом}$, то ток станет прерывистым. Чтобы отодвинуть эту границу в сторону больших сопротивлений, нужно увеличить индуктивность дросселя.

15. Для расчета переменной составляющей тока дросселя нужно найти эквивалентное сопротивление фильтра на частоте первой гармоники, т.е.

$$Z_{\phi} = jX_L + \frac{-jX_C \cdot R_d}{R_d - jX_C},$$

учитывая, что в нашем случае $X_C \ll R_d$, приближенно получим

$$Z_{\phi} = X_L - X_C = 92,4 - 6,98 = 85,42 \text{ Ом.}$$

16. Амплитуда переменной составляющей тока дросселя определяется как

$$I_{d\sim} = \frac{U_{1m}}{Z_{\phi}}.$$

Учитывая, что $\frac{U_{1m}}{U_d} = \kappa_n = 0,25$, находим

$$U_{1m} = 0,25U_d = 0,25 \cdot 630 = 157,5 \text{ В.}$$

Отсюда

$$I_{d\sim} = \frac{157,5}{85,42} \approx 1,8 \text{ А.}$$

17. Действующее значение тока дросселя определим по формуле

$$I_{\text{др}} = \sqrt{I_d^2 + \left(\frac{I_{d\sim}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{2^2 + \left(\frac{1,8}{\sqrt{2}}\right)^2} = 2,37 \text{ А.}$$

18. Габаритную мощность дросселя найдем как произведение действующего значения тока дросселя на действующее значение напряжения первой гармоники напряжения. Амплитуда переменной составляющей напряжения

$$U_{L\sim} = \frac{U_{1m} \cdot X_L}{(X_L - X_C)} = \frac{157,5 \cdot 94,2}{87,2} = 170 \text{ В.}$$

Габаритная мощность дросселя

$$P_{\text{др}} = \frac{U_{L\sim}}{\sqrt{2}} \cdot I_{\text{др}} = \frac{170}{\sqrt{2}} \cdot 2,37 = 286 \text{ ВА.}$$

19. Таким образом, получим следующие параметры дросселя фильтра:

$$L = 100 \cdot 10^{-3} \text{ Гн; } I_d = 2 \text{ А; } I_{d\sim} = 1,8 \text{ А; } I_{\text{др}} = 2,37 \text{ А; } U_{L\sim} = 170 \text{ В; } f_1 = 150 \text{ Гц; } P_{\text{др}} = 286 \text{ ВА.}$$

По этим расчетным параметрам нужно выбрать или спроектировать дроссель.

20. Номинальное напряжение на конденсаторе равно выпрямленному напряжению

$$U_{\text{Сном}} = U_d = 630 \text{ В.}$$

21. Максимальное напряжение на конденсаторе в переходном режиме (при сбросе тока нагрузки) (см. п.12)

$$U_{\text{Сmax}} = U_d + I_d \cdot \rho = 630 + 2 \cdot 25,6 = 682 \text{ В.}$$

22. Переменную составляющую напряжения с частотой 150 Гц на конденсаторе найдем как

$$U_{C\sim} \cong \frac{U_{1m} \cdot X_C}{(X_L - X_C)} = \frac{157,5 \cdot 6,98}{87,2} = 12,6 \text{ В.}$$

23. По параметрам $U_{\text{Сном}} = 630 \text{ В; } U_{\text{Сmax}} = 682 \text{ В; } U_{C\sim} = 12,6 \text{ В}$ при $f_1 = 150 \text{ Гц}$ выберем конденсатор.

2.7 Задачи по явлению коммутации в выпрямителях, по падению напряжения от коммутации, по внешним характеристикам выпрямителей при различных нагрузках

2.7.1 Определить величину среднего напряжения на активной нагрузке трехфазного мостового выпрямителя и найти его зависимость от тока нагрузки, если фазное напряжение первичной обмотки трансформатора равно 220 В, частота 50 Гц, коэффициент трансформации 5,15, среднее значение тока нагрузки 25 А, индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора $17,8 \cdot 10^{-3}$ Гн и $0,66 \cdot 10^{-3}$ Гн соответственно, активными сопротивлениями обмоток пренебречь.

1. Формализация задачи.

Дано:

- 1.1. Схема трехфазная, мостовая «звезда-звезда» (схема Ларионова);
- 1.2. Нагрузка — активная;
- 1.3. $U_{1\phi} = 220$ В;
- 1.4. $f_c = 50$ Гц;
- 1.5. $\kappa_{тр} = 5,15$;
- 1.6. $I_d = 25$ А;
- 1.7. $L_{S1} = 17,8 \cdot 10^{-3}$ Гн;
- 1.8. $L_{S2} = 0,66 \cdot 10^{-3}$ Гн.

$U_d = ?$ Построить внешнюю характеристику.

2. Нарисуем схему выпрямителя с обозначением соответствующих токов и напряжений, рис. 16.

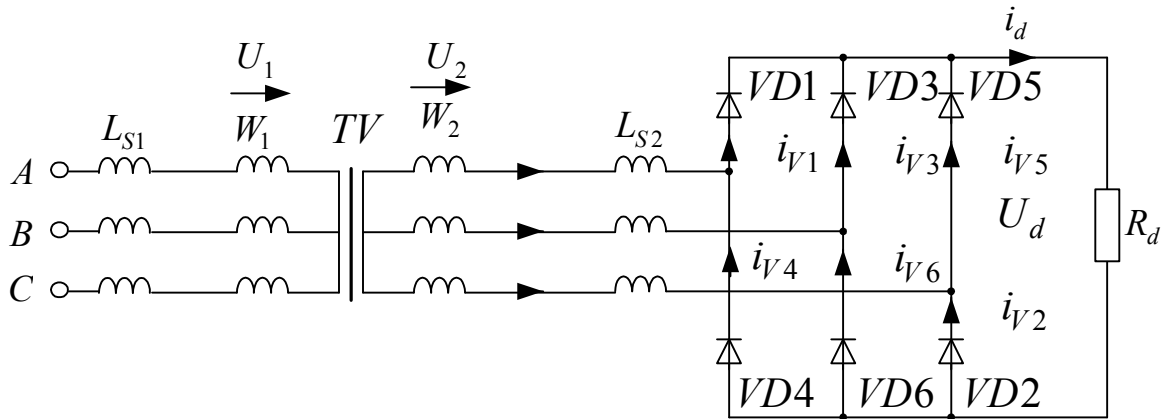


Рис. 16

3. Приводим индуктивность рассеяния первичной обмотки ко вторичной и суммируем ее с индуктивностью рассеяния вторичной. Тогда суммарная индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной обмотке, будет равна

$$L_{ST2} = L_{S2} + \frac{L_{S1}}{\kappa_{тр}^2} = 0,66 \cdot 10^{-3} + \frac{17,8 \cdot 10^{-3}}{(5,15)^2} = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Изменится соответственно и схема, рис. 17.

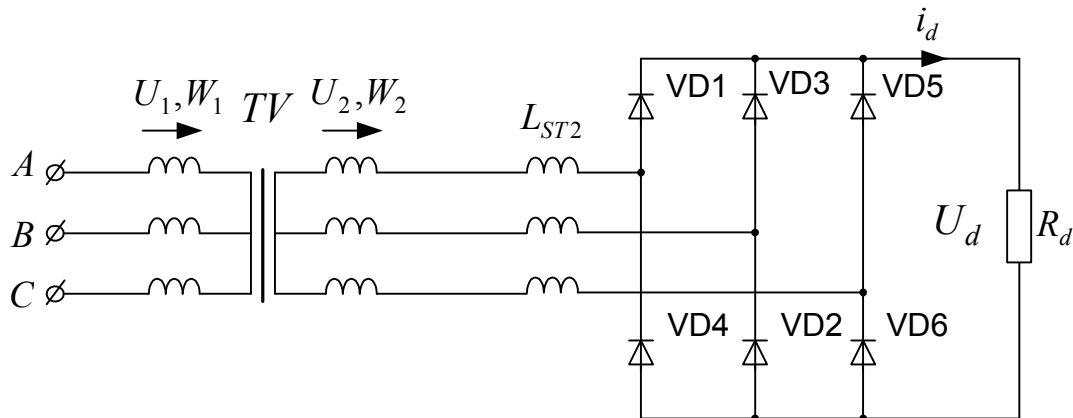


Рис. 17

4. Для идеального трансформатора можно найти среднее значение напряжения, которое будет являться напряжением холостого хода для реального трансформатора.

5. Вторичное напряжение (действующее значение)

$$U_2 = \frac{U_1}{\kappa_{\text{тр}}} = \frac{220}{5,15} = 42,72 \text{ В.} \quad (1)$$

Тогда напряжение холостого хода

$$U_{\text{д хх}} = \frac{U_2}{0,43} \approx 100 \text{ В.} \quad (2)$$

6. При увеличении тока нагрузки напряжение на выходе выпрямителя будет уменьшаться за счет падения напряжения на коммутацию, обусловленного индуктивностью рассеяния $L_{\text{СТ2}}$.

Известно выражение для расчета падения напряжения от коммутации диодов выпрямителя для схемы со средней точкой

$$\Delta U_{\text{х ср.т}} = \frac{I_{\text{д}} \cdot X_{\text{СТ}}}{\left(\frac{2\pi}{m}\right)}, \quad (3)$$

где $X_{\text{СТ}} = 2\pi f_c \cdot L_{\text{СТ2}} = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} = 0,418 \text{ Ом}$ — индуктивное сопротивление рассеяния.

Поскольку мостовой выпрямитель состоит из двух нулевых, включенных последовательно относительно нагрузки, то и падение напряжения от коммутации у мостового будет вдвое больше, т.е.

$$\Delta U_{\text{х м}} = 2 \cdot \frac{I_{\text{д}} \cdot X_{\text{СТ}}}{\frac{2\pi}{m}} = 2 \cdot \frac{25 \cdot 0,418}{\frac{2\pi}{3}} = 9,98 \text{ В} \approx 10 \text{ В.} \quad (4)$$

7. Тогда выходное номинальное напряжение выпрямителя (напряжения при номинальном токе нагрузки) будет равно

$$U_{\text{д ном}} = U_{\text{д хх}} - \Delta U_{\text{х м}} = 100 - 10 = 90 \text{ В.} \quad (5)$$

8. Следует обратить внимание, что выражение (3) справедливо и является точным при активно-индуктивной нагрузке, причем $L_{\text{д}}/R_{\text{д}} \rightarrow \infty$. Для активной нагрузки простого и точного выра-

жения нет, поэтому в данном случае это выражение и полученные результаты будут приближенными.

9. Зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения тока нагрузки называется внешней характеристикой, и ее можно получить из (5) с учетом (3) и (4):

$$U_d = U_{d\text{xx}} - 2 \cdot \frac{I_d \cdot X_{\text{ST}}}{\frac{2\pi}{m}} = U_{d\text{xx}} - \frac{I_d \cdot X_{\text{ST}} \cdot m_2}{\pi}. \quad (6)$$

10. По выражению (6) при известных значениях $U_{d\text{xx}} = 100 \text{ В}$; $X_{\text{ST}} = 0,418 \text{ Ом}$; $m = 3$ строим зависимость $U_d = f(I_d)$.

Это будет прямая с отрицательным наклоном, как показано на рис. 18.

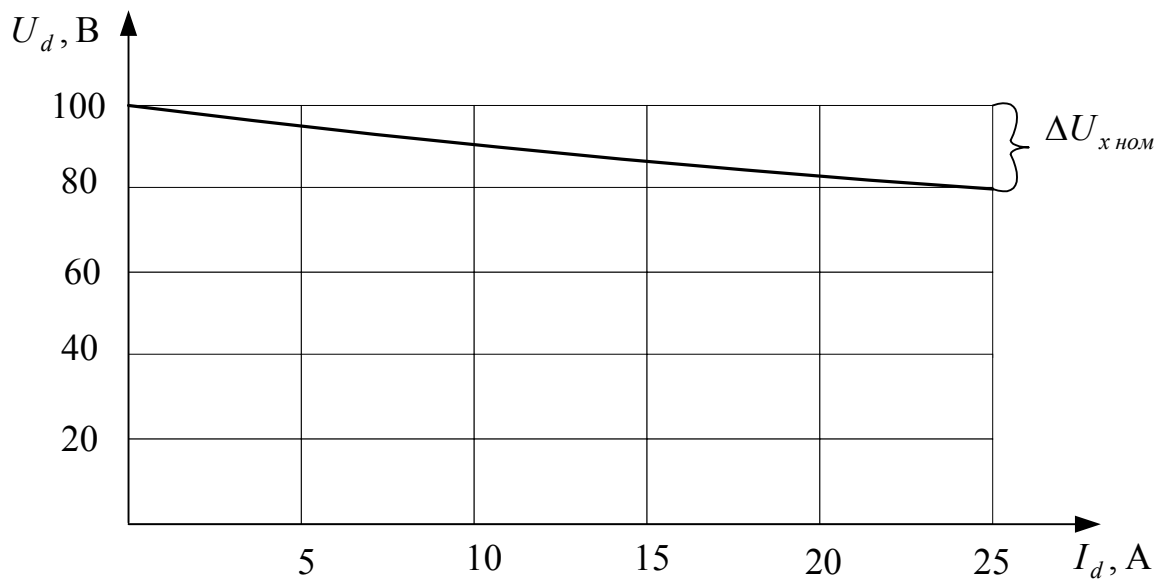


Рис. 18

11. Чтобы построить временные диаграммы токов и напряжений, необходимо рассчитать угол коммутации. Для мостового выпрямителя угол коммутации равен углу коммутации нулевого:

$$\gamma_x = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot \Delta U_x}{U_{d0}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot 10}{100}\right) = 0,64 \text{ рад},$$

что соответствует в угловой мере $\gamma_x^\circ = 36,8^\circ$.

Для упрощения построений положим, что $\gamma_x^\circ = 30^\circ$.

12. Далее строим трехфазную систему переменных напряжений, разделив предварительно период на 12 частей, при этом одно деление будет соответствовать $\frac{2\pi}{12} = \frac{\pi}{6}$ радиан или 30° .

13. Вспомним, что положительная огибающая многофазных напряжений является выходным напряжением «верхнего» нулевого выпрямителя, а отрицательная — «нижнего». Выходное напряжение равно разности

$$U_{d \text{ "верхнего"}} - (-U_{d \text{ "нижнего"}}) = U_{d \text{ "верхнего"}} + U_{d \text{ "нижнего"}}.$$

14. Строим $U_{d \text{ "верхнего"}}$ и $U_{d \text{ "нижнего"}}$. Затем проводим косинусоиды, максимальное значение которых совпадает с точками естественной коммутации. Именно по этим косинусоидам будет изменяться выходное напряжение соответствующих нулевых выпрямителей на интервале коммутации $\gamma_x^\circ = 30^\circ$.

15. Суммируем $U_{d \text{ "верхнего"}}$ и $U_{d \text{ "нижнего"}}$ и получаем выходное напряжение мостового выпрямителя при учете коммутации. Там же, на рис. 19, показаны токи соответствующих диодов.

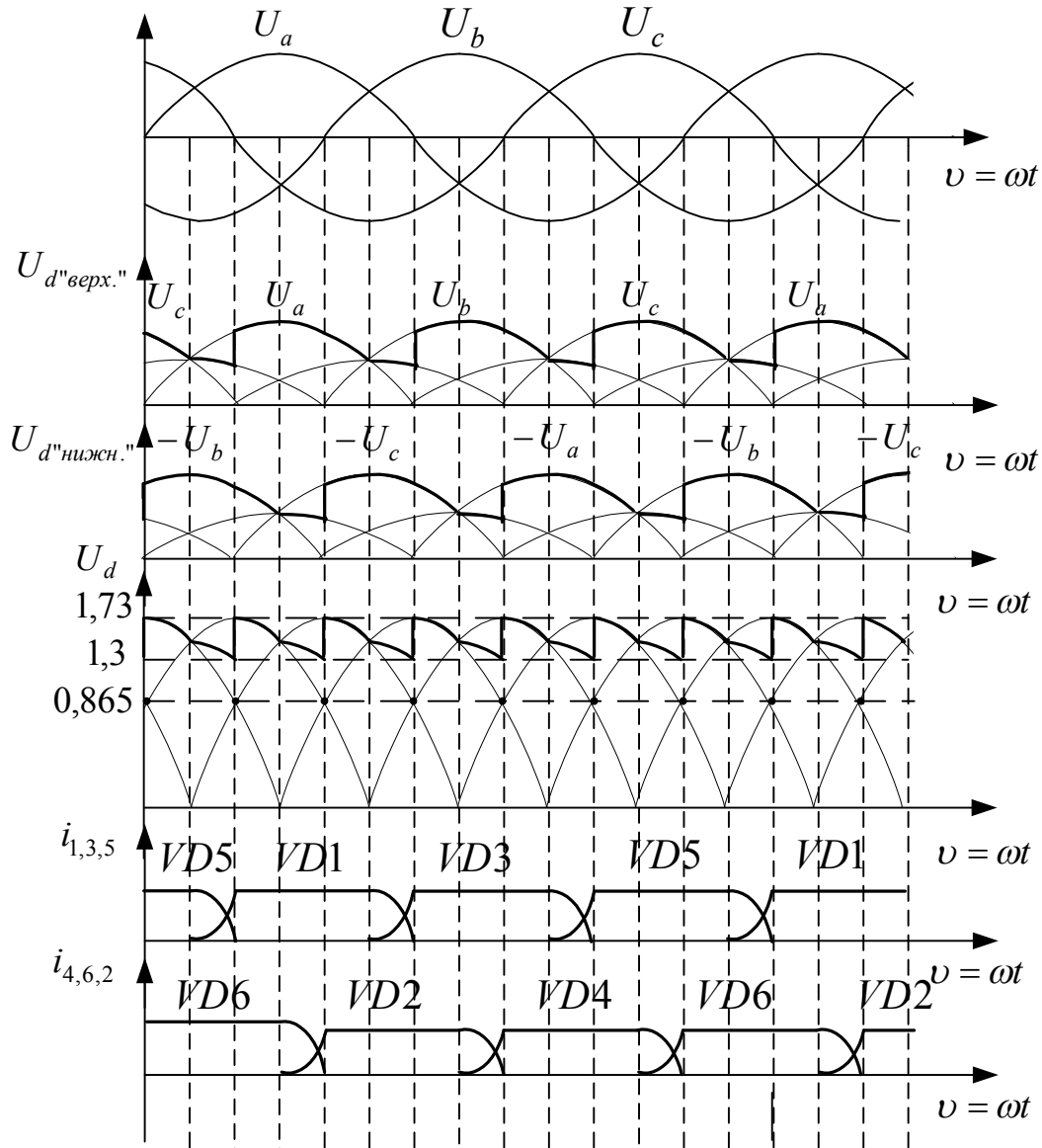


Рис. 19

2.8 Задачи по управляемым выпрямителям

2.8.1 Рассчитать угол управления тиристорами и ток первичной обмотки однофазного выпрямителя со средней точкой, работающего на активную нагрузку 6 Ом, если фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора равно 100 В, а в нагрузке протекает ток 10 А, причем фазное напряжение сети равно 220 В. Потерями в выпрямителе пренебречь. Нарисовать временные диаграммы характерных токов и напряжений.

1. Формализация задачи.

Схема — однофазная со средней точкой;

Потерь — нет ($r_{2T} = 0$, $X_{ST} = 0$, $\Delta U_0 = 0$);

Нагрузка — активная;

$U_1 = 220$ В;

$U_2 = 100$ В;

$R_d = 6$ Ом;

$I_{d\alpha} = 10$ А

α , $I_1 = ?$

2. Рисуем схему выпрямителя, рис. 20.

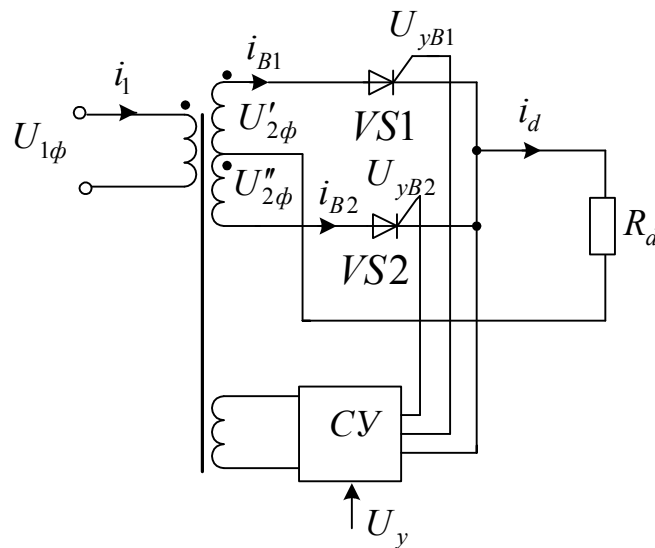


Рис. 20

3. Строим временные диаграммы токов и напряжений, представленные на рис. 21, в следующей последовательности:

3.1. Как обычно, строим напряжение сети $U_{1\phi}$ и напряжения вторичных полуобмоток $U'_{2\phi}$, $U''_{2\phi}$.

3.2. От точки естественной коммутации (для однофазных выпрямителей это точка перехода напряжения через нуль) отсчи-

тываем угол α управления и строим короткие импульсы управления, подаваемые на тиристоры VS1 и VS2.

3.3. Напряжение U_d на нагрузке будет равно соответствующему напряжению $U'_{2\phi}$ или $U''_{2\phi}$ после включения соответствующего тиристора. Пока тиристор не включился, напряжение на нагрузке будет равно нулю.

3.4. Ток нагрузки i_d будет повторять собой форму напряжения, так как нагрузка активная. При переходе тока нагрузки через нуль включенный тиристор выключается.

3.5. Ток первичной обмотки трансформатора будет равен разности токов вторичных обмоток, с учетом коэффициента трансформации и направления токов относительно начала обмоток, так что

$$i_1 W_1 - i_{V1} W_2 + i_{V2} W_2 = 0 \Rightarrow$$

$$i_1 = \frac{1}{K_{тр}} (i_{V1} - i_{V2}).$$

3.6. Напряжение на тиристоре, в предположении, что тиристоры идеальны и имеют одинаковые прямое и обратное сопротивление в выключенном состоянии, строим из следующих соображений:

– на интервале $0 - \alpha$, когда оба тиристора выключены, суммарное напряжение вторичных обмоток делится пополам, так что к одному тиристору, например, VS1 прикладывается прямое напряжение $U'_{2\phi}$, а к вентилю VS2 — обратное, равное $U''_{2\phi}$;

на интервале времени $\alpha - \pi$ тиристор VS1 включается и напряжение на нем становится равным нулю, а к тиристору V2 прикладывается удвоенное напряжение $U'_{2\phi} + U''_{2\phi}$; далее процессы повторяются.

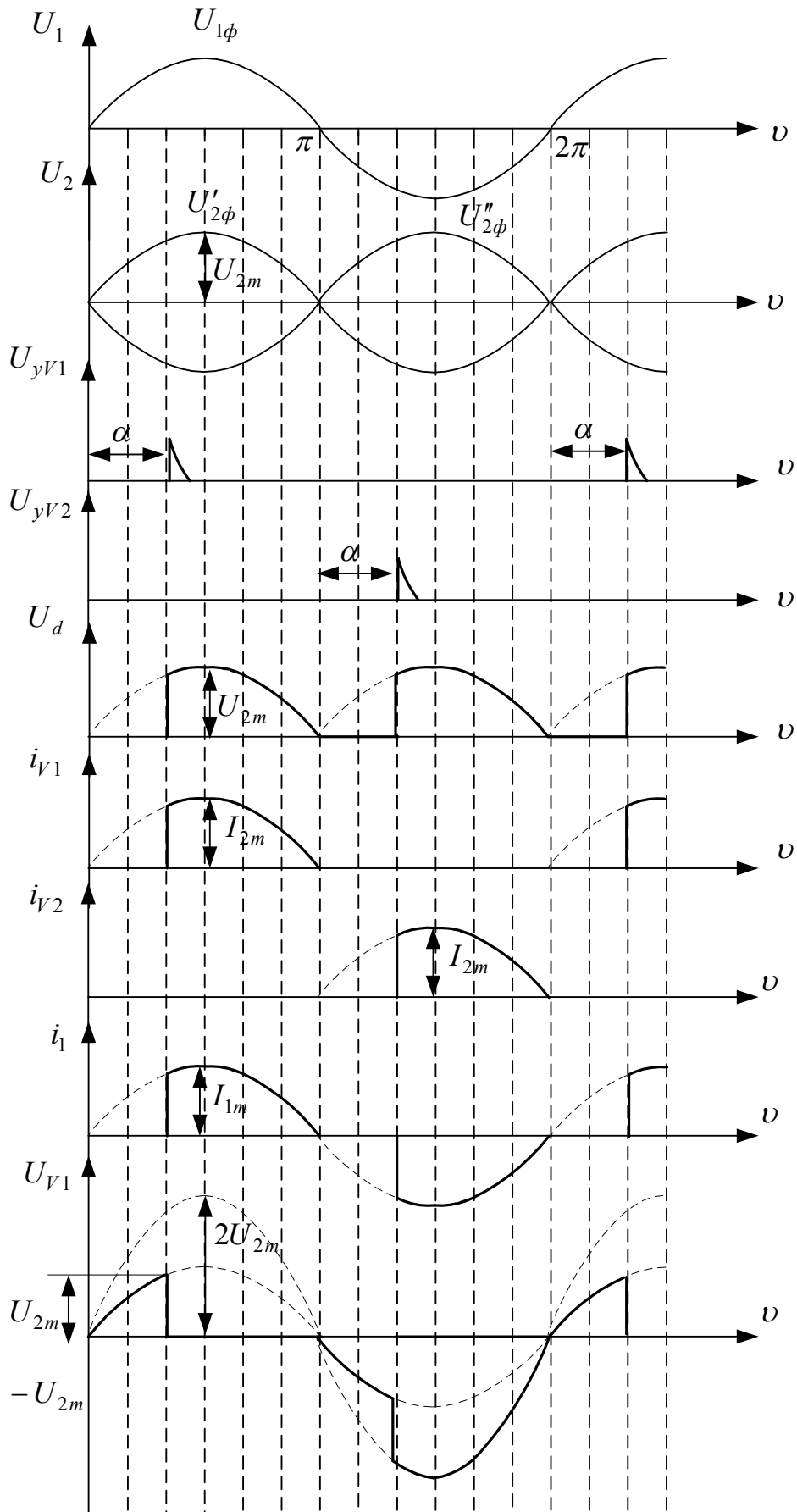


Рис. 21

4. Находим среднее значение выпрямленного напряжения при некотором угле управления тиристорами α

$$U_{d_\alpha} = I_{d_\alpha} \cdot R_d = 10 \cdot 6 = 60 \text{ В.}$$

5. Выпрямленное напряжение при активной нагрузке связано с напряжением вторичной обмотки и углом управления тиристорами следующим соотношением:

$$U_{d_\alpha} = \frac{0,9U_2(1 + \cos \alpha)}{2}, \quad (1)$$

откуда можно найти угол управления тиристорами.

Обратим внимание на следующее. Если положить $\alpha = 0$, что соответствует неуправляемому выпрямителю на диодах, то из (1) получим

$$U_{d0} = 0,9U_2 = 90 \text{ В,}$$

тогда выражение (1) можно переписать в виде

$$U_{d_\alpha} = U_{d0} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right). \quad (2)$$

6. Из (1) находим

$$\begin{aligned} (1 + \cos \alpha) &= \frac{2U_{d_\alpha}}{U_{d0}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \alpha &= \arccos \left[\frac{120}{100} - 1 \right] = 1,231 \text{ рад,} \end{aligned}$$

что соответствует $\alpha^\circ = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot 1,231 = 70,6^\circ$.

7. Для того, чтобы найти ток первичной обмотки, необходимо найти коэффициент трансформации:

$$\kappa_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{220}{100} = 2,2.$$

8. Действующее значение тока первичной обмотки при чисто активной нагрузке в схеме выпрямителя без потерь

$$I_1 = \frac{2I_d}{0,9\kappa_{\text{тр}}(1 + \cos \alpha)} = \frac{2 \cdot 10}{0,9 \cdot 2,2 \cdot (1 + 0,33)} = 7,5 \text{ А.}$$

2.8.2 Трехфазный симметричный управляемый мост работает на активно-индуктивную нагрузку. Определить фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора, если в нагрузке сопротивление 10 Ом протекает ток 10 А, а угол управления тиристорами равен 60° . Потерями в выпрямителе пренебречь, ток нагрузки считать непрерывным. Представить характерные временные диаграммы токов и напряжений.

1. Формализация задачи.

- 1.1. Схема — управляемый трехфазный мост (схема Ларионова);
- 1.2. Нагрузка — активно-индуктивная ($L_d/R_d \rightarrow \infty$, т.к. ток считаем непрерывным);
- 1.3. $R_d = 10 \text{ Ом}$;
- 1.4. $I_d = 10 \text{ А}$;
- 1.5. $\alpha^\circ = 60^\circ$

$U_2 = ?$ Построить временные диаграммы

2. Схема. Из задачи неясно, как соединены первичные и вторичные обмотки трансформатора — звездой или треугольником. Поэтому для определенности полагаем, что схема соединена по принципу треугольник-звезда.

3. Представляем временные диаграммы токов и напряжений. Поясним ход их построения.

3.1. Строим трехфазную систему фазных напряжений U_a , U_b , U_c .

3.2. Отмечаем углы управления тиристорами α — VS1, VS2, ..., VS6. При этом помним, что угол α управления соответствующим вентилем измеряется от точки естественной коммута-

ции (ТЕК) соответствующего тиристора до момента включения этого тиристора. Так, для тиристора VS1 интервал его естественной работы — «положительность» фазы А, для VS3 — фазы В, для VS5 — фазы С, для VS4 — «отрицательность» фазы А, для VS6 — фазы В, для VS2 — фазы С.

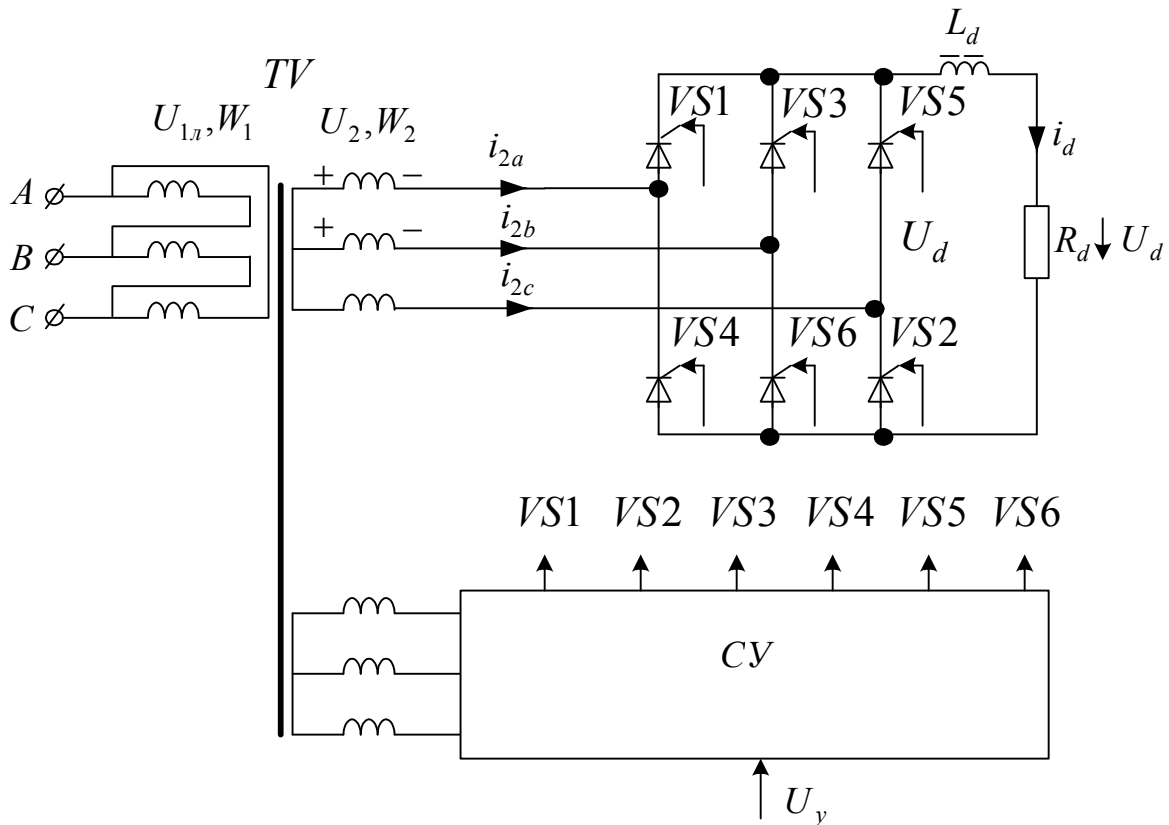


Рис. 22

3.3. Выпрямленное напряжение $U_{\text{дВывр}}$ на выходе тиристорного комплекта (на входе сглаживающего фильтра) равно линейному напряжению вторичных обмоток трансформатора в соответствии с тем, какие тиристоры включены. Среднее значение напряжения $U_{\text{дВывр.ср}}$ — прямая линия, которая при $L_d \rightarrow \infty$ определяет форму тока $i_d = I_d$.

3.4. Так как форма тока I_d нагрузки известна, то легко нарисовать токи вентиля — ведь через них протекает ток I_d . Однако нужно учесть, что ток в соответствующем тиристоре задержан на угол α относительно своей ТЕК. Угол проводимости каждого из

тиристоров по-прежнему равен 120° . Момент выключения тиристора определяется углом включения следующего тиристора в катодной или анодной группе.

3.5. Имея диаграммы токов тиристорov легко построить токи вторичных и первичных обмоток трансформатора.

3.6. Обратите внимание, что через 60° управляющий импульс на каждый из тиристорov повторяется. Это необходимо для запуска выпрямителя, когда $I_d = 0$ и в режиме прерывистого тока. В этом случае можно управлять тиристорами «длинными» импульсами, как на рис. 23 показано пунктиром.

4. Выпрямленное напряжение (среднее значение) при заданных токе и сопротивлении нагрузки равно

$$U_{d\alpha} = I_{d\alpha} \cdot R_d. \quad (1)$$

5. Но это же напряжение при индуктивной нагрузке должно быть равно

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha. \quad (2)$$

6. Выпрямленное напряжение при $\alpha = 0^\circ$ для трехфазного мостового выпрямителя

$$U_{d0} = \frac{U_2}{0,43}. \quad (3)$$

7. Подставляем (1) и (3) в (2) и получаем

$$I_{d\alpha} \cdot R_d = \frac{U_2}{0,43} \cos \alpha,$$

откуда

$$U_2 = \frac{0,43 I_{d\alpha} R_d}{\cos \alpha} = \frac{0,43 \cdot 10 \cdot 10}{\cos 60^\circ} = 86 \text{ В.}$$

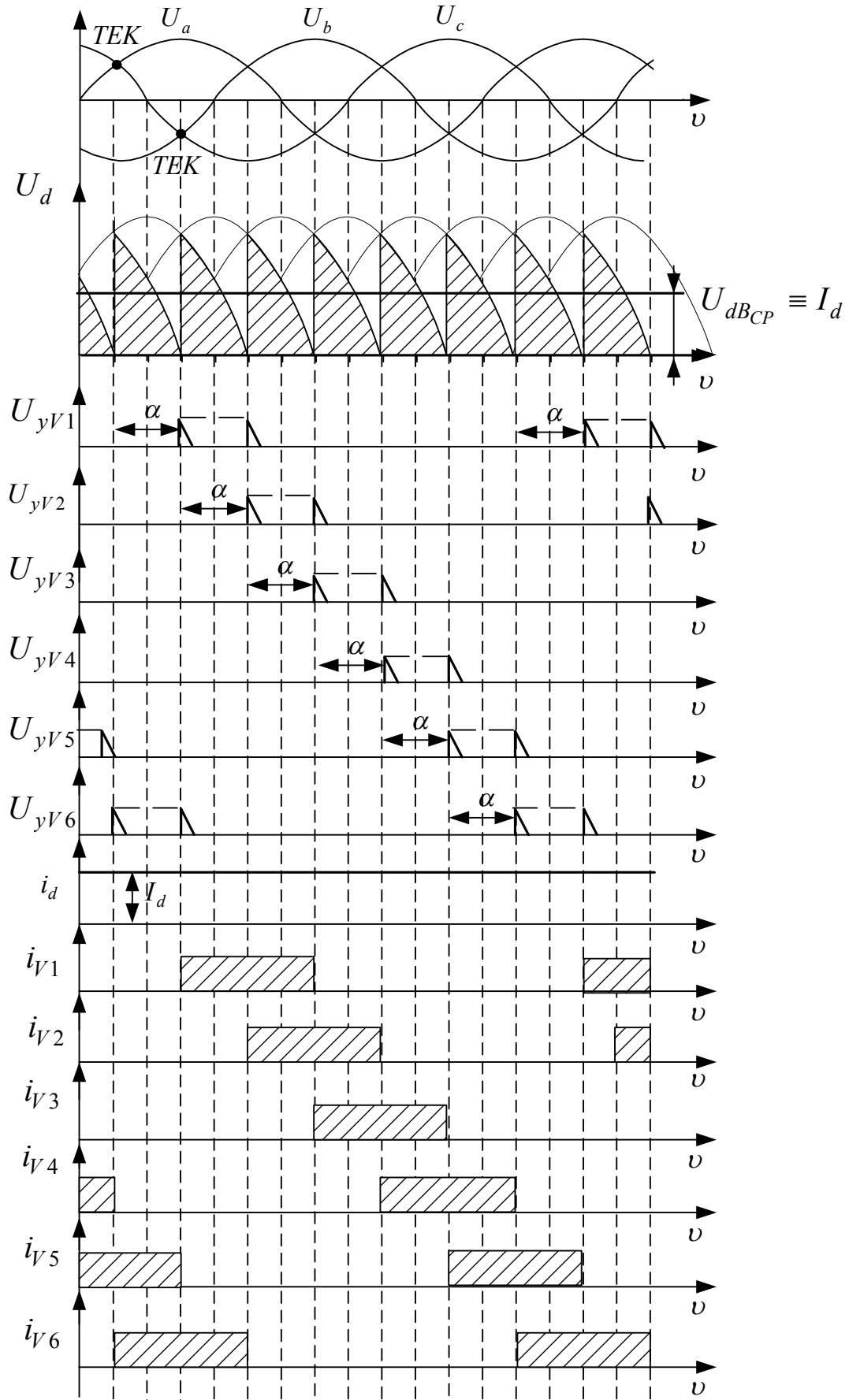


Рис. 23

2.8.3 Определить величину тока, протекающего в активно-индуктивной нагрузке с сопротивлением 5 Ом, подключенной к выходу трехфазного управляемого выпрямителя с нулевой точкой и нулевым диодом. Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора 100В, угол управления тиристорами равен 60° . Потерями в выпрямителе и трансформаторе пренебречь. Представить характерные временные диаграммы напряжений и токов.

1. Формализация задачи.

1.1. Схема — трехфазная нулевая (схема Миткевича) с нулевым диодом, управляемая;

1.2. Нагрузка — активно-индуктивная (т.к. соотношение $\omega L_d / R_d$ не задано, то определяемся с целью упрощения $\omega L_d / R_d \rightarrow \infty$);

1.3. $R_d = 5$ Ом;

1.4. $L_d \rightarrow \infty$;

1.5. $\alpha = 60^\circ$;

1.6. $\Delta U_r = 0$; $\Delta U_x = 0$; $\Delta U_0 = 0$

$I_d = ?$ Построить временные диаграммы.

2. Схема выпрямителя. Не указана схема соединения первичных обмоток трансформатора. Принимаем схему звезда-звезда.

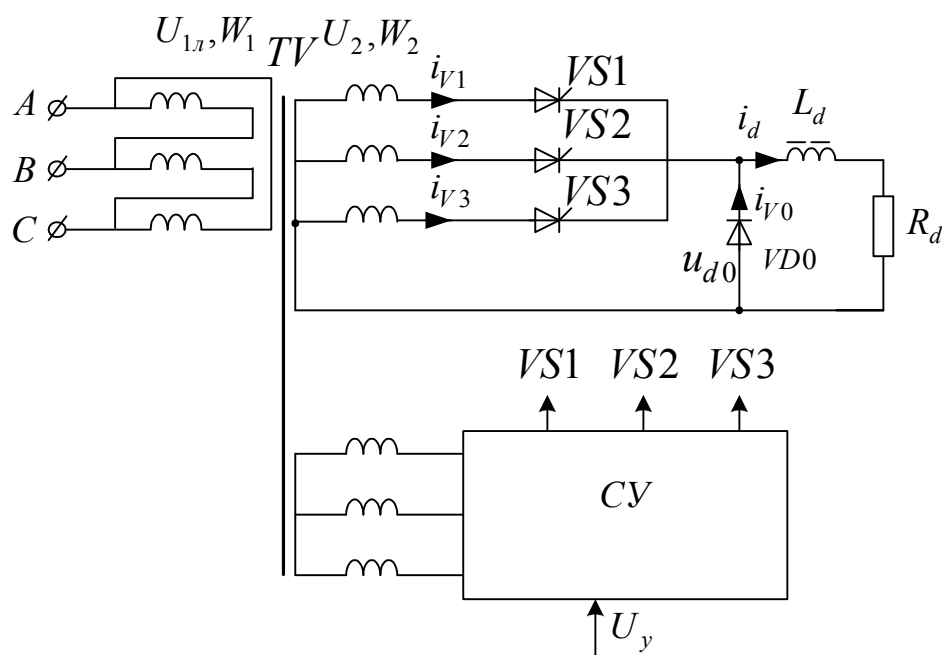


Рис. 24

3. Прокомментируем построение временных диаграмм на рис. 25.

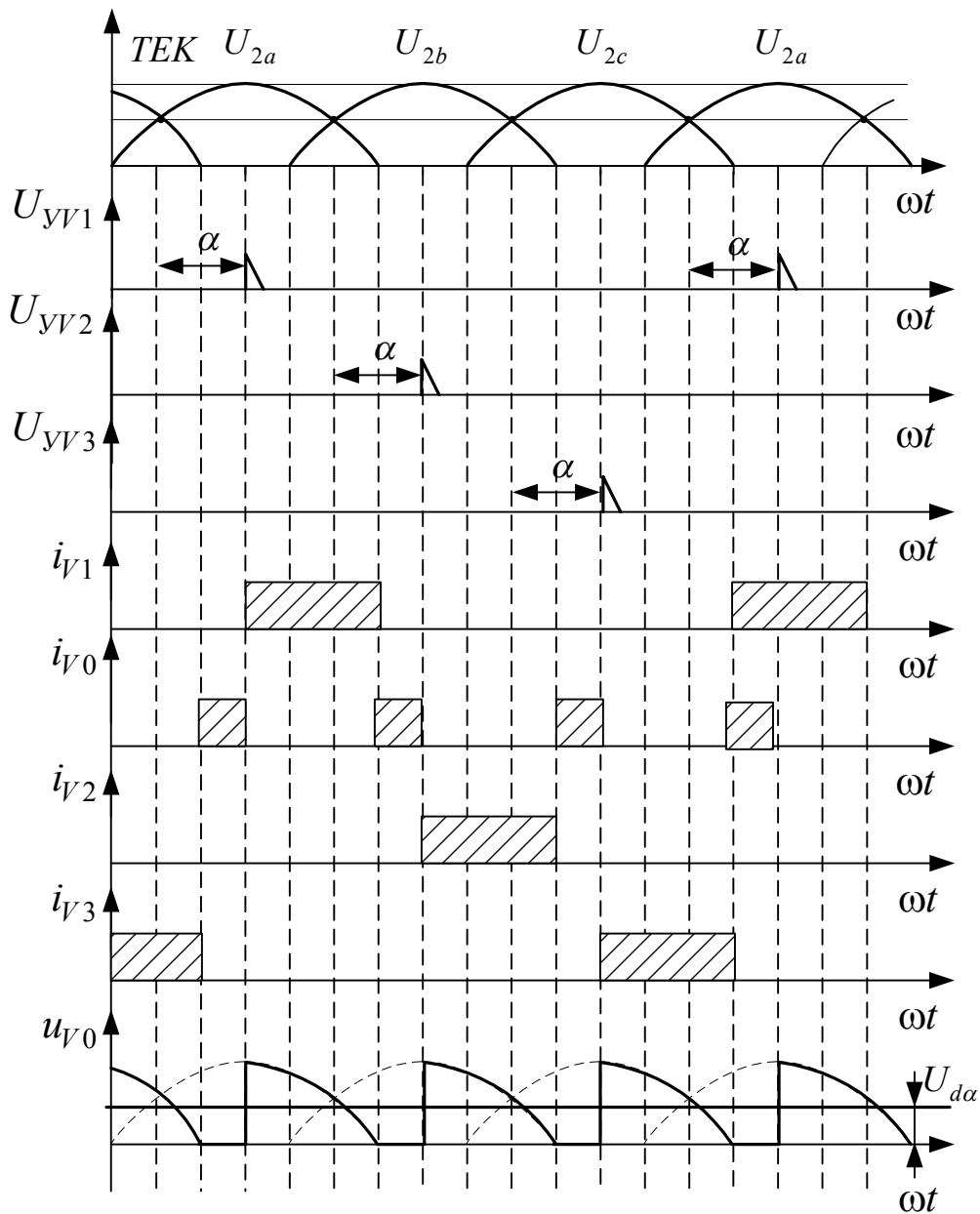


Рис. 25

3.1. Так как выпрямитель однополупериодный с нулевым диодом, то строим только «положительную» часть трехфазной системы фазных напряжений.

3.2. От ТЕК откладываем угол управления $\alpha = 60^\circ$, равный углом управления соответствующих тиристоров.

3.3. При допущении $L_d \rightarrow \infty$ ток вентиляй идеально сглажен. Угол проводимости вентиляй λ изменяется от $\lambda=120^\circ$ при $\alpha=0^\circ$ до $\lambda=0^\circ$ при $\alpha=150^\circ$.

3.4. При переходе фазного напряжения через нуль соответствующий тиристор выключается, а для обеспечения протекания непрерывного тока нагрузки включается «нулевой» диод.

3.5. При этом сумма углов проводимости тиристора λ_{Vi} и диода λ_{V0} равна 120° .

3.6. Напряжение на нулевом диоде U_{V0} представляет собой «положительные» части соответствующих фазных напряжений. А на нагрузке R_d действует его постоянная составляющая $U_{d\alpha}$.

4. Среднее значение выпрямленного напряжения управляемого трехфазного выпрямителя с нулевой точкой и нулевым диодом определяется по выражению для **активной** нагрузки:

$$U_{d\alpha} = \begin{cases} U_{d\alpha} \cdot \cos \alpha, & \text{при } 0^\circ < \alpha < 30^\circ; \\ U_{d0} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right], & \text{при } 30^\circ < \alpha \leq 150^\circ. \end{cases} \quad (1)$$

5. Среднее значение выпрямленного напряжения при $\alpha = 0^\circ$ равно

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}U_2}{2\pi} = \frac{3\sqrt{6} \cdot 100}{2\pi} = 117 \text{ В}. \quad (2)$$

6. Подставляя (2) в (1) при $\alpha > 30^\circ$, получаем

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} \right) \right] = \frac{117}{\sqrt{3}} \left[1 + \cos \frac{\pi}{2} \right] = 67,5 \text{ В}.$$

7. Тогда среднее значение тока нагрузки при угле управления $\alpha = 60^\circ$ определится как

$$I_{d\alpha} = \frac{U_{d\alpha}}{R_d} = \frac{67,5}{5} = 13,5 \text{ А}.$$

2.9 Задачи по инверторам, ведомым сетью (зависимым инверторам)

2.9.1 Однофазный инвертор, ведомый сетью (зависимый инвертор), собранный по схеме с нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора, имеет следующие параметры:

напряжение вторичной обмотки — 150 В;

индуктивность рассеяния фазы трансформатора — $1,6 \cdot 10^{-3}$ Гн;

угол опережения — 25° ;

время восстановления запирающих свойств тиристора не более $300 \cdot 10^{-6}$ сек.

Нарисовать структурную схему инвертора, принципиальную схему силовой цепи и характерные временные диаграммы, определить предельное значение инвертируемого тока.

1. Сделаем основные допущения и доопределения.

В задаче не определены: активное сопротивление трансформатора — принимаем его равным нулю; не указана частота и напряжение сети — для определенности принимаем $U_1 = 220$ В, $f_c = 50$ Гц; величину индуктивности дросселя в цепи постоянного тока принимаем бесконечно большой $L_d \rightarrow \infty$.

2. Тогда задача формализуется следующим образом:

Схема — однофазная, двухполупериодная, со средней (нулевой) точкой;

$$U_1 = 220 \text{ В};$$

$$U_2 = 150 \text{ В};$$

$$L_{\text{стр}} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$r_{\text{тр}} = 0;$$

$$\beta = 25^\circ;$$

$$t_{\text{восст}} = 300 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

$$f_c = 50 \text{ Гц}$$

$I_{d_{\text{пред}}} = ?$ Привести схему инвертора и временные диаграммы

Что изменится, если учесть активное сопротивление дросселя $r_{др} = 0,5 \text{ Ом}$ — ?

3. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы трансформатора

$$X_{Стр} = \omega_c L_{Стр} = 2\pi \cdot f_c \cdot L_{Стр} = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = 0,5 \text{ Ом.}$$

4. Нарисуем схему силовой части инвертора (рис. 26), необходимыми атрибутами которой являются дроссель в цепи постоянного тока и источник постоянного напряжения E_0 , включенный согласно с током таким образом, что он является **источником**, отдающим энергию.

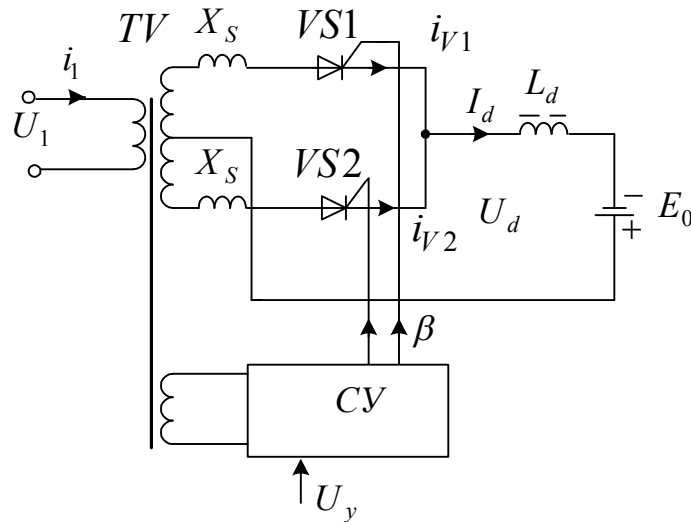


Рис. 26

Так как источником энергии в данном случае служит источник постоянного напряжения, а энергия передается в цепь переменного тока, то силовую схему инвертора можно представить в следующем виде, как показано на рис. 27.

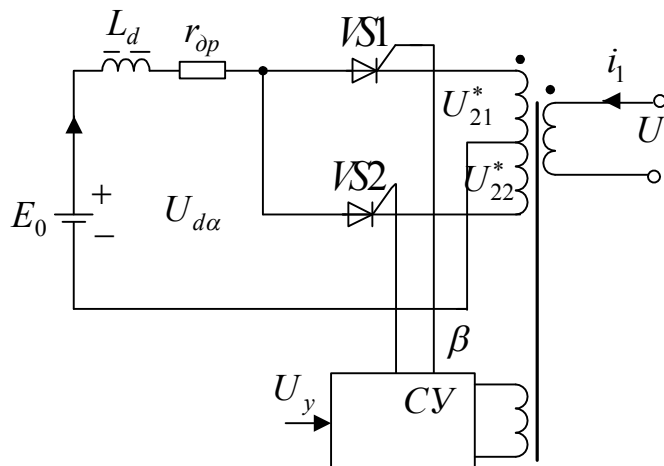


Рис. 27

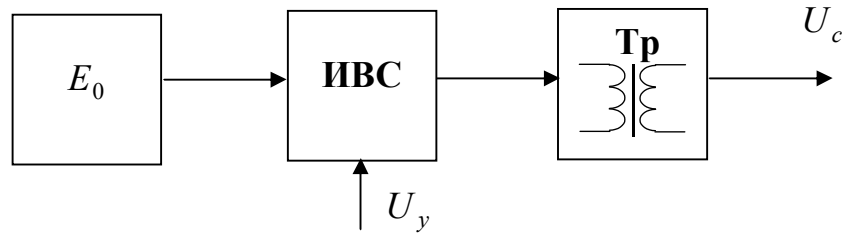


Рис. 28

Соответствующая структурная схема представлена на рис. 28, где E_0 — источник постоянного напряжения;

ИВС — инвертор ведомый сетью;

Тр — сетевой трансформатор.

5. Тиристор, как известно, — полупроводниковый прибор **неполностью управляемый**, и ему требуется предоставлять некоторое время $t_{\text{восст}}$ для восстановления вентильных свойств. В угловой мере времени $t_{\text{восст}}$ соответствует некоторый угол $\delta_{\text{рад}}$ восстановления

$$\delta_{\text{рад.}} = \omega_c \cdot t_{\text{восст.}} = 2\pi f_c \cdot t_{\text{восст.}} = 2\pi \cdot 50 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 0,0942 \text{ рад.}$$

или в градусах

$$\delta = \frac{\delta_{\text{рад.}} \cdot 180^\circ}{\pi} = 5,4^\circ.$$

6. Семейство внешних характеристик управляемого выпрямителя при работе на индуктивную нагрузку представлено на рис. 29 и описывается следующими выражениями

$$U_{d_\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{I_{d_\alpha} \cdot X_{\text{Стр}}}{(2\pi/m_2)} \quad (1)$$

или

$$U_{d_\alpha} = U_{d0} \cdot \left(\frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} \right), \quad (2)$$

где U_{d0} — среднее значение напряжения неуправляемого выпрямителя ($\alpha = 0$);

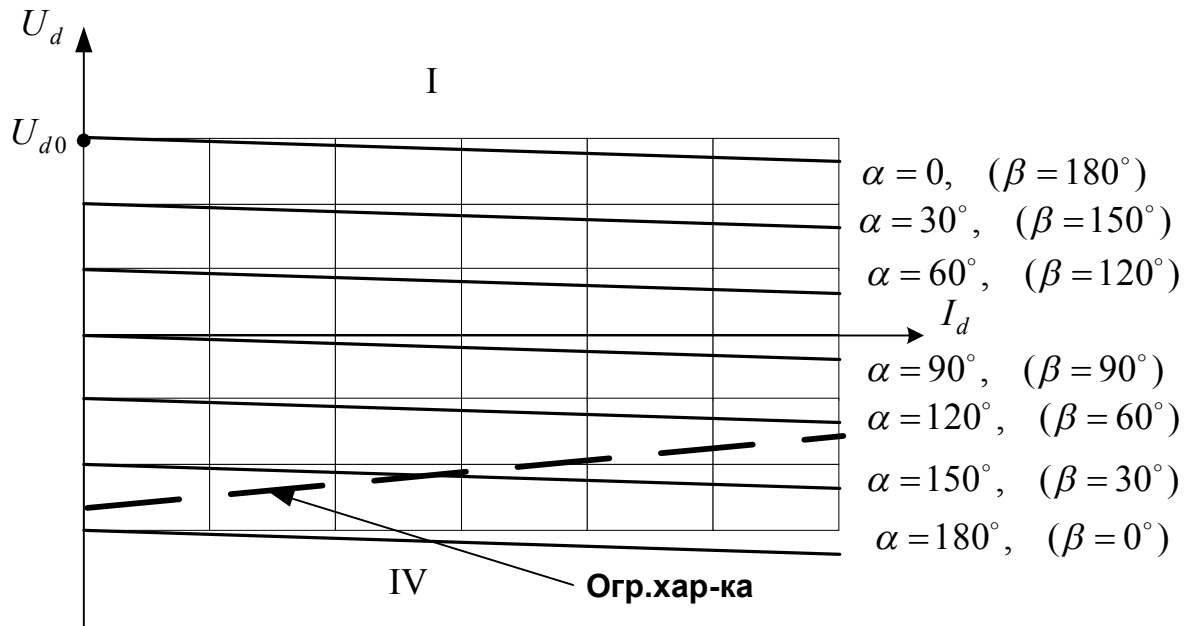


Рис. 29

$$\gamma = \arccos \left\{ \cos \alpha - \frac{I_d \cdot X_{\text{стр}}}{\sqrt{2} U_2} \right\} - \alpha \quad \text{— угол коммутации,} \quad (3)$$

причем для m_2 -фазного выпрямителя с нулевой точкой

$$U_{d0} = \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \frac{m_2}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m_2}. \quad (4)$$

7. При $\alpha > 90^\circ$ выпрямитель меняет знак своего среднего значения напряжения (оно становится отрицательным) при неизменном направлении тока, что свидетельствует о переходе его в режим инвертора, когда он начинает передавать энергию из цепи постоянного тока в цепь переменного тока.

Если создать условия для поддержания тока неизменным, то режим инвертирования будет устойчивым. Условием устойчивости инверторного режима является равенство напряжения источника постоянного напряжения E_0 и выходного напряжения выпрямителя $U_{d\alpha}$ (собственной противо-ЭДС инвертора).

Величина тока $I_{d\alpha}$ в цепи постоянного напряжения, исходя из схемы, может быть выражена следующим образом:

$$I_{d_\alpha} = \frac{E_0 + U_{d_\alpha}}{r_{др}}, \quad (5)$$

или с учетом (1)

$$I_{d_\alpha} = \frac{E_0 + U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{I_{d_\alpha} \cdot X_{Стр}}{(2\pi/m_2)}}{r_{др}} \Rightarrow$$

$$I_{d_\alpha} = \frac{E_0 + U_{d0} \cdot \cos \alpha}{r_{др} + \frac{X_{Стр} \cdot m_2}{2\pi}}. \quad (6)$$

Однако ток I_{d_α} не может быть как угодно большим, так как с его увеличением увеличивается угол коммутации (3). Предельный угол $\gamma_{пред}$ коммутации, соответствующий предельному току $I_{дпред}$, будет равен

$$\gamma_{пред} = \pi - \alpha - \delta. \quad (7)$$

Подставляя $\gamma_{пред}$ и $I_{дпред}$ в (3), получаем

$$\pi - \alpha - \delta = \arccos \left\{ \cos \alpha - \frac{I_{дпред} \cdot X_{Стр}}{\sqrt{2}U_2} \right\} - \alpha.$$

Преобразовываем последнее выражение:

$$\arccos \left\{ \cos \alpha - \frac{I_{дпред} \cdot X_{Стр}}{\sqrt{2}U_2} \right\} = \pi - \delta.$$

Откуда

$$\cos \alpha - \frac{I_{дпред} \cdot X_{Стр}}{\sqrt{2}U_2} = \cos(\pi - \delta).$$

И, наконец,

$$I_{дпред} = \frac{\sqrt{2}U_2}{X_{Стр}} [\cos \alpha - \cos(\pi - \delta)]. \quad (8)$$

9. Подставляя численные значения в (8), получаем предельный ток инвертора

$$I_{d_{\text{пред}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 150}{0,5} [\cos(180^\circ - 25^\circ) - \cos(180^\circ - 5,4^\circ)] = \\ = 424,3 [-0,906 + 0,996] = 38 \text{ А.}$$

10. Численное значение U_{d0} найдем по (4):

$$U_{d0} = \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \frac{m_2}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m_2} = \sqrt{2} \cdot 150 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{2} = 135 \text{ В.}$$

11. Зная предельный ток $I_{d_{\text{пред}}}$ и U_{d0} и $\alpha = 180^\circ - \beta$, из (6) можно найти ЭДС источника E_0 постоянного напряжения:

$$E_0 = I_{d_{\text{пред}}} \left(r_{\text{др}} + \frac{X_{\text{Стр}} \cdot m_2}{2\pi} \right) - U_{d0} \cdot \cos \alpha = \\ = 38 \left(0 + \frac{0,5 \cdot 2}{2\pi} \right) - 135 \cdot \cos(180^\circ - 25^\circ) = 6 + 122,35 = 128,4 \text{ В.}$$

12. Подставляем $I_{d_{\text{пред}}}$ из (8) в (1) получим

$$U_{d_{\alpha \text{ пред}}} = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{\sqrt{2} U_2}{X_{\text{Стр}}} [\cos \alpha - \cos(\pi - \delta)] \cdot \frac{X_{\text{Стр}}}{(2\pi/m_2)} = \\ = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \sqrt{2} U_2 \frac{m_2}{2\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi - \delta)] = \\ = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{U_{d0}}{2} \cdot \cos \alpha + \frac{U_{d0}}{2} \cdot \cos(\pi - \delta) = \\ = \frac{U_{d0}}{2} \cdot \cos \alpha + \frac{U_{d0}}{2} \cdot \cos(\pi - \delta).$$

Или окончательно имеем:

$$U_{d_{\alpha \text{ пред}}} = \frac{U_{d0}}{2} \cdot [\cos \alpha + \cos(\pi - \delta)]. \quad (9)$$

Таким образом, получим систему уравнений (8) и (9):

$$\left. \begin{aligned} I_{d_{\text{пред}}} &= \frac{\sqrt{2}U_2}{X_{\text{Стр}}} [\cos \alpha - \cos(\pi - \delta)]; \\ U_{d_{\alpha \text{ пред}}} &= \frac{U_{d0}}{2} \cdot [\cos \alpha + \cos(\pi - \delta)]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Исключая $\cos \alpha$, получим

$$U_{d_{\alpha \text{ пред}}} = \frac{U_{d0}}{2} \cdot \left[\frac{I_{d_{\text{пред}}} \cdot X_{\text{Стр}}}{\sqrt{2}U_2} + \cos(\pi - \delta) \right] + \frac{U_{d0}}{2} \cdot \cos(\pi - \delta).$$

Или окончательно

$$U_{d_{\alpha \text{ пред}}} = U_{d0} \cdot \cos(\pi - \delta) + \frac{I_{d_{\text{пред}}} \cdot X_{\text{Стр}} \cdot U_{d0}}{\sqrt{2}U_2 \cdot 2}.$$

Откуда

$$\boxed{U_{d_{\alpha \text{ пред}}} = U_{d0} \cdot \cos(\pi - \delta) + \frac{I_{d_{\text{пред}}} \cdot X_{\text{Стр}}}{\left(\frac{2\pi}{m_2}\right)}}. \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой ограничительную (предельную) характеристику инвертора, ведомого сетью, которая представлена на рис. 29 пунктиром.

13. Зная эту характеристику, решение можно найти формально проще. Действительно, судя по графику рис. 29, предельный ток можно найти как точку пересечения ограничительной характеристики и входной (внешней).

Из выражения (1)

$$U_{d_{\alpha}} = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{I_{d_{\alpha \text{ пред}}} \cdot X_{\text{Стр}}}{(2\pi/m_2)} = U_{d_{\alpha \text{ пред}}}.$$

Из выражения (11)

$$U_{d_{\alpha \text{ пред}}} = U_{d0} \cdot \cos(\pi - \delta) + \frac{I_{d_{\alpha \text{ пред}}} \cdot X_{\text{Стр}}}{\left(\frac{2\pi}{m_2}\right)}.$$

Откуда получаем

$$U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{I_{d_{\alpha \text{ пред}}} \cdot X_{\text{Стр}}}{\left(\frac{2\pi}{m_2}\right)} = U_{d0} \cdot \cos(\pi - \delta) + \frac{I_{d_{\alpha \text{ пред}}} \cdot X_{\text{Стр}}}{\left(\frac{2\pi}{m_2}\right)};$$

$$I_{d_{\text{пред}}} = \frac{U_{d0} \cdot 2\pi}{2X_{\text{Стр}} \cdot m_2} [\cos \alpha - \cos(\pi - \delta)]. \quad (12)$$

Подставляя в (12) численные значения величин, получим

$$I_{d_{\text{пред}}} = \frac{135 \cdot 2\pi}{2 \cdot 0,5 \cdot 2} [\cos 155^\circ - \cos 174,6^\circ] = 38 \text{ А.}$$

Естественно, что предельное значение инвертируемого тока осталось тем же самым.

14. Что же изменится, если учитывать или не учитывать активное сопротивление дросселя?

Как показывает выражение (8), предельное значение тока не зависит от $r_{\text{др}}$, так как оно определяется только условиями коммутации.

Из выражения (6) следует, что изменится величина инвертируемого тока:

$$I_{d_{\alpha}} = \frac{E_0 + U_{d0} \cdot \cos \alpha}{r_{\text{др}} + \frac{X_{\text{Стр}} \cdot m_2}{2\pi}} = \frac{E_0 - U_{d0} \cdot \cos \beta}{r_{\text{др}} + \frac{X_{\text{Стр}} \cdot m_2}{2\pi}} =$$

$$= \frac{147,35 - 135 \cdot \cos 25^\circ}{0,5 + \frac{0,5 \cdot 2}{2\pi}} = \frac{128,39 - 122,35}{0,5 + 0,159} = 9,2 \text{ А.}$$

15. Увеличением угла управления β или увеличением величины напряжения источника постоянного тока инвертируемый ток можно увеличить, но при этом следует обратить внимание, что потери мощности в дросселе равны

$$\Delta P_{\text{др}} = I_{d_{\alpha}}^2 \cdot r_{\text{др}} = 9,2^2 \cdot 0,5 = 42 \text{ Вт};$$

при предельном токе возрастут до

$$\Delta P_{\text{др пред}} = I_{d_{\alpha \text{ пред}}}^2 \cdot r_{\text{др}} = 38^2 \cdot 0,5 = 722 \text{ Вт},$$

что неприемлемо и нужно, соответственно, уменьшать активное сопротивление дросселя.

16. Временные диаграммы инвертора представлены на рис. 30. Прокомментируем построение временных диаграмм.

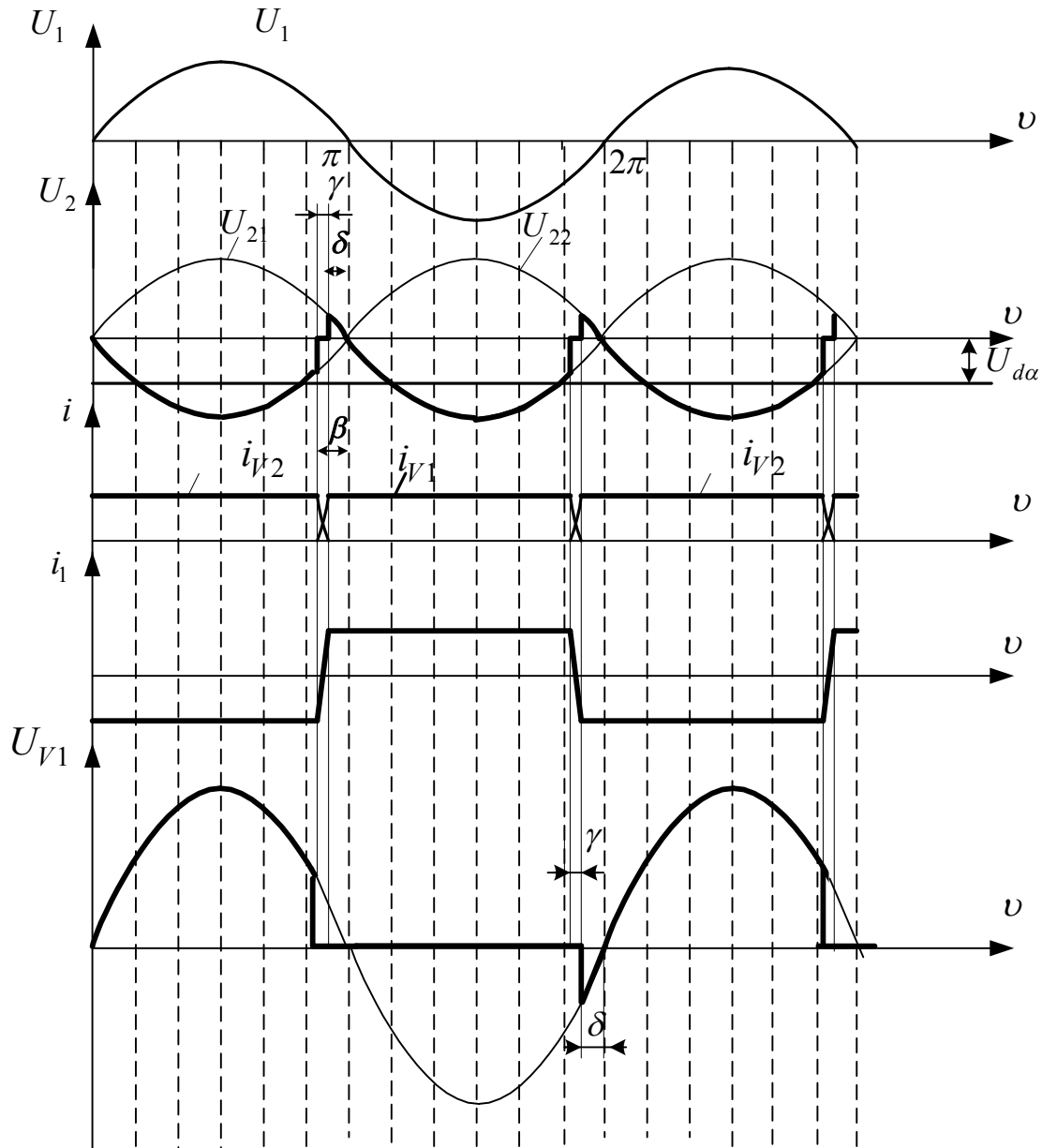


Рис. 30

16.1. Строим синусоидальное напряжение сети U_1 и синусоидальные вторичные напряжения U_{21} и U_{22} , сдвинутые друг относительно друга на 180° .

16.2. От точки естественной коммутации (ТЕК), для однофазного преобразователя это точка перехода через нуль сетевого напряжения, влево откладываем угол опережения $\beta=25^\circ$. Уместно вспомнить, что угол управления α откладывается вправо от ТЕК.

16.3. Поскольку преобразователь работает в инверторном режиме, то его напряжение по сравнению с выпрямительным режимом отрицательное. Значит, это будет «отрицательная» часть U_{21} и U_{22} .

16.4. При допущении, что дроссель в цепи постоянного тока бесконечно велик, токи в тиристорах идеально сглажены.

16.5. После включения очередного тиристора наблюдается интервал коммутации — γ -интервал, в котором ток включающегося тиристора нарастает до тока нагрузки, а выключающегося — уменьшается до нуля.

16.6. Ток первичной обмотки (ток сети) находится как разность токов тиристоров

$$i_1 = \frac{1}{K_{\text{тр}}} (i_{V1} - i_{V2}).$$

16.7. Из диаграммы тока сети i_1 видно, что при положительном напряжении сети ток отрицательный. Это говорит о том, что сеть является приемником энергии.

16.8. Напряжение на тиристоре VS1 почти всегда положительно и становится отрицательным только после интервала коммутации γ в течение угла δ , который называется углом, предоставляемым тиристором для восстановления вентильных свойств.

3 ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов Б.И. Основы преобразовательной техники: Учебное пособие для студентов заочного факультета. — Томск: ТУСУР, 2006. — 160 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебное пособие для вузов. — Новосибирск: НГТУ, 2003. — 651 с.
3. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. — М.: Высшая школа, 1980. — 424 с.
4. Ковалев Ф.И., Мосткова Г.П. Полупроводниковые выпрямители. — М.: Энергия, 1978. — 446 с.
5. Розанов Ю.К. Основы силовой Электроники. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 295 с.
6. Малогабаритные трансформаторы и дроссели: Справочник / И.Н. Сидоров и др. — М.: Радио и связь, 1985. — 416 с.
7. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / В.П. Берзан и др.; Под ред. Г.С. Кучинского. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 565 с.
8. Полупроводниковые приборы: Диоды выпрямительные. Стабилитроны. Тиристоры. Справочник / А.Б. Гитчевич и др.; Под ред. А.В. Голомедова. — М.: Радио и связь, 1989. — 526 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Схемы выпрямителей

Однофазная однополупериодная
с активной нагрузкой

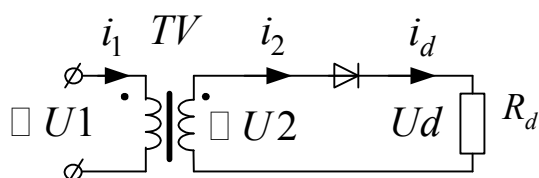


Рис. 1

Однофазная однополупериодная
с емкостной нагрузкой

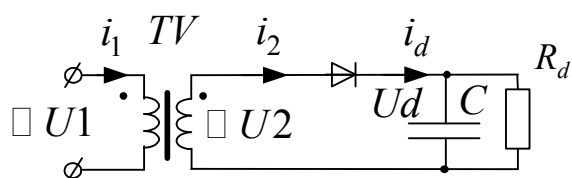


Рис. 2

Однофазная с выводом средней
точки трансформатора
на активную нагрузку

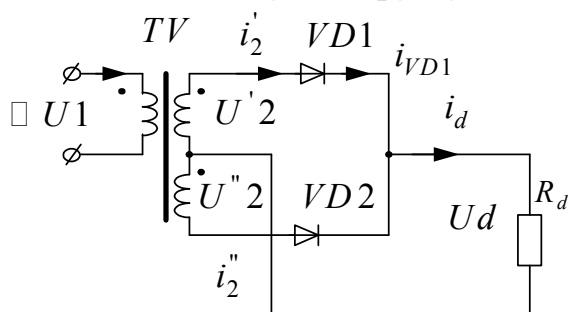


Рис. 3

Однофазная с выводом средней
точки трансформатора на индук-
тивную нагрузку

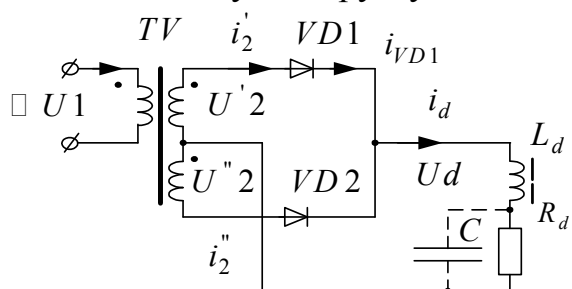


Рис. 4

Однофазная с выводом средней
точки трансформатора
на емкостную нагрузку

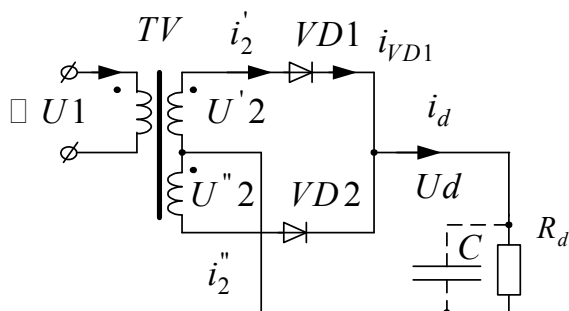


Рис. 5

Однофазная мостовая (схема Греча)
на активную нагрузку

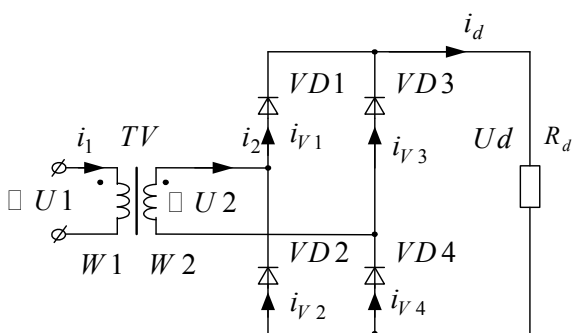


Рис. 6

Продолжение приложения 1

Однофазная мостовая
(схема Греча)
на индуктивную нагрузку

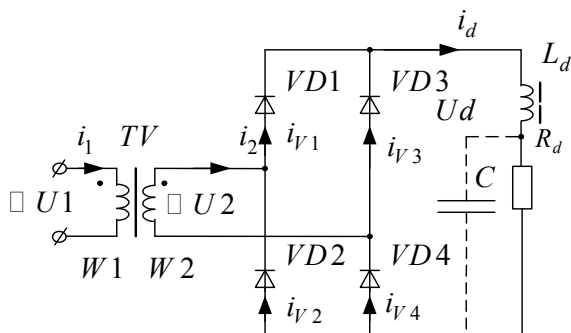


Рис. 7

Однофазная мостовая
(схема Греча)
на емкостную нагрузку

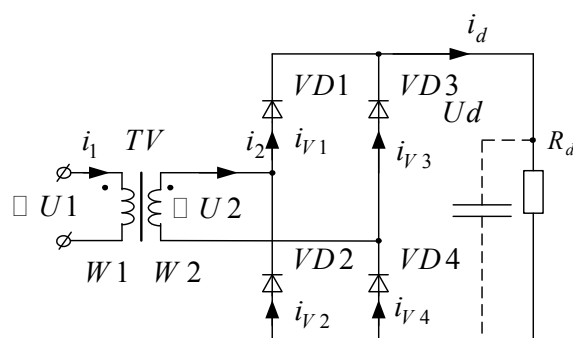


Рис. 8

Схема Латура (однофазная полумостовая) с емкостной реакцией нагрузки

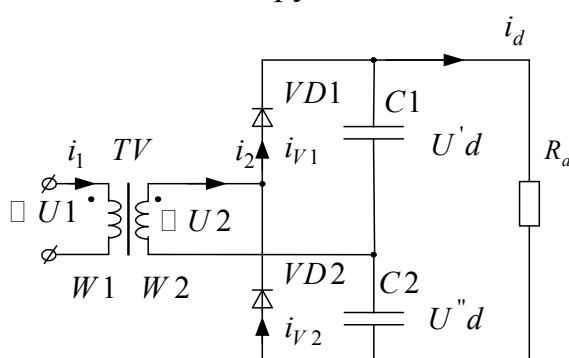


Рис. 9

Схема Миткевича (трехфазная нулевая соединение обмоток звезда-звезда)

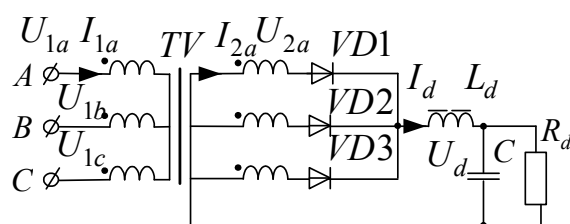


Рис. 10

Схема Миткевича (трехфазная нулевая соединение обмоток треугольник-звезда)

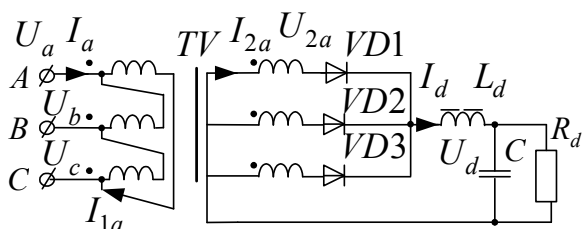


Рис. 11

Шестифазная нулевая при соединении первичных обмоток треугольником и активной нагрузке

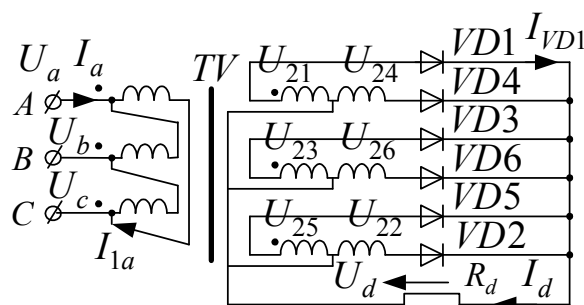


Рис. 12

Окончание приложения 1

Шестифазная нулевая при соединении первичных обмоток треугольником и индуктивной нагрузке

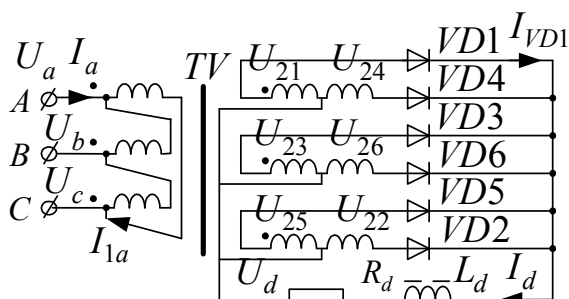


Рис. 13

Шестифазная нулевая при соединении первичных обмоток звездой и индуктивной нагрузке

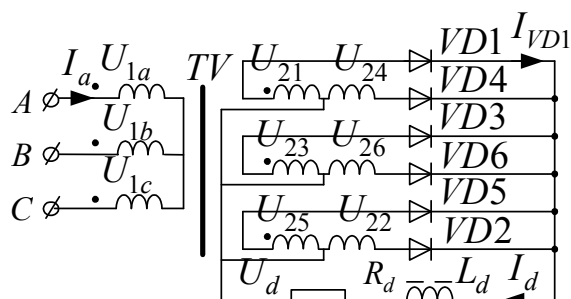


Рис. 14

Схема Ларионова (трехфазная мостовая по схеме звезда-звезда)

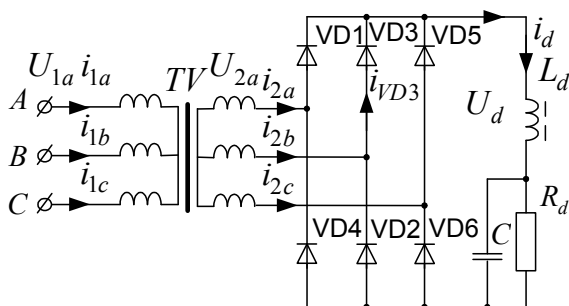


Рис. 15

Схема Ларионова (трехфазная мостовая по схеме треугольник-звезда)

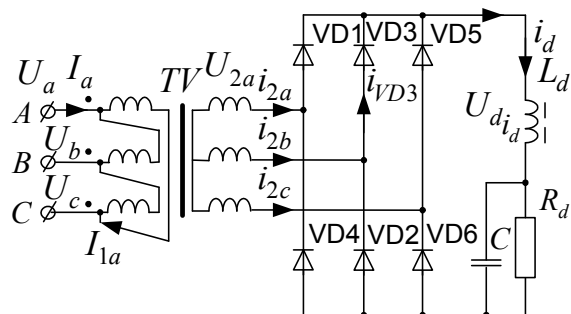


Рис. 16

Схема Ларионова (трехфазная мостовая по схеме звезда-треугольник)

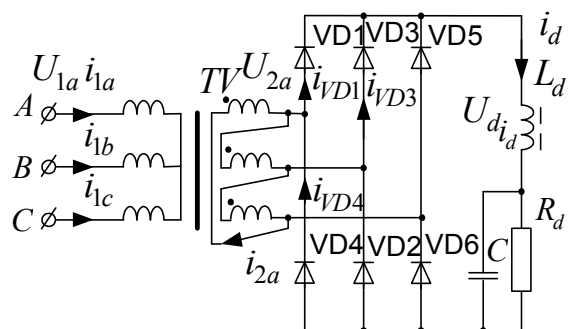


Рис. 17

Схема Ларионова (трехфазная мостовая по схеме треугольник-треугольник)

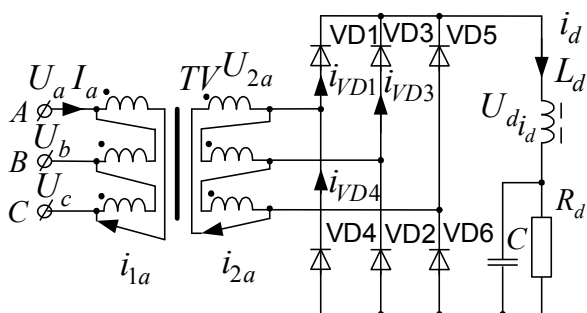


Рис. 18

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Название схемы номер рисунка из Приложение 1	Характер на- грузки	Трансформатор							Вентильный комплект				Фильтр		
		$\frac{U_{2\text{эф}}}{U_d}$	$\frac{I_{2\text{эф}}}{I_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_{1\text{эф}} \cdot n}{I_d}$	$\frac{P_{\text{тр}}}{P_d}$	$\frac{P_2}{P_d}$	$\frac{P_1}{P_d}$	$\frac{U_{\text{мобр}}}{U_d}$	$\frac{I_{V\text{эф}}}{I_d}$	$\frac{I_{Vm}}{I_d}$	$\frac{I_V}{I_d}$	m_{Π}	$f_1, \text{Гц}$	$\kappa_{\Pi}, \%$
Однофазная рис. 1 однополупери- одная рис. 2	R	2,22	1,57	1	1,21	3,09	3,48	2,69	3,14	1,57	3,14	1	1	<i>fc</i>	157
		2,45	1,5	1	1,15	3,25	3,66	2,83	3,45	1,5	3,14	1	1	<i>fc</i>	157
	C	0,707	–	1	–	–	–	–	2	–	–	1	1	<i>fc</i>	–
		1,09	2,09	1	1,84	2,13	2,27	2	3,08	2,09	6	1	1	<i>fc</i>	–
Однофазная со рис. 3 средней точкой рис. 4 рис. 5	R	1,11	0,785	0,5	1,11	1,48	1,74	1,23	3,14	0,785	1,57	0,5	2	<i>2fc</i>	66,7
		1,22	0,75	0,5	1,06	1,56	1,82	1,29	3,45	0,75	1,57	0,5	2	<i>2fc</i>	70
	L	1,11	0,707	0,5	1	1,34	1,57	1,11	3,14	0,707	1	0,5	2	<i>2fc</i>	66,7
		1,22	0,67	0,5	0,95	1,41	1,65	1,17	3,45	0,67	1	0,5	2	<i>2fc</i>	70
	C	0,707	–	0,5	–	–	–	–	2	–	–	0,5	2	<i>2fc</i>	–
		0,93	1,15	0,5	1,63	1,83	2,14	1,52	2,63	1,15	3,4	0,5	2	<i>2fc</i>	–
Схема Греца рис. 6 однофазная рис. 7 мостовая рис. 8	R	1,11	1	0	1	1,11	1,11	1,11	1,57	0,707	1	0,5	2	<i>2fc</i>	66,7
		1,22	0,95	0	0,95	1,17	1,17	1,17	1,72	0,67	1	0,5	2	<i>2fc</i>	70
	L	1,11	1,11	0	1,11	1,23	1,23	1,23	1,57	0,785	1,57	0,5	2	<i>2fc</i>	66,7
		1,22	1,06	0	1,06	1,29	1,29	1,29	1,72	0,75	1,57	0,5	2	<i>2fc</i>	70
	C	0,707	–	0	–	–	–	–	1	–	–	0,5	2	<i>2fc</i>	–
		0,93	1,63	0	1,63	1,52	1,52	1,52	1,32	1,15	3,4	0,5	2	<i>2fc</i>	–

Примечание: величины в строках «курсив» для выпрямителей с потерями.

Продолжение приложения 2

Название схемы номер рисунка из Приложение 1	Характер на- грузки	Трансформатор							Вентильный комплект				Фильтр		
		$\frac{U_{2\text{эф}}}{U_d}$	$\frac{I_{2\text{эф}}}{I_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_{1\text{эф}} \cdot n}{I_d}$	$\frac{P_{\text{тр}}}{P_d}$	$\frac{P_2}{P_d}$	$\frac{P_1}{P_d}$	$\frac{U_{\text{мобр}}}{U_d}$	$\frac{I_{V\text{эф}}}{I_d}$	$\frac{I_{V\text{м}}}{I_d}$	$\frac{I_V}{I_d}$	m_{Π}	$f_1, \Gamma_{\text{ц}}$	$\kappa_{\Pi}', \%$
Схема Латура (однофазная полумостовая) рис.9	C	0,35	–	0	–	–	–	–	1	–	–	1	2	$2fc$	–
		0,54	2,95	0	2,95	1,59	1,59	1,59	1,54	2,09	6	1	2	2fc	–
Схема Миткевича (трехфазная нулевая звезда-звезда) рис.10	R	0,855	0,59	0,33	0,48	1,36	1,5	1,23	2,09	0,59	1,21	0,33	3	$3fc$	25
		0,94	0,56	0,33	0,46	1,43	1,58	1,29	2,3	0,56	1,21	0,33	3	3fc	33
	L	0,855	0,598	0,33	0,47	1,34	1,48	1,21	2,09	0,58	1	0,33	3	$3fc$	25
		0,94	0,55	0,33	0,45	1,41	1,56	1,27	2,3	0,55	1	0,33	3	3fc	33
	C	0,71	–	0,33	–	–	–	–	2	–	–	0,33	3	$3fc$	–
		0,88	0,8	0,33	0,72	2,01	2,11	1,92	2,5	0,8	2,5	0,33	3	3fc	–
Схема Миткевича (трехфазная нулевая треугольник-звезда) рис.11	R	Справедливы соотношения, приведенные для схемы рис. 10													
	L	Справедливы соотношения, приведенные для схемы рис. 10													
	C	Справедливы соотношения, приведенные для схемы рис. 10													

Окончание приложения 2

Название схемы номер рисунка из Приложение 1	Характер на- грузки	Трансформатор							Вентильный комплект				Фильтр		
		$\frac{U_{2\text{эф}}}{U_d}$	$\frac{I_{2\text{эф}}}{I_d}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_{1\text{эф}} \cdot n}{I_d}$	$\frac{P_{\text{тр}}}{P_d}$	$\frac{P_2}{P_d}$	$\frac{P_1}{P_d}$	$\frac{U_{\text{мобр}}}{U_d}$	$\frac{I_{V\text{эф}}}{I_d}$	$\frac{I_{Vm}}{I_d}$	$\frac{I_V}{I_d}$	m_{Π}	$f_1, \text{Гц}$	$\kappa_{\Pi}, \%$
Схема Ларионова (трехфазная мостовая звезда-звезда) рис.15	R	0,43	0,82	0	0,82	1,05	1,05	1,05	1,047	0,58	1,05	0,33	6	6fc	5,7
		0,47	0,78	0	0,78	1,1	1,1	1,1	1,15	0,55	1,1	0,33	6	6fc	8
	L	0,43	0,82	0	0,82	1,05	1,05	1,05	1,047	0,58	1	0,33	6	6fc	5,7
		0,47	0,78	0	0,78	1,1	1,1	1,1	1,15	0,55	1	0,33	6	6fc	8
	C	0,41	—	0	—	—	—	—	1	—	—	0,33	6	6fc	—
		0,467	0,92	0	0,92	—	—	—	1,15	0,65	1,66	0,33	6	6fc	70
Схема Ларионова (треугольник- звезда) рис.16	R	Справедливы соотношения, приведенные для схемы рис. 15													
	L	Справедливы соотношения, приведенные для схемы рис. 15													
Схема Ларионова (треугольник- треугольник) рис.18	L	0,74	0,47	0	0,47	1,05	1,05	1,05	1,047	0,58	1	0,33	6	6fc	5,7
		0,82	0,45	0	0,45	1,1	1,1	1,1	1,15	0,55	1	0,33	6	6fc	8

Список основной литературы

1. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / Мелешин В.И., Овчинников Д.А.— М.: Техносфера, 2011.— 576 с.— [Электронный ресурс]
2. Семенов Б.Ю. Силовая электроника. Профессиональные решения / Семенов Б.Ю.— М.: ДМК Пресс, 2011.— 416 с [Электронный ресурс]
3. Джеймс Рег Промышленная электроника / Джеймс Рег— М.: ДМК Пресс, 2011.— 1136 с [Электронный ресурс]

Список дополнительной литературы

1. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : полный курс : учебное пособие / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкий, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. - М. : Горячая Линия - Телеком, 2002. - 768 с. - Библиогр.: с. 763. - ISBN 5-93517-002-7.
2. Лачин, В. И. Электроника : учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. - 4-е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д : Феникс, 2010. - 572 с. : ил. - (Высшее образование). - Библиогр. с. 565. - ISBN 5-222-02718-X
3. Горбачёв, Г. Н. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. Н. Горбачёв, Е. Е. Чаплыгин ; под ред. В. А. Лабунцова. - М. : Энергоиздат, 1988. - 320 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 314-315. - Предм. указ.: с. 315-318. - ISBN 5-283-00517-8
4. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1991. - 622 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Прил.: с. 610-614. - Библиогр.: с. 615-616. - Предм. указ.: с. 617-619. - ISBN 5-06-00
5. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. - М. : Высш. шк., 1982. - 496 с. : ил. - Библиогр.: с. 486-488. - Предм. указ.: с. 480-494
6. Грабовецкий Г.В. Непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией для электромеханических систем: учебное пособие / Грабовецкий Г.В., Куклин О.Г., Харитонов С.А.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2009.— 376 с [Электронный ресурс]
7. Редди, С. Р. Основы силовой электроники / С. Рама Редди ; пер. с англ. В. В. Маслова ; под ред. Д. П. Приходько. — М. : Техносфера, 2006. — 288 с. : ил. — Библиогр.: с. 287. — ISBN 5-94836-055-5. — ISBN 1-84265-056-4(англ.)
8. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.

ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

по направлению подготовки

11.03.04 Электроника и наноэлектроника
профиль
Промышленная электроника

Составитель: Дюдюн Дмитрий Евгеньевич

Редактор: _____

Формат _____	Подписано в печать _____	Уч.-изд. л. – ____.
Бумага _____.	Усл. п. л. – ____	Заказ _____
Печать _____.	Тираж ____ экз.	

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

Издательство Северо-Кавказского федерального университета
Отпечатано в типографии СКФУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»
для студентов направления подготовки
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
Направленность (профиль)
«Интеллектуальные программируемые системы и устройства»)

Ставрополь
2026

Печатается по решению
Учебно-методического совета
Северо-Кавказского федераль-
ного университета

УДК
ББК

Дюдюн Д.Е. Основы преобразовательной техники: методические указания для студентов по организации самостоятельной работы. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 202_. – _ с.

Настоящие методические рекомендации предназначены для организации самостоятельной работы по дисциплине «Основы преобразовательной техники» для студентов очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль Интеллектуальные программируемые системы и устройства. В методических рекомендациях приведён план график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, представлены вопросы для обсуждения, а также задания и вопросы для формирования и контроля владения компетенциями и список основной литературы, рекомендуемой для самостоятельной работы. Представленный список дополнительной литературы, позволяющий студентам более глубоко познакомиться с изучаемым предметом.

Методические рекомендации к самостоятельной работе студентов составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль Интеллектуальные программируемые системы и устройства, рабочими учебными планами и программами дисциплины «Основы преобразовательной техники».

УДК
ББК

© ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет», 202_

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»	5
1.1 Цель и задачи самостоятельной работы студентов	5
1.2 Тематика выполнения СРС, указания по форме контроля	9
2 ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС	11
3 КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ВИДЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО НИМ.....	12
4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К СРС	12
4.1 Работа с литературой	12
4.2 Критерии оценки для проверки уровня обученности в рамках текущего контроля.....	20
5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	22
5.1 Основная литература.....	22
5.2. Дополнительная литература:.....	22

Введение

Современные стандарты подготовки специалистов предусматривают значительный объем внеаудиторной работы. Освоение программы курса предполагает получение как теоретических знаний по проблемам преобразовательной техники, так и формирование навыков практической работы. Поэтому самостоятельная работа в рамках курса ориентирована как на теоретический, так и на практический аспект.

Самостоятельная работа студентов – это выполнение теоретических и практических заданий студентами по усвоению изучаемой дисциплины «Основы преобразовательной техники».

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»

1.1 Цель и задачи самостоятельной работы студентов

Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний, полученных студентами на лекциях, подготовке к текущим лабораторным и практическим занятиям, промежуточным формам контроля знаний и к итоговому контролю.

Дидактические цели самостоятельных занятий:

- формирование профессиональных умений;
- формирование умений и навыков самостоятельного умственного труда;
- мотивирование регулярной целенаправленной работы по освоению специальности;
- развитие самостоятельности мышления;
- формирование убежденности, волевых черт характера, способности к самоорганизации;
- овладение технологическим учебным инструментом.

Задача самостоятельной работы студентов – систематическое изучение дисциплин в течение семестра, закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовка к предстоящим занятиям, а также формирование культуры умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний и умений, и, в том числе, формирование компетенций.

Основная тенденция инноваций в области образования определяется как переход от «научения к изучению»

Именно систематическое изучение учебной дисциплины позволяет студенту достигнуть уровня требований федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) к профессиональной подготовленности, которые сформулированы следующим образом: знать, уметь, владеть.

В современной науке существует несколько классификаций самостоятельной работы студентов. Один из вариантов такой классификации представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Виды самостоятельной работы студентов

Виды	Содержание
Репродуктивная	Повторение учебного материала, самостоятельный просмотр, прочтение, конспектирование учебной литературы; прослушивание, запоминание, заучивание и пересказ магнитофонных записей лекций, Интернет-ресурсы и др.
Познавательная-поисковая	Написание курсовых, контрольных работ и рефератов. Разработка сообщений, эссе, докладов, докладов с презентациями. Подготовка выступлений на практических и семинарских занятиях, проработка литературы по дисциплинарным проблемам, и др.
Творческая	Подготовка дипломной работы (дипломного проекта), научных статей, рефератов, участие в научно-исследовательской работе, в студенческих и научно-практических конференциях.

Студенты в ходе выполнения самостоятельной работы должны руководствоваться ориентировочной основой деятельности на каждом этапе:

- 1 этап – определить цели самостоятельной работы;
- 2 этап – конкретизировать познавательные (практические или проблемные) задачи;
- 3 этап – оценить собственную готовность к самостоятельной работе по решению познавательных задач;
- 4 этап – выбрать оптимальный способ действий (технологии, методы и средства), ведущий к достижению поставленной цели через решение конкретных задач;
- 5 этап – спланировать (самостоятельно или с помощью преподавателя) программу самостоятельной работы;
- 6 этап – реализовать программу самостоятельной работы.

Планирование и контроль преподавателем самостоятельной работы студентов необходим для успешного ее выполнения. Преподаватель заранее планирует систему самостоятельной работы, учитывает все ее цели, формы, отбирает учеб-

ную и научную информацию и методические средства коммуникаций, продумывает свое участие и роль студента в этом процессе.

Вопросы для самостоятельной работы студентов, указанные в рабочей программе дисциплины, предлагаются преподавателями в начале изучения дисциплины. Студенты имеют право выбирать дополнительно интересующие их темы для самостоятельной работы.

Содержание деятельности преподавателя и студента при выполнении самостоятельной работы представлено в табл. 2.

Таблица 2.

Содержание деятельности при выполнении самостоятельной работы

Основные характеристики	Деятельность преподавателя	Деятельность студентов
Цель выполнения СР	• объяснить смысл и цель самостоятельной работы; • дать подробный инструктаж о требованиях, предъявляемых к самостоятельной работе и методах ее выполнения; • продемонстрировать образец самостоятельной работы	• понять и принять цель самостоятельной работы как лично значимую; • познакомиться с требованиями и образцами самостоятельной работы
Мотивация	• раскрыть теоретическую и практическую значимость выполнения самостоятельной работы, • сформировать познавательную потребность студента и готовность к выполнению самостоятельной работы; • мотивировать студента на достижение цели	• сформировать у себя познавательную потребность в выполнении самостоятельной работы; • сформировать целевую установку и принять решение о выполнении самостоятельной работы
Управление	• осуществлять управление через воздействие на каждом этапе процесса выполнения самостоятельной работы; • дать оптимальные технологии выполнения самостоятельной работы	самому осуществлять управление самостоятельной работой (проектировать, планировать, рационально распределять время и т.д.) на основе предложенных технологий

Продолжение таблицы2

Основные характеристики	Деятельность преподавателя	Деятельность студентов
Контроль и коррекция выполнения	• осуществлять входной контроль, предполагающий выявление начального уровня готовности студента к выполнению самостоятельной работы; • намечать дальнейшие пути выполнения самостоятельной работы; • осуществлять итоговый контроль конечного результата выполнения самостоятельной работы	• осуществлять текущий и итоговый операционный самоконтроль за ходом выполнения самостоятельной работы; • самоанализ и исправление допущенных ошибок и внесение корректив в работу; • ведение поиска оптимальных способов выполнения самостоятельной работы; • осуществлять рефлекссию к собственной деятельности
Оценка	• давать оценку самостоятельной работе на основе сличения результата с образцом; • давать методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы выявлять затруднения и типичные ошибки; подчеркивать положительные и отрицательные стороны; • устанавливать уровень и определять уровень продвижения студента и тем самым формировать у него мотивацию достижения успеха в учебной деятельности	дать оценку собственной работе, своим познавательным возможностям и способностям сопоставляя достигнутый результат с целью самостоятельной работы

Самостоятельная работа включает те разделы курса, которые не получили достаточного освещения на лекциях по причине ограниченности лекционного времени и большого объема изучаемого материала.

Методическое обеспечение самостоятельной работы состоит из:

- 1) Определения учебных вопросов, которые студенты должны изучить самостоятельно;
- 2) Подбора необходимой учебной литературы, обязательной для проработки и изучения;
- 3) Поиска дополнительной научной литературы, к которой студенты могут

обращаться по желанию, если у них возникает интерес в данной теме;

4) Определения контрольных вопросов, позволяющих студентам самостоятельно проверить качество полученных знаний;

5) Организации консультаций преподавателя со студентами для разъяснения вопросов, вызвавших у обучающихся затруднения при самостоятельном освоении учебного материала.

1.2 Тематика выполнения СРС, указания по форме контроля

Тематика СРС соответствует рабочей программе дисциплины «Основы преобразовательной техники» по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», направленность (профиль) «Интеллектуальные программируемые системы и устройства». Темы разделов дисциплины и виды самостоятельной работы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Темы разделов дисциплины и виды самостоятельной работы

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы	Форма контроля	Зачетные единицы (часы)
7 семестр			
	Подготовка к лекционным занятиям	Выборочный опрос	0,100 (2,7)
	Подготовка к практическим занятиям	Выборочный опрос	0,200 (5,40)
	Подготовка к лабораторным занятиям	Опрос в рамках допуска к работе	0,150 (4,05)
1	Неуправляемые выпрямители однофазного тока		0,060 (1,6125)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Коммутация токов в выпрямителях».	Устный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
2	Неуправляемые выпрямители трехфазного тока		0,060 (1,6125)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Трехфазные мостовые выпрямители».	Письменный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
3	Управляемые выпрямители.		0,119 (3,225)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Высшие гармонические составляющие в кривой первичного тока выпрямителя и сетевые фильтры».	Письменный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы	Форма контроля	Зачетные единицы (часы)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Высшие гармонические в кривой выпрямленного напряжения и сглаживающие фильтры».	Письменный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
4	Инверторы, ведомые сетью		0,060 (1,6125)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Однофазный ведомый инвертор с нулевым выводом».	Устный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
5	Импульсные преобразователи напряжения		0,119 (3,225)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Принципы построения импульсных преобразователей постоянного напряжения».	Устный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Многотактные импульсные преобразователи постоянного напряжения».	Устный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
6	Регуляторы – стабилизаторы и статические контакторы		0,119 (3,225)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Импульсные регуляторы постоянного напряжения».	Письменный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Статические контакторы».	Устный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
7	Системы управления ведомыми вентиляльными преобразователями.		0,179 (4,8375)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Принципы фазового управления вентиляльными преобразователями».	Устный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Способы построения синхронных и асинхронных фазосмещающих устройств».	Письменный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
	Самостоятельное дополнительное изучение темы «Физическая модель силовой части вентиляльного преобразователя, как многофункциональный элемент систем управления».	Письменный обзор, выборочный опрос	0,060 (1,6125)
	Итого за 7 семестр		1,167 (31,5)
	Подготовка к экзамену	Опрос в рамках экзамена	1,333 (36)

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание; вид самостоятельной работы	Форма контроля	Зачетные единицы (часы)
		Итого	2,500 (67,5)

2 ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ СРС

Подготовка к лекциям и практическим занятиям осуществляется непосредственно перед каждым занятием. План-график выполнения самостоятельной работы приведен в таблице 4.

Таблица 4 - План-график выполнения самостоятельной работы

Код реализуемой компетенции	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объем часов
7 семестр				
ПК-1 (ИД-1ПК-3; ИД-2ПК-3; ИД-3ПК-3; ИД-4ПК-3) ПК-2 (ИД-1ПК-2; ИД-2ПК-2; ИД-3ПК-2)	Подготовка к лекционным занятиям	конспект	собеседование	2,7
ПК-1 (ИД-1ПК-3; ИД-2ПК-3; ИД-3ПК-3; ИД-4ПК-3) ПК-2 (ИД-1ПК-2; ИД-2ПК-2; ИД-3ПК-2)	Подготовка к практическим занятиям	отчет	собеседование	5,40
ПК-1 (ИД-1ПК-3; ИД-2ПК-3; ИД-3ПК-3; ИД-4ПК-3) ПК-2 (ИД-1ПК-2; ИД-2ПК-2; ИД-3ПК-2)	Подготовка к лабораторным занятиям	отчет	собеседование	4,05
ПК-1 (ИД-1ПК-3; ИД-2ПК-3; ИД-3ПК-3; ИД-4ПК-3) ПК-2 (ИД-1ПК-2; ИД-2ПК-2; ИД-3ПК-2)	Самостоятельное изучение источников и литературы по разделам №№1-7	конспект	собеседование	19,35
Итого за 7 семестр				31,5
ПК-1 (ИД-1ПК-3; ИД-2ПК-3; ИД-3ПК-3; ИД-4ПК-3) ПК-2 (ИД-1ПК-2; ИД-2ПК-2; ИД-3ПК-2)	Подготовка к экзамену	конспект	Ответы на вопросы к экзамену	36,0.00
Всего				67.50

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И ВИДЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО НИМ

Контроль знаний студентов включает формы текущего и итогового контроля. Текущий контроль осуществляется в процессе изучения курса и включает в себя оценку работы студентов на практических занятиях, а также защиту контрольной работы. Рейтинговая оценка знаний студентов в рамках текущего контроля приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Рейтинговая оценка знаний студентов.

№ п/п	Тип занятия (контрольной точки)	Сроки выполнения, неделя	Кол-во баллов
7 семестр			
1.	Лабораторная работа №5.	11	11
2.	Лабораторная работа №8.	16	11
3.	Практическая работа №3.	6	11
4.	Практическая работа №6.	13	11
5.	Практическая работа №7.	15	11
Итого за 7 семестр			55

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К СРС

Опрос по темам, изученным самостоятельно, может проходить в интерактивной форме в виде дискуссий или презентаций.

Выполнение заданий ведется в тетрадях для СРС или в электронном виде. Второй вид может быть использован для конспектирования.

Подготовка к практическим занятиям представляет собой внеаудиторную самостоятельную работу студентов и заключается в чтении:

- конспекта соответствующей лекции (если она читалась по данной теме);
- соответствующего раздела учебника и первоисточников (основная и дополнительная литература, интернет-ресурсы).

4.1 Работа с литературой

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки является работа с литературой ко всем видам занятий: семинарским, практическим, при подготовке к зачетам, экзаменам, тестированию, участию в научных конференциях.

Умение работать с литературой означает научиться осмысленно пользоваться источниками. Прежде чем приступить к освоению научной литературы, рекомендуется чтение учебников и учебных пособий.

Существует несколько методов работы с литературой.

Один из них – самый известный – метод повторения: прочитанный текст можно заучить наизусть. Простое повторение воздействует на память механически и поверхностно. Полученные таким путем сведения легко забываются.

Наиболее эффективный метод – метод кодирования: прочитанный текст нужно подвергнуть большей, чем простое заучивание, обработке. Чтобы основательно обработать информацию и закодировать ее для хранения, важно произвести целый ряд мыслительных операций: прокомментировать новые данные; оценить их значение; поставить вопросы; сопоставить полученные сведения с ранее известными.

Для улучшения обработки информации очень важно устанавливать осмысленные связи, структурировать новые сведения.

Изучение научной, учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей.

Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект.

План – первооснова, каркас какой-либо письменной работы, определяющие последовательность изложения материала.

План является наиболее краткой и потому самой доступной и распространенной формой записей содержания исходного источника информации. По существу, это перечень основных вопросов, рассматриваемых в источнике. План может быть простым и развернутым. Их отличие состоит в степени детализации содержания и, соответственно, в объеме.

Преимущество плана состоит в следующем.

Во-первых, план позволяет наилучшим образом уяснить логику мысли автора, упрощает понимание главных моментов произведения.

Во-вторых, план позволяет быстро и глубоко проникнуть в сущность построения произведения и, следовательно, гораздо легче ориентироваться в его содержании.

В-третьих, план позволяет – при последующем возвращении к нему – быстрее обычного вспомнить прочитанное.

В-четвертых, с помощью плана гораздо удобнее отыскивать в источнике нужные места, факты, цитаты и т. д.

Выписки – небольшие фрагменты текста (неполные и полные предложения, отдельные абзацы, а также дословные и близкие к дословным записи об излагаемых в нем фактах), содержащие в себе квинтэссенцию содержания прочитанного.

Выписки представляют собой более сложную форму записей содержания исходного источника информации. По сути, выписки – не что иное, как цитаты, заимствованные из текста. Выписки позволяют в концентрированной форме и с максимальной точностью воспроизвести в произвольном (чаще последовательном) порядке наиболее важные мысли автора, статистические и даталогические сведения. В отдельных случаях — когда это оправданно с точки зрения продолжения работы над текстом – вполне допустимо заменять цитирование изложением, близким к дословному.

Тезисы – сжатое изложение содержания изученного материала в утвердительной (реже опровергающей) форме.

Отличие тезисов от обычных выписок состоит в следующем. *Во-первых*, тезисам присуща значительно более высокая степень концентрации материала. *Во-вторых*, в тезисах отмечается преобладание выводов над общими рассуждениями. *В-третьих*, чаще всего тезисы записываются близко к оригинальному тексту, т. е. без использования прямого цитирования.

Исходя из сказанного, нетрудно выявить основное преимущество тезисов: они незаменимы для подготовки глубокой и всесторонней аргументации письменной работы любой сложности, а также для подготовки выступлений на защите, докладов и пр.

Аннотация – краткое изложение основного содержания исходного источника информации, дающее о нем обобщенное представление. К написанию аннотаций прибегают в тех случаях, когда подлинная ценность и пригодность исходного источника информации исполнителю письменной работы окончательно неясна, но в то же время о нем необходимо оставить краткую запись с обобщающей характеристикой. Для указанной цели и используется аннотация.

Характерной особенностью аннотации наряду с краткостью и обобщенностью ее содержания является и то, что пишется аннотация всегда после того, как (хотя бы в предварительном порядке) завершено ознакомление с содержанием исходного источника информации. Кроме того, пишется аннотация почти исключительно своими словами и лишь в крайне редких случаях содержит в себе небольшие выдержки оригинального текста.

Резюме – краткая оценка изученного содержания исходного источника информации, полученная, прежде всего, на основе содержащихся в нем выводов. Резюме весьма сходно по своей сути с аннотацией. Однако, в отличие от последней, текст резюме концентрирует в себе данные не из основного содержания исходного источника информации, а из его заключительной части, прежде всего выводов. Но, как и в случае с аннотацией, резюме излагается своими словами – выдержки из оригинального текста в нем практически не встречаются.

Конспект – сложная запись содержания исходного текста, включающая в себя заимствования (цитаты) наиболее примечательных мест в сочетании с планом источника, а также сжатый анализ записанного материала и выводы по нему.

Для работы над конспектом следует:

- определить структуру конспектируемого материала, чему в значительной мере способствует письменное ведение плана по ходу изучения оригинального текста;
- в соответствии со структурой конспекта произвести отбор и последующую запись наиболее существенного содержания оригинального текста — в форме цитат или в изложении, близком к оригиналу;

- выполнить анализ записей и на его основе – дополнение записей собственными замечаниями, соображениями, "фактурой", заимствованной из других источников и т. п. (располагать все это следует на полях тетради для записей или на отдельных листах-вкладках);
- завершить формулирование и запись выводов по каждой из частей оригинального текста, а также общих выводов.

Систематизация изученных источников позволяет повысить эффективность их анализа и обобщения. Итогом этой работы должна стать логически выстроенная система сведений по существу исследуемого вопроса.

Необходимо из всего материала выделить существующие точки зрения на проблему, проанализировать их, сравнить, дать им оценку.

Обзор – краткое точное изложение сущности какого-либо вопроса, темы на основе одной или нескольких книг, монографий или других первоисточников. Обзор должен содержать основные фактические сведения и выводы по рассматриваемому вопросу.

Обзор выполняет следующие функции:

- информативная;
- поисковая;
- справочная;
- сигнальная;
- индикативная;
- коммуникативная.

Степень выполнения этих функций зависит от содержательных и формальных качеств обзора, а также от того, кто и для каких целей их использует. Язык обзора должен отличаться ясностью, точностью, краткостью и простотой. Содержание следует излагать объективно от имени автора.

При оценке обзора учитывается не только качество реферирования прочитанной литературы, но и аргументированное изложение собственных мыслей студента по рассматриваемому вопросу. Результат работы студента оценивается преподавателем по бальной системе. Также допускается оценивать работы, удовлетво-

ряющие или не удовлетворяющие предъявляемым требованиям, «зачтено» или «не зачтено» соответственно.

Письменный обзор должен содержать следующие структурные элементы: титульный лист, заполненный по единой форме; оглавление с указанием всех разделов обзора и номерами страниц; введение объемом не более 1,5-2 печатные страницы; основная часть, которая содержит одну или несколько глав, состоящих из 2-3 параграфов (пунктов, разделов); заключение, которое содержит главные выводы основной части, и в котором отмечается выполнение задач и достижение цели, сформулированных во введении; приложения, включающие график и таблицы (если таковые имеются); библиографическое описание использованных источников оформленных по ГОСТ 7.82–2001, ГОСТ 7.1-2003. В тексте обзора обязательны ссылки на первоисточники.

Печатный вариант работы выполняется на белой бумаге формата А4 (210x297 мм). Текст работы излагается на одной стороне листа. Все линии, цифры, буквы и знаки работы должны быть черного цвета.

Текст обзора, рисунки, формулы, таблицы, а также номера страниц не должны выходить за пределы двухсантиметровой рамки листа А4. Номера страниц должны быть проставлены внизу по центру. При использовании текстового редактора Word, для выполнения этих условий необходимы следующие настройки:

- размер бумаги А4;
- поля слева, сверху, справа по 2 см, нижнее поле 2,5 см, расстояние от нижнего края страницы до нижнего колонтитула 2 см;
- номер страницы – внизу по центру.

Основной текст обзора быть должен быть набран шрифтом Times New Roman, размер 14 пт, начертание обычное, через полуторный интервал, выравнивание по ширине страницы. Для оформления таблиц и подписей к рисункам допускается Times New Roman, размер 12 пт.

Название каждой главы начинается с новой страницы, объем главы не может быть меньше 5 страниц. Заголовки и подзаголовки должны быть выделены и отличаться от основного текста (шрифтом, жирностью, курсивом и пр.). Подзаголовки

следует отделять от основного текста сверху двумя строками, снизу – одной. В тексте должны отсутствовать сокращения, кроме общепринятых ГОСТ 7.88–2003, общепринятые или необходимые сокращения при первоначальном употреблении должны быть расшифрованы. Каждый рисунок, график или таблица в письменном обзоре должны быть пронумерованы и иметь заголовки или подпись. При наличии в обзоре ссылок на использованные научные или нормативные источники, ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.32-2001.

Письменный обзор должен быть переплетен в обложку или помещен в папку–скоросшиватель (картонную или пластиковую).

Письменный обзор должен быть предоставлен в установленный преподавателем срок. В случае несвоевременного представления работы, Письменный обзор не проверяется преподавателем и не зачитывается как выполненный.

В процессе работы над обзором можно выделить 4 этапа:

- вводный – выбор темы, работа над планом и введением;
- основной – работа над содержанием и заключением обзора;
- заключительный – оформление обзора;
- защита обзора (на практическом занятии, экзамене, студенческой конференции и т.д.)

Работа над обзором начинается с выбора темы исследования. Заинтересованность автора в проблеме определяет качество проводимого исследования и соответственно успешность его защиты. Выбирая круг вопросов своей работы, не стоит спешить воспользоваться списком тем, предложенным преподавателем. Надо попытаться сформулировать проблему своего исследования самостоятельно. При определении темы обзора нужно учитывать и его информационную обеспеченность. С этой целью, во-первых, можно обратиться к библиотечным каталогам, а во-вторых, проконсультироваться с преподавателем и библиотекарем.

Выбрав тему обзора и изучив литературу, необходимо сформулировать цель работы и составить план обзора. Возможно, формулировка цели в ходе работы будет меняться, но изначально следует ее обозначить, чтобы ориентироваться на нее

в ходе исследования. Определяясь с целью дальнейшей работы, параллельно надо думать над составлением плана: необходимо четко соотносить цель и план работы.

План – это точный и краткий перечень положений в том порядке, как они будут расположены в обзоре, этапы раскрытия темы. Существует два основных типа плана: простой и сложный (развернутый). В простом плане содержание обзора делится на параграфы, а в сложном на главы и параграфы. При работе над планом обзора необходимо помнить, что формулировка пунктов плана не должна повторять формулировку темы.

При работе над введением необходимо опираться на навыки, приобретенные при написании изложений и сочинений. В объеме обзора введение, как правило, составляет 1-2 машинописные страницы. Введение обычно содержит вступление, обоснование актуальности выбранной темы, формулировку цели и задач обзора, краткий обзор литературы и источников по проблеме, историю вопроса и вывод. Содержание обзора должно соответствовать теме, полно ее раскрывать. Все рассуждения нужно аргументировать. Обзор показывает объективное отношение автора к излагаемому материалу. Следует стремиться к тому, чтобы изложение было ясным, простым и точным.

Заключение – самостоятельная часть обзора. Оно не должно быть переложением содержания работы. Заключение должно содержать основные выводы в сжатой форме, а также оценку полноты и глубины решения тех вопросов, которые вставали в процессе изучения темы. Объем заключения не должен превышать 2 печатных страниц.

Типичными ошибками, допускаемыми студентами при подготовке обзора, являются:

- недостаточное обоснование актуальности, практической и теоретической значимости полученных результатов, поверхностный анализ используемого материала;
- неглубокие критические оценки и рекомендации по решению исследуемой проблемы;
- поверхностные выводы и предложения;

- нарушение требований к оформлению письменного обзора;
- использование информации без ссылок на источник.

4.2 Критерии оценки для проверки уровня обученности в рамках текущего контроля

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент показал глубокое, прочное и аргументированное освоение программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт последовательно, четко и логически стройно, в полном исчерпывающем объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, не допущено при ответе ошибок

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент показал твердое знание программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт грамотно и по существу, в достаточно полном объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, допущены при ответе отдельные неточности или одна ошибка

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент показал знание только основной части учебного материала без его частных деталей, при этом поставленный вопрос раскрыт с нарушением логической последовательности, не в полном объеме; были допущены неточные формулировки основных категорий, понятий и терминов учебного курса, а также ошибки (не более двух) или ряд незначительных неточностей, не исказивших существенно суть ответа.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки (более двух), существенно исказившие его суть. Оценка неудовлетворительно выставляется также, если отсутствует ответ на вопрос, либо студент отказался его сдавать.

По результатам опроса в рамках текущего контроля выставляется рейтинговый балл по каждому рейтинговому мероприятию. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установ-

ленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом (Таблица 6):

Таблица 6 - Расчет рейтинговых баллов по результатам текущего контроля

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Конкретное значение рейтингового балла определяется распределением рейтинговых баллов по контрольным мероприятиям.

5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

5.1 Основная литература

1. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электро-энергии / Мелешин В.И., Овчинников Д.А.— М.: Техносфера, 2011.— 576 с.— [Электронный ресурс]
2. Семенов Б.Ю. Силовая электроника. Профессиональные решения / Семенов Б.Ю.— М.: ДМК Пресс, 2011.— 416 с [Электронный ресурс]
3. Джеймс Рег Промышленная электроника / Джеймс Рег— М.: ДМК Пресс, 2011.— 1136 с [Электронный ресурс]

5.2. Дополнительная литература:

1. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : полный курс : учебное пособие / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкий, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. - М. : Горячая Линия - Телеком, 2002. - 768 с. - Библиогр.: с. 763. - ISBN 5-93517-002-7.
2. Лачин, В. И. Электроника : учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. - 4-е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д : Феникс, 2010. - 572 с. : ил. - (Высшее образование). - Библиогр. с. 565. - ISBN 5-222-02718-X
3. Горбачёв, Г. Н. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. Н. Горбачёв, Е. Е. Чаплыгин ; под ред. В. А. Лабунцова. - М. : Энергоиздат, 1988. - 320 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 314-315. - Предм. указ.: с. 315-318. - ISBN 5-283-00517-8
4. Гусев, В. Г. Электроника : учеб. пособие для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1991. - 622 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Прил.: с. 610-614. - Библиогр.: с. 615-616. - Предм. указ.: с. 617-619. - ISBN 5-06-00

5. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. - М. : Высш. шк., 1982. - 496 с. : ил. - Библиогр.: с. 486-488. - Предм. указ.: с. 480-494

6. Грабовецкий Г.В. Непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией для электромеханических систем: учебное пособие / Грабовецкий Г.В., Куклин О.Г., Харитонов С.А.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2009.— 376 с [Электронный ресурс]

7. Редди, С. Р. Основы силовой электроники / С. Рама Редди ; пер. с англ. В. В. Маслова ; под ред. Д. П. Приходько. – М. : Техносфера, 2006. – 288 с. : ил. – Библиогр.: с. 287. – ISBN 5-94836-055-5. – ISBN 1-84265-056-4(англ.)

8. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

по направлению подготовки

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
направленность (профиль)

Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Составитель: Дюдюн Дмитрий Евгеньевич

Редактор: _____

Подписано в печать _____
Формат _____ Усл. п. л. – _____ Уч.-изд. л. – _____.
Бумага _____. Печать _____. Заказ Тираж _____ экз.
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
_____, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

Издательство Северо-Кавказского федерального университета
Отпечатано в типографии СКФУ