

---

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

621.382(07)  
Б896

О.Г. Брылина, М.В. Гельман, М.М. Дудкин

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие к виртуальным  
лабораторным работам

---

Челябинск  
2012

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Электропривод и автоматизация  
промышленных установок»

621.382(07)  
Б896

О.Г. Брылина, М.В. Гельман, М.М. Дудкин

## **СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Учебное пособие к виртуальным лабораторным работам

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2012

УДК 621.382(076.5)+621.314(076.5)  
Б896

*Одобрено  
учебно-методической комиссией энергетического факультета*

*Рецензенты:  
А.С. Карандаев, Б.Ю. Сидоренко*

**Брылина, О.Г.**  
Б896      Силовая электроника: учебное пособие к виртуальным лабораторным работам / О.Г. Брылина, М.В. Гельман, М.М. Дудкин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 144 с.

Учебное пособие содержит описание и методику проведения виртуальных лабораторных работ по полупроводниковым преобразователям электрической энергии в математическом пакете MatLab+Simulink. Лабораторные работы позволяют изучить практически все виды полупроводниковых преобразователей электрической энергии, применяемых в настоящее время.

Учебное пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения, обучающихся по программам подготовки бакалавров и магистров по специальностям 140400.62 и 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника». Учебное пособие будет полезно также студентам других направлений электротехнического профиля.

УДК 621.382(076.5)+621.314(076.5)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2012

## **ВВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие предназначено для студентов энергетического факультета, обучаемых по программам подготовки бакалавров и магистров по специальностям 140400.62 и 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника», в которых предусмотрено изучение курсов «Преобразовательная техника», «Силовая электроника», «Энергетическая электроника» и других курсов с близкими названиями.

Основная задача данного цикла лабораторных работ – предоставить студентам возможность на базе виртуальных математических моделей изучить основные типы устройств преобразовательной техники. 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 пособии.

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».

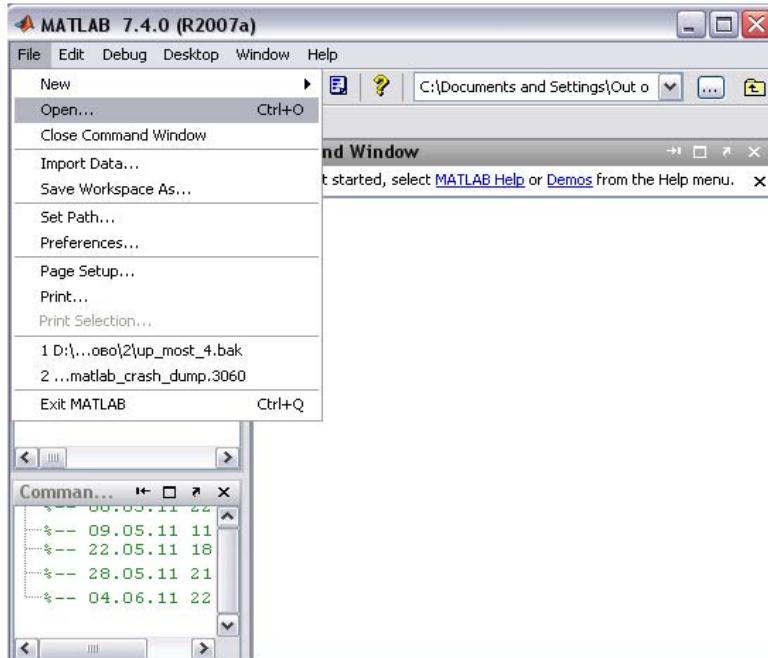


Рис. 1. Диалоговое окно программы MatLab



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-Кутта 2 порядка [4, 5].



Рис. 3. Индикатор хода расчета

### *Редактирование осциллографм 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  $X_{\text{вх}}$ , то на экране представляется зависимость  $X_{\text{вх}} = f(t)$ .

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.

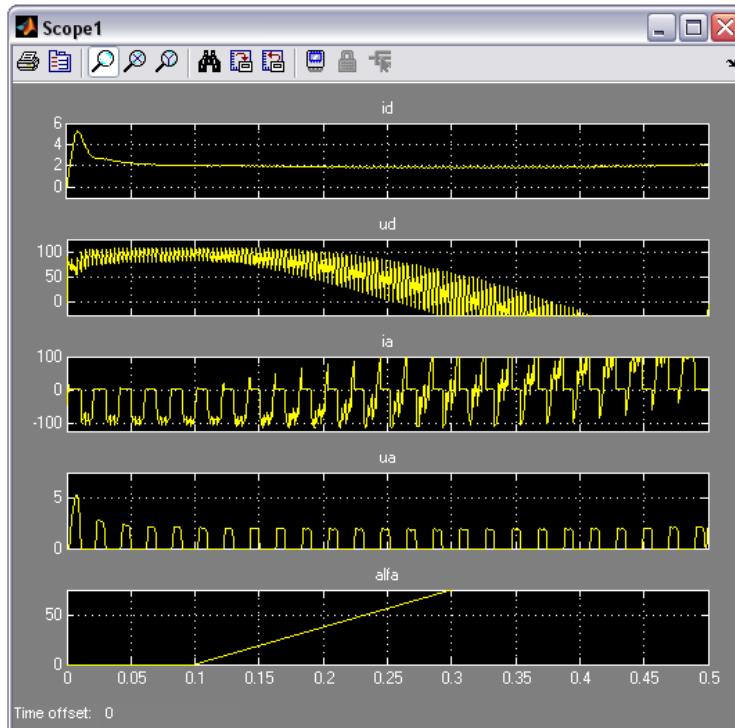


Рис. 4. Внешний вид экрана виртуального осциллографа

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 Scope 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 Scope может отображаться до 30 кривых.

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

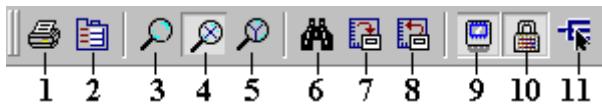


Рис. 5. Панель инструментов управления осциллографом

На рис. 5 приняты следующие обозначения кнопок управления:

- 1 – печать содержимого окна Scope;
- 2 – вызов диалогового окна настройки параметров блока Scope;
- 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 Scope 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.

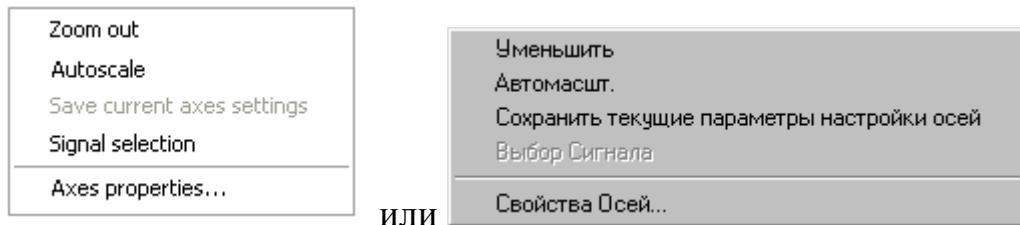
Первое нажатие левой кнопки мыши приводит к четырехкратному увеличению масштаба, каждое последующее дает увеличение масштаба в два раза.

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 осциллографа (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 осциллограф (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 ( $Y_{max}$ ) и нижня ( $Y_{min}$ ) границы оси ординат, а также заголовок графика. Заголовок будет отображаться (при нажатии кнопки ОК или Принять) непосредственно в окне Scope над изображением соответствующего графика. Название графика следует написать вместо надписи «%<SignalLabel>».

Внимание! В названии графиков рекомендуется использовать только латинские буквы!

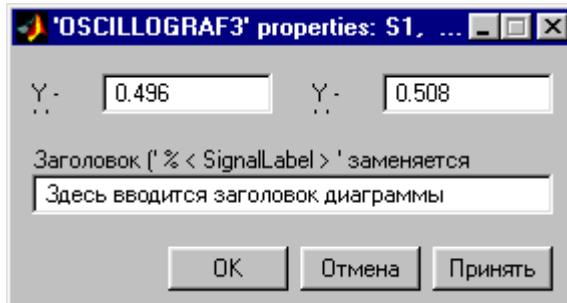


Рис. 7. Окно задания свойства осей блока Scope

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

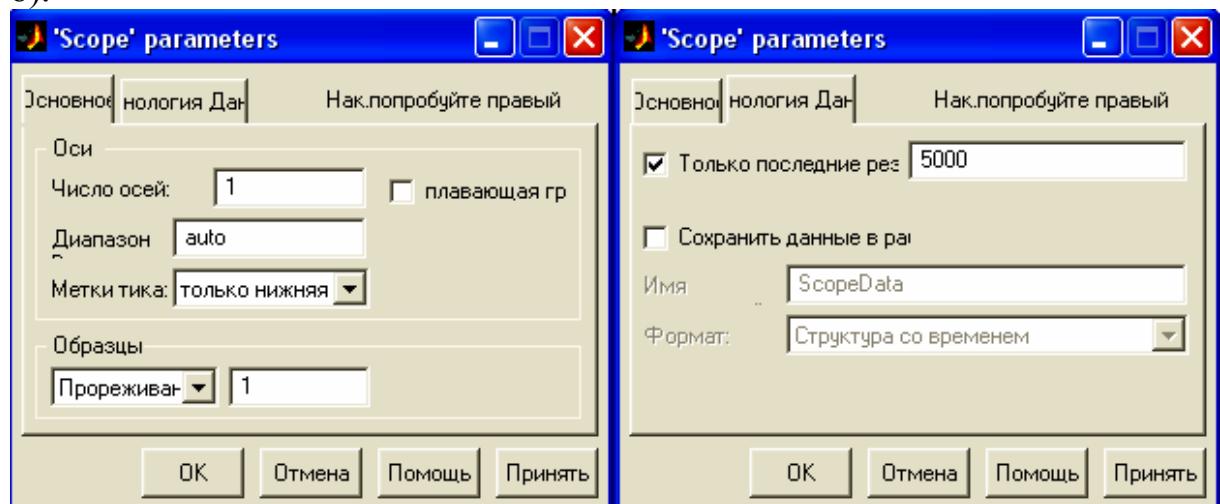


Рис. 8. Параметры блока Scope

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 Scope; 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 Scope.

**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 Scope), то под графиком в строке Time offset (Сдвиг по времени) выводится значение 0.

Если же интервал моделирования превышает установленное значение, то в окне Scope 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 Scope. 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.

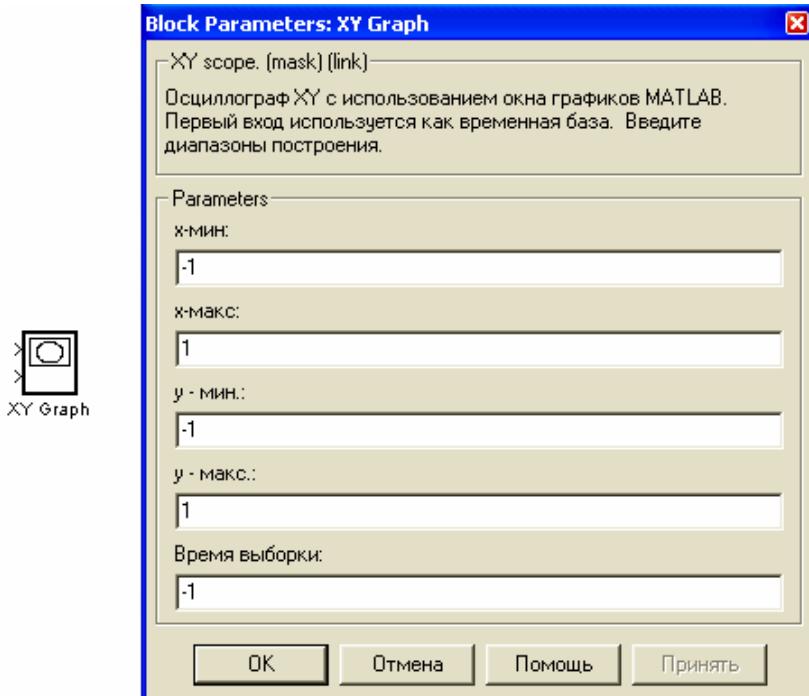
### ***Построение графических зависимостей в функции $Y=f(X)$***

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.

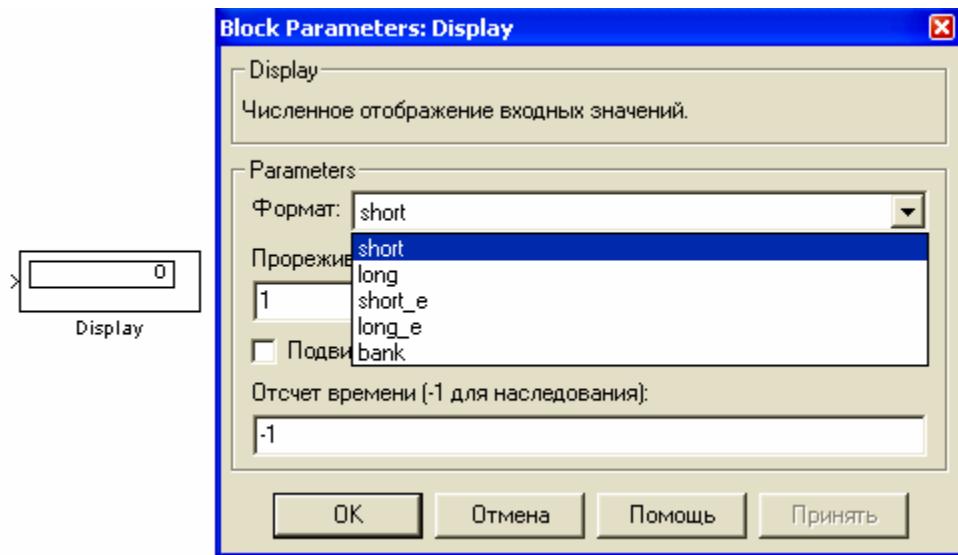
### **Блок Display**

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 установленному).
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).

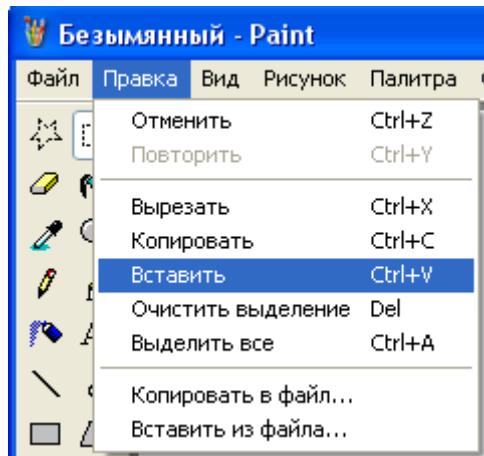


Рис. 11. Панель инструментов графической среды Paint

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).

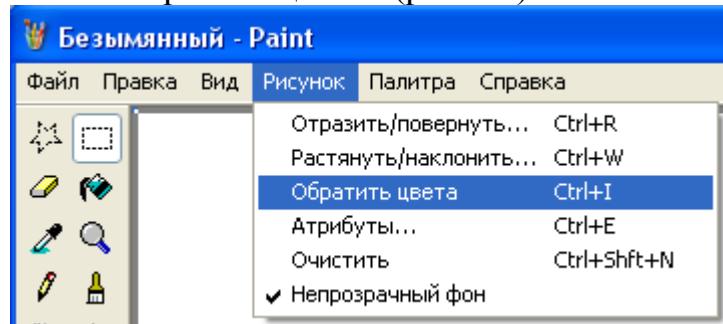


Рис. 12. Внешний вид вкладки «Рисунок» на панели инструментов

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.

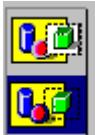
7. Выделить необходимую часть графического изображения можно, нажав на кнопку «Выделить» или «Выделение произвольной области»



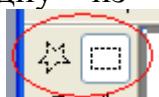
, которые расположены на боковой панели графического редактора Paint.

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 осцилограммы (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).

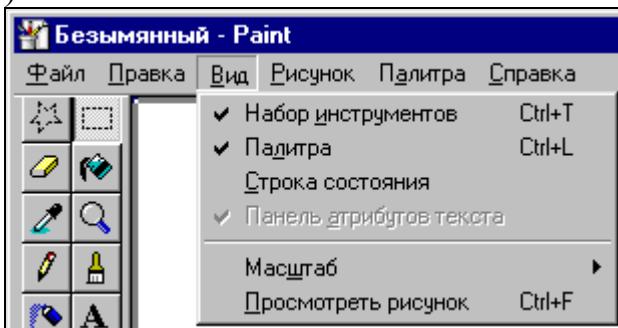


Рис. 14. Панель инструментов редактора Paint

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,  – 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 (*Rd, Ld, 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 Ом;

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

– дифференциальное сопротивление вентиля во включенном состоянии *r<sub>d</sub>* (*Resistance Ron (Ohms)*). Установить *r<sub>d</sub>* = 1 Ом);

– пороговое напряжение вентиля *U<sub>0</sub>* (*Forward voltage Vf(V)*).

Установить *U<sub>0</sub>* = 0,8 В;

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

Установить *Ic* = 0 А);

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

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

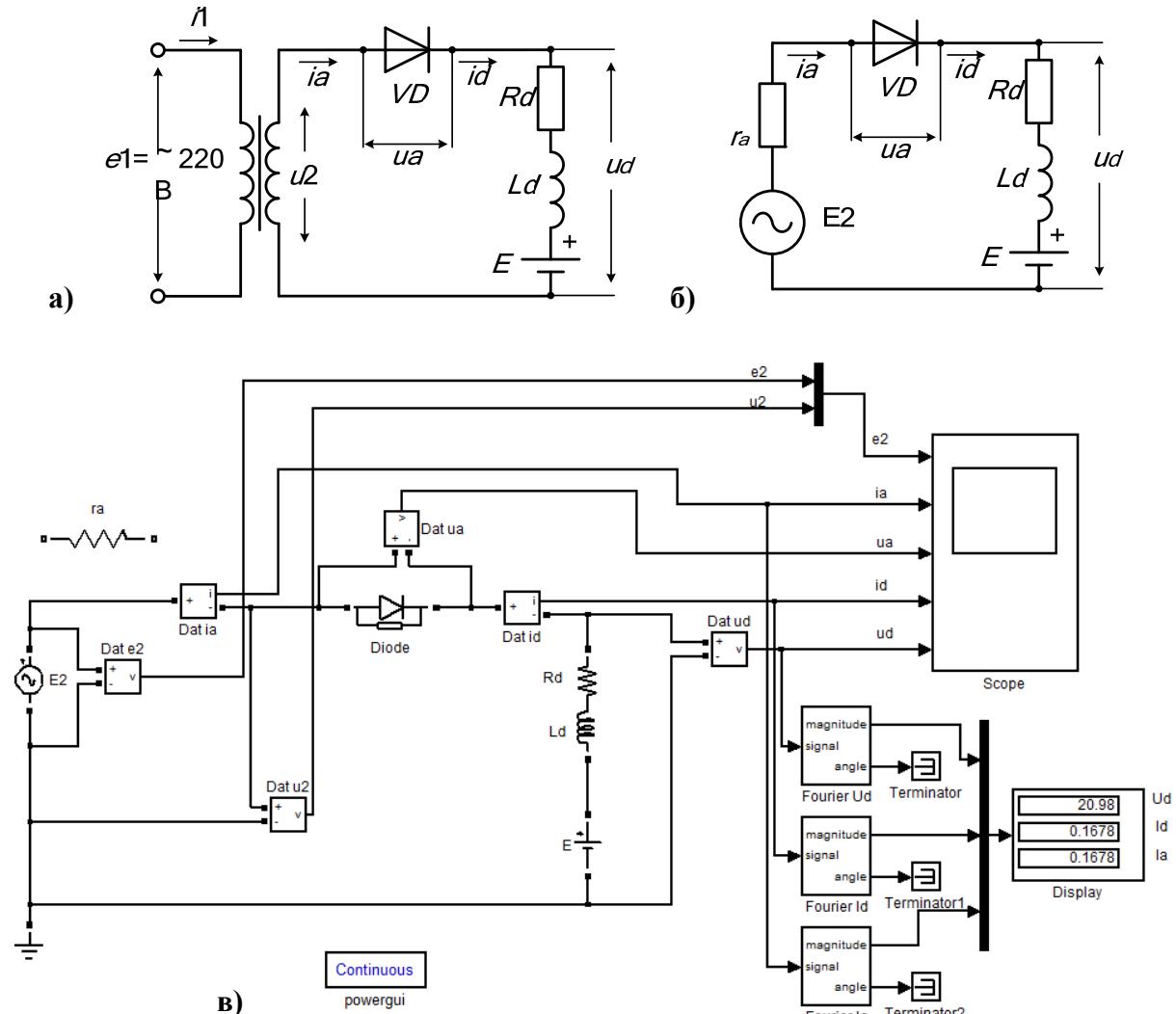


Рис. 1. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя

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  $Xd$  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 осцилограммы 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 ud*), мультиметр (*Multimeter*), 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. Установить действующее значение ЭДС *E2* 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 сопротивления обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить  $r_a = 10$  Ом;

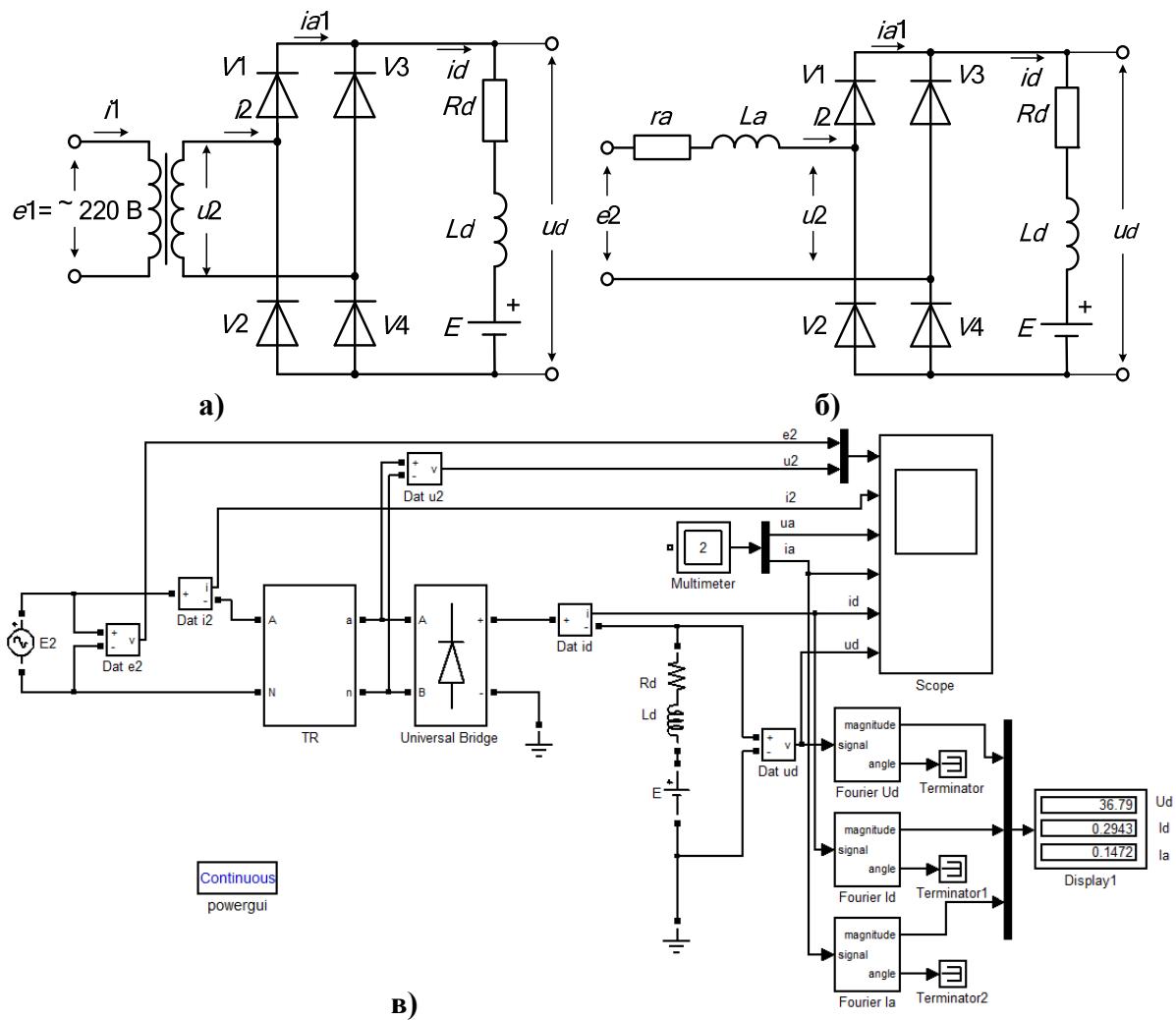


Рис. 2. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) неуправляемой однофазной мостовой схемы выпрямления

- 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 из последовательно включенных активного сопротивления  $Rs$  и конденсатора  $Cs$ . Эта схема подключается параллельно диодам – установить  $Rs = 10^6$  Ом,  $Cs = inf$  (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  $r_o = 1$  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 ( $Rd$ ,  $Ld$ ,  $E$ ) 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  $Xd$  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) 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 осцилограммы 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.		
$U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2$		
У2 – 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		
$I_d = \frac{U_{d0}}{R_d}$		
Среднее и амплитудное значение анодного тока		
$I_a = I_d, I_{a\max} = I_{d\max} = \pi \cdot I_d$	$I_a = I_d / 2,$ $I_{a\max} = I_{d\max} / 2 = \pi \cdot I_d / 2$	(6)
Амплитуда обратного напряжения на вентиле		
$U_{a\max} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{d0}$	$U_{a\max} = 2 \cdot U_{2m} = 2\sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{d0}$	(7)

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

Таблица 2

## Результаты предварительных расчетов и измерений

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

*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 осцилограмм 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 осцилограмм 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\_1odnopolup.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 осцилограммы 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.

Осцилограммы 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 осцилограммы – в установленном режиме), обработать эти осцилограммы 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 осцилограммы, 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 осцилограмм. Записать показания измерительных приборов (в табл. 2) и сравнить их с показаниями при активной нагрузке;

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

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

б) увеличить индуктивность нагрузки в 2 раза и исследовать влияние на осцилограммы 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 осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений для активной нагрузки для мостовой схемы выпрямления.

Обработать осцилограммы по аналогии с п. 1.2.б;

в) аналогичным образом снять и сохранить осцилограммы, 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 осцилограмм, 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 осцилограмм 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 вентилей?
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  $X_d = R_d / \omega$  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 ( $\alpha$ ), система управления ( $SU$ ), тиристор ( $Thyristor$ ), нагрузка ( $Rd$ ,  $Ld$ ), датчики напряжения и тока ( $Dat e2$ ,  $Dat id$ ,  $Dat ud$ ), осциллограф ( $Scope$ ), блоки разложения в ряд Фурье ( $Fourier Ud$ ,  $Fourier Id$ ) и дисплей ( $Display$ ).

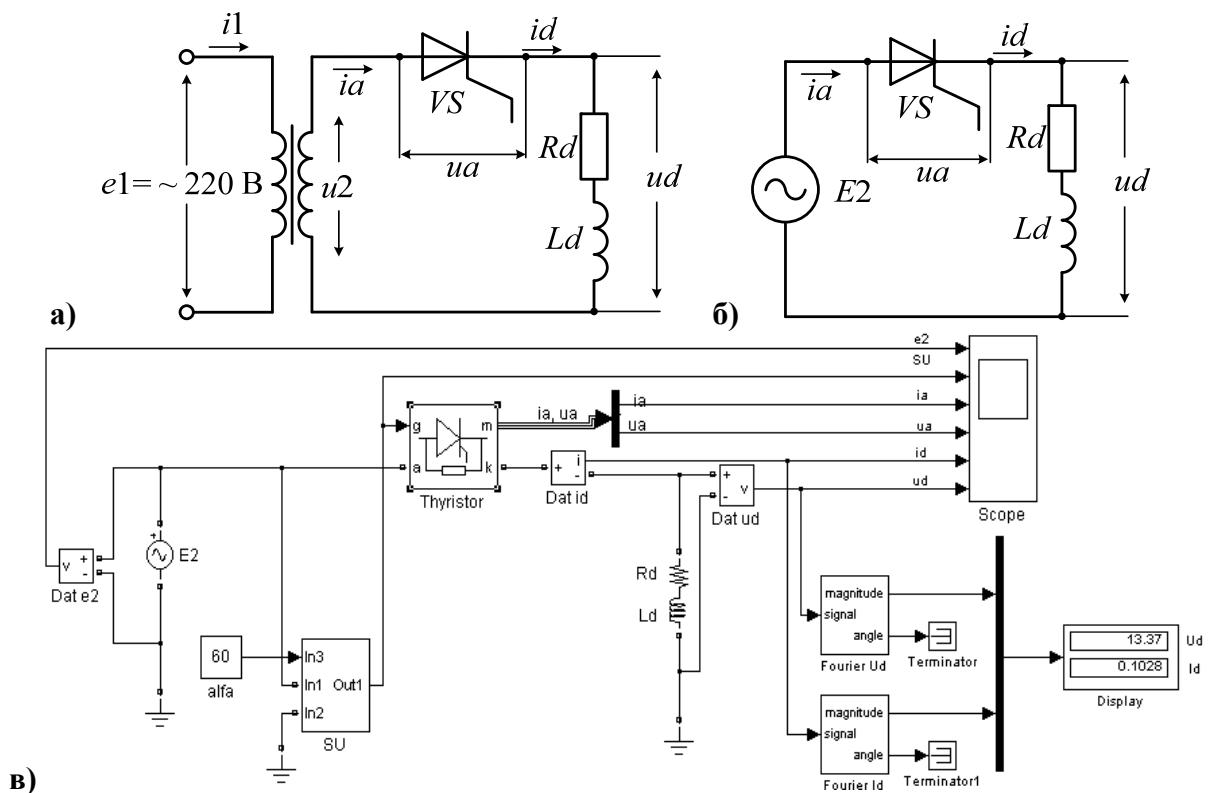


Рис. 1. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) однофазного управляемого выпрямителя

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  $E2$  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*» – демультиплексор выходных сигналов тиристора (соединение данного выхода с блоком *Mux* дает возможность выдать на разные выходы осциллографа ток  $i_a$  и напряжение  $ua$  на тиристоре).

Изменяемые параметры блока:

- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии  $r_\partial$  (Resistance Ron (Ohms)). Установить  $r_\partial = 1$  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  $Ic = 0$  А);

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

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

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

- активная –  $Ld = 0$ ,  $Rd$  – установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов);
- активно-индуктивная –  $Rd$  установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов). Индуктивность  $Ld$  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 осцилограммы 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 сопротивления обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной стороне. Установить  $r_a = 10$  Ом.

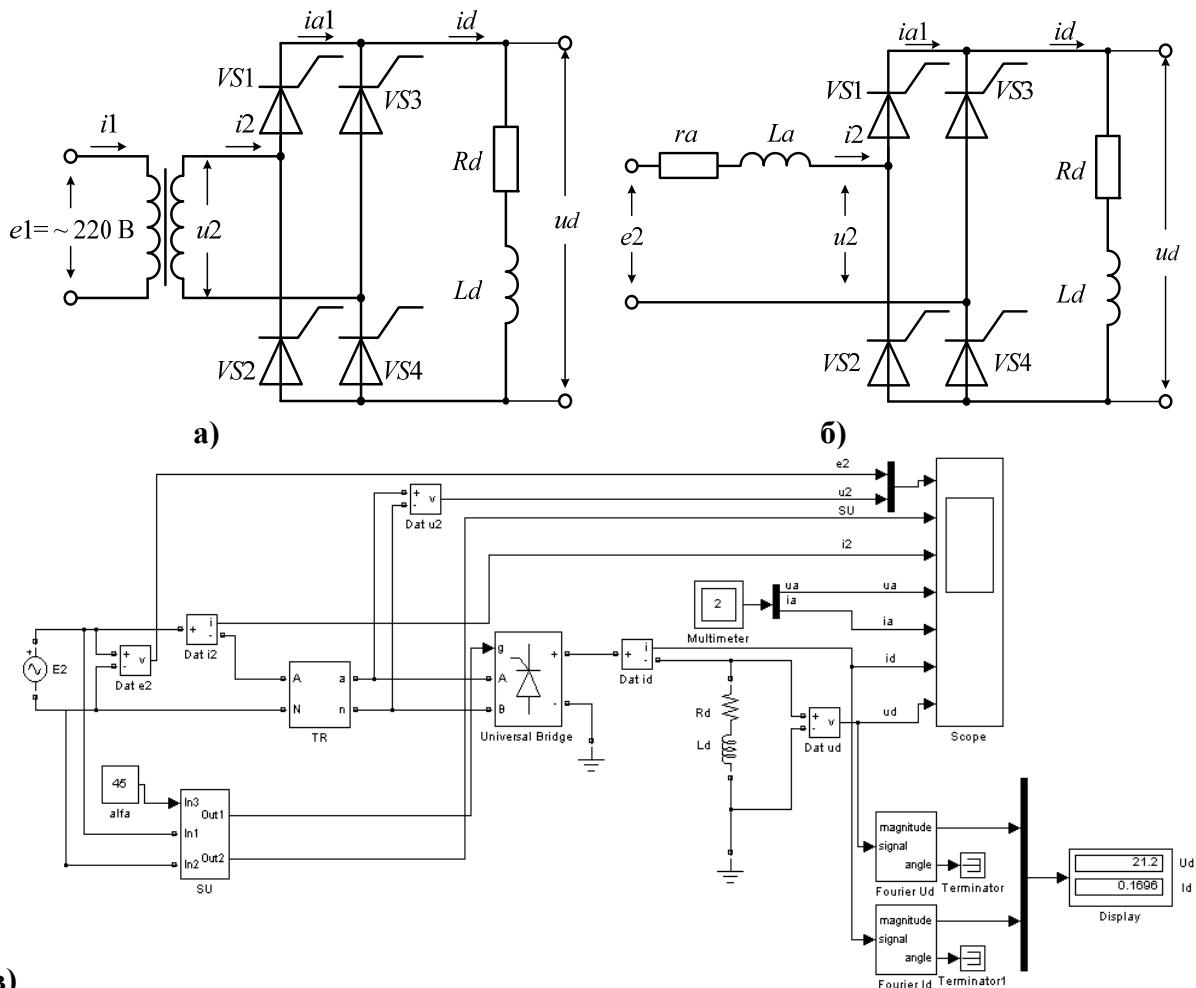


Рис. 2. Принципиальная схема (а), схема замещения (б) и виртуальная модель (в) однофазного управляемого мостового выпрямителя

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 группы 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  $r_o = 1 \text{ Ом}$ ;

– 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 (*Snubber*) – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления  $Rs$  и конденсатора  $Cs$ . Эта схема подключается параллельно тиристору и устраняет перенапряжения при выключении тиристора. Установить  $Rs = 10e^6$  Ом,  $Cs = inf$ .

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

В зависимости от установленных параметров меняется характер нагрузки:

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

– активно-индуктивная –  $Rd$  установить в соответствии с заданным вариантом (см. таблицу вариантов). Индуктивность  $Ld$  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 (*Ud, Id*), 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  $\alpha$  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  $E2$  взять из таблицы вариантов. Вентили и трансформатор считать идеальными;
- в) для однофазной мостовой схемы и заданного угла управления  $\alpha$  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  $E2$  взять из таблицы вариантов. Угол коммутации  $\gamma$  рекомендуется принять равным 10 град. Вентили считать идеальными;
- г) рассчитать и построить регулировочную характеристику при активной нагрузке и идеальных вентилях и трансформаторе

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

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**

Пара- метры	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 «*ipr\_1dnopolup.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 осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активной нагрузке.

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

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осцилограммы 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 осцилограммы, 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 осцилограмм.

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

б) снять регулировочную характеристику  $Ud = f(\alpha)$  при активно-индуктивной нагрузке. Определить требуемый диапазон изменения угла  $\alpha$  для снижения  $Ud$  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 осцилограммы 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 осцилограммы, полученные при активно-индуктивной нагрузке. Параметры нагрузки при этом устанавливать в соответствии с рекомендациями, приведенными в описании к виртуальным моделям. Объяснить внешний вид полученных осцилограмм, 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  $Ud = f(\alpha)$  при чисто активной нагрузке. При построении регулировочной характеристики изменять угол управления в блоке  $\alpha/\alpha$  (диапазон изменения  $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$  с шагом  $30^\circ$ , см. табл. 2). Величину выпрямленного напряжения  $Ud$  снимать с блока дисплей (*Display*);

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

При каждом угле  $\alpha$  по осцилограммам смотреть, какой режим по току в выпрямителе. На регулировочной характеристике отметить точку, соответствующую граничному режиму.

Таблица 2

**Экспериментальные данные для построения регулировочных характеристик**

<i>α, град</i>		0	30	60	90	120	150	180
<b>нагрузка R</b>	<i>Ud</i>							
<b>нагрузка RL</b>	<i>Ud</i>							

2.4. Снятие внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.

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

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

Таблица 3

## Экспериментальные данные для построения внешних характеристик

<b>Пара- метры</b>	$\alpha_{\text{зад}} = \underline{\hspace{2cm}}$		
	$Rd = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$	$Rd' = 2 \cdot Rd = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$	$Rd'' = 5 \cdot Rd = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом}$
<i>Ud</i>			
<i>Id</i>			
	$\alpha = \alpha_{\text{зад}} \cdot 10^0 = \underline{\hspace{2cm}}$		
<i>Ud</i>			
<i>Id</i>			

*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 вентилей?
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 $\alpha$ , град	ЭДС на вторичной стороне трансформатора $E_2$ , В	Активное сопротивление нагрузки $Rd$ , Ом
			$Rd$ , 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  $X_d = Rd$  для однополупериодной схемы и  $X_d = 5 \cdot Rd$  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 ( $Ud = f(Id)$ ,  $Ud = f(alfa)$ ).

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:

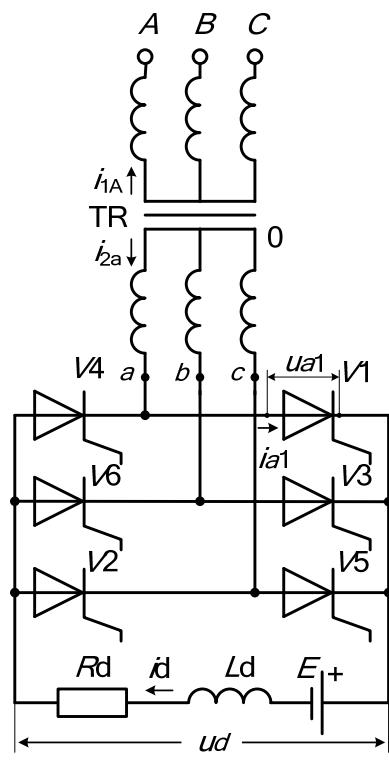
– индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне. Установить  $L_a = X_a / \omega$ , где  $X_a$  – задано по варианту (при частоте 50 Гц  $\omega = 314$ ).

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

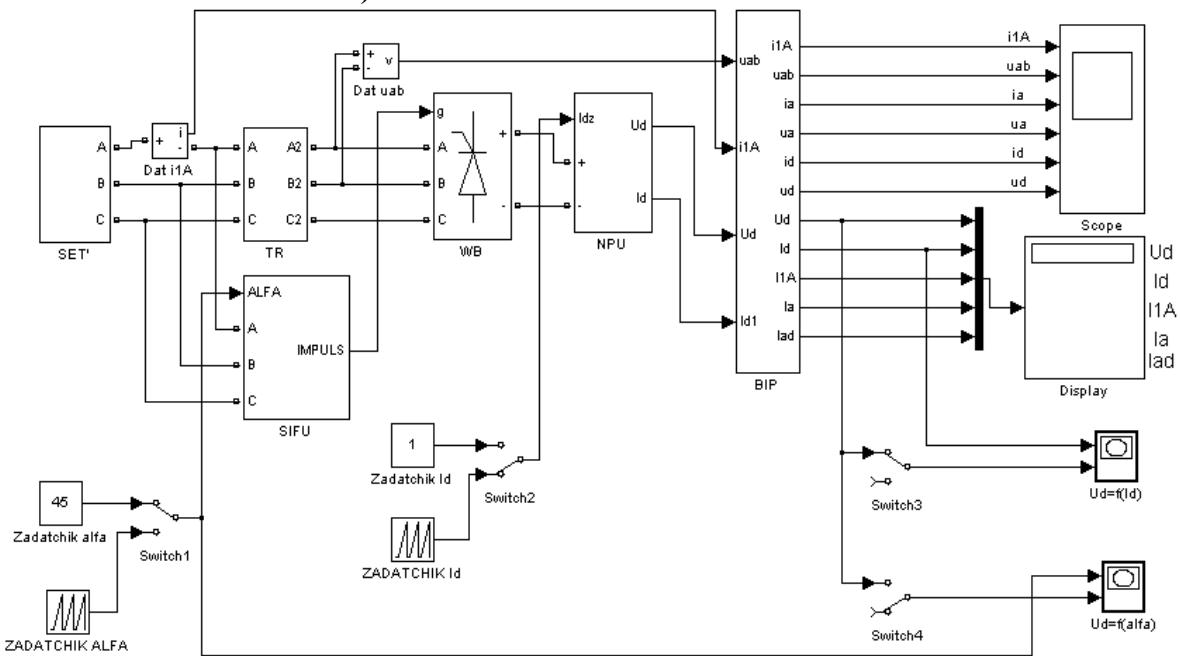
– фазное напряжение на первичной стороне трансформатора *U1* (установить 220 В);

– 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.



a)



б)

**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 сдвоенные 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  $R_{on}$  (установить 0,2 Ом);

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

– пороговое напряжение тиристора  $U_f$  (установить 0,8 В);

– демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления  $R_s$  и конденсатора  $C_s$ . Эта схема подключается параллельно тиристору 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  $R_d$  (установить 5 Ом);

– индуктивность реактора  $L_d$  (установить 0,2 Гн);

– вид нагрузки (*Vid nagruzki с 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 тока на первичной стороне трансформатора фазы А (*i1a*);

– мгновенные значения линейного напряжения (*uab*);

– 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 (*Ud*);

– среднее значение выпрямленного тока (*Id*);

– действующее значение тока на первичной стороне трансформатора фазы А (*I1A*);

– среднее значение анодного тока (*Ia*);

– действующее значение анодного тока (*Iad*).

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

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

11) Осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осцилограммы 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  $Ud = f(Id)$  (*Switch3*),  $Ud = f(alfa)$  (*Switch4*).

14) Графопостроители ( $Ud = f(Id)$ ,  $Ud = f(alfa)$ ) – блоки, предназначенные для построения внешней  $Ud = f(Id)$  и регулировочной  $Ud = f(\alpha)$  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*),

задатчики тока  $Id$  (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), датчик напряжения (*Dat uab*), осциллограф (*Scope*), дисплей (*Display*), переключатели (*Switch1*, *Switch2*, *Switch3*, *Switch4*) и графопостроители ( $Ud = f(Id)$ ,  $Ud = f(\alpha)$ ).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник ЭДС (*E2*) – имитирует трехфазную ЭДС на вторичной стороне трансформатора.

Изменяемые параметры блока:

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

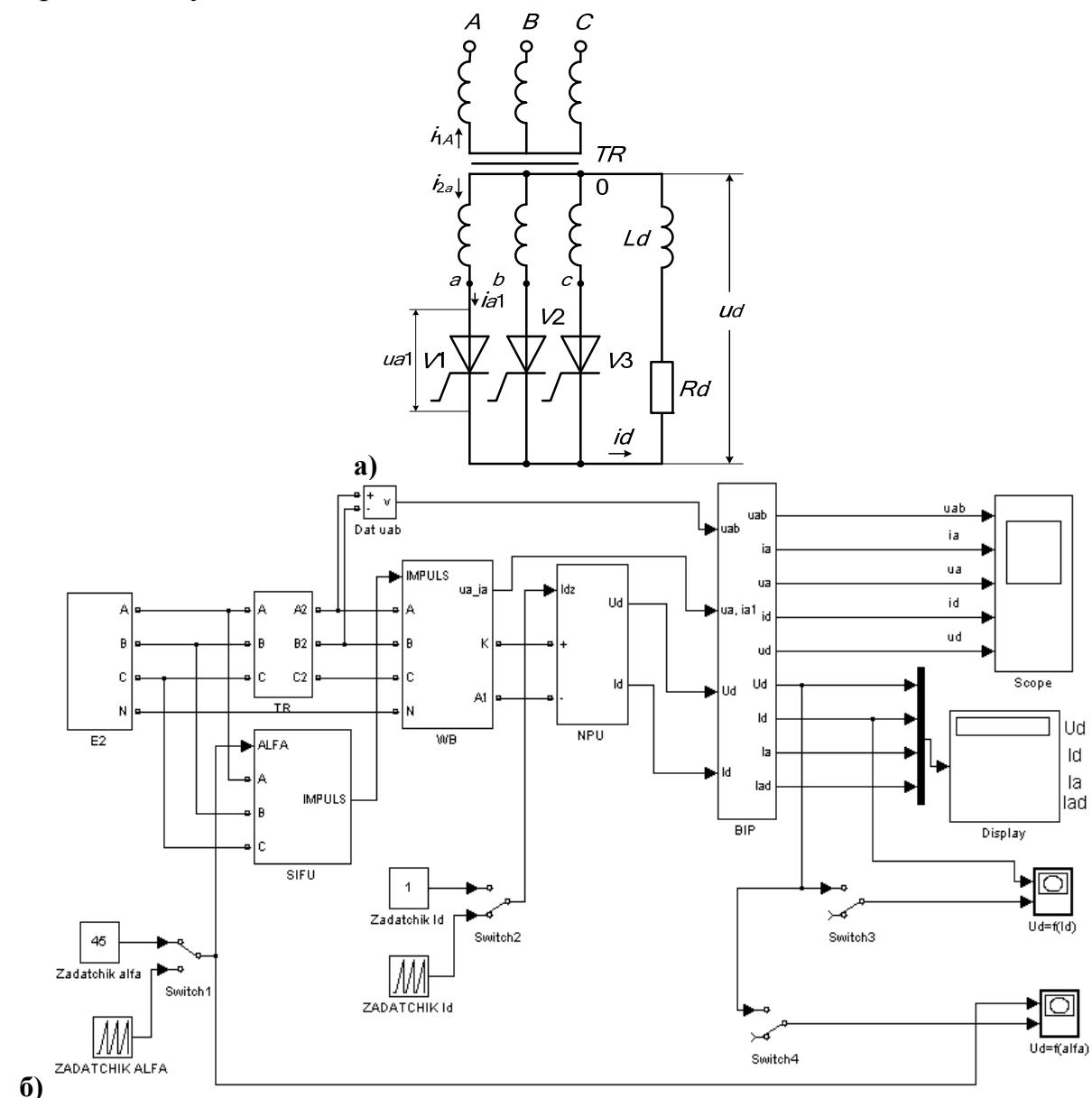


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) трехфазного нулевого выпрямителя

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

Изменяемые параметры блока:

– активное сопротивления 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  $50 \text{ Гц} \omega = 314$ ).

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*  $50 \text{ Гц}$ ;

– 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 тиристоров включенных в соответствии с трехфазной нулевой схемой. Изменяемые параметры блока:

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

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

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

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 c 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 напряжения между фазами А и В ( $uab$ );
  - 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 ( $Ud$ );
  - среднее значение выпрямленного тока ( $Id$ );
  - среднее значение анодного тока ( $Ia$ )
  - действующее значение анодного тока ( $Iad$ ).

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

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

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

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  $Ud = f(Id)$  (*Switch3*),  $Ud = f(alfa)$  (*Switch4*).

13) Графопостроители ( $Ud = f(Id)$ ,  $Ud = f(alfa)$ ) – блоки, предназначенные для построения внешней  $Ud = f(Id)$  и регулировочной характеристики  $Ud = f(\alpha)$  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  $\gamma$  для заданного варианта. Угол  $\gamma$  рекомендуется определить из соотношения

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

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  $E_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $I_d$  и рассчитанного  $\gamma$ ;

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  $\alpha$  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 вентиляй).

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	$m$	$U_{d0}$	$a$	$\alpha_{\text{тр}}$	$\alpha_{\text{мин}}$	$E_{2m}$	$B$
Трехфазная нулевая	3	$1,17 E_2$	1	$30^\circ$	$60^\circ$	$\sqrt{2} E_2$	0,46
Трехфазная мостовая	6	$2,34 E_2$	2	$60^\circ$	$30^\circ$	$\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_2$	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)

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

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

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

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

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

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

Значения  $\alpha_{\text{тр}}$ ,  $\alpha_{\text{мин}}$ ,  $E_{2m}$  приведены в табл. 2.

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

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

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

где коэффициент В приведен в табл. 2

Примечание: все характеристики строить в абсолютных единицах.

Таблица 3

**Результаты предварительных расчетов и измерений**

Пара- метры	Трехфазная мостовая			Трехфазная нулевая		
	Предв. расчет ( нагрузка)	Нагрузка RL+ПЭДС		Предв. расчет ( нагрузка)	Нагрузка RL+ПЭДС	Нагрузка RL
		Непрерывный режим	Прерывистый режим			
угол $\alpha$						
$\gamma$		см. по осцилл.	X			X
$U_d$						
$U_{a\max}$						
$I_a$						
$I_d$						
$I_{d\text{гр}}$		см. по внешн. хар-ке	X			
$I_I$					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  $Ud = f(Id)$  и  $Ud = f(alfa)$  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  $\alpha_1$  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 осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

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

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осцилограммы 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  $Ud = f(Id)$  при заданном по варианту углу управления.

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления  $\alpha_1$  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  $Ud = f(Id)$ .

Запустить расчет модели и снять внешнюю характеристику  $Ud = f(Id)$ .

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

б) снять внешнюю характеристику  $Ud = f(Id)$  при другом угле управления

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

В блоке *Zadatchik alfa* задать угол управления равный  $\alpha_2$  и повторить опыт.

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

в) снять внешнюю характеристику  $Ud = f(Id)$  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  $\alpha_1$  заданный по варианту.

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

В блоке *Zadatchik Id* задать выпрямленный ток  $Id = 0,06$  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  $Ud = f(Id)$  и  $Ud = f(\alpha)$ .

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  $Ud = f(\alpha)$ .

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

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

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

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

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

Обе полученные регулировочные характеристики, при разных значениях тока *Id*, 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  $Ud = f(Id)$  и  $Ud = f(\alpha)$  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  $\alpha_1$  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 осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

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

Добившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осцилограммы 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  $R_{dh} = U_d/I_d$ , 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 *ZADATCHNIK ALFA* и графопостроитель  $Ud = f(\alpha)$ .

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

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  $Id$  задать по варианту.

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

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

в) снять регулировочную характеристику  $Ud = f(\alpha)$  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  $R_{dh}$ .

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  $Ud = f(Id)$ .

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

а) снять внешнюю характеристику  $Ud = f(Id)$  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  $\alpha_1$  задать по варианту.

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

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

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления  $\alpha_1$  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  $R_{dh}$ . 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:

- a) 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 осцилограмм.

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 осцилограммам и характеристикам сравнить трехфазную нулевую и мостовую схемы управляемых выпрямителей:

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

По осцилограммам 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
			$I_d$ , А	$U_2$ , В	
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 ( $U_d = f(Id)$ ,  $U_d = f(alfa)$ ).

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 сдвоенные импульсы для управления тиристорами вентильного блока.

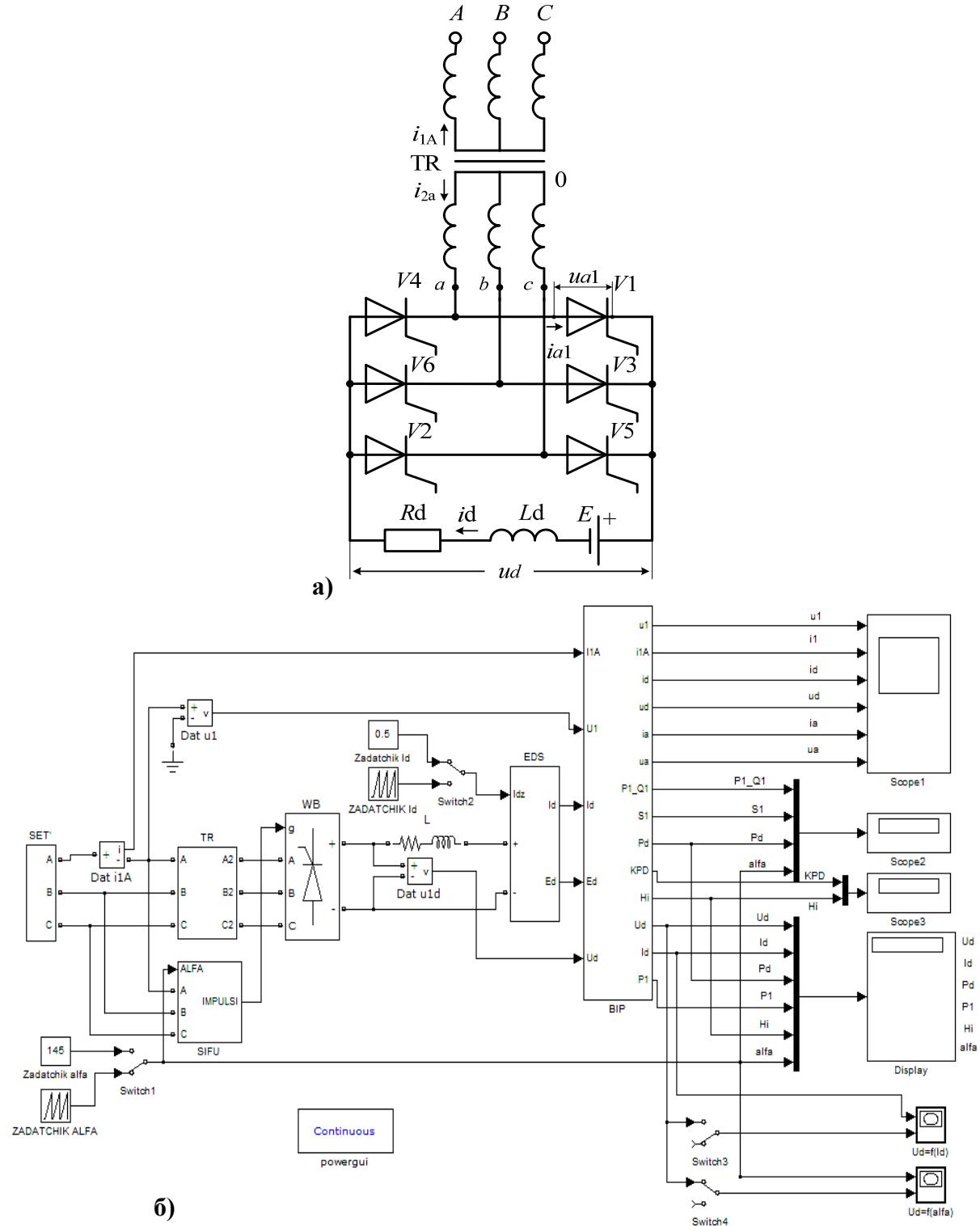


Рис. 1. Схема (а) и виртуальная модель (б) однокомплектного рекуперирующего преобразователя

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  $150^0$  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;

– демпфирующая цепь – цепь, состоящая из последовательно включенных сопротивления  $R_s$  и конденсатора  $C_s$ . Эта схема подключается параллельно тиристору и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить  $R_s = 6000$  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 *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 (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 (*u1*);

– мгновенные значения тока на первичной стороне трансформатора фазы А (*i1A*);

- мгновенные значения выпрямленного тока ( $id$ );
  - мгновенные значения выпрямленного напряжения ( $ud$ );
  - мгновенные значения анодного тока ( $ia$ );
  - мгновенные значения напряжения на вентиле ( $ua$ );
  - активную мощность ( $P1$ ), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
  - полную мощность ( $S1$ ) и реактивную ( $Q1$ ), потребляемую из сети;
  - активную мощность ( $Pd$ ), потребляемую из источника ЭДС или отдаваемую в него;
  - угол управления тиристорами  $\alpha$  ( $alfa$ );
  - КПД преобразователя ( $KPD$ );
  - коэффициент мощности  $\chi$  ( $Hi$ ).
- и измерять:
- среднее значение выпрямленного напряжения ( $Ud$ );
  - среднее значение выпрямленного тока ( $Id$ );
  - активную мощность ( $Pd$ ), потребляемую из источника ЭДС или отдаваемую в него;
  - активную мощность ( $P1$ ), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
  - коэффициент мощности  $\chi$  ( $Hi$ );
  - угол управления тиристорами  $\alpha$  ( $alfa$ ).

10) Датчики тока (*Dat i1A*) и напряжения (*Dat u1*) – позволяют осциллографировать ток и напряжение на первичной стороне трансформатора фазы А.

11) Датчик напряжения (*Dat u1d*) – позволяет осциллографировать напряжение на нагрузке;

12) Осциллографы (*Scope1*, *Scope2*, *Scope3*) – блоки, позволяющие наблюдать осцилограммы 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 alfa* и *ZADATCHIK ALFA* (*Switch1*), *Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id* (*Switch2*), а также введения в схему графопостроителей  $Ud = f(Id)$  (*Switch3*),  $Ud = f(alfa)$  (*Switch4*).

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

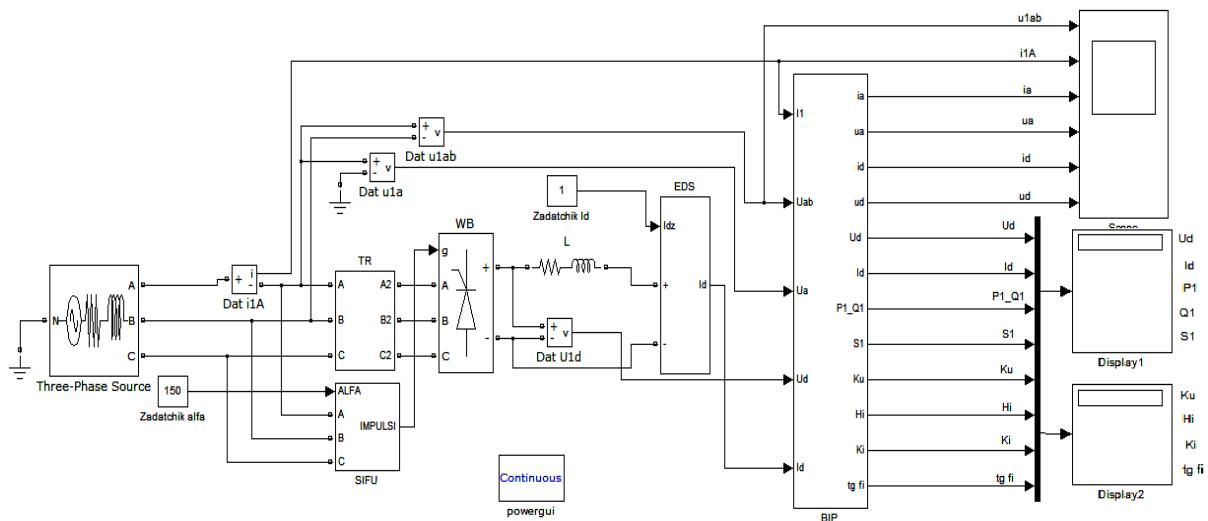
Виртуальная модель однокомплектного рекуперирующего преобразователя, выполненного по мостовой схеме, предназначенная для исследования влияния преобразователя на питающую сеть, изображены на рис. 2.

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 *Id* (*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 рекуперирующего 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 ( $ia$ );
- мгновенные значения напряжения на вентиле ( $ua$ );
- мгновенные значения выпрямленного тока ( $id$ );
- мгновенные значения выпрямленного напряжения ( $ud$ );
- среднее значение выпрямленного напряжения ( $Ud$ );
- среднее значение выпрямленного тока ( $Id$ );
- активную мощность ( $P1$ ), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
- реактивную ( $Q1$ ) мощность, потребляемую из сети;
- полную мощность ( $S1$ ) потребляемую из сети;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения ( $Ku$ );
- коэффициент мощности  $\chi$  ( $Hi$ );
- результирующий коэффициент гармоник тока ( $Ki$ );
- $\operatorname{tg} \phi$  ( $\operatorname{tg} fi$ )

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 осцилограммы 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 осцилограммами. В раскрывающемся списке выбрать «*Preobrazovatel*»;

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

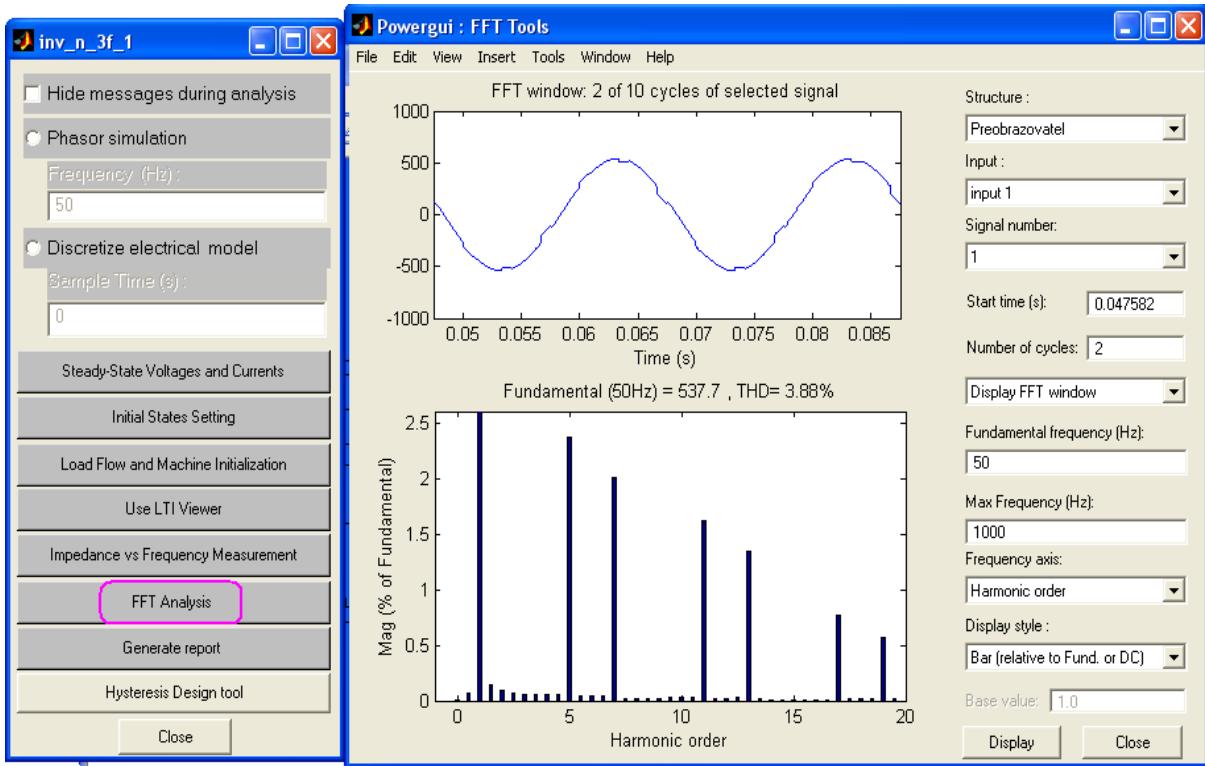


Рис. 3. Панель инструментов (а) и смотровое окно с временной диаграммой напряжения  $u1ab$  и разложением напряжения  $u1ab$  в спектр

- *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 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)*.

### **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  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , 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	<i>m</i>	$U_{d0}$	<i>a</i>
Трехфазная мостовая	6	$2,34 E_2$	2

в) рассчитать и построить регулировочную характеристику однокомплектного рекуперирующего 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  $\delta_{min}$  – минимальный угол, предоставляемый на выключение или восстановление управляемых 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  $U_2$ ,  $\alpha_2$ ,  $I_d$  и угла коммутации  $\gamma = 10^0$  по аналогии с диаграммами, приведенными в [1, рис. 7.4, б]. На диаграммах отметить углы  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $U_{a\max}$ ,  $I_{a\max}$ .

### ***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  $Ud = f(Id)$  и  $Ud = f(alfa)$  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  $\alpha_1$  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 осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений для заданного угла управления  $\alpha_1$  в выпрямительном режиме.

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

Добавившись нужного изображения (два полных периода), обработать эти осцилограммы 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 осцилограммы 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  $Ud = f(\alpha)$ .

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

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

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

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

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

По осцилограммам 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  $\chi$  (*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  $Ud = f(Id)$ .

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

а) снять внешнюю характеристику  $Ud = f(Id)$  в выпрямительном режиме.

В блоке *Zadatchik alfa* угол управления  $\alpha_1$  задать по варианту.

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

б) снять внешнюю характеристику  $Ud = f(Id)$  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 $\delta_{min} = const$ .

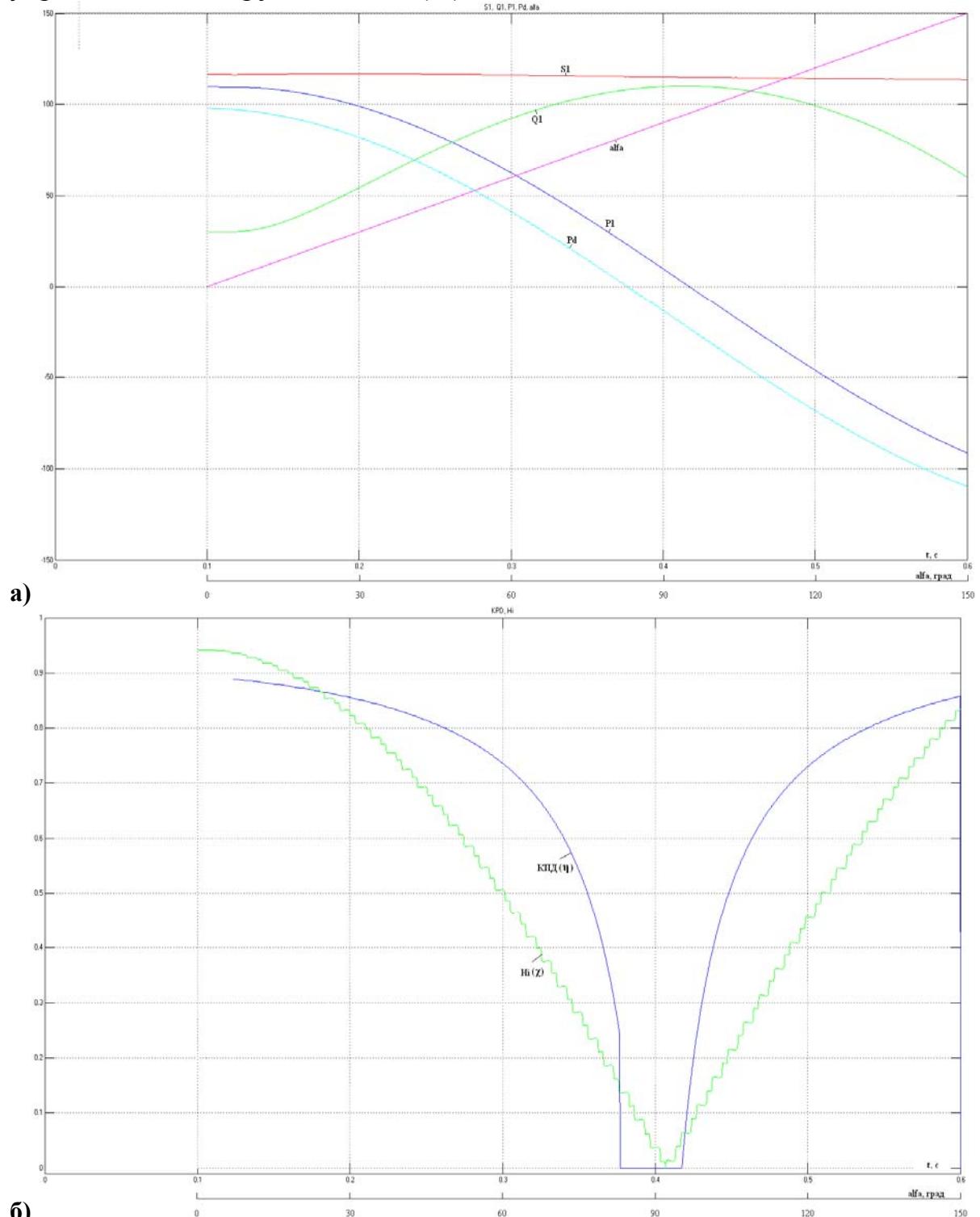
Переключатель  $Switch1$  установить в верхнее положение, подключив в схему блок *Zadatchik alfa*.

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

Переключатели  $Switch3$  и  $Switch4$  установить в нижнее положение, отключив графопостроители  $Ud = f(Id)$  и  $Ud = f(alfa)$ .

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

преобразователя  $Udmax = f(Id)$  и зависимость допустимого угла управления от нагрузки  $\alpha_{max} = f(Id)$ .



**Рис. 4. Пример обработки осциллографов 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 однокомплектного рекуперирующего 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  $\alpha_1$  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  $\alpha_1$  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

Пара- метры	$X_a$ (задано по варианту)	$2X_a$	Индуктивное сопротивление сети $L_{Set}$ ( <i>Source inductance</i> ) (задано по варианту)	$2 \cdot L_{Set}$
$X_a$				
$U_d$				
$I_d$				
$P_I$				
$Q_1$				
$S_1$				
$K_u$				
$\chi$ ( <i>Hi</i> )				
$K_i$				
$\operatorname{tg} \phi$ ( $\operatorname{tg} \phi_1$ )				

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 осциллографы 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. Осцилограммы 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 осцилограмм и характеристик:

– указать, чем отличаются осцилограммы 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
	$\alpha_1$ , 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:

- Студенты, получившие подвариант А, выполняют пункты 1а, б, г; Б – пункты 1а, в; В – пункты 1а, д.
- При расчете принимать  $E_2 = U_2$  на холостом ходу;  $U_{T(T0)} = 0,8$  В;  $r_T = 0,2$  Ом,  $r_a = 1,5$  Ом;  $\delta_{min} = 15^\circ$ .
- Все расчеты и построения выполняются для трехфазной мостовой схемы ( $m = 6$ ).
- При построении диаграмм принимать  $x_d = \infty$ .
- Принять  $\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$ .

## **Работа № 5. 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 осцилограмм 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 (*Ud = f(Id)*).

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:

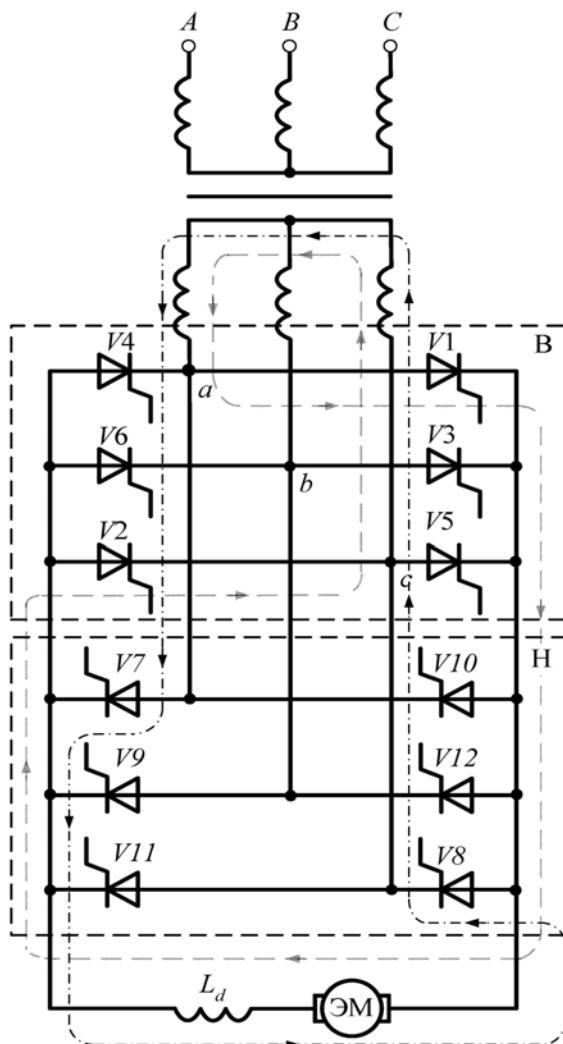
– индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к вторичной стороне, установить  $L_a = X_a / 314$  (значение  $X_a$  см. в приложении к таблице вариантов).

– активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной стороне (установить  $R_a = 1,65$  Ом, см. приложение к табл. вариантов).

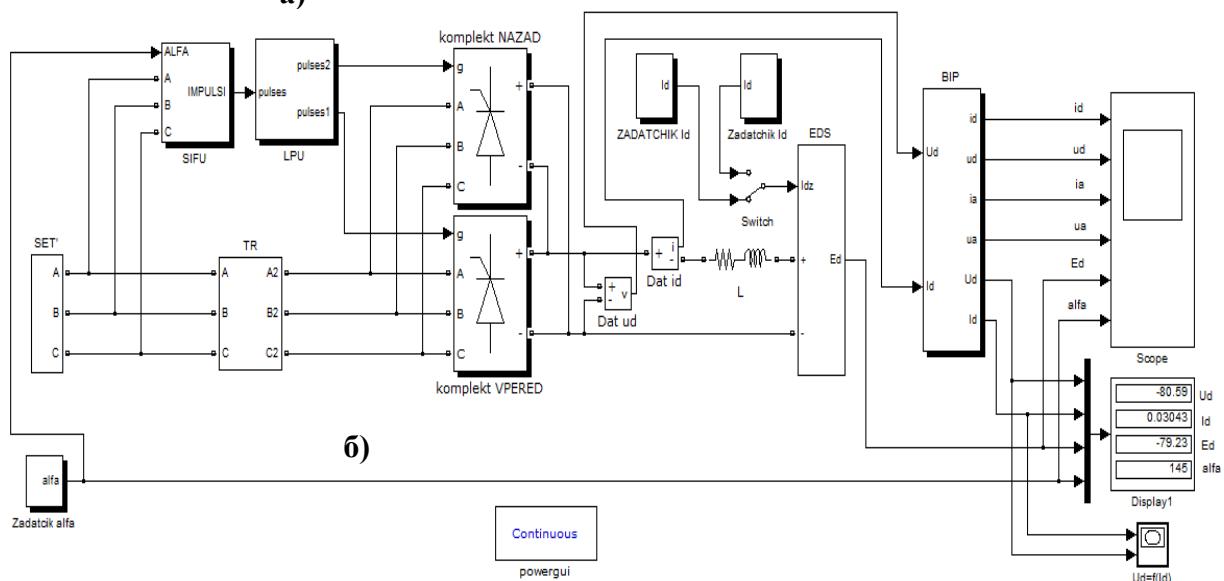
– фазное напряжение на первичной стороне трансформатора *U1* (установить 220 В);

– фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора *U2* (установить 48 В).

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



a)



б)

**Рис. 1. Принципиальная схема (а) реверсивного преобразователя и его виртуальная модель (б) предназначенная для снятия осциллографм и внешних характеристик**

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 ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  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  $Rs$  и конденсатора  $Cs$ . Эта схема подключается параллельно тиристору и устраняет перенапряжения при выключении вентилей (установить  $Rs = 6000$  Ом,  $Cs = 1e^{-7}$ );

– 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).

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  $Id$  (*Zadatchik Id* и *ZADATCHIK Id*) – блоки задания по току нагрузки  $Id$  за счет автоматического регулирования величины ЭДС (ПЭДС).

Блок *Zadatchik Id* позволяет задавать фиксированное значение выпрямленного тока  $Id$  (установить по варианту) и предназначен для снятия осцилограмм;

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 (*i1a*);
- мгновенные значения напряжения на вентиле (*u1a*);
- напряжение источника ЭДС (*E*);
- угол управления тиристорами  $\alpha$  (*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.

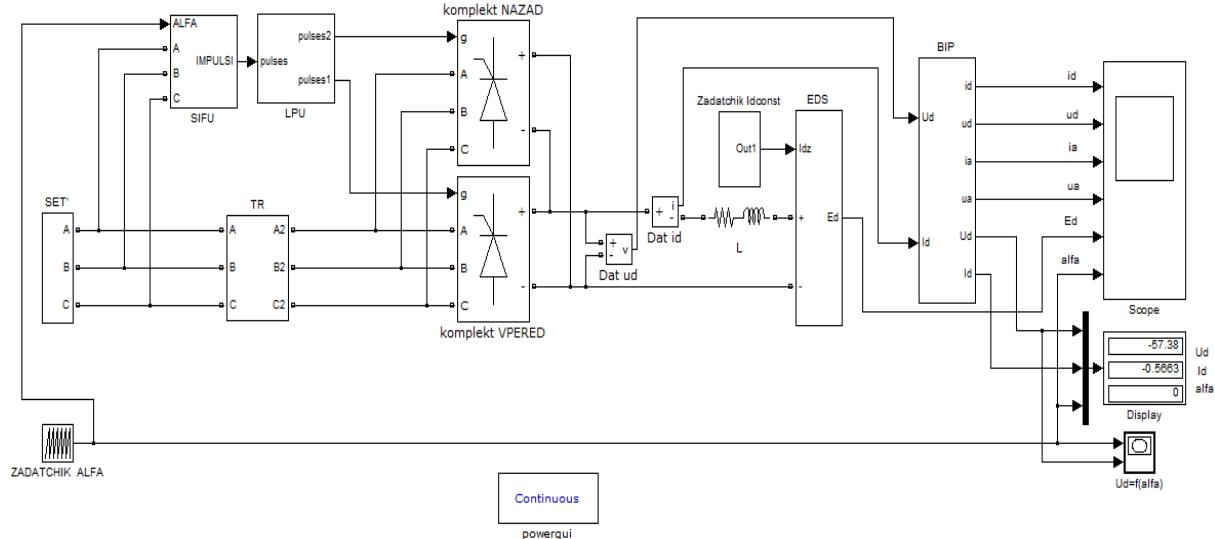
12) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений, снимаемых с блока *BIP*;

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 (*Ud = f(Id)*) – блок, предназначенный для построения внешней  $Ud = f(Id)$  характеристики в автоматическом режиме.

Виртуальная модель реверсивного преобразователя, предназначенная для снятия осцилограмм и регулировочных характеристик изображена на рис. 2.



**Рис. 2. Виртуальная модель реверсивного преобразователя, предназначенная для снятия осцилограмм 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  $i_d$ , Dat  $u_d$ ), осциллограф (Scope), дисплей (Display) и графопостроитель ( $U_d = f(\alpha)$ ).

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 ( $U_d = f(\alpha)$ ) – блок, предназначенный для построения регулировочной  $U_d = f(\alpha)$  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  $U_{d\theta} = f(\alpha)$  и  $U_{dh} = f(\alpha)$  в абсолютных единицах для непрерывного режима при заданном токе нагрузки  $I_d$ .

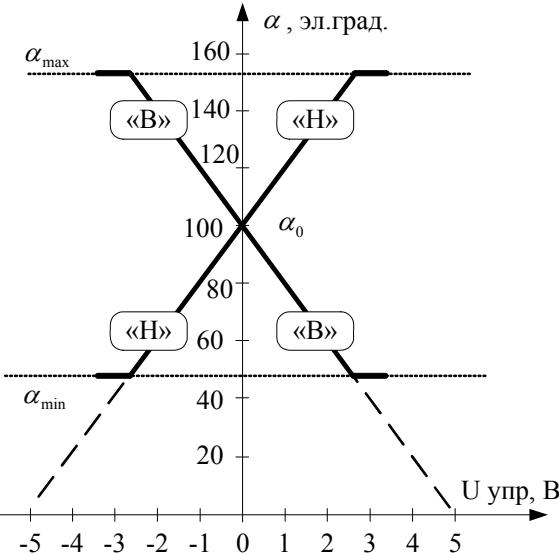
Расчет регулировочной характеристики реверсивного преобразователя выполнить по уравнениям внешних характеристик для непрерывного режима

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

$$U_{dh} = -U_{d\theta};$$

в) рассчитать и построить регулировочные характеристики реверсивного преобразователя  $U_d = f(\alpha)$  (уравнения 1), регулировочные характеристики системы управления реверсивного преобразователя  $\alpha = f(U_{\text{упр}})$ , и реверсивного преобразователя вместе с системой управления  $U_d = f(U_{\text{упр}})$  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  $\alpha_0$  и  $\frac{\Delta\alpha}{\Delta U}$  представлен на рис. 3. Углы  $\alpha_{max}$  и  $\alpha_{min}$  определяются при выполнении пункта е).



**Рис. 3. Пример регулировочной характеристики системы управления реверсивного преобразователя**

г) рассчитать и построить внешние характеристики реверсивного преобразователя  $U_d = f(Id)$  в абсолютных единицах для углов управления  $\alpha_1$  (выпрямительный режим комплектов вентилей «Вперед» и «Назад») и  $\alpha_2$  (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

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

$$U_{dmaxH} = -U_{dmax\alpha}, \text{ при } I_{dh} = -I_{da};$$

е) определить максимально допустимый угол  $\alpha_{max}$  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  $\alpha_{min}$ , 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 характеристики при различных токах и различных видах нагрузки и выбор угла  $\alpha_0$  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  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  комплектами «Вперед» и «Назад» задать по варианту.

В блоке *Zadatchik Id* задать выпрямленный ток *Id* 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  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  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 осцилограммы 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  $Ud$  и  $Ed$ .

**Таблица 1**  
**Результаты предварительных расчетов и измерений**

Комплект «В» или «Н»				
Режим «В» или «Н»				
$\alpha$				
$Ud$				
$Id$				
$Ed$				

1.3. Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной нагрузке с ПЭДС.

Ключ *Switch* установить в нижнее положение, подключив в схему блок *ZADATCHNIK Id*.

а) запустить модель и снять внешнюю характеристику  $Ud = f(Id)$ .

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  $Rd = Ud/Id$  (значение  $Ud$  взять из табл. 2, для комплекта вперед, работающего в выпрямительном режиме;  $Id$  из таблицы вариантов).

- вторая точка установить  $Rd^* = Rd \cdot 2$ .

- третья точка установить  $Rd^{**} = Rd \cdot 10$ .

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  $\alpha_0$  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  $\alpha_0$  для остановки двигателя и согласования характеристик. По регулировочной характеристике, снятой при малом токе (п. 2.2 б), найти при каком угле управления  $\alpha$  напряжение  $Ud$  близко к нулю.

Записать полученное значение угла  $\alpha_0$  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. Осцилограмму мгновенных значений токов и напряжений для заданных углов управления  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  при работе комплекта «Вперед» и комплекта «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах. На осцилограмме 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  $\alpha_0$  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 осцилограммам и результатам измерений сравнить работу комплектов «Вперед» и «Назад» в выпрямительном и инверторном режимах

По осцилограммам и результатам измерений определить, на что влияет характер нагрузки.

### *Контрольные вопросы*

1. Почему в реверсивном преобразователе предусматриваются два комплекта вентилей?
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  $U_{\text{вх}} = 0$  угол управления  $\alpha_0$  должен быть больше  $90^\circ$ ?

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	$I_{\text{dh}}$ , А	$\alpha_1$ , град	$\alpha_0$ , град	№ варианта	$I_{\text{dh}}$ , 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  $\frac{\Delta\alpha}{\Delta U} = 20 \frac{\text{град}}{\text{В}}$  (см. рис. 3).

4. Условия согласования  $\alpha_0 = \frac{\alpha_B + \alpha_H}{2}$ .

## **Работа № 6. 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 *Rip* = 2 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 мкФ);

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

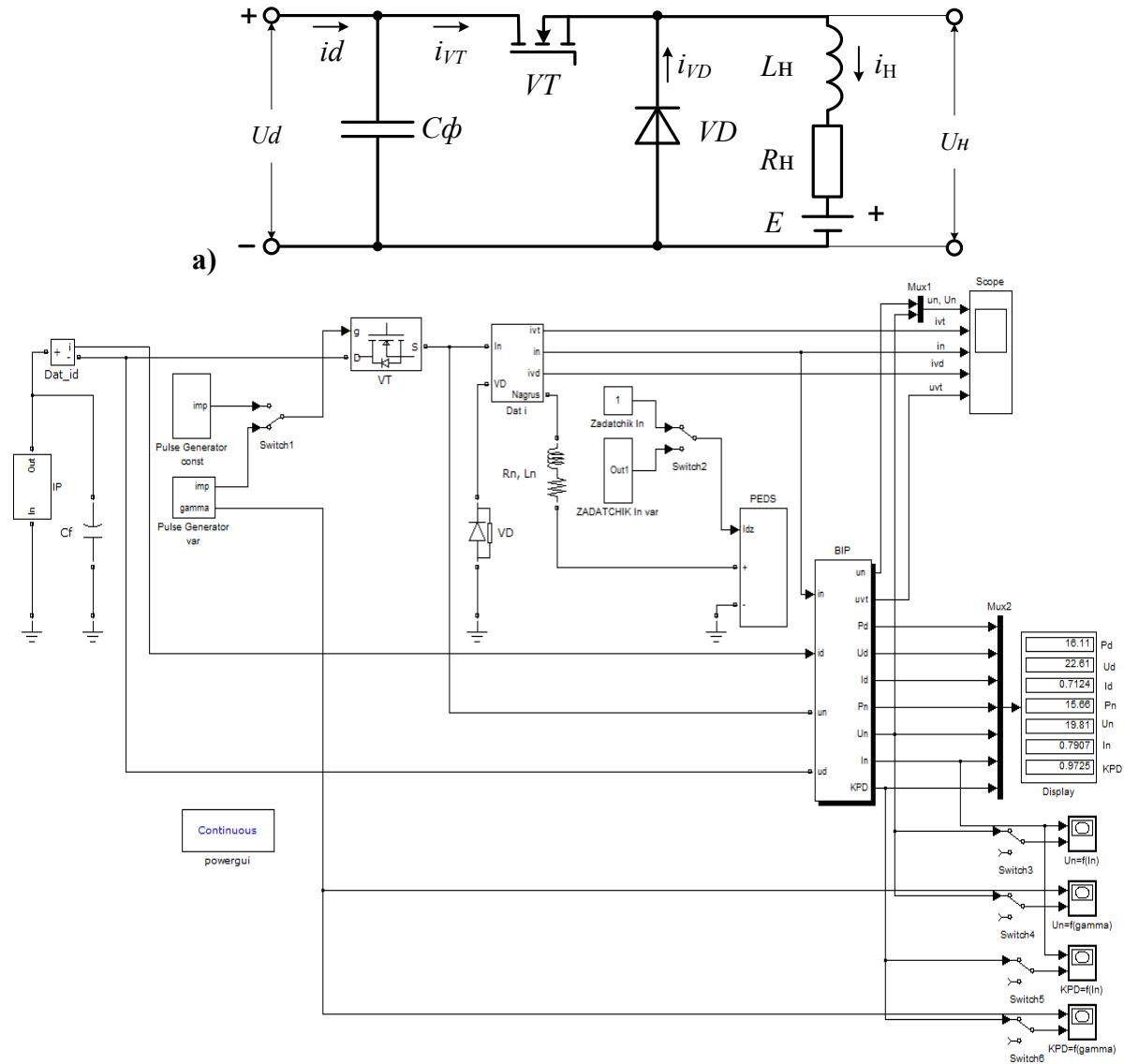
Изменяемые параметры блока:

- дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии *Ron* (установить 0,5 Ом);
- индуктивность транзистора во включенном состоянии *Lon* (установить 0,1 мкГн);
- внутреннее сопротивление диода *Rd* (установить 0,5 Ом);
- демпфирующая цепь – *Rs* = 15 Ом, *Cs* = 0,003 мкФ.

4) генератор импульсов (*Pulse Generator const*) – блок, формирующий импульсы управления транзистором с постоянной относительной длительностью управляемого импульса (скважностью)  $\gamma$ .

Основные параметры блока *Pulse Generator const*:

- частота управляющих импульсов (*Frequency*) – задать 10000 Гц;
- скважность  $\gamma$  (*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.

6) 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 противо-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 противо-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 (*uvt*);
- 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 осцилограммы токов и напряжений, снимаемых со всех датчиков и блока *BIP*:

- мгновенное и среднее значение напряжения на нагрузке (*un*, *Un*);

- мгновенное значение тока на входе ППН (*id*) и тока, протекающего через транзистор (*id*, *ivt*);

- мгновенное значение тока нагрузки (*in*);

- мгновенное значение тока протекающего через диод (*ivd*);

- мгновенное значение напряжения на транзисторе *uvt*.

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 мГн);
- внутреннее сопротивление диода  $R_d$  (установить 0,5 Ом);
- демпфирующая цепь –  $R_s = 15$  Ом,  $C_s = 0,003$  мкФ.

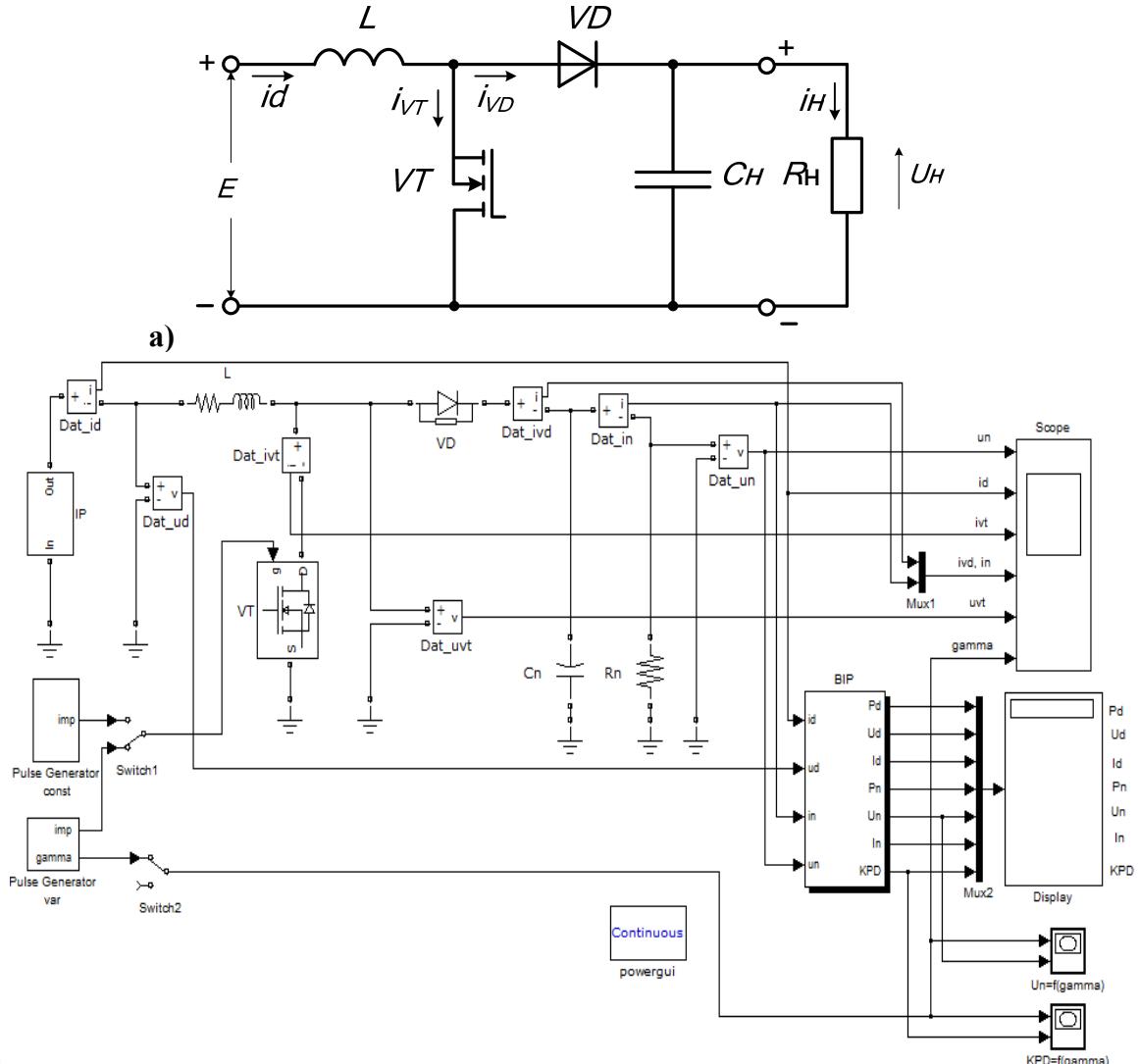


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) повышающего преобразователя постоянного напряжения

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 относительной длительность управляющего импульса (скважностью)  $\gamma$ .

Основные параметры блока *Pulse Generator const*:

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

– скважность  $\gamma$  (*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  $Rs = 10^4$  Ом,  $Cs = 0,01$  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 осцилограммы токов и напряжений, снимаемых с датчиков:

- мгновенное значение напряжения на нагрузке (*in*);
- 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 *uvt*.
- скважность  $\gamma$  (*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 ВИР.

15) графопостроители ( $U_n = f(\gamma)$ ,  $KPD = f(\gamma)$ ) – 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  $\gamma$  – относительная длительность включенного состояния транзистора;

в) определить коэффициент  $\gamma$ , 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  $\gamma$  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  $\gamma$  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
$P_d$	X		
$E$			
$I_d$	X		
$P_H$	X		
$U_H$			
$I_H$			
$\eta$	X		
$\gamma$			
$I_{Hgr}$			
$q_i$			
$E_{min}$			

### *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\_pon*». 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 осцилограммы 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 осцилограммы 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 осцилограммам 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 осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений.

По осцилограммам 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  $\gamma$ , 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  $U_n = f(I_n)$  и  $KPD = f(I_n)$ ;

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  $I_{H\text{гр}}$ .

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  $I_{H_{\text{гр}}}$ .

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  $I_{H_3}$ .

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  $I_H = I_{H_3}$ .

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

Переключатели *Switch4* и *Switch6* 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  $U_H = f(\gamma)$  характеристику и зависимость  $\eta = f(\gamma)$  при другом токе нагрузки  $I_H$ .

В блоке *Zadatchik In* задать ток нагрузки  $I_H^* = I_{H_3}/2$  (или другом, 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\_pov*». 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  $Un = f(\gamma)$ ,  $KPD = f(\gamma)$ .

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

а) запустить расчет модели

б) снять осцилограммы 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 осцилограммы 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 осцилограммам 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**

<b>Параметры</b>	<b>Емкость фильтра</b>	
	<b><math>C</math></b>	<b><math>0,1 \cdot C</math></b>
<b><math>P_d</math></b>		
<b><math>U_d</math></b>		
<b><math>I_d</math></b>		
<b><math>P_h</math></b>		
<b><math>U_h</math></b>		
<b><math>I_h</math></b>		
<b><math>\eta</math></b>		
<b><math>q_u</math></b>		

в) в блоке фильтр уменьшить емкость С 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  $\gamma$ .

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  $R_H = 3 R_n$ .

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<sub>n</sub>*.

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<sub>n</sub>*. Построить характеристики  $U_H = f(I_H)$  и  $\eta = f(I_H)$  по трем точкам:  $R = R_n$ ,  $R = 2R_n$  Ом и  $R = 3R_n$  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	$R_H$	$2R_H$	$3R_H$
$U_H$			
$I_H$			
$\eta$			

***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. Осцилограммы 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 осцилограмм 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 такая 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 такая 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 нагрузки?
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
		$E, В$	$U_H, В$	$R_H, Ом$	$R_H, Ом$	$C_H,$ $мкФ$
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:

- 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.
- Индуктивность нагрузки в понижающем ППН  $L_H = 2 \text{ мГн}$ .
- Несущая частота 10000 Гц.
- При выполнении предварительного расчета принять, что все элементы идеальны.

## **Работа №7. 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 осцилограмм 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 (*Ulin(1) = f(I(1)); KPD = f(I(1)); cosFi = f(I(1))*).

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

- 1) источник питания (*IP*). Изменяемые параметры блока:
  - ЭДС *Ed* установить в соответствии с заданным вариантом;
  - внутреннее сопротивление *Rip* = 2 Ом.

2) конденсатор (*Cd*) – уменьшает потери в источнике питания, делая потребление энергии от него более постоянным (установить *Cd* = 1000 мкФ);

3) датчики тока (*id*, *id1*, *Datch I*) – позволяют осциллографировать токи, протекающие в схеме:

*Dat id* – ток, потребляемый от источника питания;

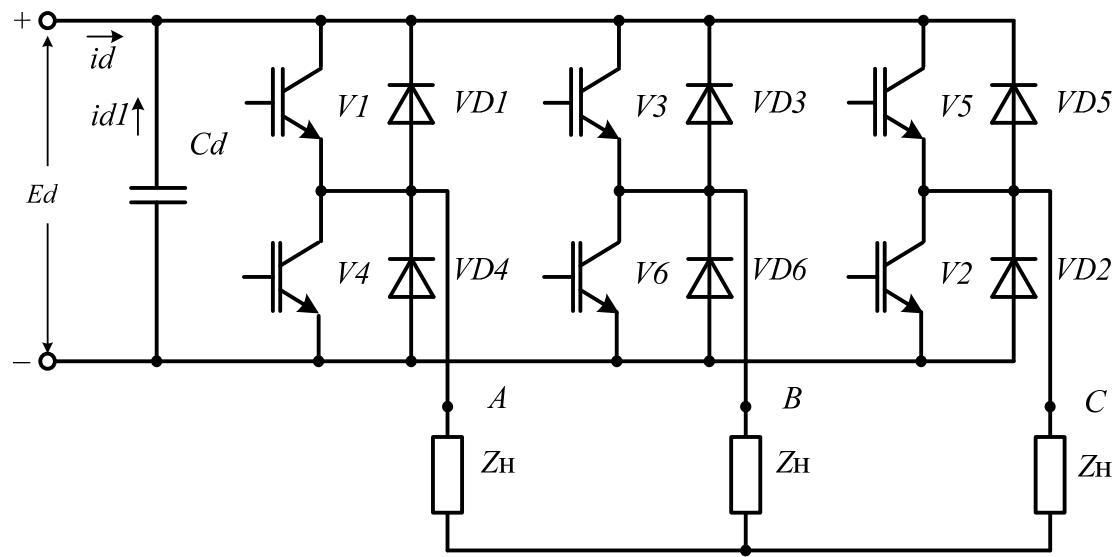
*Dat id1* – ток на входе инвертора (после конденсатора);

*Datch I* – токи, протекающие в каждой фазе нагрузки.

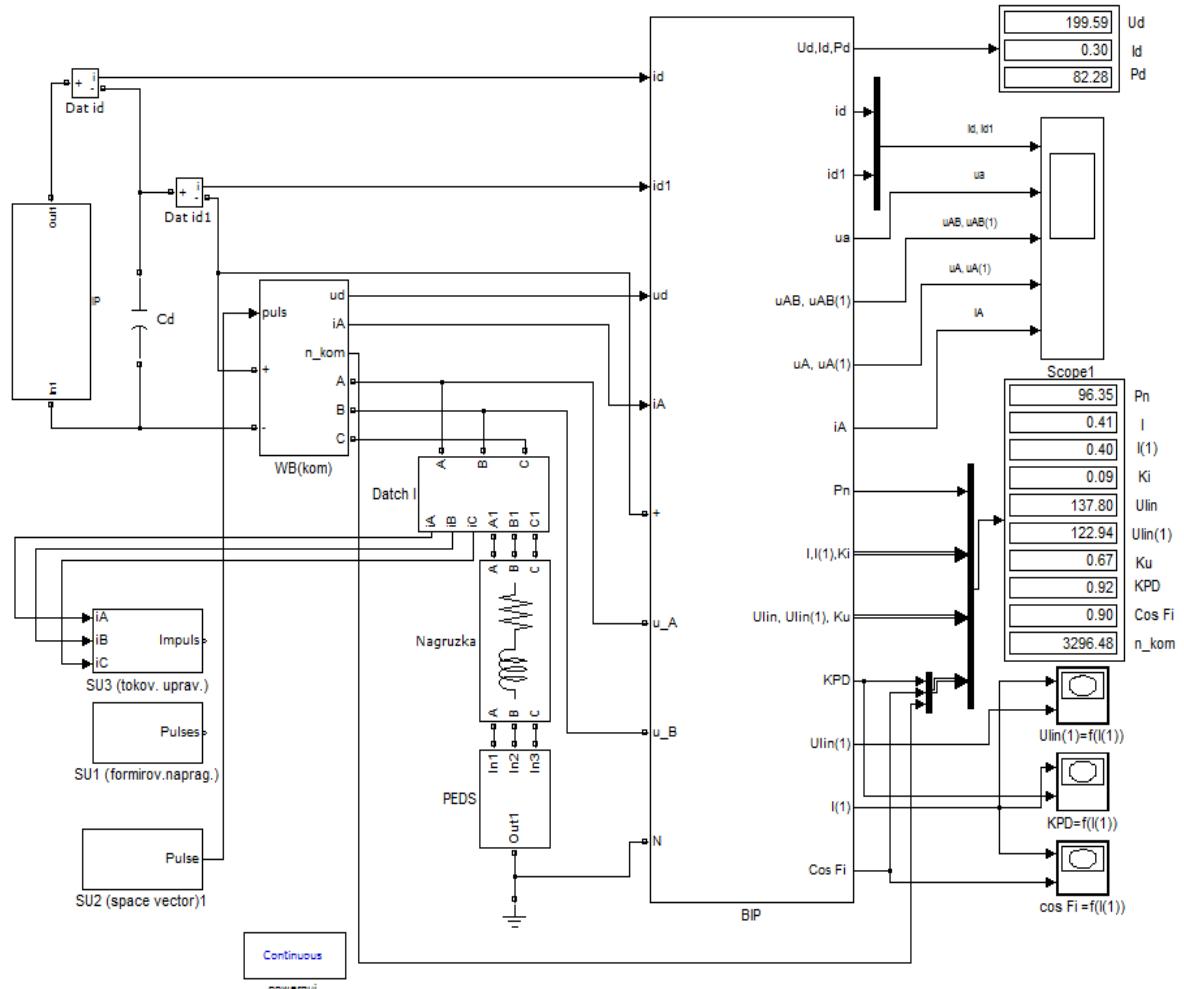
4) системы управления (*SU1(formirov.naprag.)*, *SU2 (space vector)*, *SU3(tokov.uprav.)*) реализуют три способа импульсной модуляции:

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 Гц;



a)



б)

Рис. 1. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) силовых цепей трехфазного автономного инвертора напряжения

- коэффициент модуляции<sup>1</sup> (*Modulation index, (0 < m < 1)*) – установить равным 0.9, ( $\mu = \frac{U_{\text{мод max}}}{U_{\text{ГПН max}}} \approx \frac{U_{\text{л(1)}}}{U_{\text{л(1) max}}}$ );

– 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 (*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  $R_{dif} = 0,5$  Ом).

---

<sup>1</sup> 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 = Em/Ed*) и конечное (*PEDS konech otnosit = Em/Ed*) значение величины противо-ЭДС (в относительных единицах). При снятии осциллографм 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  $(E_m/Ed)_{\text{нач}} = 0$  и  $(E_m/Ed)_{\text{кон}} = 0,48$ ;
- для схемы АИН с формированием фазных напряжений с помощью пространственного вектора (управление от *SU2*) установить  $(E_m/Ed)_{\text{нач}} = 0$  и  $(E_m/Ed)_{\text{кон}} = 0,55$ .
- 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 *Ud*,
- среднее значение тока потребляемого от источника питания АИН *Id*;
- активную мощность, потребляемую от источника постоянного тока *Pd*;
- мгновенное значение тока, потребляемого от источника питания АИН *id*;
- мгновенное значение тока на входе АИН (после конденсатора) *id1* в цепи постоянного тока (источника питания);
- мгновенное значение напряжения на вентиле *ia*;
- мгновенное значение линейного напряжения *uAB* и его первой гармоники *uAB(1)*;

- мгновенное значение фазного напряжения  $uA$  и его первой гармоники  $uA(1)$ ;
- мгновенное значение фазного тока  $i$  (соответствует  $I_\phi$ );
- активную мощность, передаваемую в нагрузку  $Pn$ ;
- действующее значение фазного тока  $I$  и амплитуду его первой гармоники ( $I(1)$ );
- результирующий коэффициент гармоник тока  $Ki$  ( $K_i$ );
- действующее значение линейного напряжения  $Ulin$  и его первой гармоники  $Ulin(1)$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $Ku$  ( $K_U$ );
- коэффициент полезного действия  $KPD$  ( $\eta$ );
- $\cos Fi$  ( $\cos \varphi_h$ ).

Изменяемые параметры блока BIP:

- частота выходного напряжения, Гц (*Frequency of output voltage, (Hz)*)
- установить равной 50 Гц;
- 9) осциллограф (*Scope1*) – блок, позволяющий наблюдать осцилограммы 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 *BIP*.
- 11) графопостроители ( $Ulin(1) = f(I(1))$ ;  $KPD = f(I(1))$ ;  $\cos Fi = f(I(1))$ )
- блоки, предназначенные для построения внешней характеристики  $U_{\text{л}(1)} = f(I_\phi)$ , а также зависимостей  $\eta = f(I_\phi)$  и  $\cos \varphi = f(I_\phi)$  в автоматическом режиме.

### **Предварительное домашнее задание:**

- 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;
- рассчитать для заданного варианта напряжения источника питания  $E_d$  максимальные действующие значения первой гармоники линейного  $U_{\text{л}(1)\text{max}}$  и фазного  $U_{\phi(1)\text{max}}$  напряжений на нагрузке при разных способах модуляции (вентили принимать идеальными):
  - при формировании напряжений на выводах относительно средней точки источника питания:

$$U_{\phi(1)\text{max}} = U_d \cdot k_m, \quad (1)$$

$$U_{\text{л}(1)\text{max}} = \sqrt{3} \cdot U_d \cdot k_m; \quad (2)$$

– при формировании напряжений с помощью пространственного вектора:

$$U_{\text{л(1)max}} = \frac{U_d}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$U_{\phi(1)\text{max}} = U_d \cdot k_m; \quad (4)$$

– 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  $U_{\phi(1)}$  и тока фазы  $I_{\phi(1)}$ , принимая, что источник питания и вентили идеальны. Коэффициент модуляции  $\mu$  и параметры нагрузки активное сопротивление фазы  $r_{n\phi}$  и  $\cos\varphi_n$  взять из таблицы вариантов и примечаний к ней.

$$U_{\phi(1)\text{id}} = \mu U_{\phi(1)\text{max}}; \quad (5)$$

$$I_{\phi(1)} = \frac{U_{\phi(1)\text{id}}}{z_{n\phi}}, \quad (6)$$

$$z_{n\phi} = \frac{r_{n\phi}}{\cos\varphi_n}; \quad (7)$$

Определить индуктивность фазы нагрузки

$$L_{n\phi} = \frac{z_{n\phi} \sin\varphi_n}{\omega}, \quad (8)$$

где  $\omega = 50$  Гц.

г) рассчитать для заданного варианта действующие значения первой гармоники линейного  $U_{\text{л(1)}}$  и фазного  $U_{\phi(1)}$  напряжений на нагрузке при неидеальном источнике питания, неидеальных ключах, рассчитанном токе нагрузки (по формуле 6) и коэффициенте модуляции  $\mu$ :

$$U_{\phi(1)} = \mu U_{\phi(1)\text{max}} - I_{\phi(1)} \cos\varphi_n (3\mu^2 k_m^2 r_{\text{ип}} + r_k), \quad (9)$$

$$U_{\text{л(1)}} = \sqrt{3} U_{\phi(1)} \quad (10)$$

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  $r_{ип} = 1 \text{ Ом}$ ;
- падение напряжение на транзисторе  $U_0 = 2 \text{ В}$ ;

Результаты предварительного расчета занести в таблицу 2.

д) рассчитать внешнюю характеристику при изменении  $I_\phi$  и постоянстве  $\cos \varphi$  по уравнению.

$$U_{\pi(1)} = \sqrt{3}(\mu U_{\phi(1)\max} - I_{\phi(1)} \cos \varphi_h (3\mu^2 k_m^2 r_{ип} + r_k)) \quad (12)$$

е) рассчитать зависимость КПД АИН от глубины регулирования  $\mu$  при рассчитанном токе  $I_{\phi(1)}$  (по формуле 6) и постоянстве  $\cos \varphi$ :

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu k_m \cos \varphi_h} \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_0}{U_d} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (t_{вкл} + t_{выкл}) \cdot n_{ком} + \frac{I_{\phi(1)} r_\delta}{U_d} \right)}, \quad (13)$$

где:  $r_\delta$  – дифференциальное сопротивление транзистора во включенном состоянии (принять  $r_\delta = 0,5 \text{ Ом}$ );

$n_{ком}$  – число включений (коммутаций) одного транзистора в секунду, зависящее от способа модуляции:

– при формировании напряжений на выводах относительно средней точки источника питания:

$$n_{ком} = f_{нес}, \quad (14)$$

– при формировании фазных напряжений с помощью пространственного вектора:

$$n_{ком} = f_{нес} \cdot 0,66. \quad (15)$$

Принять, что несущая частота  $f_{нес} = 5000 \text{ Гц}$ , а суммарное время включения-выключения транзистора  $t_{вкл.} + t_{выкл.} = 2 \text{ мкс}$ .

Зависимости КПД АИН от глубины регулирования построить по трем точкам (по аналогии с экспериментом):

- заданная величина  $\mu = 0,9; f = 50 \text{ Гц}$ ;
- $\mu' = 0,45; f' = 25$ ;
- $\mu' = 0,18; f' = 10$ .

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**

Пара- метры	Предварит. расчет		Эксперимент			
	Вид ИМ					
			1	2	3	
	Вид ИМ	1	Заданный режим	$f_{\text{нec}} \downarrow$ 10 раз	Заданный режим	$f_{\text{нec}} \downarrow$ 10 раз
$r_{\text{нф}}$						
$\mu$					X	X
$f_{\text{нec}}$					X	X
$n_{\text{ком}}$						
ШТК			X	X	X	X
$U_d, \text{ В}$						
$I_d, \text{ А}$	X					
$P_d, \text{ Вт}$	X					
$I_{\phi}, \text{ А}$	X					
$I_{\phi(1)}, \text{ А}$						
$I_{\phi(1)m}, \text{ А}$			X	X	X	X
$K_I$	X					
$U_{\text{л}}, \text{ В}$						
$U_{\text{л}(1)}, \text{ В}$						
$P_n, \text{ Вт}$						
$K_U$	X					
$\eta$	X					
$\cos\phi_n$	X					

в) исследование влияния несущей частоты  $f_{\text{нec}}$  на синусоидальность кривой тока и на КПД. Для этого в параметрах блока *SU1* (*formirov.naprag.*) несущую частоту уменьшить в 10 раз  $f_{\text{нec}}^* = 0.1 \cdot f_{\text{нec}}$  (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 коридора (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  $Ku$ ,  $Ki$ ,  $\eta$ ,  $n_{\text{ком.}}$ . 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  $\eta = f(I_{A(1)})$ ,  $U_{\text{л}(1)} = f(I_{A(1)})$  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  $\mu$  (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
$\mu$	0,9	0,45	0,18
$f_{\text{нec}}$			
$n_{\text{ком}}$			
$U_d, \text{В}$			
$I_d, \text{А}$			
$P_d, \text{Вт}$			
$I_\phi, \text{А}$			
$I_{\phi(1)}, \text{А}$			
$K_I$			
$U_{\text{л}}, \text{В}$			
$U_{\text{л}(1)}, \text{В}$			
$P, \text{Вт}$			
$\eta$			
$\cos\varphi$			
$K_U$			

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 осцилограмм 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
$E_d, \text{В}$	200	220	240	250	200	220	240	250	230	220	240	250
$r_{\text{нф}}, \text{Ом}$	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
$E_d, \text{В}$	200	220	240	250	200	220	240	250	200	220	230	240
$r_{\text{нф}}, \text{Ом}$	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 №8. 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, V* = 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:

a) *SU sim* – для симметричного управления. Изменяемые параметры блока:

– амплитуда тока (*Amplitude of the current I1m, 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 1А.

– частота сети (*Frequency, f(Hz)*) – установить 50 Гц.

б) *SU nesim* – для несимметричного управления. Изменяемые параметры блока:

– амплитуда тока (*Amplitude of the current I1m, 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 управления.

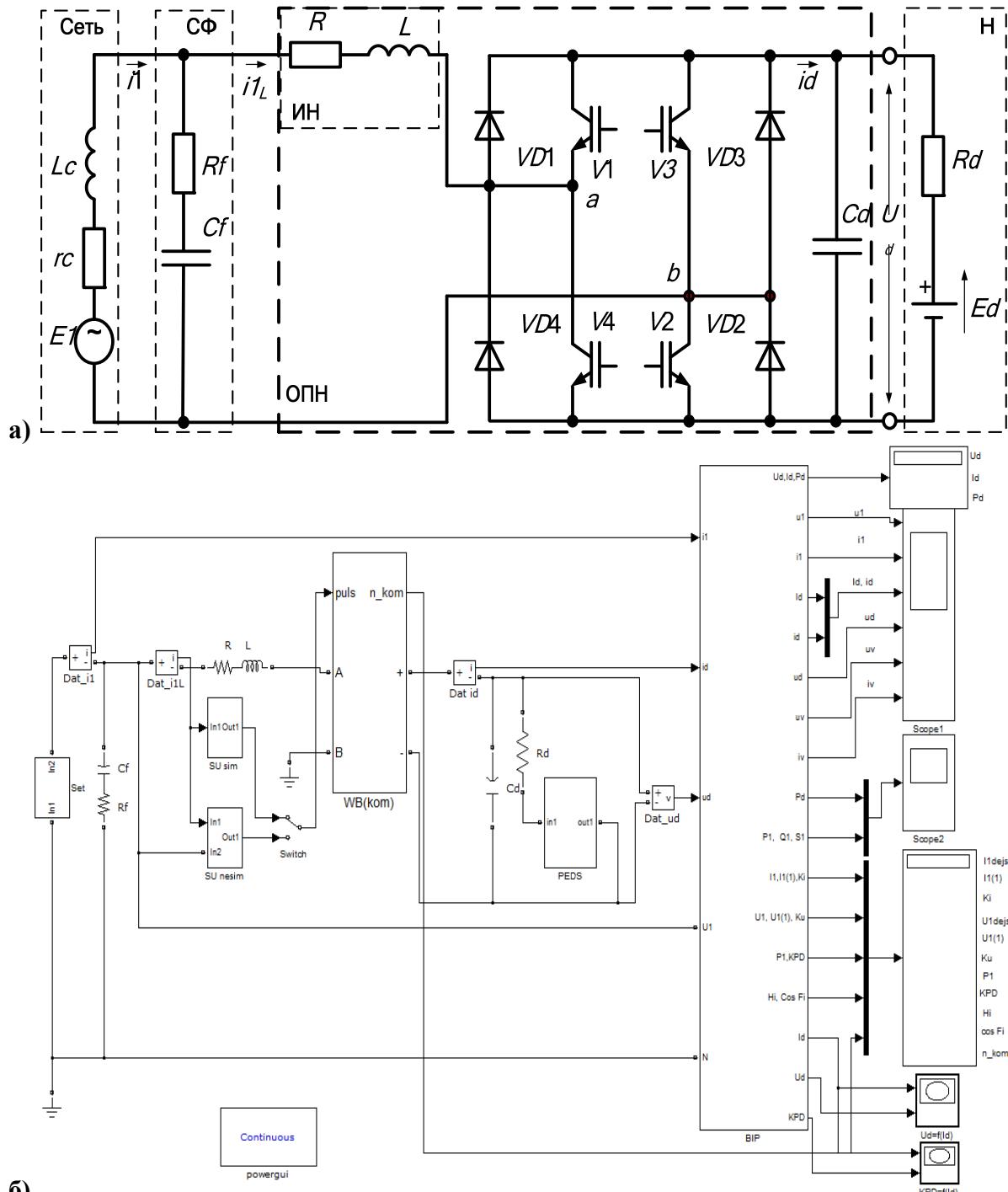
– частота сети (*Frequency, f(Hz)*) – установить 50 Гц.

– 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  $R_{dif} = 0.05$  Ом).

7) Конденсатор фильтра (*Cd*) установить равным 10 мкФ;



б)

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

8) Нагрузка противо-ЭДС с внутренним активным сопротивлением ( $Rd$ ,  $PEDS$ ). Изменяемые параметры блока:

- активное сопротивление ( $Rd$ ) – установить равным 1 Ом;
- относительная величина противо-ЭДС ( $PEDS$ )  $U_d/E_{1m}$ . Начальное значение ПЭДС ( $PEDS \text{ nach}(otnosit)$ ) и конечное значение ПЭДС ( $PEDS \text{ konech}(otnosit)$ ) 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<sub>I</sub>)*;

– действующее значение напряжения на входе ОПН *U1*, его первая гармоника *U1(1)* и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения *Ku (K<sub>U</sub>)*;

– коэффициент полезного действия *KPD (η)*;

– коэффициент мощности *Hi (χ)*,

–  $\cos Fi (\cos \varphi_h)$ .

12) осциллографы (*Scope1, Scope2*) – блоки, позволяющие наблюдать осцилограммы 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 ( $Ud = f(Id)$ ;  $KPD = f(Id)$ ) – блоки, предназначенные для построения внешних характеристик  $Ud = f(Id)$ , а также зависимостей  $\eta = f(Id)$  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 осцилограммами. В раскрывающемся списке выбрать «*Spectr*»;
- *Input*: номер входа, для вывода соответствующей осцилограммы. Порядок и количество входов (*input 1*, *input 2...*) соответствует сигналам на входах осциллографа *Scope*. Выбрать *input 1*, что соответствует осцилограмме 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.

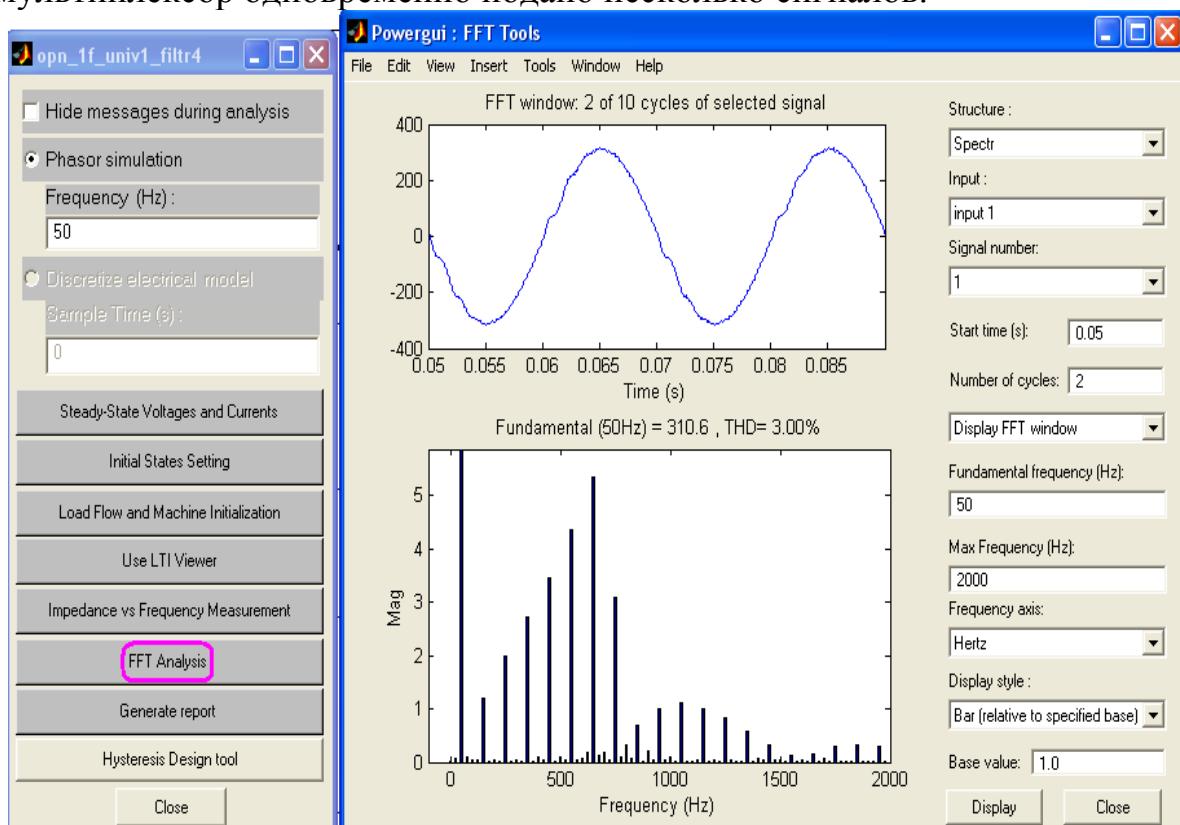


Рис. 2. Панель инструментов (а) и смотровое окно с временной диаграммой напряжения сети *u1* и его разложением в спектр

- *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 осцилограмме.
- *Display FFT window* – режим отображения осцилограммы 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:**

- 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.
- 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  $I_1 = f(I_d)$  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  $\eta$  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.

$$\begin{aligned} I_{1m} &= \sqrt{2} I_1, \\ Z &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \\ I_{1m,\max} &= U_{1m} / Z. \end{aligned} \quad (5) \quad (6) \quad (7)$$

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 управление					
		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								
$\eta$									
ШТК									
$K_U$	X								
$K_I$	X								
$\chi$	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 «*орп\_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<sub>1m</sub>, 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 осцилограммы 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 осцилограммы 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 осцилограммы 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<sub>1m</sub>, 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 осциллографмы 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 осциллографмы 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  $u1$  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  $u1$  для симметричного способа управления.

В смотровом окне установить номер входа: *Input1* – сигнал  $u1$ .

Для обновления на смотровом окне сигнала осцилограммы 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 осцилограммы и спектр, отображенные в смотровом окне (*Powergui: FFT Tools*).

б) снять спектральный состав напряжения сети  $u1$  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  $I_{1m}$ , 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*) равным 1 А.

Запустить расчет модели. По окончанию расчета с помощью блока *Continuous powergui* снять спектральный состав напряжения сети  $u1$  для несимметричного способа управления.

В смотровом окне установить номер входа: *Input1* – сигнал  $u1$ .

Для обновления на смотровом окне сигнала осцилограммы 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 осцилограммы и спектр, отображенные в смотровом окне (*Powergui: FFT Tools*).

в) сравнить осцилограммы  $u_1$  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, осцилограммы и величины  $K_U$ ,  $\eta$  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  $0^\circ$  (*Zadannaj faza (grad)*), что соответствует выпрямительному режиму.

В блоке противо-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  $180^\circ$  (*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 осцилограмм и показатели ОПН.

Сравнить расчетные значения токов и напряжений с полученными экспериментально.

7. Осцилограммы 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 осцилограммам 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	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b><math>E_d/E_{1m}</math></b>	1,2	1,1	1,15	1,2	1,1	1,15	1,2	1,25	1,1	1,15	1,2	1,25
<b><math>I_{13}, \text{А}</math></b>	5	6	7	6	7	5	6	5	7	5	6	5
<b><math>R, \text{Ом}</math></b>	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
№ вар	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b><math>E_d/E_{1m}</math></b>	1,2	1,25	1,1	1,2	1,1	1,15	1,2	1,15	1,1	1,15	1,25	1,2
<b><math>I_{13}, \text{А}</math></b>	5	6	7	6	6,5	5	6	7	7	5	6	5,5
<b><math>R, \text{Ом}</math></b>	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  $U_I = 220 \text{ В}$ ,  $U_{1m} = 1.41 U_I$ ,  $I_{1m3} = \sqrt{2} I_{13}$ .
4.  $L = 0.02 \text{ Гн}$ .
5. При расчете сеть считается бесконечной мощности ( $U_I = E_I$ ), вентили идеальными, а сетевой фильтр не учитывается.

## **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  $r_{oep}$ , 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 idI*), система управления (*SU (space vector)*), вентильный блок (*WB(kom)*), нагрузка (*Nagruzka*), блок измерительных преобразователей (*BIP*), осциллограф (*Scope*), дисплеи.

В состав неуправляемого выпрямителя (*NW*) (рис. 2) входят следующие блоки: сеть (*Set*), датчики тока (*Dat u1*, *Dat id*, *Dat idI*, *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 idI*) – 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.

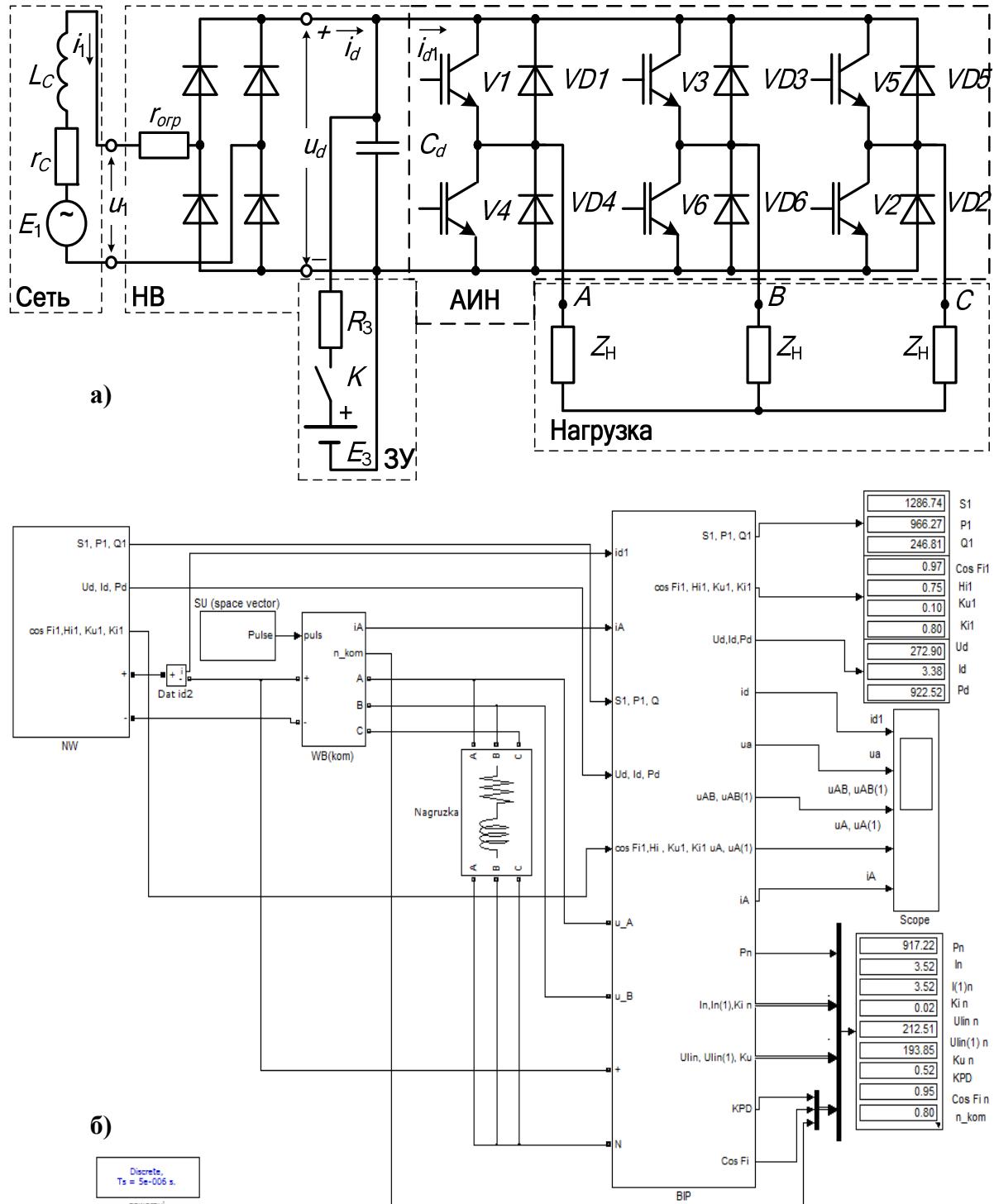
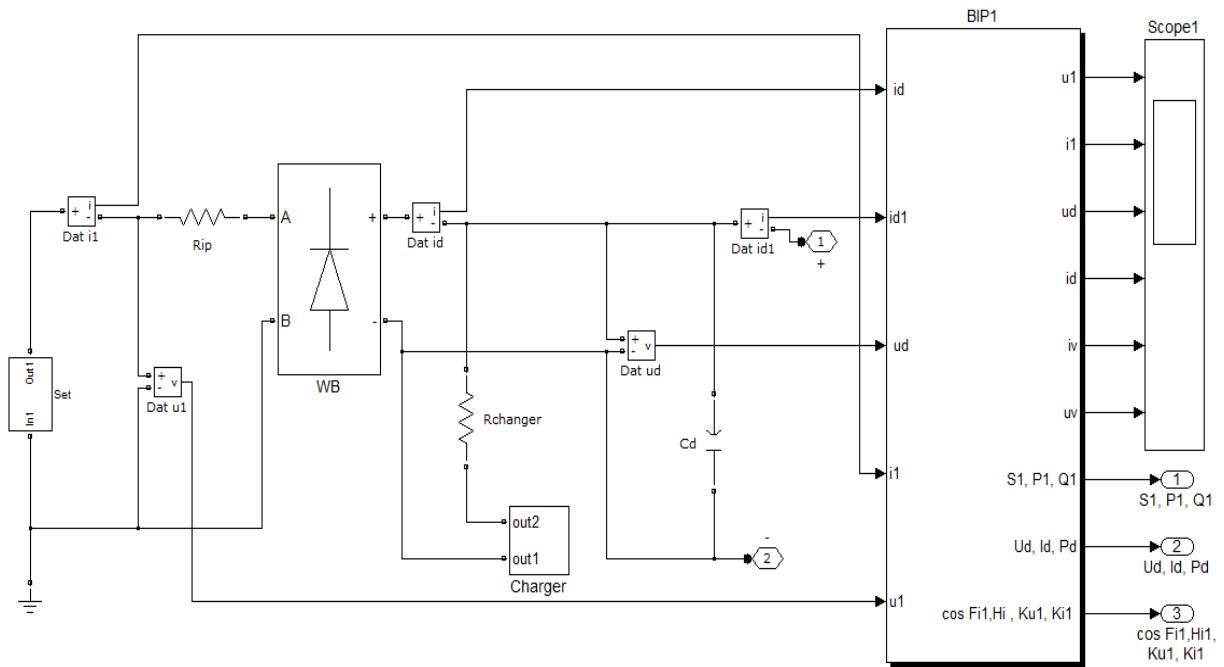


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и виртуальная модель (б) двухзвенного преобразователя частоты



**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,  $U_{0diode} = 2$  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;

–  $\cos Fi1$  (cosφ), коэффициент мощности  $Hi$  ( $\chi$ ), 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  $Pn$  ( $P_H$ );

– действующее значение тока нагрузки  $In$  ( $I_H$ ), значение его первой гармоники  $In1$  ( $I_{H1}$ ), коэффициент гармоник тока  $Ki$  ( $K_I$ );

– линейное напряжение нагрузки  $Ulin\ n$  ( $U_{ЛН}$ ), его первая гармоника  $Ulin(1n)$  ( $U_{ЛН(1)}$ ) и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $Ku$  ( $K_U$ );

– коэффициент полезного действия  $\eta$  (КПД);

– значения  $\cos Fi\ n$  (cosφ<sub>H</sub>) нагрузки.

7) осциллограф (*Scope*) – блок, позволяющий наблюдать осцилограммы мгновенных значений токов и напряжений ( $ud1$ ,  $ua$ ,  $uAB$ ,  $uAB(1)$ ,  $iA$ )

8) дисплей – блок, предназначенный для цифрового отображения числа включений одного транзистора  $n_{ком}$  ( $n\_ком$ ) 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 выходе выпрямительного моста;

– *Dat u1* – напряжение, на выходе 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  $U_{Op} = 0,8$  В);

5) зарядное устройство (*Charger + Rcharger*) – блок, предназначенный для ограничения броска тока при включении. Изменяемые параметры блока:

– сопротивление *Rcharger* установить 1 Ом.

6) фильтр ( $C_d$ ) – обеспечивает постоянное потребление энергии от выпрямителя и защищает транзисторы от перенапряжений. Установить параметры фильтра равными:  $C_d = 1000$  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.

–  $\cos \phi$  сети (*Cos Fi 1*);

– коэффициент мощности  $\chi$  (*Hi*);

– коэффициент гармоник напряжения  $Ku1$  ( $K_{U1}$ ) и коэффициент гармоник тока  $Ki1$  ( $K_{I1}$ ).

8) осциллограф (*Scope1*) – блок, позволяющий наблюдать осцилограммы 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  $i_1$ , 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»):

$$I_{1\max \text{ пуск}} = \frac{\sqrt{2}E_1}{\sqrt{x_c^2 + (r_c + r_t)^2}}, \quad (4)$$

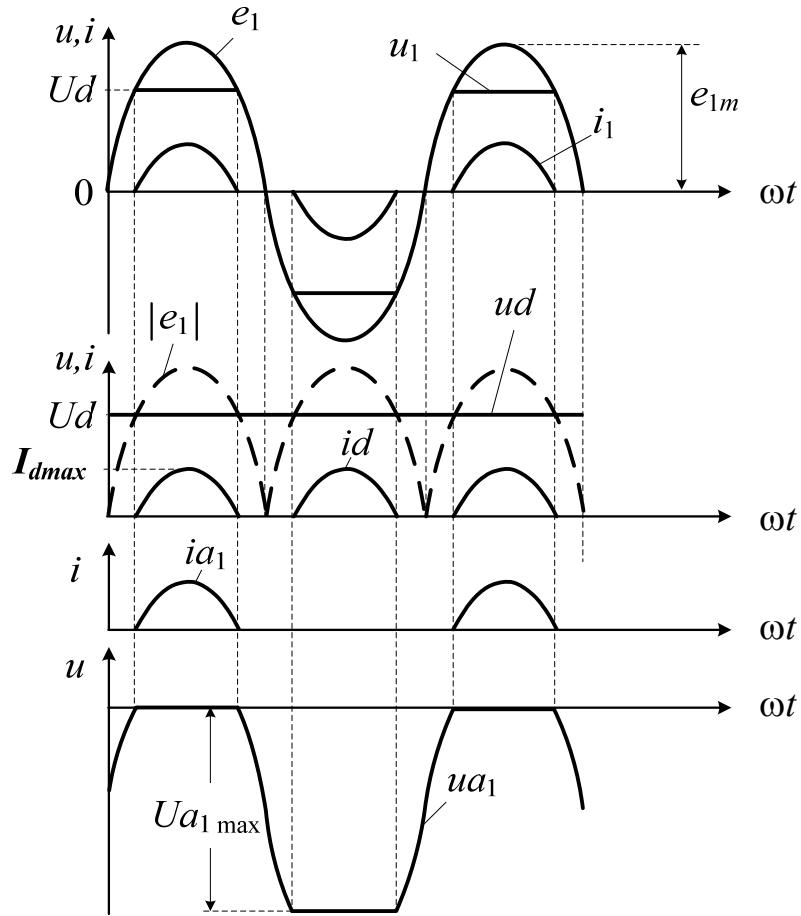


Рис. 3. Временные диаграммы

д) рассчитать для заданного варианта максимальное действующее значение первой гармоники линейного напряжения на нагрузке ДПЧ  $U_{\text{нл(1)max}}$ :

$$U_{\text{нл(1)max}} = \frac{U_d}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

е) рассчитать коэффициент модуляции  $\mu$  для заданного варианта. Коэффициент модуляции  $\mu$  рекомендуется определить из соотношения

$$\mu = \frac{f}{f_{\max}}. \quad (6)$$

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  $U_{\text{нл(1)max}}$

$$U_{\text{нл(1)}} = \mu U_{\text{нл(1)max}}, \quad (7)$$

и  $\cos\phi_H$  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**

Пара- метры	Предварительный расчет	Эксперимент		
		Заданный режим	Изменение $L_{ogr}$	Изменение $C_d$
$S_1$	X			
$P_1$	X			
$Q_1$	X			
$\cos \varphi_1$	X			
$\chi_1$	X			
$K_{U1}$	X			
$K_{I1}$	X			
$U_d$				
$I_d$	X			
$I_{d\max}$				
$P_d$	X			
$P_n$	X			
$\eta_{\text{НВ}}$	X			
$\eta_{\text{АИН}}$	X			
$I_{\text{H}}$	X			
$I_{\text{H}}(1)$	X			
$K_{I\text{H}}$	X			
$U_{\text{ЛН}}$	X			
$U_{\text{НЛ}}(1)$				
$K_{U\text{Н}}$	X			
$\eta_{\text{ПЧ}}$	X			
$\cos \varphi_{\text{Н}}$				
$n_{\text{ком}}$	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  $Rogr$  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 ( $K_{l1}, K_{U1}, \eta_{HB}, \chi, \cos\phi_1$ ).

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 ( $K_{l1}, K_{U1}, \eta_{HB}, \chi, \cos\phi_1$ ).

**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  $U_{\text{НФ(1)}} = F(I_{\text{НФ(1)}})$  и энергетических  $P_1 = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $S_1 = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $\cos\phi_1 = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $\chi = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $P_d = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $P_n = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $K_I = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $\cos\phi_n = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $\eta_{\text{НВ}} = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $\eta_{\text{АИН}} = F(I_{\text{НФ(1)}})$ ,  $\eta_{\text{ПЧ}} = F(I_{\text{НФ(1)}})$  характеристик ДПЧ, при заданном по варианту значении частоты  $f$ .

В блоке  $NW$  установить  $\text{Logr} = 0 \text{ Гн}$ .

Величину емкости входного фильтра установить  $C_d = 1000 \text{ мкФ}$ .

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

Пара- метры	$f = \text{Гц}$		
	$R_h^* = R_h/2 = \text{Ом}$	$R_h = \text{Ом}$	$R_h^{**} = 2R_h = \text{Ом}$
$S_1$			
$P_1$			
$Q_1$			
$\cos\phi_1$			
$\chi_1$			
$K_{U1}$			
$K_n$			
$U_d$			
$I_d$			
$P_d$			
$P_n$			
$I_h$			
$I_h(1)$			
$K_{Ih}$			
$U_{LH}$			
$U_{NL}(1)$			
$K_{Uh}$			
$\eta$			
$\cos\phi_n$			
$n_{kom}$			

## 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  $\mu$  и частоту  $f$  одновременно) и заданном значении  $R_H$ . Частоту изменять в диапазоне 10 – 50 Гц. Заполнить соответствующую часть таблицы 3.

Коэффициент модуляции  $\mu$  устанавливать в блоке системы управления  $SU$  (*space vector*).

Частоту  $f$  устанавливать в блоке  $SU$  (*space vector*).

Таблица 3

Исследование регулировочных и энергетических характеристик

Параметры	10 Гц	25 Гц	40 Гц	50 Гц
$f$	10 Гц	25 Гц	40 Гц	50 Гц
$\mu$	0,2	0,5	0,8	1
$S_1$				
$P_1$				
$Q_1$				
$\cos\varphi_1$				
$\chi_1$				
$K_{U1}$				
$K_{I1}$				
$U_d$				
$I_d$				
$P_d$				
$P_n$				
$I_H$				
$I_{H(1)}$				
$K_{IH}$				
$U_{\text{НЛ}}$				
$U_{\text{НЛ}}(1)$				
$K_{UH}$				
$\eta$				
$\cos\varphi_H$				
$n_{\text{ком}}$				

## *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. Осцилограммы для блока выпрямления, всего ДПЧ и таблицу 1.
7. Сравнение расчетных значений токов и напряжений и временных диаграмм с осцилограммами и экспериментальными значениями.
8. Анализ (по осцилограммам) влияния параметров схемы на коэффициент мощности и качество напряжения сети,
9. Анализ (по осцилограммам) 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 двухзвеный и непосредственный преобразователи частоты.
15. Какие ДПЧ наиболее перспективны в электроприводе в настоящее время?

**Таблица 4**

**Таблица вариантов**

<b>№ вар</b>	<b><math>R_H</math>, Ом</b>	<b><math>L_H</math>, Гн</b>	<b><math>f</math>, Гц</b>	<b>№ вар</b>	<b><math>R_H</math>, Ом</b>	<b><math>L_H</math>, Гн</b>	<b><math>f</math>, Гц</b>
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.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
2. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – Ч. 2. – 104 с
3. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – Ч. 3. – 155 с.
4. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink / Проектирование механотронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА Век, 2008. – 368 с.
5. Герман-Галкин, С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА-принт, 2002. – 304 с.
6. Преобразовательная техника: учебное пособие к лабораторным работам / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, Н.М. Сапрунова, О.Г. Терещина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 161 с.
7. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
8. Электротехника: учеб. пособие для вузов: В 3 кн. Кн. II. Электрические машины. Промышленная электроника. Теория автоматического управления / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – М.; Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 711 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Методические указания к выполнению виртуальных лабораторных работ .....	4
1.1. Общие рекомендации к выполнению виртуальных лабораторных работ .....	4
1.2. Краткие рекомендации по работе с математического пакетом MatLab+Simulink .....	4
1.3. Рекомендации по работе с графической средой Paint .....	12
1.4. Оформление отчетов по виртуальным лабораторным работам .....	15
2. Комплекс виртуальных лабораторных работ .....	16
Работа №1. Исследование однофазных неуправляемых выпрямителей .....	16
Работа №2. Исследование однофазных управляемых выпрямителей .....	28
Работа №3. Исследование трехфазных управляемых выпрямителей .....	39
Работа №4. Исследование однокомплектного рекуперирующего преобразователя в режимах выпрямления и инвертирования .....	57
Работа №5. Исследование двухкомплектного реверсивного преобразователя .....	73
Работа №6. Исследование преобразователей постоянного напряжения .....	84
Работа №7. Исследование трехфазных АИН с различными способами импульсной модуляции .....	100
Работа №8. Исследование обратимого преобразователя напряжения .....	114
Работа №9. Исследование двухзвенного преобразователя частоты .....	129
Библиографический список .....	143