

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

А. К. Пронина

СУДОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания
к выполнению лабораторных работ по дисциплине
для студентов специальности
26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования
и средств автоматики»
очной и заочной формы обучения

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2024

УДК 629.5.064.5(07)

ББК 39.45я73

П81

Р е ц е н з е н т :

С.А. Конева – канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Судовое электрооборудование»

Пронина, А.К.

П81 Судовая электроника и силовая преобразовательная техника: к выполнению лабораторных работ по дисциплине для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» очной и заочной формы обучения». Ч. 2 / А.К. Пронина; Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь: СевГУ, 2024. – 87 с. – Текст : электронный.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 - Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, выполняющих лабораторные работы по дисциплине «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника».

УДК 629.5.064.5(07)

ББК 39.45я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Судовое электрооборудование» Морского института ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 7 от 29 февраля 2024 г.

© Пронина А.К., 2024
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА.....	5
2. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	11
РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ.....	14
РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.....	21
РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ТРЕХФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.....	26
РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ	35
РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКОМПЛЕКТНОГО РЕВЕРСИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	41
РАБОТА № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	48
РАБОТА № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ	56
РАБОТА № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЗВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ.....	65
РАБОТА № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	72
РАБОТА № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ.	76
РАБОТА № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	82

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по специальности 26.05.07 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики.

Основная задача данного цикла лабораторных работ – предоставить студентам возможность практически изучить основные типы устройства преобразовательной техники. Студенты должны приобрести навыки работы с электронными схемами и закрепить материал, изученный теоретически.

Особое внимание при выполнении лабораторных работ уделяется развитию навыков работы с электронным осциллографом.

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 экспериментальных исследований.

1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Технические характеристики

- Электропитание от сети 3×380 В
- Частота питающего напряжения 50 Гц
- Потребляемая мощность, не более 750 ВА
- Габаритные размеры..... 1500х800х450 мм
- Масса, не более 100 кг
- Диапазон рабочих температур +10...35 °С
- Влажность до 80 %

Состав

Комплекс содержит два каркаса, в которых размещены модули (рис. 1).

Перечень модулей и их краткие технические характеристики приведены в табл. 1

Описание исследуемых модулей приведено в соответствующих лабораторных работах и техническом описании стенда. Краткое описание модулей, используемых для питания и измерения, приведено ниже.

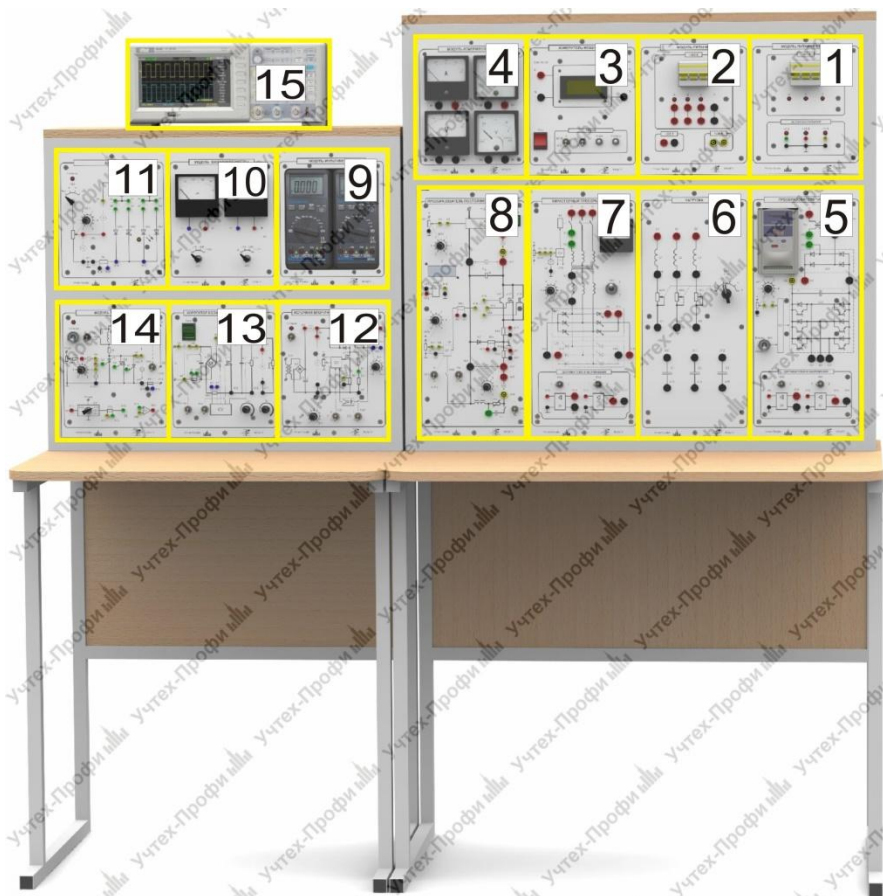


Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда

Таблица 1

№	Наименование	Краткая техническая характеристика
1.	Модуль питания стенда	Ввод $\sim 3 \times 380 \text{ В}$, ВИП $\pm 15 \text{ В}$, $+5 \text{ В}$, автоматический выключатель
2.	Модуль питания (трех-фазный)	Автоматический выключатель, питание $\sim 3 \times 380 \text{ В}$, $\sim 220 \text{ В}$
3.	Измеритель мощности	Универсальный цифровой прибор для измерения постоянных и переменных напряжений, токов, мощностей, частоты и энергетических показателей ($\cos \varphi$, φ)
4.	Модуль измерительный	Стрелочные приборы для измерения постоянных и переменных токов в цепях преобразователей
5.	Модуль «Преобразователь частоты»	Исследование двухзвенного преобразователя частоты и трехфазного автономного инвертора напряжения. Напряжение на выходе регулируемое трехфазное до $\sim 110 \text{ В}$, ток до $\sim 1 \text{ А}$, частота до 50 Гц
6.	Модуль «Нагрузка»	Дискретно-регулируемые активно-индуктивно-емкостные нагрузки
7.	Модуль «Тиристорный преобразователь»	Исследование трехфазных выпрямителей, ведомых и реверсивных преобразователей. Напряжение на выходе регулируемое до $\pm 110 \text{ В}$, ток до $\pm 1 \text{ А}$
8.	Модуль «Преобразователь постоянного напряжения»	Исследование широтно-импульсного преобразователя и стабилизатора постоянного напряжения, а также ключевого режима транзисторов (биполярных, полевых и IGBT). Напряжение на входе регулируемое до $\sim 27 \text{ В}$, ток до $\sim 1,0 \text{ А}$
9.	Модуль «Мультиметры»	Цифровые приборы (в основном для измерения напряжений)
10.	Модуль «Миллиамперметры»	Измерение постоянного тока в 4-х пределах измерения: 100 мкА , 1 мА , 10 мА и 100 мА .
11.	Модуль «Диоды»	Исследование диода, диода Шоттки, неуправляемого однофазного выпрямителя, светодиода и стабилитрона. Напряжения: $\pm 15 \text{ В}$, $\sim 9 \text{ В}$, ток до 100 мА .
12.	Модуль «Источник вторичного электропитания»	Исследование обратного источника вторичного электропитания
13.	Модуль «Корректор коэффициента мощности»	Исследование неуправляемого выпрямителя, работающего на емкостной фильтр без корректора коэффициента мощности и с корректором коэффициента мощности. Напряжение на входе $\sim 16 \text{ В}$, ток до $\sim 2,0 \text{ А}$
14.	Модуль «Тиристоры»	Исследование тиристоров, симисторов, запираемых тиристоров, управляемого выпрямителя и преобразователя переменного напряжения. Напряжение на входе $+15 \text{ В}$, $\sim 12 \text{ В}$, ток до 100 мА
15.	Осциллограф	Снятие осциллограмм

Модуль питания стенда

Модуль питания стенда (МПС) предназначен для ввода трехфазного напряжения из сети в лабораторный комплекс, защиты стенда от токов короткого замыкания и подачи силовых и маломощных напряжений питания на модули стенда.

Внешний вид модуль представлен на рис. 2.

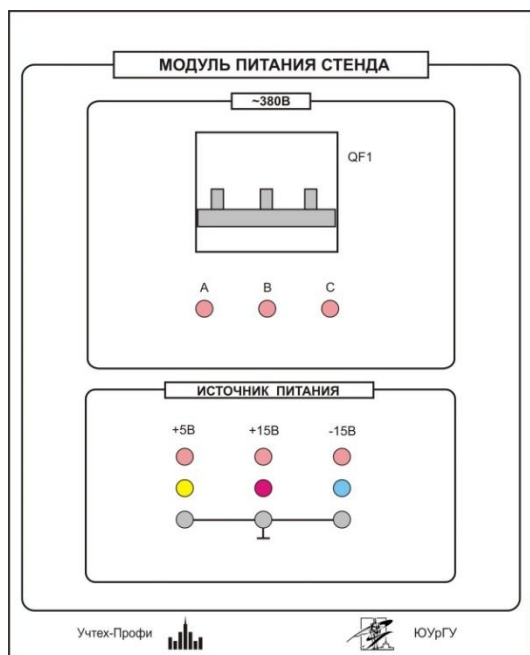


Рис. 2. Модуль питания стенда

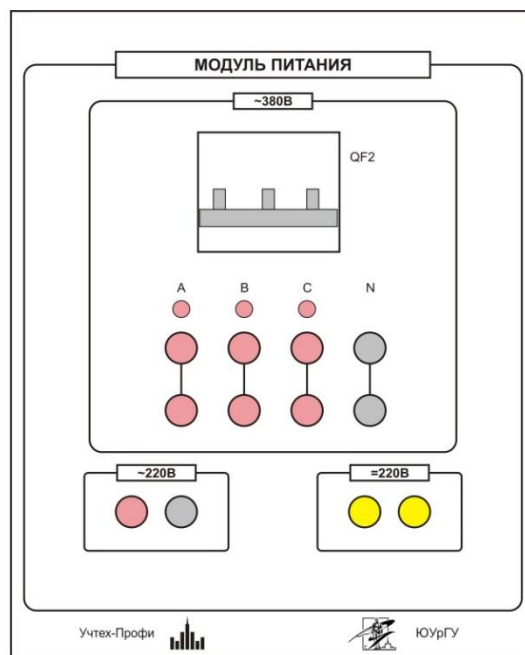


Рис. 3. Модуль питания

Модуль содержит автоматический трехполюсный выключатель QF1, вторичный источник питания напряжениями ± 15 В и + 5В маломощных цепей модулей. Подключение стенда к напряжению питания, подача силового и маломощного напряжений на модули выполняется с помощью жгутов, подключаемых с тыльной стороны модуля.

На лицевой части имеется индикация подачи силового напряжения по фазам А, В и С, а также маломощных напряжений питания +5В, +15В и –15В. Кроме этого возможны низковольтных напряжений с лицевой панели (выведены соответствующие клеммы напряжений и общего провода).

Модуль питания

Модуль питания (МП) предназначен для подачи трехфазного напряжения на модули с помощью соединительных проводов с лицевой стороны модуля и защиты подключенных модулей от токов короткого замыкания.

Внешний вид модуля представлен на рис. 3. На лицевой панели модуля расположены автоматический трехполюсный выключатель QF2, гнезда трехфазного напряжения А, В, С и нейтрали N (гнезда продублированы), индикация наличия фазных напряжений, гнезда фазного напряжения ~220 В. К

гнездам =220 В ничего не подключено, в данном варианте стенда они не используются.

Модуль «Мультиметры»

Модуль «Мультиметры» (рис. 4) содержит два универсальных цифровых прибора типа МУ67(68) и используется в основном для измерения напряжений. Диапазоны измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Измеряемый параметр	Диапазоны измерения	Класс точности
Постоянное напряжение	0...±1000 В	1,5
Постоянный ток	0...±400 мкА; 0...±400 мА; 0...±10 А	1,5
Переменное напряжение	0...750 В	1,5
Переменный ток	0...400 мкА; 0...400 мА; 0...10 А	1,5

Примечание. Будьте внимательны, при измерении тока соединительные провода мультиметра необходимо подсоединять к клеммам «мА» (либо «10 А») и к «com»!

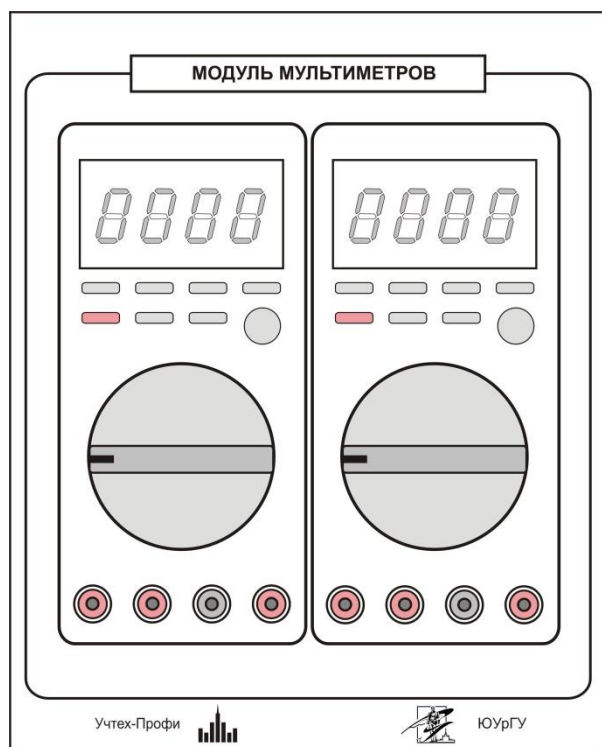


Рис. 4. Модуль мультиметров

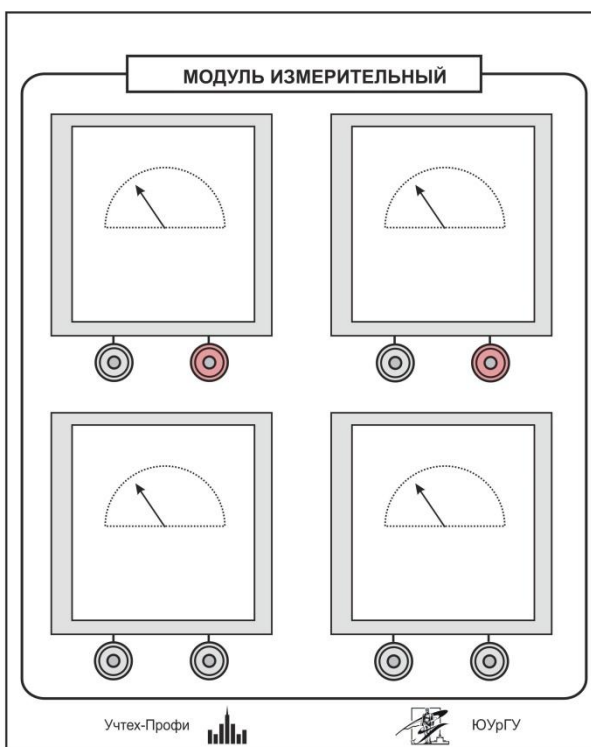


Рис. 5. Модуль измерительный

Модуль «Измерительный»

Модуль «Измерительный» (рис. 5) предназначен для проведения измерений в цепях постоянного и переменного тока. Модуль содержит два амперметра постоянного тока магнитоэлектрической системы типа М42300 с

пределом измерения $+2\text{ А}$ и $\pm 2\text{ А}$, один амперметр переменного тока электромагнитной системы типа ЭА0700 с пределом измерения 1 А . И один вольтметр переменного тока типа Ц42300 с пределом измерения $0\ldots 250\text{ В}$.

Модуль «Измеритель мощности»

Модуль «Измеритель мощности» (рис. 6) предназначен для измерения параметров электрической цепи:

- действующего значения напряжения в поддиапазонах $0\ldots 30\text{ В}$ или $0\ldots 300\text{ В}$;
- действующего значения тока в поддиапазонах $0\ldots 0,2\text{ А}$ или $0\ldots 2\text{ А}$;
- активной мощности в диапазоне $0\ldots 600\text{ Вт}$;
- реактивной мощности в диапазоне $0\ldots 600\text{ ВАР}$;
- полной мощности в диапазоне $0\ldots 600\text{ ВА}$;
- частоты в диапазоне $5\ldots 200\text{ Гц}$;
- $\cos\varphi$;
- угла сдвига фаз между током и напряжением φ .

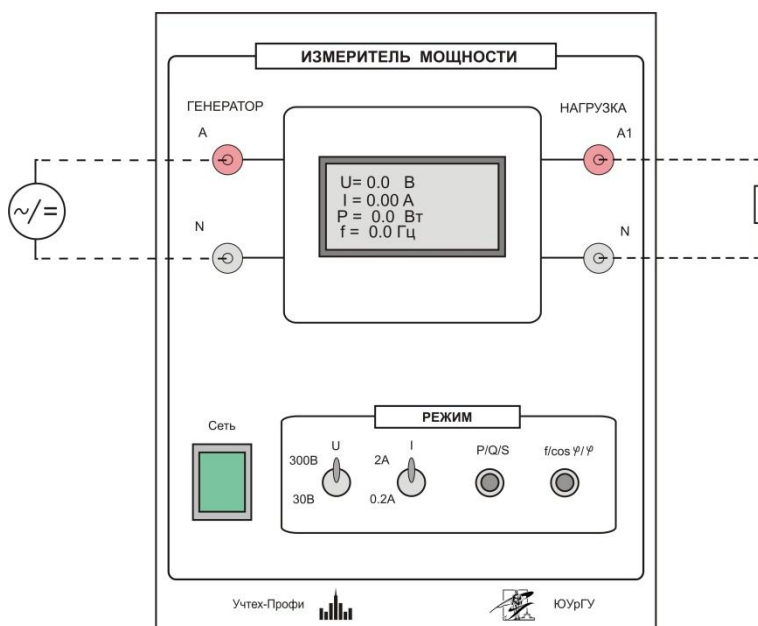


Рис. 6 Измеритель мощности

Прибор содержит:

- гнезда для подачи входного измеряемого сигнала (генератора) A и N
- гнезда для подключения потребителя (нагрузки) $A1$ и N . Шунт для измерения тока нагрузки подключен между гнездами A и $A1$;
- индикатор жидкокристаллический четырехстрочный для вывода информации;
- выключатель «Сеть» для подключения питания прибора;
- тумблер « U » для изменения поддиапазона измерения напряжения;
- тумблер « I » для изменения поддиапазона измерения тока;

- кнопка « $P/Q/S$ » для изменения вывода информации в третьей строке индикатора, соответственно, активной, реактивной и полной мощности;
- кнопка « $f/\cos\varphi/\varphi$ » для изменения вывода информации в четвертой строке индикатора, соответственно, частоты, косинуса и угла сдвига фаз между током и напряжением.

При одновременном нажатии, в течении порядка 2 сек, кнопок « $P/Q/S$ » и « $f/\cos\varphi/\varphi$ » модуль «Измеритель мощности» переходит в режим измерения постоянного тока. Обратное переключение осуществляется повторным нажатием кнопок « $P/Q/S$ » и « $f/\cos\varphi/\varphi$ ».

2. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Порядок выполнения работ

Перед выполнением работ все студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к лаборатории промышленной электроники, для чего преподавателем проводится инструктаж. Краткий инструктаж проводится также на каждом занятии.

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) изучить схему лабораторного стенда и продумать методику выполнения лабораторной работы;

3) 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 пособия.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

1) ознакомиться с рабочим местом, проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводов;

2) произвести сборку схемы;

3) после разрешения преподавателя включить питание и приступить к выполнению работы;

4) в начале каждого опыта качественно оценить характер зависимости, изменяя напряжения и токи в допустимых пределах, а затем произвести требуемые измерения. При снятии характеристик надо обязательно снять крайние точки. Наибольшее число измерений следует производить на участках резкого изменения наклона характеристик, а на линейных участках независимо от их протяженности достаточно снимать по три точки. Характеристики строятся непосредственно во время проведения эксперимента;

5) в ходе работы и по ее окончании полученные данные представлять на проверку преподавателю;

6) схему разбирать только после проверки преподавателем результатов опыта (перед разборкой выключить источник питания!);

7) по окончании работы привести в порядок рабочее место.

Рекомендации по работе с осциллографом

Масштабы по напряжению m_u каналов ввода сигналов соответствует указанным на осциллографе.

При измерении напряжения на шунте масштаб по току

$$m_i = \frac{m_u}{R_{ш}} \frac{A}{\text{дел.}}, \quad (1)$$

где $R_{ш}$ – сопротивление шунта.

Масштаб в угловых единицах (градусах)

$$m_{\omega t} = 360 f m_t \frac{\text{град}}{\text{дел.}}, \quad (2)$$

при этом масштаб по времени m_t должен быть выражен в «с/дел».

Удобнее определять масштаб в градусах, зная период сигнала на экране. Тогда

$$m_{\omega t} = \frac{360}{T_{\text{дел}}} \frac{\text{град}}{\text{дел.}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{дел}}$ – длительность периода на экране в делениях.

Рекомендации по обеспечению техники безопасности при работе с осциллографом

При применении двухканального осциллографа возникает опасность коротких замыканий в схеме через два провода входов, связанных с корпусом осциллографа.

От осциллографа в исследуемую схему должен идти только один провод, связанный с корпусом «⊥». Этот провод рекомендуется подключать к точке исследуемой схемы с наименьшим потенциалом. При подключении двух проводов оба сигнала будут измеряться относительно точки, к которой подсоединен корпус осциллографа («⊥»).

Аналогично, сигнал внешней синхронизации должен подаваться на вход внешней синхронизации только одним проводом. При этом сигнал подается относительно точки, к которой подключен корпус осциллографа («⊥»).

Эти рекомендации являются обязательными! Их невыполнение может привести к выходу из строя модулей стенда.

Кроме того, все современные импортные осциллографы имеют трехпроводную схему подключения к сетевому напряжению через евророзетку. При этом, заземляющий контакт сети, чаще всего это нейтраль, соединён с корпусом «⊥» осциллографа. Т.е. общий контакт входов осциллографа «⊥» получается напрямую соединённым с нейтралью сети. Это следует учитывать при обеспечении электробезопасности.

Оформление отчетов по лабораторным работам

В отчете должна быть сформулирована цель проведенной работы и представлены следующие материалы:

- 1) схемы экспериментов;
- 2) предварительные расчеты заданного варианта;

- 3) рассчитанные характеристики и подтверждающие их экспериментальные характеристики, построенные в одних осях координат;
- 4) сравнительные таблицы экспериментальных и расчетных данных;
- 5) все остальные экспериментальные характеристики;
- 6) обработанные осциллограммы;
- 7) выводы (анализ экспериментальных данных, вида кривых, причин погрешностей и т. д.).

Отчет оформляется чернилами или шариковой ручкой. Схемы вычерчиваются карандашом. Графики строятся на листах миллиметровой бумаги карандашом и вклеиваются в отчет. Отчет может быть напечатан на принтере.

Опытные точки могут иметь разброс. Экспериментальные кривые проводят плавно, максимально приближая к экспериментальным точкам. На графиках приводят название, обозначают, к какому опыту они относятся, и указывают постоянные величины, определяющие условия опыта. На осях координат надо обязательно указать, какая величина по ним отложена, в каких единицах она измеряется, и нанести деления. Цена деления должна быть удобной для работы.

Пример обработки осциллограммы приведен на рис. 8.

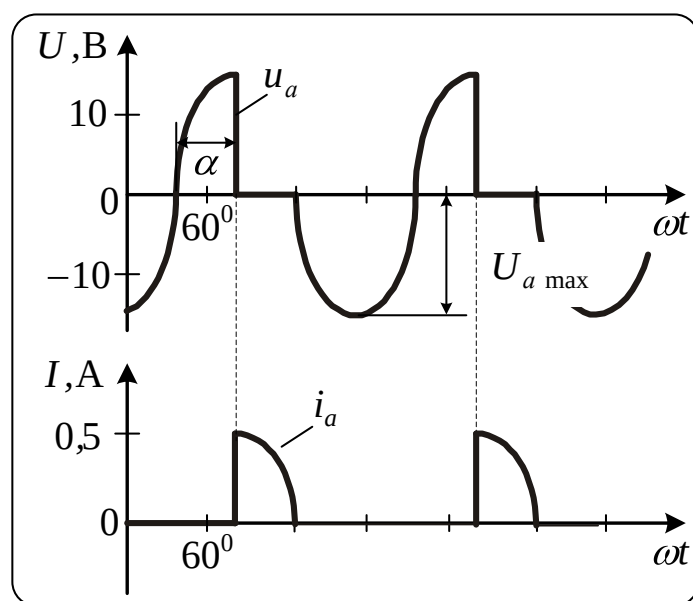


Рис. 8. Пример обработки осциллограмм

Работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы

Изучение характеристик и параметров диодов – выпрямительных, Шоттки, стабилитронов и светодиодов. Ознакомление с применением выпрямительных диодов в неуправляемых выпрямителях, стабилитронов в параметрических стабилизаторах постоянного напряжения, светодиодов в индикаторах.

Описание лабораторного стенда

При выполнении работы используются следующие модули: «Диоды», «Мультиметры», «Миллиамперметры», а также двухканальный осциллограф.

Лицевая панель модуля «Диоды» представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: выпрямительный диод $VD1$, диод Шоттки $VD2$, светодиод $VD3$, стабилитрон $VD4$, потенциометр $RP1$ для изменения подаваемого напряжения, резистор $R_n = 150 \text{ Ом}$, и балластный резистор $R_b = 1,1 \text{ кОм}$. Резистор R_n используется в качестве ограничивающего ток при снятии характеристик и в качестве сопротивления нагрузки при исследовании выпрямителя. Переключатель $SA1$ предназначен для включения переменного или постоянного напряжения (положительного или отрицательного), а также выключения питания модуля. Шунт $R_{ш} = 10 \text{ Ом}$ служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через диод. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений ($X1 - X15$).

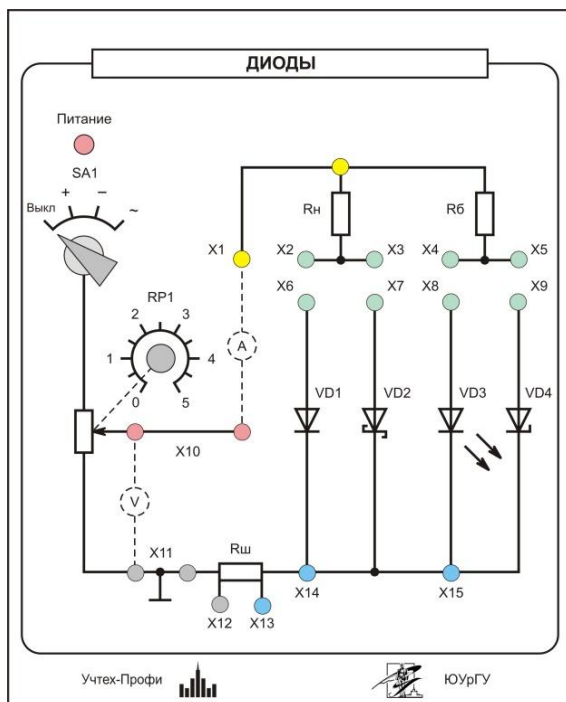


Рис. 1. Модуль «Диоды»

Питание модуля осуществляется от источников сетевого переменного $\sim 220\text{В}$ и постоянного напряжения $\pm 15\text{ В}$.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

- а) изучить тему курса «Полупроводниковые диоды» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;
- б) начертить схему для снятия ВАХ выпрямительного диода на постоянном токе и схему для исследования параметрического стабилизатора;
- в) начертить схему для снятия ВАХ выпрямительного диода на переменном токе и схему для исследования светодиода;
- г) начертить схему для снятия ВАХ стабилитрона на переменном токе и схему для исследования выпрямителя;
- д) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения u , выпрямленного напряжения $u_{\text{н}}$, анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a . Амплитудное значение U_m переменного напряжения взять из таблицы вариантов. Вентиль считать идеальным;
- е) для идеализированной ВАХ стабилитрона построить линию нагрузки, если напряжение стабилизации стабилитрона $U_{\text{ст}} = 6,8\text{ В}$, его дифференциальное сопротивление r_d на участке стабилизации равно нулю, напряжение питания $U_{\text{п}}$ – в соответствии с таблицей вариантов. Определить ток I_6 через балластный резистор;
- ж) для светодиода определить величину балластного сопротивления R_6 , если максимально возможный ток через светодиод $I_{\text{max}} = 10\text{ мА}$, пороговое напряжение светодиода $U_0 = 2\text{ В}$, напряжение питания $U_{\text{п}}$ взять из таблицы вариантов.

2. Экспериментальное исследование выпрямительного диода:

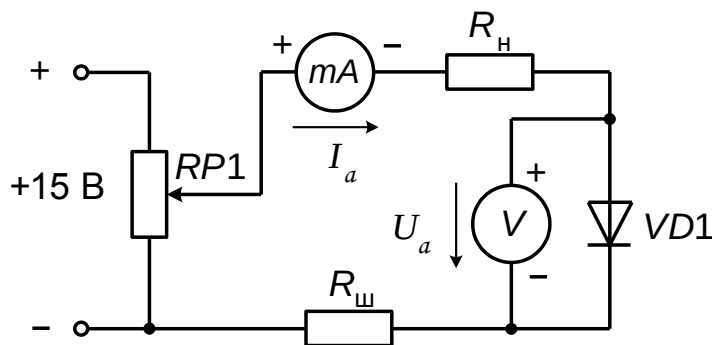


Рис. 2. Схема для исследования выпрямительного диода на постоянном токе

- а) собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе (рис. 2). Соединить перемычкой гнезда X2 – X6. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 1000$ » (максимальный ток 100 мА) между

гнездами $X1 - X10$. Для измерения анодного напряжения между гнездами $X3, X14$ включить мультиметр на пределе «2 В», при больших напряжениях перейти на предел «20 В». Переключить тумблер $SA1$ в положение «+»;

б) снять по точкам вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе. Для этого потенциометром $RP1$ изменять напряжение на входе, фиксируя анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на диоде $VD1$. ВАХ снимать сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключатель $SA1$ на «-». При смене ветви не забыть изменить полярности миллиамперметра и вольтметра и их пределы измерения!

После выполнения эксперимента перевести переключатель $SA1$ в положение «Выкл». Ручку потенциометра $RP1$ установить в положение «0»;

в) по построенной вольтамперной характеристике определить основные параметры диода: пороговое напряжение U_0 , дифференциальное сопротивление r_d , обратный ток $I_{обр}$, прямое падение напряжения $U_{a\max}$ при максимальном анодном токе $I_{a\max}$;

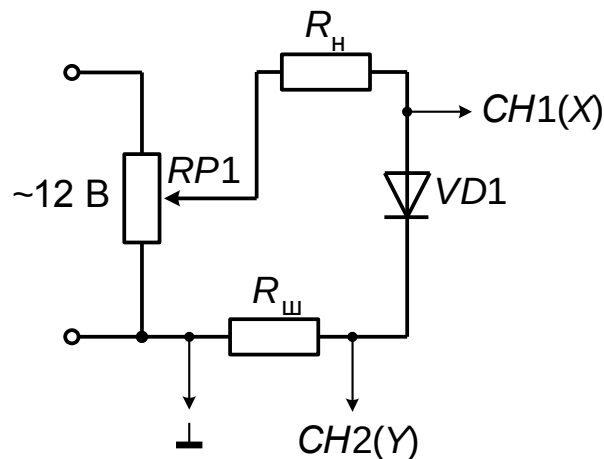


Рис. 3. Схема для исследования выпрямительного диода на переменном токе

г) собрать схему для исследования выпрямительного диода на переменном токе с целью получения ВАХ диода на экране осциллографа (рис. 3). Вход $CH2(Y)$ осциллографа подключить к шунту $R_{ш}$ (гнездо $X13$), а корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом $X12$. Вход $CH1(X)$ осциллографа подключить к гнезду $X3$. При этом осциллограф должен быть переведен в положение X/Y (кнопка меню «Дисплей», подменю «Формат»). Подать питание – переключатель $SA1$ установить в положение «~». Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Вращать ручку потенциометра $RP1$ до положения «5». Зарисовать ВАХ диода. Определить масштабы по току и напряжению.

После выполнения эксперимента перевести переключатель $SA1$ в положение «Выкл». Ручку потенциометра $RP1$ установить в положение «0»;

д) определить по осциллограмме параметры диода: пороговое напряжение U_0 , дифференциальное сопротивление r_d , обратный ток $I_{обр}$, прямое

падение напряжение $U_{a\max}$ при максимальном анодном токе $I_{a\max}$. Сравнить с параметрами определенными в п. 2 в, объяснить причину различий.

3. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на диоде:

а) собрать схему выпрямителя (рис. 3) – это не потребует никаких переключений на модуле. Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. На экране осциллографа Вы увидите осциллограммы анодного тока i_a и напряжения на диоде u_a ;

б) исследовать выпрямитель, для этого установить на входе напряжение с амплитудой U_m , указанной в таблице вариантов. Измерение напряжения производить при помощи осциллографа, подключив вход *CH2* осциллографа к гнезду *X10*, а корпус осциллографа «⊥» – к гнезду *X12*. Канал *CH1* осциллографа рекомендуется отключить от модуля;

в) снять осциллограммы напряжения на диоде u_a (вход *CH1* осциллографа подключить к гнезду *X3*) и анодного тока i_a (вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду *X13*, а корпус осциллографа «⊥» уже соединен с гнездом *X12*). Переключить осциллограф в двухканальный режим развёртки во времени. Зарисовать с экрана осциллографа временные диаграммы сигналов друг под другом. Снять осциллограмму напряжения на нагрузке u_n . Для этого корпус осциллографа подключить к гнезду *X3*, а вход канала *CH2* к гнезду *X1* (не забудьте определить масштабы по току и напряжению).

После выполнения эксперимент перевести переключатель *SA1* в положение «Выкл». Ручку потенциометра *RP1* установить в положение «0».

4. Экспериментальное исследование диода Шоттки:

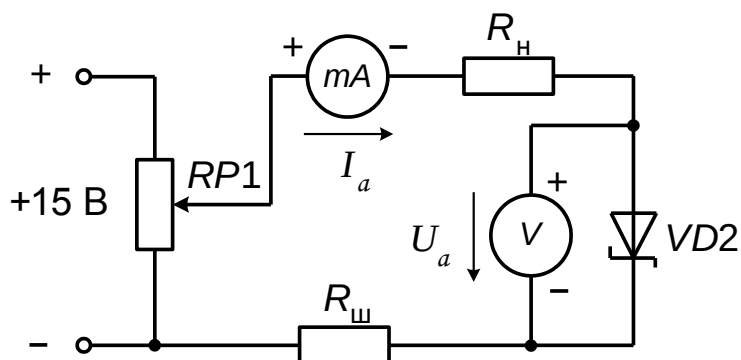


Рис. 4. Схема для исследования диода Шоттки на постоянном токе

а) собрать схему для исследования диода Шоттки на постоянном токе (рис. 4). Соединить перемычкой гнезда *X3*, *X7*. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 1000$ » (максимальный ток 100 мА) между гнездами *X1* – *X10*. Для измерения анодного напряжения между гнездами *X2* – *X14* включить

мультиметр на пределе «2 В», при больших напряжениях перейти на предел «20 В». Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

б) снять по точкам вольтамперную характеристику диода Шоттки на постоянном токе. Для этого потенциометром RP1 изменять напряжение на входе, фиксируя анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на диоде VD2. ВАХ снять сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключатель SA1 на «-». При смене ветви не забыть изменить полярности миллиамперметра и вольтметра и их пределы измерения!

После выполнения эксперимента перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0»;

в) по построенной вольтамперной характеристике определить основные параметры диода Шоттки: пороговое напряжение U_0 , дифференциальное сопротивление r_d , обратный ток $I_{обр}$, прямое падение напряжения $U_{a\max}$ при максимальном анодном токе $I_{a\max}$. Сравнить с параметрами выпрямительного диода.

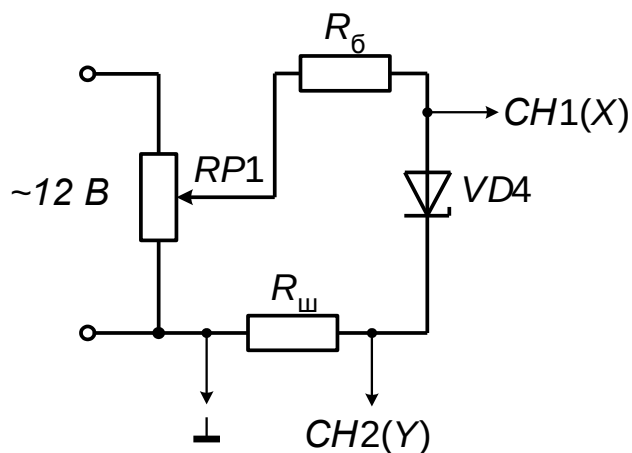


Рис. 5. Схема для исследования стабилитрона

5. Экспериментальное исследование стабилитрона:

а) собрать схему для исследования стабилитрона VD4 на переменном токе (рис. 5). Соединить перемычкой гнезда X5 – X9. Вход CH2(Y) осциллографа подключить к шунту $R_{ш}$ (гнездо X13), а корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом X12. Вход CH1(X) осциллографа подключить к гнезду X4. При этом осциллограф должен быть переведен в положение X/Y (кнопка меню «Дисплей», подменю «Формат»). Подать питание – переключатель SA1 установить в положение «~». Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Вращать ручку потенциометра RP1 до положения «5». Зарисовать ВАХ стабилитрона, определить масштабы по току и напряжению. После выполнения эксперимента перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0»;

б) по снятой ВАХ определить напряжение стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона и дифференциальное сопротивление r_d на участке стабилизации.

6. Экспериментальное исследование параметрического стабилизатора:

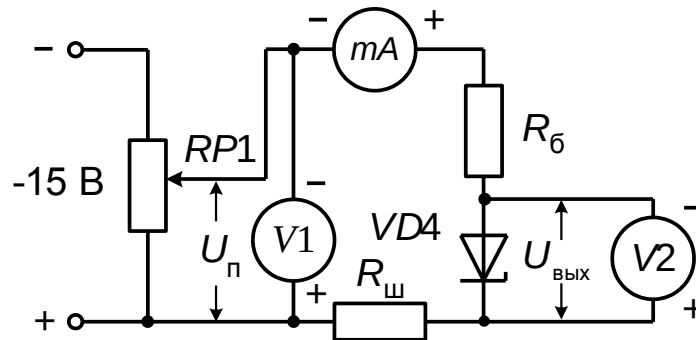


Рис. 6. Схема для исследования параметрического стабилизатора

а) собрать схему параметрического стабилизатора напряжения (рис. 6). Включить вольтметры измерительного модуля на вход и выход стабилизатора, соответственно между гнездами X10 – X11 и X4 – X15. Подать постоянное напряжение переключателем SA1 (см. рис. 6, обратите внимание на полярность).

б) снять и построить зависимость выходного напряжения от напряжения источника питания $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{п}})$. Для этого, изменяя потенциометром напряжение питания $U_{\text{п}}$ на входе стабилизатора, замерять соответствующее ему выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Определить напряжение стабилизации стабилизатора $U_{\text{ст}}$. Сравнить его с напряжением $U_{\text{ст}}$, найденным в п. 5 б.

Перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0»;

в) определить коэффициент стабилизации стабилизатора $K_{\text{ст}}$ и выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ на участке стабилизации.

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{п}}}{\Delta U_{\text{вых}}}; \quad R_{\text{вых}} = r_{\text{д}}.$$

7. Экспериментальное исследование светодиода:

а) собрать схему для исследования светодиода на постоянном токе.

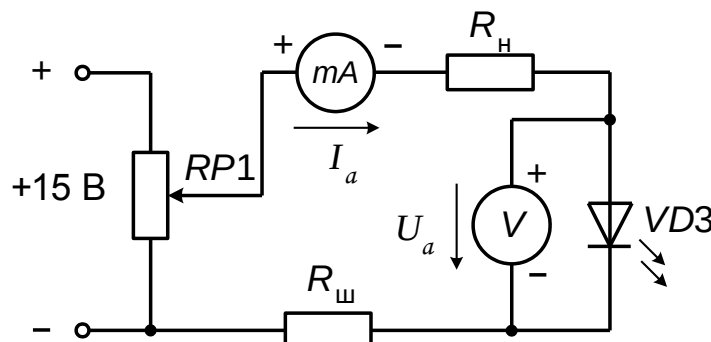


Рис. 7. Схема для исследования светодиода

Соединить перемычкой гнезда X4 – X8 (рис. 7). Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 100$ » (максимальный ток 10 мА) между гнездами

X1 – X10. Для измерения анодного напряжения между гнездами X5 – X15 включить вольтметр. Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

б) снять по точкам вольтамперную характеристику светодиода на постоянном токе. Для этого, вращая ручку потенциометра RP1 до положения «5», изменять напряжение на входе, фиксируя анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на светодиоде VD3. Снимать только прямую ветвь ВАХ светодиода. Записать значение анодного тока I_a при котором становится заметным свечение. Перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов в соответствии с мнемосхемой, представленной на рис. 1;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе. Обязательно ответить на контрольные вопросы 7, 12 – 15, указать причины отличий результатов, полученных на постоянном токе и с помощью осциллографа.

Контрольные вопросы

1. Как снять по точкам ВАХ диода?
2. Как снять ВАХ диода с помощью осциллографа?
3. Поясните вид ВАХ стабилизатора.
4. В чем отличие ВАХ выпрямительного диода, диода Шоттки, стабилизатора и светодиода?
5. Как работает неуправляемый выпрямитель?
6. Как и для чего строят временные диаграммы токов и напряжений в схеме выпрямителя?
7. Как изменится напряжение на выходе стабилизатора при повышении температуры?
8. При каком минимальном напряжении на входе стабилизатора еще возможна стабилизация напряжения?
9. От какого параметра зависит качество стабилизации напряжения?
10. От чего зависит яркость свечения светодиода?
11. Какой элемент обязателен в схеме индикатора на светодиоде? Почему?
12. Каким образом на экране осциллографа получают изображение функциональной зависимости двух напряжений?

Работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы

Исследование электромагнитных процессов, регулировочных и энергетических характеристик управляемых выпрямителей, выполненных по однофазной однополупериодной схеме выпрямления на обычных и запираемых тиристорах, при работе на активную и активно-индуктивную нагрузку.

Описание лабораторного стенда

В лабораторной работе используются следующие модули: «Тиристоры», «Вольтметры», «Измеритель мощности», а также двухканальный осциллограф.

Лицевая панель модуля тиристоров представлена на рис. 1.

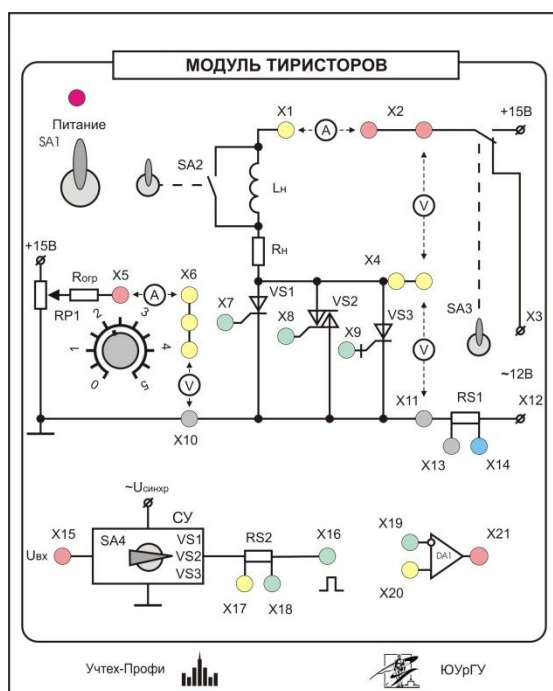


Рис. 1. Лицевая панель модуля «Тиристоры»

На лицевой панели приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: тиристор VS1, симметричный тиристор VS2 (в данной работе не используется), запираемый тиристор VS3, активное и индуктивное сопротивления нагрузки однополупериодного выпрямителя ($R_n = 150 \text{ Ом}$ и $L_n = 70 \text{ мГн}$). Потенциометр RP1 служит для изменения напряжения управления. Система управления (CY) формирует управляющие импульсы, сдвигаемые по фазе, при изменении входного управляющего напряжения $U_{упр} = 0 \dots 10 \text{ В}$. Шунт RS1 = 10 Ом служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через тиристор, а RS2 = 10 Ом для осциллографирования тока управления. Усилитель DA1 позволяет усилить сигнал тока, снимаемый с шунта RS1. Также на

передней панели размещены гнезда для осуществления внешних соединений $X1 - X21$, ручка потенциометра $RP1$, переключатель вида нагрузки $SA1$ (активной – положение вверх или активно-индуктивной – положение вниз) и переключатель каналов подачи управляющих импульсов на соответствующие тиристоры $SA3$. Переключатель $SA2$ в данной работе подает на схему переменное напряжение (~ 12 В). На мнемосхеме не показан понижающий трансформатор, от которого переменное напряжение U_2 подается на схему.

Подача питания выполняется при включении сетевого выключателя, установленного на модуле.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Тиристоры», «Однофазные выпрямители», «Управляемые выпрямители тока», «Энергетические показатели выпрямителей» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения u_2 , выпрямленного напряжения (напряжения на нагрузке) u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a для управляемого выпрямителя на однооперационном (незапираемом) тиристоре для заданного угла управления α и напряжения U_2 ;

в) построить регулировочную характеристику при активной нагрузке и идеальных вентилях, а также при учете падения напряжения на вентиле, для заданных параметров. Уравнение регулировочной характеристики при активной нагрузке и идеальных вентилях

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

где $U_{d0} = 0,45 \cdot U_2$ – среднее выпрямленное напряжение на нагрузке в неуправляемом выпрямителе.

Падение напряжения на вентиле приближенно можно учесть, вычтя пороговое напряжение U_0 , тогда уравнение регулировочной характеристики

$$U_{d\alpha} = U_{d\alpha 0} - U_0. \quad (2)$$

г) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения u_2 , выпрямленного напряжения (напряжения на нагрузке) u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a для управляемого выпрямителя на запираемом тиристоре для заданных углов управления α и напряжения U_2 .

2. Экспериментальное исследование однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя на незапираемом тиристоре:

а) собрать схему однополупериодного управляемого выпрямителя на незапираемом тиристоре в соответствии с рис. 2. Дополнительные перемычки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

В табл. 1 приведены измерительные приборы, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на схеме (рис. 2).

Переключить тумблер SA1 (см. рис. 1) в верхнее положение, соответствующее активной нагрузке, а SA2 – в нижнее положение, подключив в цепь нагрузки тиристора VS1 переменное напряжение (~ 12 В). Переключатель SA3 установить в верхнее положение, соответствующее управлению тиристором VS1. Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 1;

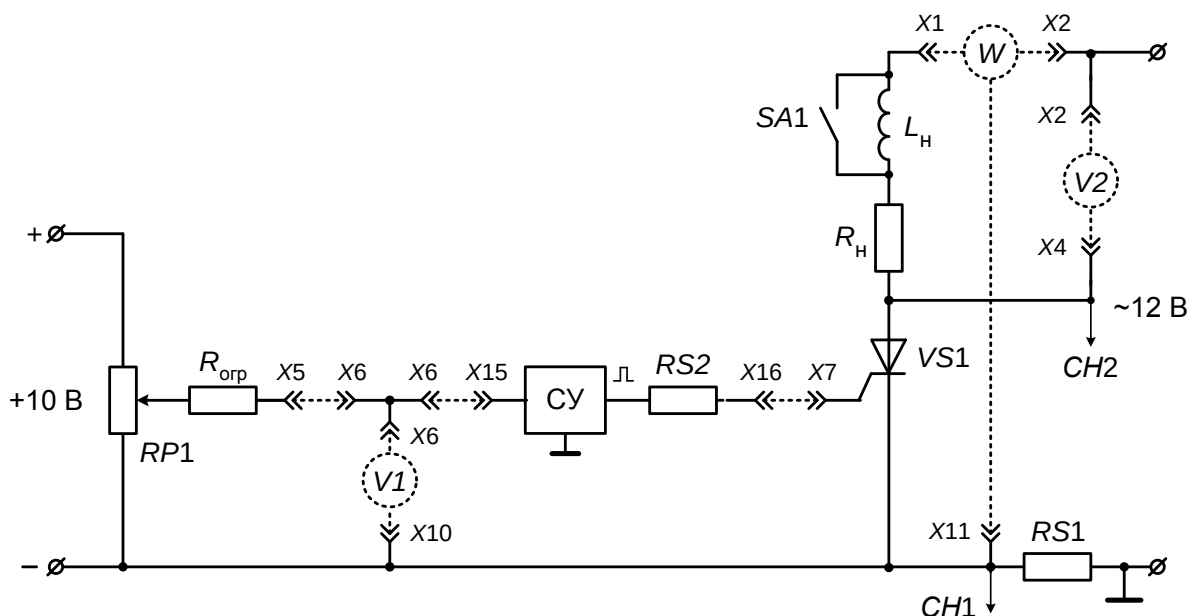


Рис. 2. Схема для исследования однополупериодного управляемого выпрямителя на незапираемом тиристоре

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Действующие значения напряжения U_2 , тока I_2 и мощности на входе	W	$U_2 \sim 30$ В; $I_2 \sim 0,2$ А	Измеритель мощности
Среднее значение выпрямленного напряжения U_d	V2	~ 20 В	Мультиметры
Напряжение управления $U_{упр}$	V1	~ 20 В	Мультиметры

б) изучить влияние угла управления на выпрямленное напряжение u_d и определить возможный диапазон изменения угла управления α . Для этого подключить вход CH2 осциллографа к гнезду X4, а корпус ($\perp$) – к гнезду X14 (напряжение на тиристоре u_a). Включить питание модуля «Тиристоры» и тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности». Регулировать угол управления α , изменяя напряжение управления $U_{упр}$. Снять зависимость угла управления от напряжения управления $\alpha = F(U_{упр})$.

Угол управления α определять при помощи осциллографа

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{дел.}}}{T_{\text{дел.}}} 360, \text{ град.} \quad (3)$$

где α – угол управления тиристора (град.); $\alpha_{\text{дел.}}$ – угол управления на экране в делениях; $T_{\text{дел.}}$ – длительность периода на экране в делениях.

В дальнейшем, пользуясь этой характеристикой, можно определять угол управления α , не пользуясь осциллографом;

в) при активной нагрузке и заданном угле управления α снять осциллограммы напряжения на тиристоре u_a (вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду *X4*, а корпус ($\perp$) – к гнезду *X14*) и анодного тока i_a (снимается с шунта *RS1* – вход *CH1* осциллографа к гнезду *X13*). Затем снять отдельно осциллограмму выпрямленного напряжения u_d (вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду *X2*, а корпус ($\perp$) – к гнезду *X4*, временно отключив вольтметр *V2* от измеряемой цепи). Определить коэффициент мощности в этой точке $\chi = P/S$. Активную P и полную S мощности измерить «Измерителем мощности»;

г) переключить тумблер *SA1* в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки L_n . Снять те же осциллограммы при заданном по варианту угле управления α и активно-индуктивной нагрузке, сравнить осциллограммы;

д) снять регулировочную $U_d = F(\alpha)$ и энергетические характеристики $P = F(\alpha)$, $S = F(\alpha)$, $\chi = F(\alpha)$ при активной нагрузке. Для этого переключить тумблер *SA1* в верхнее положение, соответствующее активной нагрузке. Изменяя напряжение управления $U_{\text{упр}}$ ручкой потенциометра *RP1*, фиксировать по измерительным приборам требуемые величины. Экспериментальные данные занести в таблицу. Построить характеристики;

е) снять регулировочную характеристику $U_d = F(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке, для чего переключить тумблер *SA1* в нижнее положение. Сравнить снятые регулировочные характеристики и, пользуясь осциллограммами, объяснить причины их отличий. Выключить питание модуля «Тиристоры» и тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности».

3. Экспериментальное исследование однополупериодного управляемого выпрямителя на запираемом тиристоре:

а) собрать схему в соответствии с рис. 2, а вместо тиристора *VS1* включить запираемый тиристор *VS3*. Для этого подать на управляющий электрод *VS3* импульсы от системы управления (*СУ*), переключив переключатель *SA3* в крайне нижнее положение и соединив перемычкой гнезда *X9* – *X16*. Переключить тумблер *SA1* в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки L_n ;

б) повторить пункты 2 в, г для запираемого тиристора *VS3*. Сравнить осциллограммы п. 2 и 3. Объяснить наличие перенапряжений в схеме с запираемым тиристором;

в) для активной нагрузки найти угол α , при котором коэффициент мощности χ и $\cos\varphi$ преобразователя максимальны. Энергетические показатели преобразователя замерять модулем «Измеритель мощности». Объяснить результат. Выключить питание модуля «Тиристоры» и тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) временные диаграммы и характеристики, построенные предварительно;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе. Обязательно ответить на контрольные вопросы 3, 4, 9.

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. От чего зависит форма напряжения на нагрузке?
5. Можно ли выполнить управляемый выпрямитель на транзисторе? Если нет, то почему, если да, то как?
6. Как влияет вид нагрузки на осциллограммы напряжения и тока?
7. Что такое угол проводимости вентилей?
8. Что такое регулировочная характеристика?
9. От чего зависит вид регулировочной характеристики?
10. Можно ли снять регулировочную характеристику на холостом ходу? Обоснуйте ответ.
11. Чем определяется диапазон изменения угла управления, необходимый для полного регулирования выпрямленного напряжения?

Работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ТРЕХФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы

Исследование электромагнитных процессов и характеристик выпрямителей, выполненных по трехфазной схеме с нулевым выводом и трехфазной мостовой схеме, при работе на активно-индуктивную нагрузку и активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС в режимах прерывистого и непрерывного тока.

Описание лабораторного стенда

В комплект лабораторного стенда входят следующие модули: «Тиристорный преобразователь», «Нагрузка», «Модуль питания», «Преобразователь частоты», «Мультиметры», модуль «Измерительный» и «Измеритель мощности».

Лицевая панель модуля «Тиристорный преобразователь» представлена на рис. 1. На ней изображена мнемосхема и установлены коммутирующие, регулирующие и измерительные элементы, а также гнезда для внешних соединений ($X1 - X20$). На мнемосхеме показаны трансформатор TV и реверсивный тиристорный преобразователь, состоящий из комплекта «Вперед» ($UZ1$) и комплекта «Назад» ($UZ2$). С помощью тумблера $SA1$ устанавливаются заданные параметры трансформатора (фактически подключаются дополнительные реакторы). Параметры трансформатора в зависимости от положения тумблера $SA1$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Положение тумблера	Первичное фазное напряжение U_1 , В	Вторичное фазное напряжение U_2 , В	Индуктивное сопротивление рассеяния, приведенное к вторичной стороне x_a , Ом	Активное сопротивление, приведенное к вторичной стороне r_a , Ом
1	220	48	4,3	1,65
2	220	48	0,3	1,5

В модуле установлена система управления (СУ) преобразователя, построенная на основе микроконтроллера. При подаче напряжения на гнезда А, В, С микроконтроллер СУ обеспечивает требуемый порядок включения элементов схемы, в том числе контактора $K1$, и подачу управляющих импульсов на тиристоры в соответствии с заданным углом управления. Потенциометр $RP1$ служит для регулирования напряжения на входе системы управления СУ с целью установки требуемого угла управления. Измерительный прибор $P1$ служит для измерения угла управления α .

В модуле «Тиристорный преобразователь» установлены датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН), служащие для осциллографирования напряжений и токов в схеме. На гнезда $X16$ и $X17$ подаются сигналы напряжения, а на гнез-

да X19 и X20 – сигналы тока. Гнезда X15, X18 и общий провод «⊥» служат для подключения выходных цепей ДН и ДТ к осциллографу.

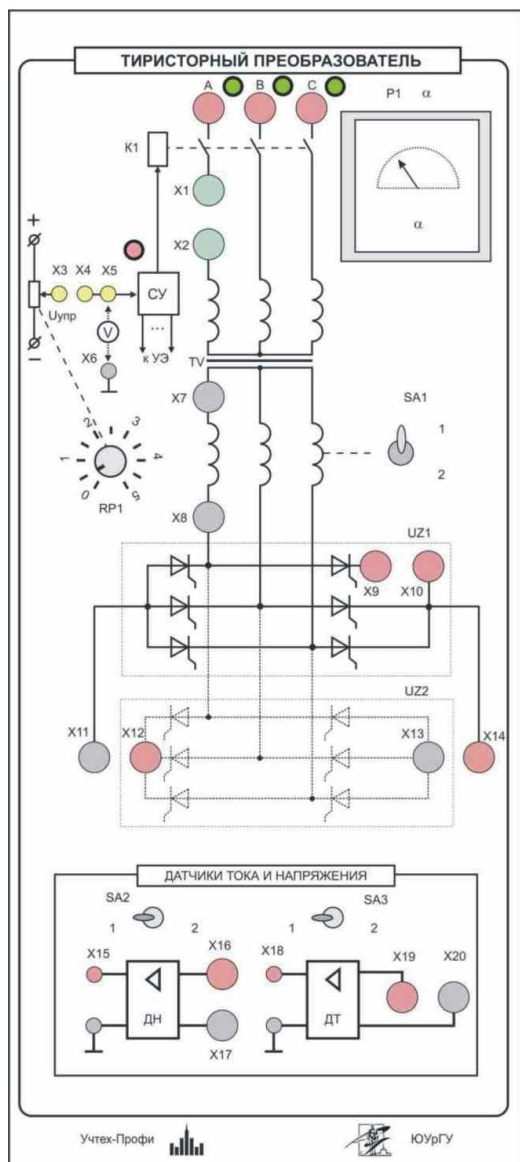


Рис. 1. Модуль «Тиристорный преобразователь»

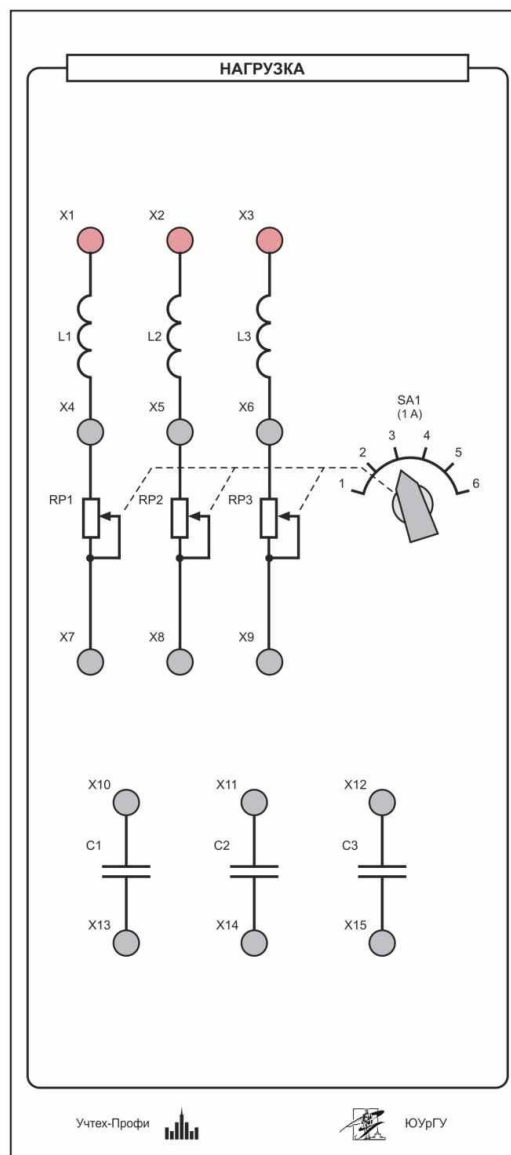


Рис. 2. Модуль «Нагрузка»

Коэффициент преобразования датчиков напряжения $k_H = 40$, коэффициент преобразования датчиков тока $k_T = 0,25$ А/В. Фактические значения напряжения и тока определяются умножением значений, измеренных при помощи осциллографа, на соответствующий коэффициент датчика.

С помощью тумблеров SA2 и SA3 изменяется полоса пропускания датчиков, что позволяет наблюдать на экране осциллографа сигнал (положение «2») или его первую гармонику (положение «1»).

Питание модуля «Тиристорный преобразователь» осуществляется через гнезда А, В, С на лицевой панели от источника трехфазного переменного напряжения (линейное напряжение 380 В) через автомат QF2, расположенный в модуле питания. Постоянные напряжения для системы управления подаются на заднюю панель. Максимальный выпрямленный ток установки не

должен превышать $I_d = 1$ А. Модуль «Тиристорный преобразователь» снабжен защитой от перегрузки, срабатывающей при токе $I_d = 2$ А.

Нагрузкой для модуля «Тиристорный преобразователь» является модуль «Нагрузка» (рис. 2). Она обеспечивает работу исследуемого преобразователя на активно-индуктивную нагрузку и на активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС (ПЭДС). На лицевой панели изображена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. В нагрузке регулируются только активные сопротивления, а индуктивности остаются почти неизменными. Регулирование производится переключателем SA1. Значения резисторов, соответствующие положениям переключателя, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Положение переключателя SA1	1	2	3	4	5	6
Сопротивление нагрузки (Ом)	100	200	400	600	1000	1600

В данной работе используется одна фаза модуля «Нагрузка». Сглаживающий реактор $L1$ индуктивностью 80 мГн вместе с резистором $RP1$ выполняют роль регулируемой активно-индуктивной нагрузки. Для уменьшения нагрева резисторов нагрузки рекомендуется 2 фазы активных сопротивлений нагрузки ($RP1$, $RP2$) включить в параллель. Работа на ПЭДС имитируется подключением параллельно активной нагрузке конденсаторов $C1 - C3$ всех трех фаз. Емкость каждого конденсатора 10 мкФ.

Порядок включения и выключения установки

1. Собрать схему эксперимента для выполнения лабораторной работы.
2. В модуле «Тиристорный преобразователь» переключить тумблер SA1 в положение, соответствующее заданным параметрам трансформатора (см. таблицу вариантов).
3. Установить переключатель SA1 на модуле «Нагрузка» в положение максимального сопротивления (крайнее правое положение).
4. Включить автомат QF1 «Модуля питания стенда», включить автомат QF2 «Модуля питания».
5. В модуле «Тиристорный преобразователь» установить заданный угол управления потенциометром $RP1$.
6. Установить переключателем SA1 необходимое сопротивление на модуле «Нагрузка».

При включенном автомате QF2 «Модуля питания» запрещается переключать тумблер SA1 в модуле «Тиристорный преобразователь», изменять места включения измерительных модулей и производить другие пересоединения.

Порядок выключения – обратный. Выключатель «Модуля питания стенда» выключается только в конце работы.

При срабатывании защиты по току необходимо отключить автомат QF2 «Модуля питания», проверить схему, включить автомат «Модуля питания».

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса: «Многофазные выпрямители», «Управляемые выпрямители», «Непрерывный режим», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

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

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

Ток в цепи нагрузки I_d для управляемого выпрямителя, работающего в непрерывном режиме, приближенно можно оценить из выражения

$$I_d = \frac{U_{d0} \cdot \cos \alpha}{R_d}; \quad (2)$$

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

г) рассчитать среднее значение выпрямленного напряжения U_d , ток вентиля I_a , вторичный I_2 и первичный I_1 токи трансформатора для заданного значения тока I_d . Среднее значение выпрямленного напряжения при заданном значении угла управления α и тока нагрузки I_d можно определить из уравнения внешней характеристики для непрерывного режима

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

где $U_{T(T0)}$ – пороговое напряжение тиристора; r_T – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии; r_a , x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления (сопротивления схемы замещения трансформатора, приведенные к стороне вентиля).

Коэффициент схемы a , пульсность схемы m и напряжение идеального холостого хода U_{d0} определяются видом схемы:

– для трехфазной нулевой схемы: $a = 1$, $m = 3$, $U_{d0} = 1,17 E_2$;

– для трехфазной мостовой схемы: $a = 2$, $m = 6$, $U_{d0} = 2,34 E_2$.

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

Формулы для расчета анодного тока вентиля I_a , действующих значений вторичного I_2 и первичного I_1 токов трансформатора приведены в табл. 3.

Таблица 3

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

Примечание. Коэффициент трансформации $n = U_1 / U_2$.

2. Экспериментальное исследование трехфазной мостовой схемы выпрямления при работе на активно-индуктивную нагрузку:

а) собрать схему для исследования трехфазной мостовой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку в соответствии с рис. 3. Дополнительные перемычки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

В табл. 4 приведены измерительные приборы, а в табл. 5 датчики тока и напряжения, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 3).

Таблица 4

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Действующее значение фазного напряжения U_1 и первичного тока I_1 трансформатора	$PW1$	$U_1 \sim 300 \text{ В};$ $I_1 \sim 0,2 \text{ А}$	Измеритель мощности
Действующее значение вторичного напряжения трансформатора U_2	$PV1$	$\sim 200 \text{ В}$	Мультиметры
Среднее значение анодного тока I_a	$PA1$	–	Модуль измерительный
Среднее значение выпрямленного напряжения U_d	$PV2$	$= 200 \text{ В}$	Мультиметры
Среднее значение выпрямленного тока I_d	$PA2$	–	Модуль измерительный

Таблица 5

Измеряемый сигнал	Обозначение прибора	Месторасположение прибора (название модуля)
Мгновенное значение анодного напряжения u_a	ДН1	Преобразователь частоты
Мгновенное значение анодного тока i_a	ДТ1	Преобразователь частоты
Мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d	ДН2	Тиристорный преобразователь
Мгновенное значение выпрямленного тока i_d	ДТ2	Тиристорный преобразователь

Тумблеры SA2 и SA3 датчиков напряжения (ДН1 – ДН2) и тока (ДТ1 – ДТ2) в модулях «Тиристорный преобразователь» и «Преобразователь частоты» установить в положение «2» (фильтр выключен). Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 4;

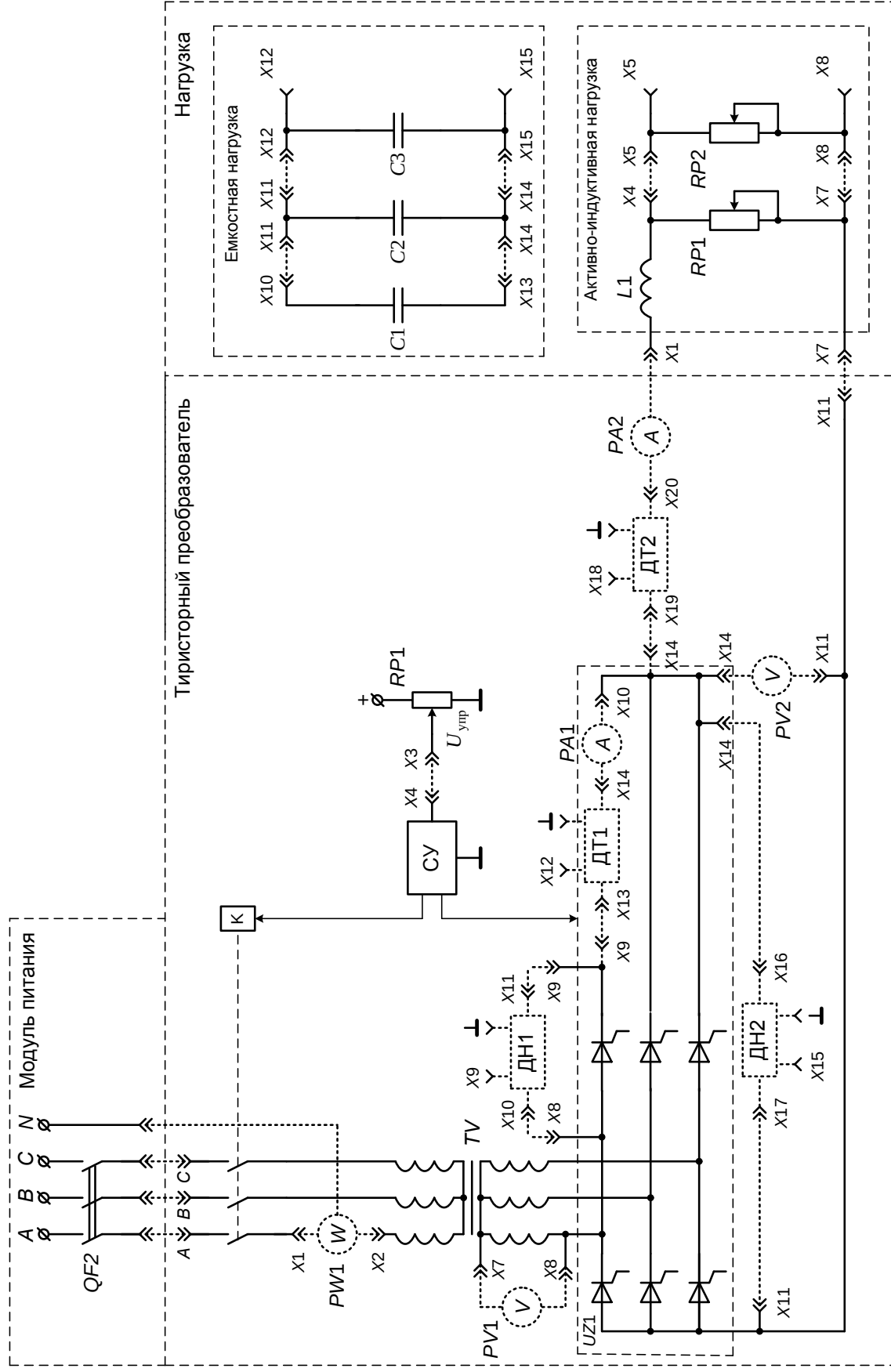


Рис. 3. Принципиальная схема для исследования трехфазной мостовой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку

б) снять осциллограммы анодного тока i_a и анодного напряжения u_a при помощи осциллографа. Для этого подключить выходы осциллографа к датчику напряжения ДН1 (канал $CH1$ – гнездо $X9$) и датчику тока ДТ1 (канал $CH2$ – гнездо $X12$, корпус осциллографа соединить с гнездом « $\perp$ » датчика тока ДТ1). Выполнить необходимые операции, указанные в порядке включения установки. Включить тумблер «Сеть» в модуле «Измеритель мощности». Потенциометром $RP1$ в модуле «Тиристорный преобразователь» установить заданное значение угла управления α_1 (по прибору $P1$). Переключателем $SA1$ в модуле «Нагрузка» установить заданное значение сопротивления нагрузки R_d . Проверить с помощью осциллографа соответствие угла α заданному, зарисовать с экрана осциллографа ток через вентиль i_a и напряжение на вентиле u_a . Записать масштабы по напряжению и времени (углу), а также учесть коэффициенты датчиков напряжения и тока;

в) снять осциллограммы выпрямленного напряжения u_d и тока i_d . Для этого подключить выходы осциллографа к датчику напряжения ДН2 (канал $CH1$ – гнездо $X15$) и датчику тока ДТ2 (канал $CH2$ – гнездо $X18$, корпус осциллографа соединить с гнездом « $\perp$ » датчика тока ДТ2). Проверить величину заданного угла α_1 и сопротивление нагрузки R_d согласно таблице вариантов. Зарисовать с экрана осциллографа осциллограммы u_d и i_d в тех же масштабах;

г) с помощью измерительных приборов сделать замеры среднего значения анодного тока I_a , выпрямленного напряжения U_d и первичного тока I_1 трансформатора для заданного сопротивления нагрузки R_d и угла α_1 . Замерить вторичное напряжение U_2 при $I_d \approx 0$ (установить переключатель $SA1$ модуля «Нагрузка» в крайне правое положение). Сравнить полученные значения с расчетными;

д) снять регулировочные характеристики выпрямителя $U_d = F(\alpha)$ при двух значениях сопротивления нагрузки (заданного по варианту и по указанию преподавателя). Характеристики снимать, изменяя угол α ручкой потенциометра $RP1$ в модуле «Тиристорный преобразователь» так, чтобы выпрямленное напряжение U_d изменялось в диапазоне от максимального значения до нуля. Построить характеристики на одном графике;

е) снять внешние характеристики $U_d = F(I_d)$ при заданном значении α_1 и при $\alpha_2 = \alpha_1 + 15^\circ$. Характеристики снимать, изменяя ток нагрузки I_d переключателем $SA1$ в модуле «Нагрузка». При снятии характеристик отметить точку перехода от непрерывного режима к прерывистому. Снизить ток нагрузки I_d до нуля (установить переключатель $SA1$ модуля «Нагрузка» в крайне правое положение), выключить автомат $QF2$ «Модуля питания»;

ж) установить другие параметры трансформатора переключением тумблера $SA1$ в модуле «Тиристорный преобразователь». Включить автомат $QF2$ «Модуля питания», и снова снять внешнюю характеристику при заданном угле α_1 . Построить все внешние характеристики на одном графике;

з) установить тот же угол α_1 и сопротивление нагрузки R_d , что и в п. 2 б. Снять осциллограмму u_d в том же масштабе, что и раньше. Сравнить углы коммутации γ . Снизить ток нагрузки I_d до нуля (установить переключатель

SA1 модуля «Нагрузка» в крайне правое положение), выключить автомат QF2 «Модуля питания».

3. Экспериментальное исследование трехфазной мостовой схемы выпрямления при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС:

а) собрать схему для исследования трехфазной мостовой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС. Для этого в модуле «Нагрузка» подключить конденсаторы $C1 - C3$ параллельно резисторам $RP1 - RP2$, соединив перемычками гнезда $X5 - X12$, $X8 - X15$ (см. рис. 3). Остальная схема остается неизменной;

б) повторить все пункты раздела 2, кроме 3). Выключить автомат QF2 «Модуля питания».

4. Экспериментальное исследование трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом при работе на активно-индуктивную нагрузку:

а) собрать схему для исследования трехфазной нулевой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку. Для этого гнездо $X7$ модуля «Нагрузка» и гнездо $X17$ датчика напряжения ДН2 соединить с нулевым выводом трансформатора TV (гнездо $X7$) в модуле «Тиристорный преобразователь». Остальная схема остается неизменной (см. рис. 3);

б) повторить все пункты раздела 2. Выключить автомат QF2 «Модуля питания».

5. Экспериментальное исследование трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС:

а) собрать схему для исследования трехфазной нулевой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС. Для этого в модуле «Нагрузка» подключить конденсаторы $C1 - C3$ параллельно резисторам $RP1 - RP2$, соединив перемычками гнезда $X5 - X12$, $X8 - X15$ (см. рис. 3). Остальная схема остается неизменной;

б) повторить все пункты раздела 2, кроме 3). Выключить автомат QF2 «Модуля питания», а затем автомат QF1 «Модуля питания стенда».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) предварительные расчеты и построения;
- в) исходные данные, принципиальную силовую схему и схему соединений модулей для своего подварианта;
- г) обработанные осциллограммы;
- д) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- е) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- ж) сравнение осциллограмм и построенных диаграмм, а также сравнение расчетных и экспериментальных значений угла γ . Объяснить расхождения;

з) сравнение соответствующих осциллограмм для разных схем выпрямления и объяснение их различий. Показать и определить на осциллограммах u_a угол α ;

и) сравнение регулировочных характеристик для разных схем. Указать различие и сходство;

к) сравнение расчетных и экспериментальных значений токов и напряжений. Объяснить причины их расхождения;

л) выводы по работе:

– о влиянии на внешние характеристики и угол коммутации анодной индуктивности L_a , угла α и схемы выпрямления;

– о влиянии вида нагрузки на внешние и регулировочные характеристики;

– объяснить, почему величина тока в непрерывном режиме влияет на положение регулировочной характеристики.

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? Почему?
12. Что влияет на величину граничного тока?
13. Порядок включения и выключения лабораторного стенда. Какие переключения, и при каких условиях запрещается производить?
14. Как снять внешние и регулировочные характеристики выпрямителя при помощи измерительных приборов стенда?
15. Как определить масштабы по напряжению (току) и времени при осциллографировании сигналов при помощи осциллографа?
16. Объясните принцип работы стенда в автоматизированном режиме. Из каких программных продуктов состоит система автоматизации стенда? Назовите их назначение.

Работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы

Изучение характеристик и режимов работы управляемых выпрямителей при различных видах нагрузки.

Описание лабораторной установки

В комплект лабораторной установки входят следующие модули: «Тиристорный преобразователь», «Нагрузка», «Преобразователь частоты» (датчики тока и напряжения), «Модуль питания», «Модуль измерительный», «Мультиметры», а также двухканальный осциллограф.

Описание лабораторной установки, порядок ее включения и выключения, а также запрещенные операции подробно описаны в работе «Исследование схем трехфазных управляемых выпрямителей».

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса: «Управляемые выпрямители», «Непрерывный режим», «Прерывистый и граничный режимы», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

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

для непрерывного режима

$$U = U_{d0} \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

для прерывистого режима при активной нагрузке

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

для прерывистого режима при работе на активную нагрузку с ПЭДС

$$U_d = \begin{cases} E_{2m} \cdot \cos(\alpha - \alpha_{\min}) & \text{при } \alpha_{\min} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \alpha_{\min} \end{cases}, \quad (3)$$

где m – пульсность схемы ($m = 3$ – для трехфазной нулевой схемы; $m = 6$ – для трехфазной мостовой схемы);

$\alpha_{\text{гр}}$ – граничный угол управления при работе выпрямителя на активную нагрузку (для $m = 3$, $\alpha_{\text{гр}} = 30^\circ$; для $m = 6$, $\alpha_{\text{гр}} = 60^\circ$);

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

U_{d0} – среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке для неуправляемого выпрямителя (для $m = 3$, $U_{d0} = 1,17 E_2$; для $m = 6$, $U_{d0} = 2,34 E_2$); E_{2m} – амплитуда вторичной ЭДС (для $m = 3$, $E_{2m} = \sqrt{2}E_2$; для $m = 6$, $E_{2m} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}E_2$), где E_2 – действующее значение ЭДС на вторичной обмотке трансформатора на холостом ходу.

При работе на активную нагрузку с ПЭДС при углах $\alpha < \alpha_{\min}$ тиристоры не включаются, ток не проходит, и напряжение на выходе равно максимальной ПЭДС, т.е. E_{2m} .

При расчете принять: $E_2 = U_2 = 46$ В; $U_{T(T0)} = 1,0$ В; $r_T = 0,05$ Ом; $x_a = 4,3$ Ом; $x_d = 63$ Ом;

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

$$I_{d.\text{гр}} = \frac{B \cdot U_2}{a \cdot x_a + x_d} \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

где B , a – коэффициенты (для $m=3$ принять $B=0,46$ и $a=1$; для $m=6$ принять $B=0,22$ и $a=2$);

г) рассчитать и построить внешние характеристики для заданных α , x_a , x_d при активно-индуктивной нагрузке и активно-индуктивной с ПЭДС. При построении для режима непрерывного тока воспользуйтесь формулой (2) описания к работе № 1. Участки характеристик в области прерывистого тока построить по двум точкам, соответствующим холостому ходу и граничному току. Точка холостого хода определяется по регулировочной характеристике для прерывистого режима. Все характеристики построить в абсолютных единицах.

2. Экспериментальное исследование трехфазной мостовой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС:

а) собрать схему для исследования трехфазного выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме в соответствии с рис. 1. Дополнительные перемычки, измерительные приборы и датчики токов и напряжений, подключаемые в схему, показаны штриховой линией. Переключателем SA1 установить заданные параметры трансформатора (положение «2» соответствует большему значению индуктивности).

В табл. 1 приведены измерительные приборы, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 1). Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 1.

Подключить входы осциллографа для измерения выпрямленного напряжения u_d и тока i_d ;

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора
Действующее значение вторичного напряжения U_2	PV1	~ 200 В	Модуль мультиметров
Среднее значение выпрямленного напряжения U_d	PV2	$= 200$ В	Модуль мультиметров
Среднее значение анодного тока I_a	PA1	$= 2$ А	Модуль измерительный
Среднее значение выпрямленного тока I_d	PA2	$= 2$ А	Модуль измерительный

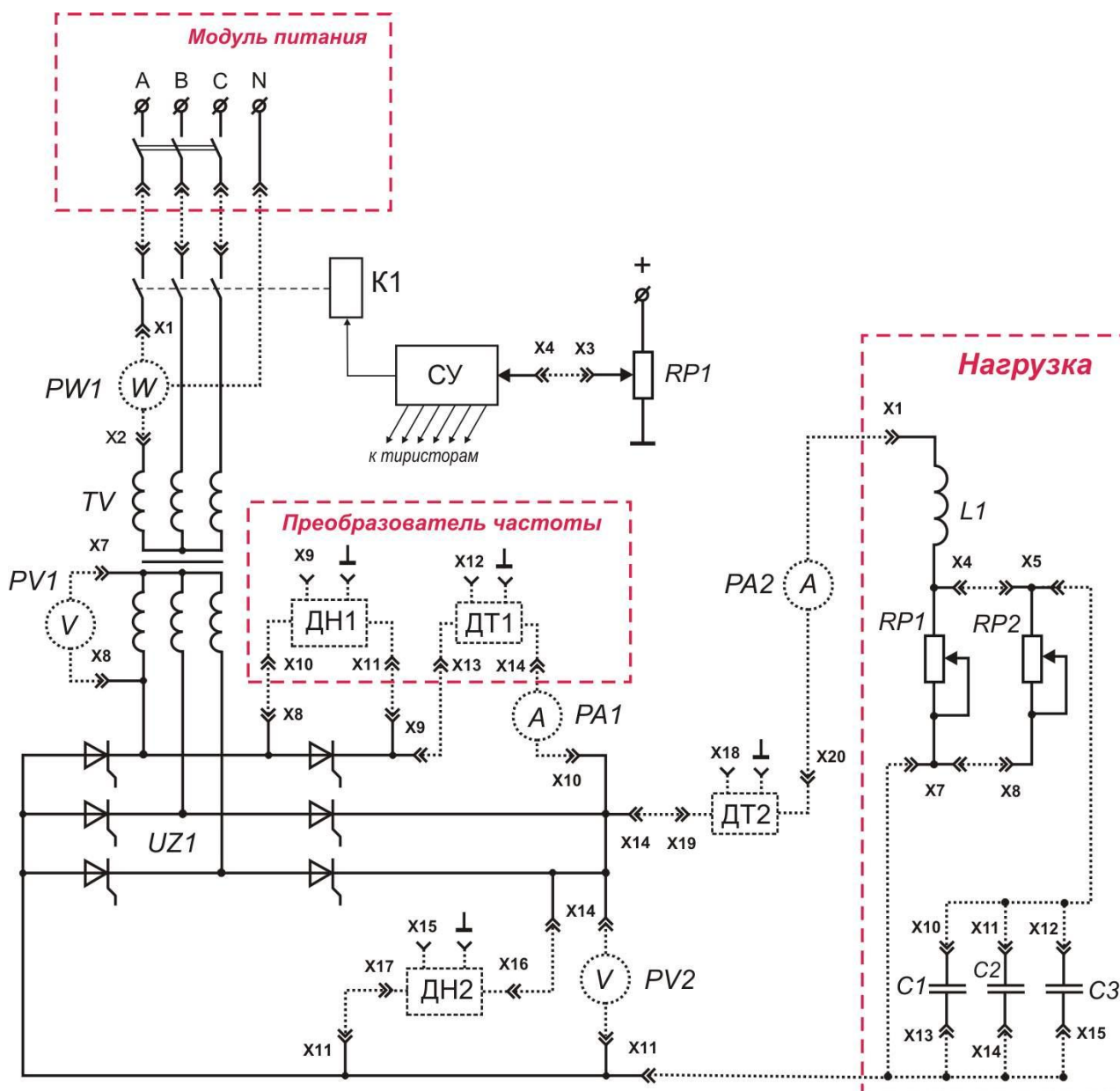


Рис. 1. Схема соединений для исследования мостовой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС

б) определить величину граничного тока $I_{d,гр}$ для заданного угла управления α_1 . Выполнить необходимые операции, указанные в порядке включения установки (см. предыдущую работу). Регулятором RP1 установить заданное значение угла α (по прибору P1).

Изменяя ток нагрузки I_d ручкой переключателя SA1 в модуле «Нагрузка», наблюдать с помощью осциллографа за формой выпрямленного тока. Зафиксировать величину граничного тока $I_{d,гр}$ с помощью амперметра; сравнить с рассчитанным значением;

в) снять осциллограммы тока i_d и напряжения u_d при токах $I_d = I_{d,гр}$, $I_d = 0,5I_{d,гр}$, $I_d = 2I_{d,гр}$. Определить и записать масштабы по времени (углу), напряжению и току.

Снять осциллограмму ПЭДС. Убедиться в наличии ПЭДС при заданном угле α и токе нагрузки. Обратит внимание на величину пульсаций. Выключить автомат QF2; восстановить подключение осциллографа по п. 2а;

г) снять и построить внешнюю характеристику $U_d = F(I_d)$ при заданном значении α_1 . Для этого изменять ток нагрузки ручкой переключателя SA1 в модуле «Нагрузка» от минимально возможного до заданного значения тока I_d . При построении отметить точку, соответствующую граничному току $I_{d,гр}$. Вместо точки холостого хода снять точку с минимально возможным значением I_d , а при построении экстраполировать внешние характеристики до точки холостого хода. Характеристики строить на том же графике, где предварительно были построены расчетные характеристики;

д) снять зависимость граничного тока $I_{d,гр}$ от угла управления α . Для этого уменьшая угол α от 90° до 0° с шагом 15° , регулировать ток I_d так, чтобы сохранялся граничный режим (или близкий к нему), одновременно фиксировать $U_{d,гр}$. Построить зависимости $I_{d,гр} = F(\alpha)$ и $U_{d,гр} = F(I_{d,гр})$. Последнюю построить на том же графике, где построены внешние характеристики. Определить максимальное значение граничного тока $I_{d,гр,max}$;

е) снять и построить регулировочные характеристики выпрямителя $U_d = F(\alpha)$ при двух постоянных значениях сопротивления нагрузки R_d : обеспечивающих режим, близкий к холостому ходу и минимально возможном. Регулировочную характеристику на холостом ходу снять нельзя, так как при отсутствии тока нагрузки после окончания управляющих импульсов тиристоры не удерживаются во включенном состоянии. Поэтому характеристика снимается при малом токе ($I_d < 0,05$ А). Характеристики снимать, изменяя угол α ручкой потенциометра RP1 в модуле «Тиристорный преобразователь» так, чтобы выпрямленное напряжение U_d изменялось в диапазоне от максимального значения до нуля. Экспериментальные характеристики строить на том же графике, где были построены расчетные характеристики.

Выключить автомат QF2 «Модуля питания».

3. Экспериментальное исследование трехфазной нулевой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС:

Собрать схему в соответствии с рис 2.

Повторить все эксперименты п. 2.

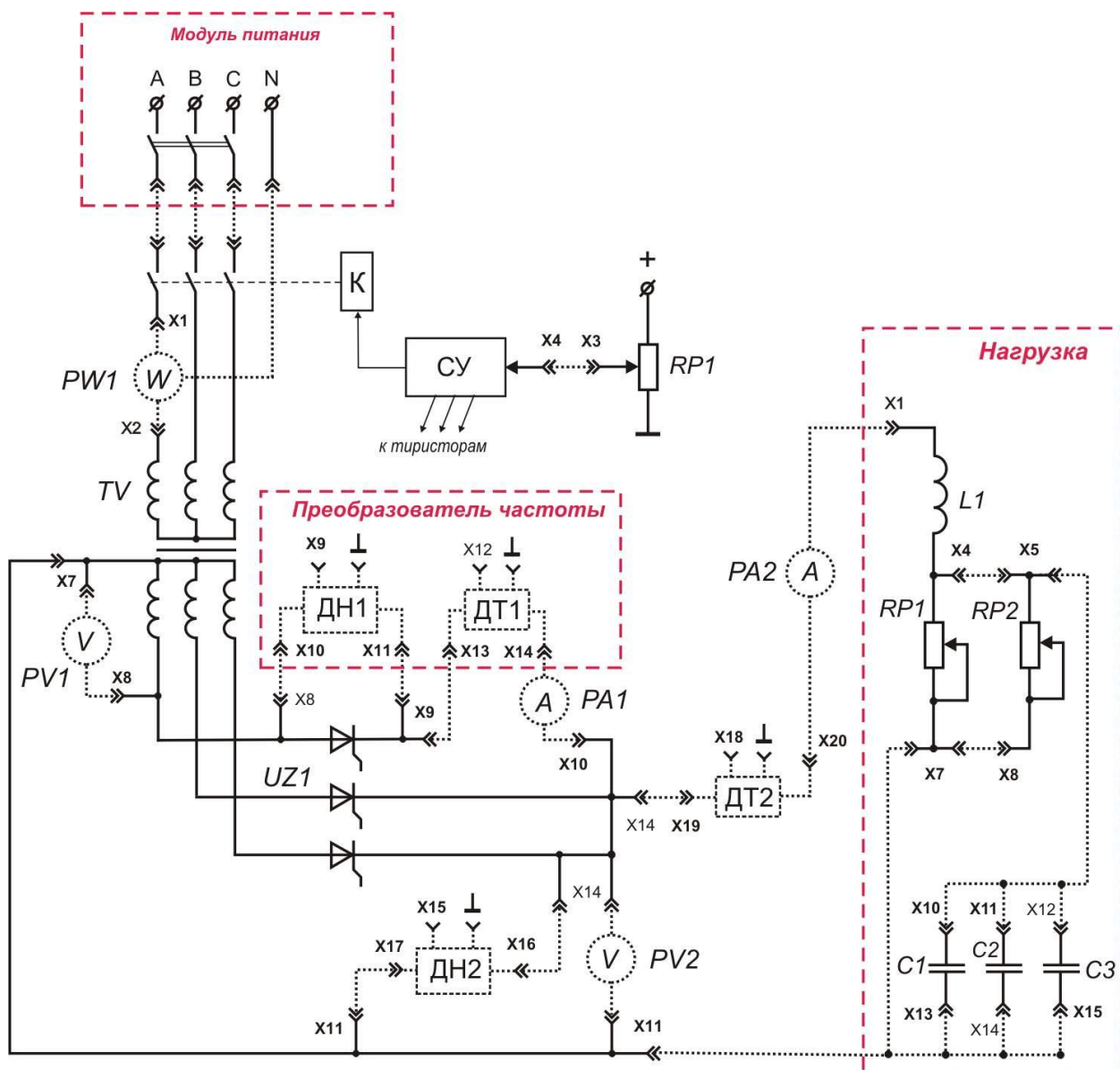


Рис. 2. Схема соединений для исследования нулевой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС

4. Экспериментальное исследование трехфазной нулевой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку.

а) собрать схему для исследования трехфазной нулевой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку. Для этого в схеме, представленной на рис.2, необходимо отключить конденсаторы, включенные параллельно активному сопротивлению нагрузки;

б) повторить все эксперименты п. 2.

5. Экспериментальное исследование трехфазной мостовой схемы при работе на активно-индуктивную нагрузку.

Для этого собрать схему по рис. 1, отключив конденсаторы C1-C3 модуля «Нагрузка». Повторить все эксперименты п. 2.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) предварительные расчеты и построения;
- в) исходные данные, принципиальную силовую схему;
- г) обработанные осциллограммы. Указать, чем отличаются осциллограммы для непрерывного и прерывистого режима и для разных видов нагрузки;
- д) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- е) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- ж) сравнение регулировочных и внешних характеристик при различных видах нагрузки;
- з) выводы по работе:
 - объяснить влияние режима работы на вид внешних и регулировочных характеристик;
 - объяснить влияние вида нагрузки на вид внешних и регулировочных характеристик;
 - объяснить влияние угла управления на величину граничного тока.

Контрольные вопросы

1. Назовите режимы работы выпрямителя.
2. Что такое внешняя характеристика?
3. Как снимаются при выполнении работы внешние характеристики при различных видах нагрузки?
4. От чего зависит вид внешней характеристики?
5. Что такое регулировочная характеристика?
6. От чего зависит вид регулировочной характеристики?
7. Что такое граничный ток $I_{d,гр}$ и граничный угол $\alpha_{гр}$?
8. От чего зависят $I_{d,гр}$ и $\alpha_{гр}$?
9. Как определить экспериментально $I_{d,гр}$ и $\alpha_{гр}$?
10. Можно ли снять регулировочную характеристику на холостом ходу? Обоснуйте ответ.
11. Что такое угол управления α и как он определяется при выполнении работы?
12. Почему резисторы с включенными параллельно им конденсаторами имитируют ПЭДС?
13. Чем отличаются временные диаграммы (осциллограммы) выпрямленного напряжения u_d и тока i_d в различных режимах при различных видах нагрузки?

Работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКОМПЛЕКТНОГО РЕВЕРСИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель работы

Изучение характеристик и энергетических показателей реверсивного тиристорного преобразователя.

Описание лабораторного стенда

В комплект лабораторного стенда входят следующие модули: «Тиристорный преобразователь», «Нагрузка», «Модуль питания», «Мультиметры», модуль «Измерительный» и «Измеритель мощности».

Описание лабораторного стенда подробно описано в работе № 3.

Порядок включения и выключения установки

1. Собрать схему эксперимента для выполнения лабораторной работы.
2. В модуле «Тиристорный преобразователь» переключить тумблер SA1 в положение, соответствующее заданным параметрам трансформатора (см. таблицу вариантов). Установить потенциометр RP1 в среднее положение, соответствующего напряжению управления и выпрямленному напряжению равного нулю.
3. Установить переключатель SA1 на модуле «Нагрузка» в положение максимального сопротивления (крайнее правое положение).
4. Включить автомат QF1 «Модуля питания стенда», включить автомат QF2 «Модуля питания».
5. В модуле «Тиристорный преобразователь» установить заданный угол управления потенциометром RP1 при работе комплекта вентилей «Вперед».
6. Установить переключателем SA1 необходимое сопротивление на модуле «Нагрузка».

При включенном автомате QF2 «Модуля питания» запрещается переключать тумблер SA1 в модуле «Тиристорный преобразователь», изменять места включения измерительных модулей и производить другие пересоединения.

Порядок выключения – обратный. Выключатель «Модуля питания стенда» выключается только в конце работы.

При срабатывании защиты по току необходимо отключить автомат QF2 «Модуля питания», проверить схему, включить автомат «Модуля питания».

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:
 - а) изучить темы курса: «Управляемые выпрямители», «Реверсивные преобразователи», «Энергетические показатели выпрямителей», «Системы управления тиристорными преобразователями», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;
 - б) рассчитать и построить регулировочные характеристики реверсивного преобразователя $U_d = f(\alpha)$ и реверсивного преобразователя вместе с системой управления $U_d = f(U_{упр})$ в абсолютных единицах для непрерывного режима.

Регулировочные характеристики комплектов преобразователя для непрерывного режима работы можно приближенно построить по уравнению

$$U_d = \pm(U_{d0} \cdot \cos \alpha - a \cdot U_{T(T0)}), \quad (1)$$

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

Коэффициент схемы a , пульсность схемы m и напряжение идеального холостого хода U_{d0} определяются видом схемы:

- для трехфазной нулевой схемы: $a = 1, m = 3, U_{d0} = 1,17 E_2$;
- для трехфазной мостовой схемы: $a = 2, m = 6, U_{d0} = 2,34 E_2$.

Регулировочная характеристика системы импульсно-фазового управления (СИФУ) линейная (рис. 1). Угол наклона характеристики $(\Delta \alpha / \Delta U_{ex}) = 16,6 \text{ град} / \text{В}$;

в) рассчитать и построить внешние характеристики реверсивного преобразователя в абсолютных единицах для двух значений угла управления группы «Вперед» ($\alpha_{В1} = \alpha_1$ и $\alpha_{В2} = \alpha_1 + 15^\circ$) и двух соответствующих значений угла управления группы «Назад» ($\alpha_{Н1} = \alpha_1$ и $\alpha_{Н2} = \alpha_1 + 15^\circ$).

Расчет выполнить по уравнению внешней характеристики для непрерывного режима

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

где r_T – дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии; r_a, x_a – анодные активное и индуктивное сопротивления (сопротивления схемы замещения трансформатора, приведенные к стороне вентилях). При расчете принять $U_{T(T0)} = 1 \text{ В}$, $r_T = 0,05 \text{ Ом}$, $E_2 = U_2$ на холостом ходу.

2. Экспериментальное исследование реверсивного преобразователя при работе на активно-индуктивную нагрузку:

а) собрать схему для исследования реверсивного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме, при работе на активно-индуктивную нагрузку в соответствии с рис. 2. Дополнительные переключки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

Внимание. Второй комплект вентилях $UZ2$ обязательно подключать, соединяя гнезда $X10$ с $X13$, т.к. между гнездами $X10$ и $X14$ установлен датчик тока, выполняющий функцию токовой защиты модуля «Тиристорный преобразователь». При неправильном подключении второго комплекта вентилях $UZ2$ (переключка между гнездами $X13$ и $X14$) последний оказывается включенным без защиты.

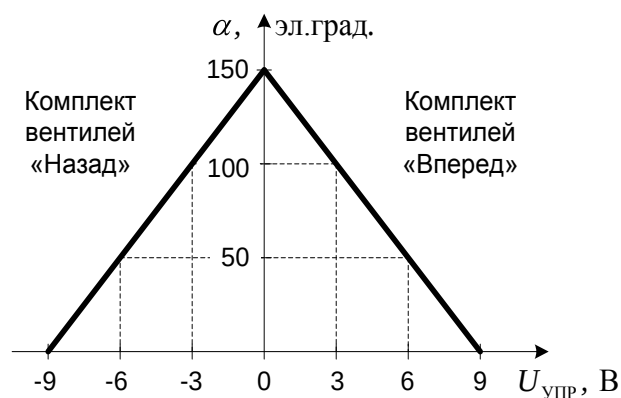


Рис. 1. Регулировочная характеристика системы управления реверсивного преобразователя

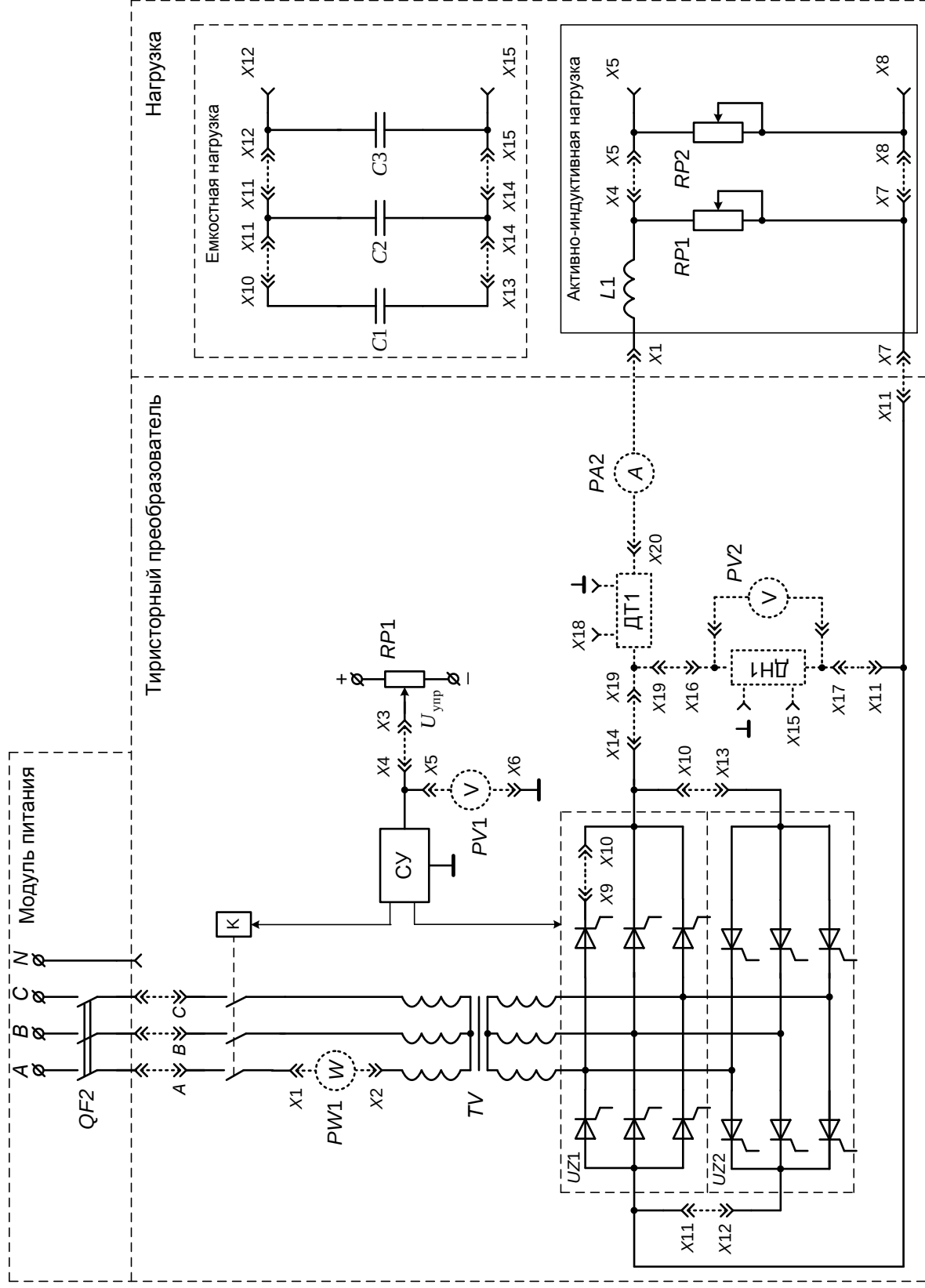


Рис. 2. Принципиальная схема для исследования двухкомплектного реверсивного преобразователя при работе на активно-индуктивную нагрузку

В табл. 1 приведены измерительные приборы, а в табл. 2 датчики тока и напряжения, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 2).

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Напряжение управления $U_{упр}$	PV1	= 20 В	Мультиметры
Среднее значение выпрямленного напряжения U_d	PV2	= 200 В	Мультиметры
Среднее значение выпрямленного тока I_d	PA2	—	Модуль измерительный
Действующее значение фазного напряжения U_1 и первичного тока I_1 трансформатора	PW1	$U_1 \sim 300$ В; $I_1 \sim 0,2$ А	Измеритель мощности

Таблица 2

Измеряемый сигнал	Обозначение прибора	Месторасположение прибора (название модуля)
Мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d	ДН1	Тиристорный преобразователь
Мгновенное значение выпрямленного тока i_d	ДТ1	Тиристорный преобразователь

Тумблеры SA2 и SA3 датчика напряжения ДН1 и тока ДТ1 в модуле «Тиристорный преобразователь» установить в положение «2» (фильтр выключен). Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 1;

б) снять осциллограммы выпрямленного напряжения u_d и тока i_d реверсивного преобразователя для заданного сопротивления нагрузки R_d и углов управления $\alpha_{В1} = \alpha_1$ (комплект вентилей «Вперед») и $\alpha_{Н1} = \alpha_1$ (комплект вентилей «Назад»).

Для этого подключить осциллограф к датчику тока ДТ1 (канал CH2 – гнездо X18, корпус осциллографа соединить с гнездом «⊥» ДТ1) и датчику напряжения ДН1 (канал CH1 – гнездо X15). Выполнить необходимые операции, указанные в порядке включения установки. Потенциометром RP1 в модуле «Тиристорный преобразователь» установить заданное значение угла управления при работе комплекта вентилей «Вперед» $\alpha_{в} = \alpha_1$ (по прибору P1). Переключателем SA1 в модуле «Нагрузка» установить заданное значение сопротивления нагрузки R_d . Зарисовать с экрана осциллографа требуемые осциллограммы. Повторить аналогичные действия для угла управления $\alpha_{Н1} = \alpha_1$ при работе комплекта вентилей «Назад». Определить масштабы по напряжению, току и времени с учетом коэффициентов датчиков;

в) снять и построить регулировочную характеристику системы управления $\alpha = F(U_{\text{упр}})$, а также регулировочные характеристики реверсивного преобразователя $U_d = F(\alpha)$ и реверсивного преобразователя с системой управления $U_d = F(U_{\text{упр}})$. Характеристики снять вблизи холостого хода при малом токе нагрузки (установить переключатель SA1 модуля «Нагрузка» в крайне правое положение) и в непрерывном режиме при заданном сопротивлении нагрузки R_d . При эксперименте вначале увеличивать угол управления α от 0 до 150 эл. град. для комплекта вентилях «Вперед», а затем переключить комплект вентилях и изменять α в том же диапазоне. Фиксировать величины U_d , α и $U_{\text{упр}}$, занося их в таблицу. Сравнить экспериментальные и расчетные характеристики, построив их на одном рисунке;

г) снять энергетические $P_1 = F(\alpha)$, $S_1 = F(\alpha)$, $P_d = F(\alpha)$, $\chi = F(\alpha)$, $\cos\varphi = F(\alpha)$, $\eta = F(\alpha)$ характеристики преобразователя для комплекта вентилях «Вперед» при заданном сопротивлении нагрузки R_d . Для этого установить заданное сопротивление нагрузки R_d ручкой переключателя SA1 в модуле «Нагрузка», и изменять угол управления α в диапазоне от 0 до 150 град. Фиксировать следующие величины и заносить их в табл. 3:

- α – угол управления преобразователя;
- $U_{1\phi}$, $I_{1\phi}$ – действующие значение фазного напряжения и тока соответственно, измеренные модулем «Измеритель мощности»;
- $P_{1\phi}$, $\cos\varphi$ – активная мощность фазы А и косинус преобразователя соответственно, измеренные модулем «Измеритель мощности»;
- U_d – среднее значение выпрямленного напряжения;
- I_d – среднее значение выпрямленного тока.

Таблица 3

α , град.										
$U_{1\phi}$, В										
$I_{1\phi}$, А										
$P_{1\phi}$, Вт										
$\cos\varphi$										
U_d , В										
I_d , А										
P_1 , Вт										
S_1 , В·А										
P_d , Вт										
χ										
η										

Расчетные значения в табл. 3 определять по формулам (3) – (6).

Активная и полная мощности преобразователя, потребляемые из сети

$$P_1 = 3 \cdot P_{1\phi}, \quad S_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi}. \quad (3)$$

Мощность нагрузки

$$P_d = U_d \cdot I_d. \quad (4)$$

Коэффициент мощности преобразователя при симметричной нагрузке

$$\chi = |P_1|/S_1. \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя в режиме выпрямления

$$\eta = P_d/P_1. \quad (6)$$

д) снять внешние характеристики реверсивного преобразователя для двух комплектов вентилях при углах управления $\alpha_{B1} = \alpha_1$ и $\alpha_{B2} = \alpha_1 + 15^\circ$, $\alpha_{H1} = \alpha_1$ и $\alpha_{H2} = \alpha_1 + 15^\circ$. Для этого переключателем SA1 изменять ток нагрузки I_d модулей «Нагрузка» от минимального до максимально возможного значения. Сравнить экспериментальные характеристики с расчетными, построив их на одном рисунке;

е) снять и построить энергетические $P_1 = F(I_d)$, $S_1 = F(I_d)$, $P_d = F(I_d)$, $\chi = F(I_d)$, $\cos\varphi = F(I_d)$, $\eta = F(I_d)$ характеристики для комплекта вентилях «Вперед» при заданном значении угла управления $\alpha_{B1} = \alpha_1$. Для этого изменять ток нагрузки I_d переключателем SA1 модуля «Нагрузка» при постоянстве угла управления. Фиксировать те же величины, что и в опыте 2 г, результаты занести в табл. 1.

3. Экспериментальное исследование реверсивного преобразователя при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС:

а) собрать схему для исследования реверсивного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме, при работе на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС. Для этого в модуле «Нагрузка» подключить конденсаторы C1 – C3 параллельно резисторам RP1 – RP2, соединив перемычками гнезда X5 – X12, X8 – X15 (см. рис. 2). Остальная схема остается неизменной;

б) повторить все пункты раздела 2. Выключить автомат QF2 «Модуля питания», а затем автомат QF1 «Модуля питания стенда».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) предварительные расчеты и построения;
- в) исходные данные, принципиальную силовую схему и схему соединений модулей для своего подварианта;
- г) обработанные осциллограммы;
- д) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- е) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- ж) сравнение расчетных и экспериментальных регулировочных и внешних характеристик. Объяснить причины их расхождения;

- 3) объяснение вида энергетических характеристик.
- 3) выводы по работе:
 - о влиянии тока нагрузки на регулировочные характеристики реверсивного преобразователя;
 - о влиянии угла управления и тока нагрузки на энергетические показатели реверсивного преобразователя;
 - о влиянии вида нагрузки на внешние и регулировочные характеристики.

Контрольные вопросы

1. Почему в реверсивном преобразователе предусматривается два комплекта клапанов?
2. В чем отличие совместного и раздельного управления?
3. Какие отличительные признаки силовых схем при раздельном и совместном управлении?
4. Чем отличаются системы управления при совместном и раздельном управлении?
5. Что такое внешняя характеристика? От каких параметров зависит ее положение в непрерывном и прерывистом режиме?
6. Что такое регулировочная характеристика, от каких параметров зависит ее вид?
7. Как снимаются регулировочные и внешние характеристики реверсивного преобразователя?
8. Что такое коэффициент мощности преобразователя?
9. Как определить коэффициент мощности преобразователя экспериментально?
10. Как зависит коэффициент мощности от угла регулирования?
11. Как зависит КПД от угла регулирования?
12. Как зависит КПД от тока нагрузки?

Работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Изучение характеристик транзисторных преобразователей и стабилизаторов постоянного напряжения, работающих в импульсном режиме, выполненных на биполярных, полевых и *IGBT* транзисторах. Сравнение ключевого режима работы транзисторов различного типа при активно-индуктивной нагрузке, шунтированной диодом.

Описание лабораторного стенда

В комплект лабораторного стенда входят следующие модули: «Преобразователь постоянного напряжения», «Модуль измерительный», «Мультиметры», а также двухканальный осциллограф.

Установка является универсальной, на ней можно производить исследования преобразователя постоянного напряжения, а также импульсного стабилизатора постоянного напряжения. В качестве регулирующего элемента может быть применен любой из существующих типов транзисторов – биполярный, полевой и *IGBT*, что позволяет сравнить эти транзисторы при их работе в ключевом режиме.

Лицевая панель модуля «Преобразователь постоянного напряжения» представлена на рис. 1. На ней изображена мнемосхема и установлены коммутирующие, регулирующие и измерительные элементы. Силовая часть схемы состоит из источника питания ИП, на выходе которого включен конденсатор фильтра C_f , силовых транзисторных ключей $VT1$, $VT2$ и $VT3$, диода VD , шунтирующего активно-индуктивную нагрузку R_n , L_n . Параллельно резистору R_n с помощью тумблера $SA3$ может подключаться конденсатор C_n . Резистор R_n выполнен регулируемым. Напряжение на выходе источника питания ИП регулируется с помощью потенциометра $RP1$.

Система управления СУ выдает на выходе управляющие импульсы, подаваемые на входы силовых транзисторов. Частота управляющих импульсов (5 – 10 кГц) изменяется тумблером $SA1$.

В режиме «Регулирование постоянного напряжения» с помощью преобразователя постоянного напряжения тумблер $SA2$ переключается в положение «Рег». При этом длительность управляющих импульсов, а следовательно и напряжение на нагрузке регулируется потенциометром $RP2$. Относительная длительность включения транзисторов – коэффициент заполнения γ измеряется прибором $PA1$, установленным на лицевой панели (см. рис. 1).

В режиме «Стабилизация постоянного напряжения» тумблер $SA2$ переключается в положение «Стаб». При этом величина стабильного выходного напряжения также устанавливается потенциометром $RP2$.

Для осциллографирования тока на входе силового транзистора установлен шунт $RS1 = 10$ Ом. Для осциллографирования токов силовых транзи-

сторгов (эмиттера, истока) i_{VT} , нагрузки i_H и диода i_D установлены шунты ($RS2$, $RS3$ и $RS4$). Сопротивления этих шунтов 1 Ом.

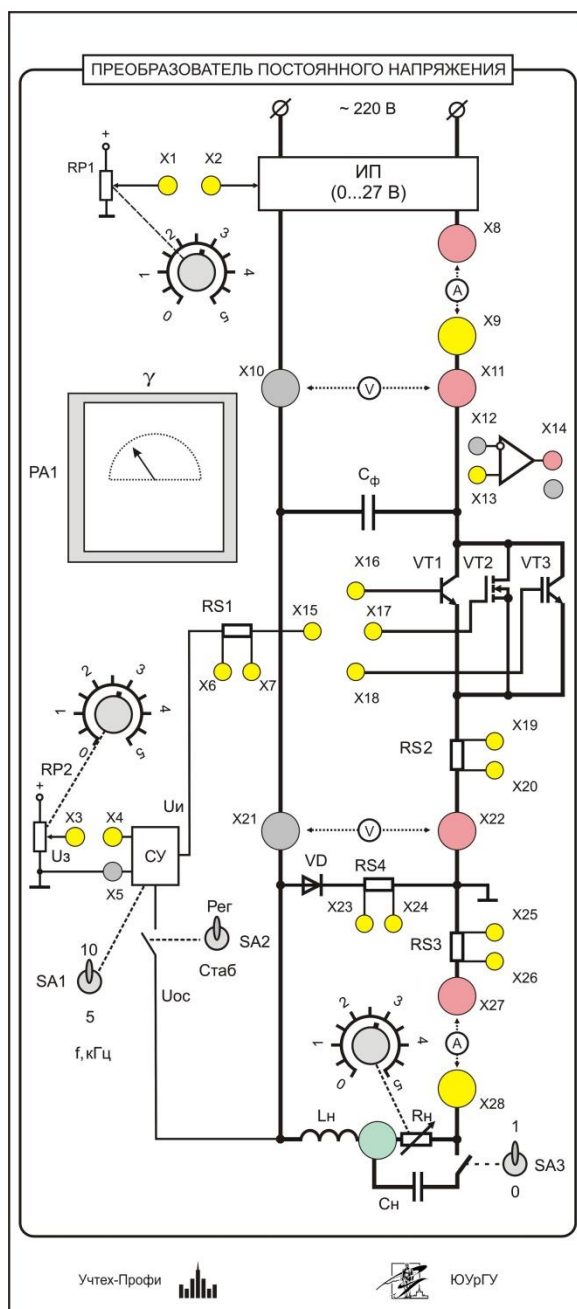


Рис. 1. Модуль «Преобразователь постоянного напряжения»

Внимание! Земля (корпус) осциллографа должна быть постоянно приближена к общей точке соединения $RS2$, $RS3$, $RS4$, обозначенной « $\perp$ ». Поэтому корпус осциллографа « $\perp$ » последовательно подключается к гнездам $X20$, $X24$, $X25$ при измерении соответствующих токов. При применении двухканального осциллографа вход канала $CH1$ используется для измерения токов, а вход канала $CH2$, подключаемый через выносной делитель ($\kappa_D = 10$), используется для измерения напряжений в схеме. При указанном подключении осциллограмма тока нагрузки i_H имеет отрицательную полярность. Это нужно учесть, указывая направление оси i на осциллограмме. При подаче сигналов с

шунтов через инструментальный усилитель (гнезда X12 – X14), расположенный на панели, осциллограммы могут быть сориентированы правильно. При измерении напряжений осциллограммы могут быть правильно сориентированы с помощью кнопки *CH2 INV*, расположенной на лицевой панели осциллографа.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить и повторить темы курса: «Ключевой режим работы транзисторов», «Преобразователи постоянного напряжения», «Стабилизаторы», содержание данной работы и быть готовым ответить на контрольные вопросы;

б) для преобразователя постоянного напряжения рассчитать и построить регулировочную характеристику $U_n = F(\gamma)$ при заданном напряжении на входе U_d

$$U_n = \gamma \cdot U_d.$$

Здесь U_n – напряжение на нагрузке; γ – коэффициент заполнения;

в) определить напряжение на нагрузке U_n при заданных значениях γ и U_d , а также сопротивление нагрузки R_n при известном среднем значении тока нагрузки I_n ;

г) определить коэффициент пульсаций для заданных значений напряжения на входе U_d , тока нагрузки I_n , коэффициента заполнения γ и частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) $f_{\text{ШИМ}}$

$$q = \frac{\Delta I_n}{I_n} = \frac{U_d \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)}{2 \cdot L_n \cdot f_{\text{ШИМ}} \cdot I_n},$$

где L_n – индуктивность нагрузки;

д) построить в масштабе диаграммы напряжений на нагрузке u_n и на транзисторном ключе u_{VT} , а также токов через транзисторный ключ i_{VT} , нагрузку i_n и через диод i_d при заданных значениях U_d , γ , I_n и $f_{\text{ШИМ}}$. Для упрощения принять, что ток нагрузки нарастает и спадает по линейному закону, а падение напряжения на транзисторе VT равно нулю;

е) для импульсного стабилизатора постоянного напряжения рассчитать и построить зависимости $U_n = F(U_d)$, $\gamma = F(U_d)$ при заданном значении напряжения на нагрузке U_n . Принять при этом, КПД стабилизатора равен 1.

2. Экспериментальное исследование преобразователя постоянного напряжения:

а) собрать схему для исследования преобразователя постоянного напряжения в соответствии с рис. 2. Дополнительные переключки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

В табл. 1 приведены измерительные приборы, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 2).

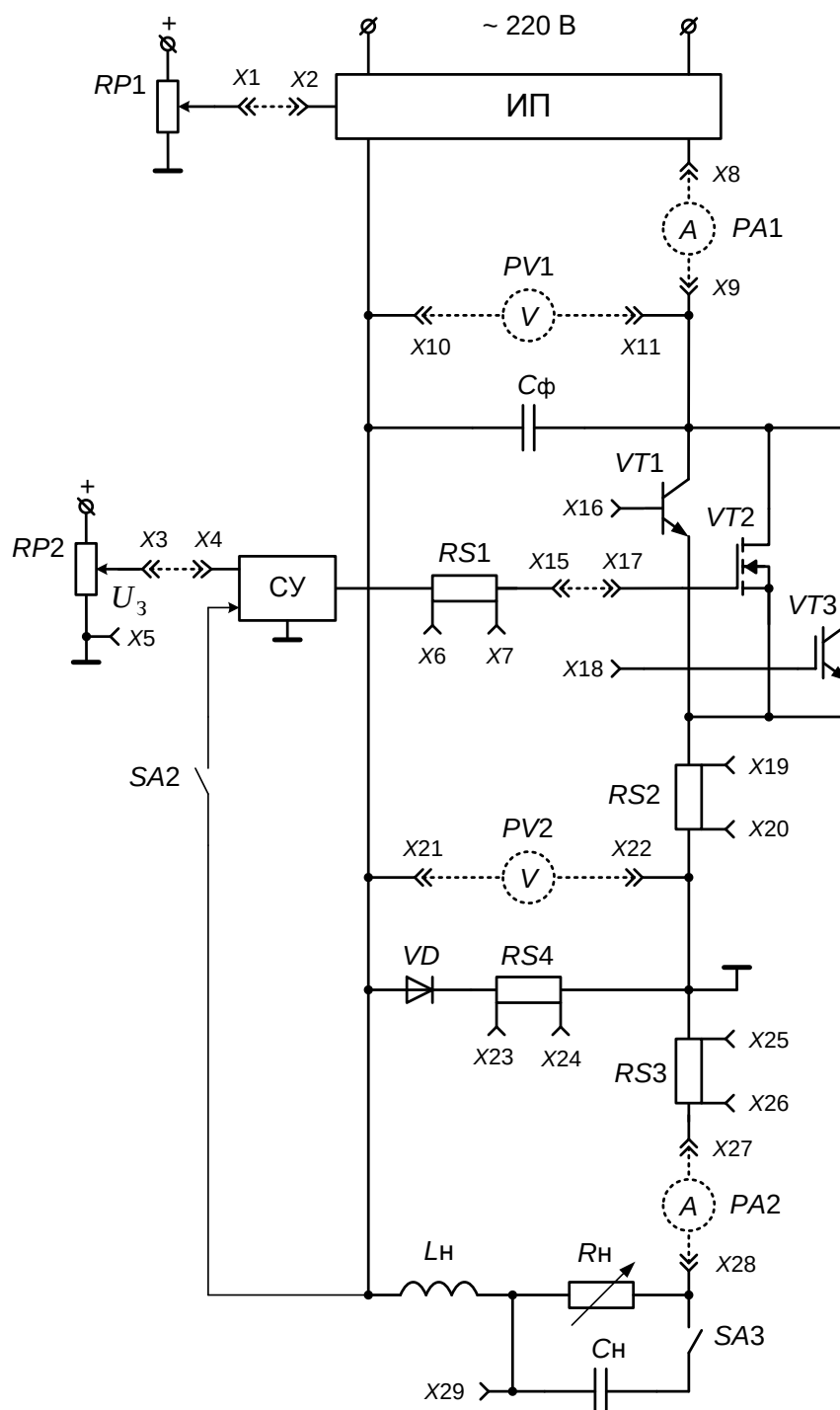


Рис. 2. Принципиальная схема для исследования преобразователя постоянного напряжения

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Напряжение на входе U_d	PV1	= 200 В	Мультиметры
Ток на входе I_d	PA1	—	Модуль измерительный
Напряжение на нагрузке U_H	PV2	= 200 В	Мультиметры
Ток нагрузки I_H	PA2	—	Модуль измерительный

Гнездо $X15$ соединить с $X17$, подключив в схему полевой транзистор $VT2$. Тумблером $SA1$ установить заданную частоту ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$ в соответствии с таблицей вариантов. Тумблер $SA2$ установить в положение «Рег», а $SA3$ в положение «0» (конденсатор C_n отключен). Ручки потенциометров $RP1$, $RP2$ и реостата R_n установить в положение «0». Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 1. Включить автомат $QF1$ «Модуля питания стенда», а затем переключатель питания модуля «Преобразователь постоянного напряжения»;

б) снять осциллограммы напряжения на транзисторном ключе u_{VT} и тока через транзистор i_{VT} . Для этого установить заданные значения напряжения на входе U_d и коэффициента заполнения γ ручкой потенциометра $RP1$ и $RP2$ соответственно. Ручкой реостата R_n по амперметру $PA2$ установить заданное значение тока нагрузки I_n . Канал $CH1$ осциллографа подключить к шунту $RS2$ («+» – гнездо $X19$, корпус осциллографа « $\perp$ » – гнездо $X20$), а канал $CH2$ – к гнезду $X11$ (напряжение на транзисторном ключе). Зарисовать с экрана осциллографа требуемые осциллограммы. Определить масштабы по напряжению, току и времени;

в) снять осциллограммы напряжения на нагрузке u_n и тока через диод i_d при тех же заданных значениях U_d , γ и I_n . Для этого канал $CH1$ осциллографа подключить к шунту $RS4$ («+» – гнездо $X23$, корпус осциллографа « $\perp$ » – гнездо $X24$), а канал $CH2$ – к гнезду $X21$ (напряжение на нагрузке). Для получения положительного отклонения напряжения u_n нажать кнопку $CH2 INV$ на осциллографе. Зарисовать с экрана осциллографа требуемые осциллограммы;

г) снять осциллограммы напряжения на нагрузке u_n и тока нагрузки i_n при тех же заданных значениях U_d , γ и I_n . Для этого канал $CH1$ осциллографа подключить к шунту $RS3$ («+» – гнездо $X25$, корпус осциллографа « $\perp$ » – гнездо $X26$), а канал $CH2$ – к гнезду $X21$ (напряжение на нагрузке). Зарисовать с экрана осциллографа требуемые осциллограммы. По осциллограмме i_n определить в каком режиме работает схема (непрерывный или прерывистый ток в нагрузке);

д) исследовать влияние частоты ШИМ преобразователя $f_{\text{ШИМ}}$ на коэффициент пульсаций q тока нагрузки I_n . Для этого переключить канал $CH1$ осциллографа на открытый вход «АС» (переменная составляющая входного сигнала). Замерить двойную амплитуду пульсаций тока нагрузки ΔI_n . Определить коэффициент пульсаций $q = \Delta I_n / (2 \cdot I_n)$, сравнив его с расчетным значением (см. п. 1 г). Переключить тумблер $SA1$ в другое положение и снова определить коэффициент пульсаций q при другой частоте ШИМ $f_{\text{ШИМ}}$;

е) подключить емкость сглаживающего фильтра C_n тумблером $SA3$ и посмотреть осциллограммы u_n и i_n при тех же заданных значениях U_d , γ , I_n и $f_{\text{ШИМ}}$. Обратить внимание на то, что формы кривых u_n и i_n практически не изменяются. Снимите также осциллограммы напряжения на резисторе R_n при подключенном и отключенном конденсаторе C_n ;

ж) снять регулировочную $U_H = F(\gamma)$ и энергетические $P_d = F(\gamma)$, $P_H = F(\gamma)$, $\eta = F(\gamma)$ характеристики преобразователя при постоянном значении сопротивления нагрузки R_H и заданных U_d и $f_{\text{шим}}$. Сопротивление R_H установить по заданной точке: коэффициенту заполнения γ и току нагрузки I_H . Изменяя γ ручкой потенциометра $RP2$ в диапазоне от нуля до максимально возможного значения, фиксировать показания U_d , I_d , U_H , I_H . Показания занести в таблицу.

Энергетические показатели рассчитать по следующим формулам: мощность на входе – $P_d = U_d \cdot I_d$, мощность на нагрузке – $P_H = U_H \cdot I_H$, КПД – $\eta = P_H / P_d$. Экспериментальную регулировочную характеристику $U_H = F(\gamma)$ нанести на предварительно построенный график с расчетной характеристикой;

з) снять внешнюю $U_H = F(I_H)$ и энергетические $P_d = F(I_H)$, $P_H = F(I_H)$, $\eta = F(I_H)$ характеристики при постоянном коэффициенте заполнения γ для заданных U_d и $f_{\text{шим}}$. Для этого потенциометром $RP2$ установить заданный по варианту коэффициент заполнения γ . Изменяя сопротивление нагрузки реостатом R_H , фиксировать показания U_d , I_d , U_H , I_H . Показания занести в таблицу, построить характеристики.

3. Экспериментальное исследование импульсного стабилизатора постоянного напряжения:

а) собрать схему импульсного стабилизатора постоянного напряжения (см. рис. 2). Для этого переключить тумблер $SA2$ в положение «Стаб», замкнув тем самым цепь обратной связи по напряжению;

б) снять зависимости (в замкнутой системе) $U_H = F(U_d)$, $\gamma = F(U_d)$ при постоянном напряжении задания U_3 и сопротивлении нагрузки R_H . Для этого ручкой потенциометра $RP1$ и $RP2$ установить требуемые значения напряжения U_d и U_H соответственно согласно таблице вариантов. При выставленных значениях U_d и U_H установить заданный ток нагрузки I_H реостатом R_H и на протяжении всего опыта не трогать положение ручки потенциометра R_H . Изменяя напряжение U_d на входе от нуля до максимально возможного значения, фиксировать показания U_d , U_H и γ . Показания занести в таблицу, построить характеристики;

в) снять внешнюю $U_H = F(I_H)$ и энергетическую $\eta = F(I_H)$ характеристики стабилизатора, при неизменном напряжении задания U_3 и заданных U_d и $f_{\text{шим}}$. Для этого потенциометром $RP1$ и $RP2$ установить заданные по варианту напряжения U_d и U_H соответственно. Изменяя сопротивление нагрузки реостатом R_H , фиксировать показания U_d , I_d , U_H , I_H . Показания занести в таблицу, построить характеристики.

4. Экспериментальное исследование транзисторных ключей при активно-индуктивной нагрузке, шунтированной диодом:

а) при работе стабилизатора в режиме непрерывного тока снять осциллограммы напряжения на ключе u_{VT} и тока через ключ i_{VT} для трех типов транзисторов (биполярного, полевого и $IGBT$) для заданных по варианту значений U_d , U_H и $f_{\text{шим}}$. Для этого сначала установить перемычку между гнездами $X15$ –

X16, подключив выход системы управления СУ к биполярному транзистору. Канал CH1 осциллографа подключить к шунту RS2 («+» – гнездо X19, корпус осциллографа «⊥» – гнездо X20), а канал CH2 – к гнезду X11 (напряжение на транзисторном ключе). Зарисовать осциллограммы для биполярного транзистора VT1. Прodelать аналогичные действия для других типов транзисторов, последовательно переключая выход СУ к входам VT2 и VT3. Обратить особое внимание на начало и конец импульса тока;

б) снять осциллограммы токов управления для трех типов транзисторов и напряжения на нагрузке u_n при заданных по варианту значений U_d , U_n и $f_{\text{ШИМ}}$. Для этого канал CH1 осциллографа подключить к шунту RS1 («+» – гнездо X6, корпус осциллографа «⊥» – гнездо X7), а канал CH2 – к гнезду X21 (напряжение на нагрузке u_n). Для правильного отклонения напряжения u_n нажать кнопку CH2 INV на осциллографе. Зарисовать осциллограммы для всех типов транзисторов. Обратить особое внимание на начало и конец импульса тока управления транзисторов и фронтов на нагрузке. По снятым осциллограммам для биполярного транзистора показать время рассасывания зарядов;

в) определить КПД для трех типов транзисторных ключей при заданных по варианту значениях U_d , U_n и $f_{\text{ШИМ}}$. Для этого переключать перемычку на входах транзисторов (см. рис. 2), одновременно фиксируя значения U_d , I_d , U_n , I_n . Рассчитать КПД, сравнить результаты;

г) повторить пункт 4 в) при другой частоте ШИМ.

Выключить переключатель питания модуля «Преобразователь постоянного напряжения», а затем автомат QF1 «Модуля питания стенда».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) предварительные расчеты и построения;
- в) исходные данные, принципиальную силовую схему установки;
- г) обработанные осциллограммы;
- д) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- е) экспериментально снятые и построенные характеристики (регулируемые, внешние и энергетические);
- ж) определение коэффициента стабилизации и выходного сопротивления стабилизатора, по зависимостям $U_n = F(U_d)$, $U_n = F(I_n)$:

$$k_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_d / U_d}{\Delta U_n / U_n} \text{ при } I_n = \text{const};$$

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_n}{\Delta I_n} \text{ при } U_d = \text{const}.$$

з) выводы по работе:

– пояснить влияние частоты ШИМ преобразователя $f_{\text{ШИМ}}$ на коэффициент пульсаций тока нагрузки q ;

- объяснить влияние коэффициента заполнения γ на КПД преобразователя постоянного напряжения;
- объяснить влияние тока нагрузки I_n на вид внешних и энергетических характеристик ППН и стабилизатора;
- сравнение показателей стабилизаторов с транзисторными ключами различных типов по КПД и анализ причин отличий;
- оценка влияния частоты ШИМ на КПД стабилизатора с различными транзисторными ключами;
- сравнение форм токов и напряжений в транзисторных ключах различных типов и пояснение причин отличий.

Контрольные вопросы

1. Сравните ключевой и линейный режимы работы транзистора.
2. Преимущества ключевого режима.
3. Как определить потери мощности в транзисторном ключе? Из каких составляющих складываются суммарные потери мощности?
4. Преимущества и недостатки импульсных и непрерывных стабилизаторов.
5. Что такое регулировочная и внешняя характеристика преобразователя постоянного напряжения? Как вид они имеют?
6. До какого предела можно уменьшать напряжение источника питания, чтобы напряжение на нагрузке стабилизатора еще могло оставаться стабильным?
7. На что влияет изменение частоты ШИМ?
8. Как определить коэффициент пульсаций тока нагрузки?
9. Как определить КПД стабилизатора?
10. Как снять осциллограммы токов и напряжений в схеме?
11. На что влияет подключение конденсатора C_n ?
12. Как подключать входы двухканального осциллографа при осциллографировании токов и напряжений?
13. На что влияет изменение типа транзисторов?

Работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Исследование электромагнитных процессов, характеристик и энергетических показателей трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН).

Описание лабораторного стенда

В комплект лабораторного стенда входят следующие модули: «Преобразователь частоты», «Нагрузка», «Модуль питания», «Тиристорный преобразователь», «Модуль измерительный», «Мультиметры», «Измеритель мощности», а также двухканальный осциллограф.

Модуль «Преобразователь частоты» обеспечивает преобразование переменного напряжения 220 В с частотой 50 Гц в трехфазное напряжение с регулируемыми значениями напряжения и частоты.

Лицевые панели модулей «Преобразователь частоты» и «Нагрузка» представлены на рис. 1, 2 соответственно. Модуль «Преобразователь частоты» (см. рис. 1) содержит:

- преобразователь частоты E2-MINI-SP5L;
- силовые гнезда для подачи однофазного входного напряжения A и N и снятия выходного напряжения $A1$, $B1$ и $C1$;
- силовые гнезда выпрямленного напряжения U_d : «+» гнездо $X5$ и «–» $X6$;
- потенциометр задания сигнала управления $RP1$ для одновременного регулирования частоты и величины выходного напряжения;
- кнопку $SB1$ «Сброс» для сброса ошибки после срабатывания защиты;
- переключатель $SA1$, изменяющий чередование фаз (направление вращения);
- частотомер для измерения частоты на выходе АИН;
- светодиоды, сигнализирующие подачу питания, нормальную работу и срабатывание защиты;
- датчик напряжения (ДН) и тока (ДТ) для осциллографирования и измерений напряжений и токов в схеме.

Питание модуля осуществляется от сети переменного тока через разделительный трансформатор TV , обеспечивающий потенциальную развязку от сети.

Модуль «Преобразователь частоты» состоит из двух звеньев (см. рис. 1). Первое звено преобразователя частоты (ПЧ) – неуправляемый выпрямитель на диодах ($UZ1$), выполненный по однофазной мостовой схеме. Второе звено – трехфазный АИН, выполненный на $IGBT$ -транзисторах ($UZ2$). На входе $UZ2$ включен емкостной фильтр.

В данной работе изучается второе звено – трехфазный автономный инвертор напряжения.

В модуле «Преобразователь частоты» установлены датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН), служащие для осциллографирования и измерения напряжений и токов в схеме. На гнезда X10 и X11 подаются сигналы напряжения, а на гнезда X13 и X14 – сигналы тока. Гнезда X9, X12 и общий провод «⊥» служат для подключения выходных цепей ДН и ДТ к осциллографу или модулю «Ввод-вывод».

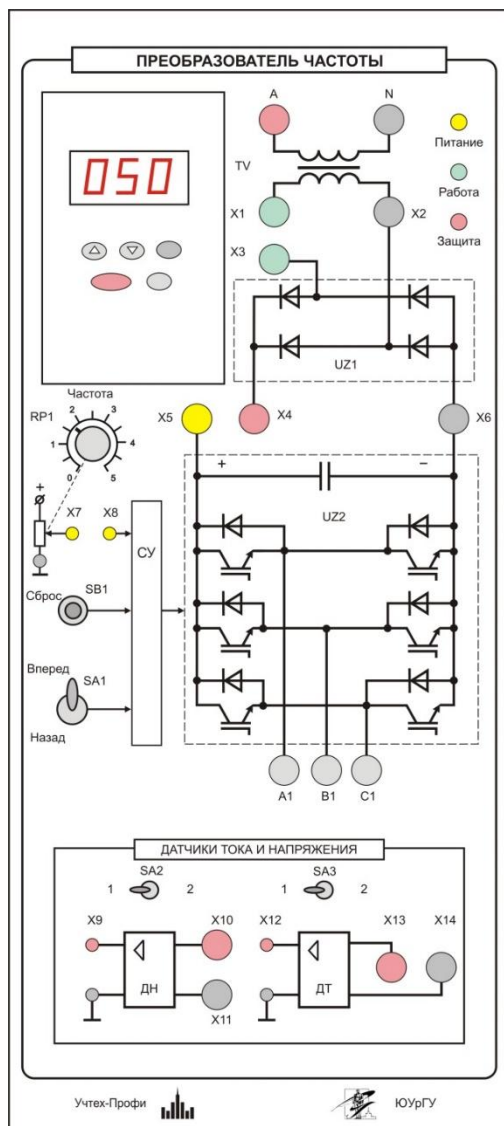


Рис. 1. Преобразователь частоты

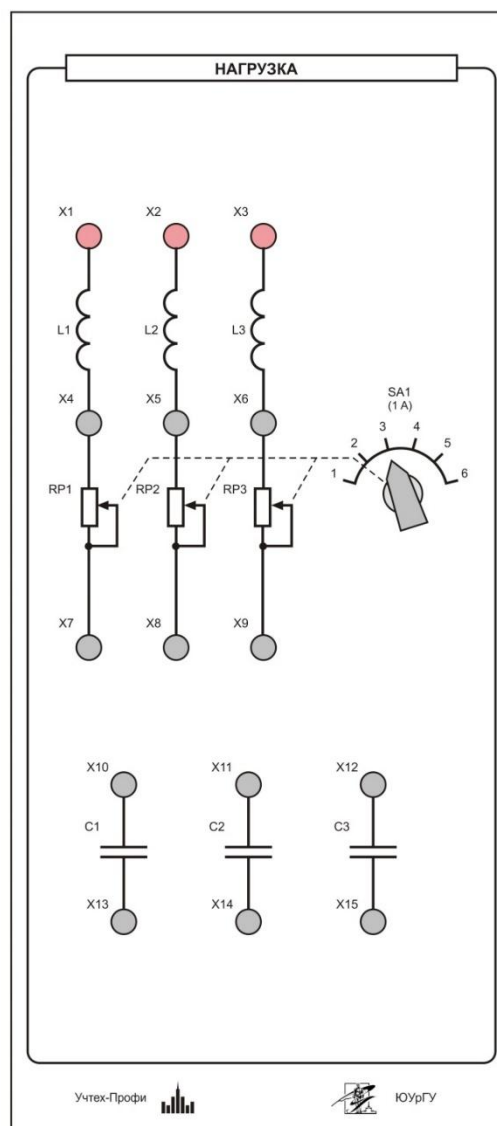


Рис. 2. Нагрузка

Коэффициент преобразования датчика напряжения $k_H = 40 \text{ В/В}$, коэффициент преобразования датчика тока $k_T = 0,25 \text{ А/В}$. Фактические значения напряжения и тока определяются умножением значений, измеренных при помощи осциллографа, на соответствующий коэффициент датчика.

С помощью тумблеров SA2 и SA3 модуля «Преобразователь частоты» изменяется полоса пропускания датчиков, что позволяет наблюдать на экране осциллографа или компьютера либо ШИМ-сигнал (положение «2»), либо его первую гармонику (положение «1»).

Питание модуля «Преобразователь частоты» осуществляется через гнезда A и N источника трехфазного переменного напряжения через автомат $QF2$, расположенный в модуле питания.

В качестве нагрузки АИН используется модуль «Нагрузка» (рис. 2), реакторы ($L1 - L3$), резисторы ($RP1 - RP3$), конденсаторы ($C1 - C3$).

В модуле «Нагрузка» регулируются только активные сопротивления фаз ($RP1 - RP3$), а реактивные элементы остаются неизменными. Регулирование производится переключателем $SA1$. Значения резисторов, соответствующие положениям переключателя, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Положение переключателя $SA1$	1*	2	3	4	5	6
Сопротивление нагрузки (Ом)	100	200	400	600	1000	1600

Примечание: знаком «*» отмечены запрещенные положения переключателя. Индуктивности ($L1 - L3$) равны 80 мГн, а емкости ($C1 - C3$) – 10 мкФ.

Для получения трехфазной активно-индуктивной нагрузки необходимо установить перемычки между гнездами $X7 - X8$ и $X8 - X9$ (нулевая точка нагрузки).

Порядок включения и выключения установки

1. Собрать схему эксперимента для выполнения лабораторной работы.
2. В модуле «Преобразователь частоты» установить тумблер $SA1$ («Направление вращения») – в среднее положение, потенциометр задания частоты $RP1$ – в нулевое положение.
3. Установить переключатель $SA1$ на модуле «Нагрузка» в положение максимального сопротивления (крайнее правое положение).
4. Включить автомат $QF1$ «Модуля питания стенда», включить автомат $QF2$ «Модуля питания».
5. Включить тумблер «Питание» модуля «Измеритель мощности».
6. В модуле «Преобразователь частоты» переключить тумблер $SA1$ в верхнее положение. При этом засветится светодиод «Работа».
7. Потенциометром $RP1$ установить требуемую частоту f и соответствующее ей напряжение на нагрузке. При этом выполняется закон $U_{нл}/f = \text{const}$.
8. Установить переключателем $SA1$ необходимое сопротивление на модуле «Нагрузка».

Порядок выключения: выключить тумблер $SA1$ модуля «Преобразователь частоты», а затем тумблер «Питание» модуля «Измеритель мощности», выключить автомат $QF2$ «Модуля питания».

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса: «Автономные инверторы напряжения», «Энергетические показатели выпрямителей», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать коэффициент модуляции μ для заданного варианта. Глубину модуляции μ рекомендуется определить из соотношения

$$\mu = \frac{U_{\text{лм}}}{U_d} = \frac{f}{f_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{лм}}$ – амплитудное значение линейного напряжения на выходе АИН; U_d – постоянное напряжение на входе АИН; f , f_{max} – заданная и максимальная частота на выходе АИН соответственно;

в) рассчитать для заданного варианта наибольшие действующие значения первой гармоники линейного $U_{\text{нл}(1)\text{max}}$ и фазного $U_{\text{нф}(1)\text{max}}$ напряжений на нагрузке при разных способах модуляции:

– при формировании средних напряжений на выводах по отношению к средней точке источника питания

$$U_{\text{нл}(1)\text{max}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_d}{2\sqrt{2}}, \quad U_{\text{нф}(1)\text{max}} = \frac{U_d}{2\sqrt{2}}; \quad (2)$$

– при формировании фазных напряжений с помощью пространственного вектора

$$U_{\text{нл}(1)\text{max}} = \frac{U_d}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{нф}(1)\text{max}} = \frac{U_d}{\sqrt{6}}; \quad (3)$$

г) рассчитать действующие значения первой гармоники линейного $U_{\text{нл}(1)}$ и фазного $U_{\text{нф}(1)}$ напряжений на нагрузке при разных способах модуляции по заданной частоте f и рассчитанному коэффициенту модуляции μ :

$$U_{\text{нл}(1)} = \mu \cdot U_{\text{нл}(1)\text{max}}, \quad U_{\text{нф}(1)} = \mu \cdot U_{\text{нф}(1)\text{max}}. \quad (4)$$

2. Экспериментальное исследование трехфазного АИН:

а) собрать схему для исследования трехфазного АИН при работе на активно-индуктивную нагрузку в соответствии с рис. 3. Дополнительные переключки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

В табл. 2 приведены измерительные приборы, а в табл. 3 датчики тока и напряжения, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 3).

Тумблеры SA2 и SA3 датчиков напряжения (ДН1 – ДН2) и тока (ДТ1 – ДТ2) в модулях «Тиристорный преобразователь» и «Преобразователь частоты» установить в положение «2» (фильтр выключен). Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 2.

Таблица 2

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Постоянное напряжение на входе АИН U_d	$PV1$	= 1000 В	Мультиметры
Постоянный ток на входе АИН I_d	$PA1$	–	Модуль измерительный
Действующее значение первой гармоники фазного напряжения $U_{нф(1)}$ и фазного тока $I_{нф(1)}$ на выходе АИН	$PW1$	$U_{нф(1)} \sim 300$ В; $I_{нф(1)} \sim 2,0$ А	Измеритель мощности

б) снять осциллограммы первой гармоники фазного напряжения $u_{нф(1)}$ и тока $i_{нф(1)}$ на выходе АИН при помощи осциллографа для заданного сопротивления нагрузки R_n и частоты управления f . Для этого подключить осциллограф к датчику тока ДТ2 (канал $CH2$ – гнездо X12, корпус осциллографа соединить с гнездом «⊥» ДТ2) и датчику напряжения ДН2 (канал $CH1$ – гнездо X9). Выполнить необходимые операции, указанные в порядке включения установки. Потенциометром $RP1$ в модуле «Преобразователь частоты» установить заданное значение частоты управления f , а переключателем $SA1$ в модуле «Нагрузка» – заданное значение сопротивление нагрузки R_n .

Таблица 3

Измеряемый сигнал	Обозначение прибора	Месторасположение прибора (название модуля)
Мгновенное значение напряжения на входе АИН u_d	ДН1	Тиристорный преобразователь
Мгновенное значение тока на входе АИН i_d	ДТ1	Тиристорный преобразователь
Мгновенное значение фазного напряжения на выходе АИН $u_{нф}$	ДН2	Преобразователь частоты
Мгновенное значение фазного тока на выходе АИН $i_{нф}$	ДТ2	Преобразователь частоты

Вначале посмотреть на осциллограммы при широкой полосе пропускания датчиков (положение «2» тумблеров $SA2$ и $SA3$ модуля «Преобразователь частоты»), а затем, переключив тумблеры $SA2$ и $SA3$ датчиков в положение «1», зарисовать осциллограммы первых гармоник фазного напряжения $u_{нф(1)}$ и тока $i_{нф(1)}$. Обратить внимание на фазовый сдвиг между ними (угол φ), а также на изменение фазового сдвига при изменении частоты управления f . Не забудьте определить масштабы по напряжению, току и времени с учетом коэффициентов датчиков;

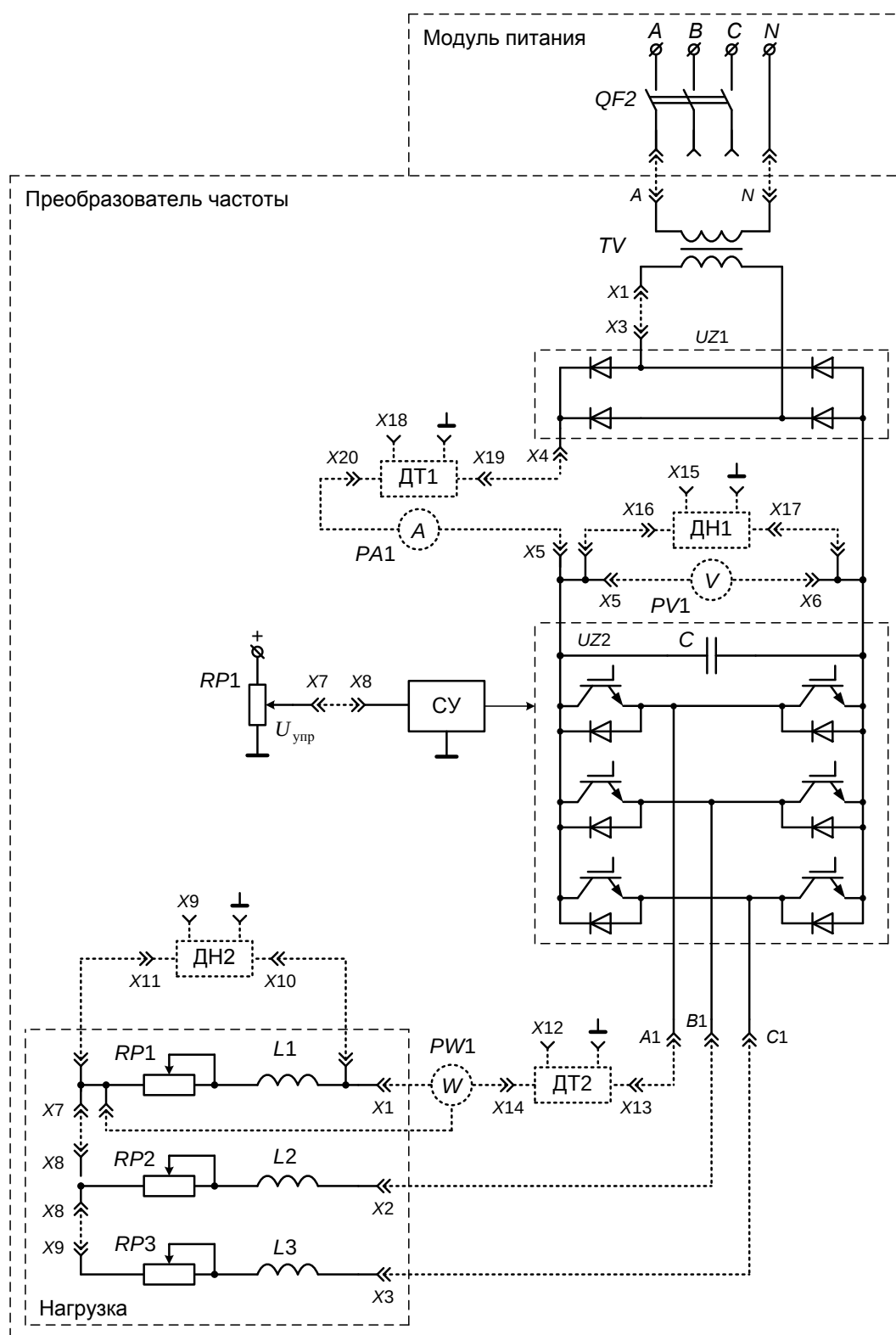


Рис. 3. Принципиальная схема для исследования автономного инвертора напряжения при работе на активно-индуктивную нагрузку

в) снять осциллограммы напряжения u_d и тока i_d на входе АИН при тех же значениях сопротивления нагрузки R_n и частоты управления f . Для этого подключить осциллограф к датчику тока ДТ1 (канал CH2 – гнездо X18, корпус осциллографа соединить с гнездом «⊥» ДТ1) и датчику напряжения ДН1

(канал *CH1* – гнездо *X15*). Объяснить импульсный характер тока, потребляемого АИН на входе;

г) снять регулировочные $U_{\text{нф}(1)} = F(f)$, $\mu = F(f)$ и энергетические $P_d = F(f)$, $P_n = F(f)$, $S_n = F(f)$, $\cos\varphi_n = F(f)$, $\eta_n = F(f)$ характеристики автономного инвертора напряжения при регулировании по закону $U/f = \text{const}$ и заданном значении R_n . Частоту изменять в диапазоне 10 – 50 Гц. Для повышения точности измерения за счет устранения помех соединить нулевую точку модуля «Нагрузка» (гнездо *X7*) с землей (гнездо *N* «Модуля питания»).

Фиксировать следующие величины и вносить их в табл. 4:

- f – частота на выходе АИН;
- U_d , I_d – постоянное напряжение и ток на входе АИН соответственно;
- $U_{\text{нф}(1)}$, $I_{\text{нф}(1)}$ – действующие значения первой гармоники фазного напряжения и тока на выходе АИН соответственно;
- $P_{\text{нф}}$, $\cos\varphi_n$ – фазная мощность на выходе АИН и $\cos\varphi_n$ преобразователя, измеренные модулем «Измеритель мощности», соответственно.

Таблица 4

f , Гц						Примечание
U_d , В						$R_n =$
I_d , А						
$U_{\text{нф}(1)}$, В						
$I_{\text{нф}(1)}$						
$P_{\text{нф}}$, Вт						
$\cos\varphi_n$						
P_d , Вт						
P_n , Вт						
S_n , В·А						
η_n						
μ						

Расчетные значения в табл. 4 определять по формулам (5) – (8).

Мощность нагрузки

$$P_d = U_d \cdot I_d. \quad (5)$$

Активная и полная мощности на выходе АИН

$$P_n = 3 \cdot P_{\text{нф}}, \quad S_n = 3 \cdot U_{\text{нф}} \cdot I_{\text{нф}}. \quad (6)$$

Коэффициент полезного действия АИН

$$\eta_n = P_n / P_d. \quad (7)$$

Коэффициент модуляции

$$\mu = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{нф}(1)}}{U_d}. \quad (8)$$

д) повторить опыт 2 г при другом значении R_H , заданном преподавателем. По данным опытов 2 г, д построить зависимости $U_{H\Phi(1)} = F(f)$, $\mu = F(f)$, $P_d = F(f)$, $P_H = F(f)$, $S_H = F(f)$, $\cos\varphi_H = F(f)$, $\eta_H = F(f)$;

е) снять внешнюю $U_{H\Phi(1)} = F(I_{H\Phi(1)})$ и энергетические характеристики $P_d = F(I_{H\Phi(1)})$, $P_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $S_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $\cos\varphi_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $\eta_H = F(I_{H\Phi(1)})$ автономного инвертора напряжения при заданном значении частоты f . Для этого потенциометром $RP1$ в модуле «Преобразователь частоты» установить заданное значение частоты f (по прибору частота) и изменять ток нагрузки $I_{H\Phi}$ переключателем $SA1$ в модуле «Нагрузка». Фиксировать те же величины, что и в опыте 2 г, а также величину R_H . Данные занести в табл. 5;

ж) повторить опыт 2 е при другом значении f , заданном преподавателем. По данным опытов 2 е, ж построить зависимости $U_{H\Phi(1)} = F(I_{H\Phi(1)})$, $P_d = F(I_{H\Phi(1)})$, $P_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $S_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $\cos\varphi_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $\eta_H = F(I_{H\Phi(1)})$.

Выключить тумблер $SA1$ модуля «Преобразователь частоты», тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности», а также автоматы $QF2$ «Модуля питания» и $QF1$ «Модуля питания стенда».

Таблица 5

R_H , Ом						Примечание
U_d , В						$f =$
I_d , А						
$U_{H\Phi(1)}$, В						
$I_{H\Phi(1)}$						
$P_{H\Phi}$, Вт						
$\cos\varphi_H$						
P_d , Вт						
P_H , Вт						
S_H , В·А						
η_H						
μ						

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- наименование и цель работы;
- принципиальные электрические схемы для выполнения экспериментов;
- результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- экспериментально снятые и построенные характеристики;
- обработанные осциллограммы;
- сравнение результатов экспериментов и предварительных расчетов;
- выводы по работе:
 - указать какой способ модуляции использован в АИН;

- объяснить влияние тока нагрузки на регулировочные характеристики АИН;
- объяснить влияние частоты управления и тока нагрузки на энергетические показатели АИН.

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. Показать контуры протекания тока 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. Порядок включения и выключения лабораторного стенда.

Работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЗВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Цель работы

Исследование электромагнитных процессов, характеристик и энергетических показателей двухзвенного преобразователя частоты (ДПЧ). Исследование проводится на промышленном преобразователе частоты.

Описание лабораторного стенда

В комплект лабораторного стенда входят следующие модули: «Преобразователь частоты», «Нагрузка», «Модуль питания», «Тиристорный преобразователь», «Модуль измерительный», «Мультиметры», «Измеритель мощности», а также двухканальный осциллограф.

Описание лабораторного стенда, а также порядок ее включения и выключения подробно описаны в работе № 6 методического пособия.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса: «Автономные инверторы напряжения», «Преобразователи частоты», «Энергетические показатели выпрямителей», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) рассчитать максимально возможное напряжение на выходе выпрямителя $U_{d\max}$, если напряжение на вторичной стороне трансформатора (напряжение на входе ДПЧ) U

$$U_{d\max} = \sqrt{2} \cdot U = \frac{\sqrt{2} \cdot U_c}{k_{тр}}. \quad (1)$$

Здесь U_c – действующее значение напряжения сети; $k_{тр}$ – коэффициент трансформации;

в) рассчитать для заданного варианта максимальные действующие значения первой гармоники линейного $U_{нл(1)\max}$ и фазного $U_{нф(1)\max}$ напряжений на нагрузке при формировании фазных напряжений с помощью пространственного вектора:

$$U_{нл(1)\max} = \frac{U_d}{\sqrt{2}}, \quad U_{нф(1)\max} = \frac{U_d}{\sqrt{6}}; \quad (2)$$

где U_d – постоянное напряжение на выходе однофазного выпрямителя;

г) рассчитать коэффициент модуляции μ для заданного варианта. Коэффициент модуляции μ рекомендуется определить из соотношения

$$\mu = \frac{f}{f_{\max}}. \quad (3)$$

Здесь f , $f_{\max}$ – заданная и максимальная частота на выходе ДПЧ соответственно;

д) рассчитать действующие значения первой гармоники линейного $U_{\text{нл}(1)}$ и фазного $U_{\text{нф}(1)}$ напряжений на нагрузке при разных способах модуляции по заданной частоте f и рассчитанному коэффициенту модуляции μ :

$$U_{\text{нл}(1)} = \mu \cdot U_{\text{нл}(1)\text{max}}, \quad U_{\text{нф}(1)} = \mu \cdot U_{\text{нф}(1)\text{max}}. \quad (4)$$

2. Экспериментальное исследование двухзвенного преобразователя частоты:

а) собрать схему для исследования ДПЧ при работе на активно-индуктивную нагрузку в соответствии с рис. 1. Дополнительные переключки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

В табл. 1 приведены измерительные приборы, а в табл. 2 датчики тока и напряжения, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 1).

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Действующее значение напряжения U и тока I на входе ДПЧ	$PW1$	$U \sim 300 \text{ В};$ $I \sim 2,0 \text{ А}$	Измеритель мощности
Действующее значение первой гармоники фазного напряжения на активном сопротивлении нагрузки $U_{\text{нф}R(1)}$	$PV1$	—	Модуль измерительный
Действующее значение первой гармоники фазного тока нагрузки $I_{\text{нф}(1)}$	$PA3$	—	Модуль измерительный

Таблица 2

Измеряемый сигнал	Обозначение прибора	Месторасположение прибора (название модуля)
Мгновенное значение напряжения на входе ДПЧ u	$ДН1$	Тиристорный преобразователь
Мгновенное значение тока на входе ДПЧ i	$ДТ1$	Тиристорный преобразователь
Мгновенное значение фазного напряжения на выходе ДПЧ $u_{\text{нф}}$	$ДН2$	Преобразователь частоты
Мгновенное значение фазного тока на выходе ДПЧ $i_{\text{нф}}$	$ДТ2$	Преобразователь частоты

Из табл. 1 видно, что для измерения действующего значения первой гармоники фазного напряжения на активном сопротивлении нагрузки $U_{\text{нф}R(1)}$ применяется вольтметр переменного напряжения $PV1$, установленный в «Модуле измерительном». Индуктивность нагрузки служит фильтром, которая отфильтровывает высокочастотную составляющую в выходном ШИМ-

сигнале ДПЧ. При этом формы кривых тока через нагрузку и напряжения на активном сопротивлении нагрузки близки к синусоидальным.

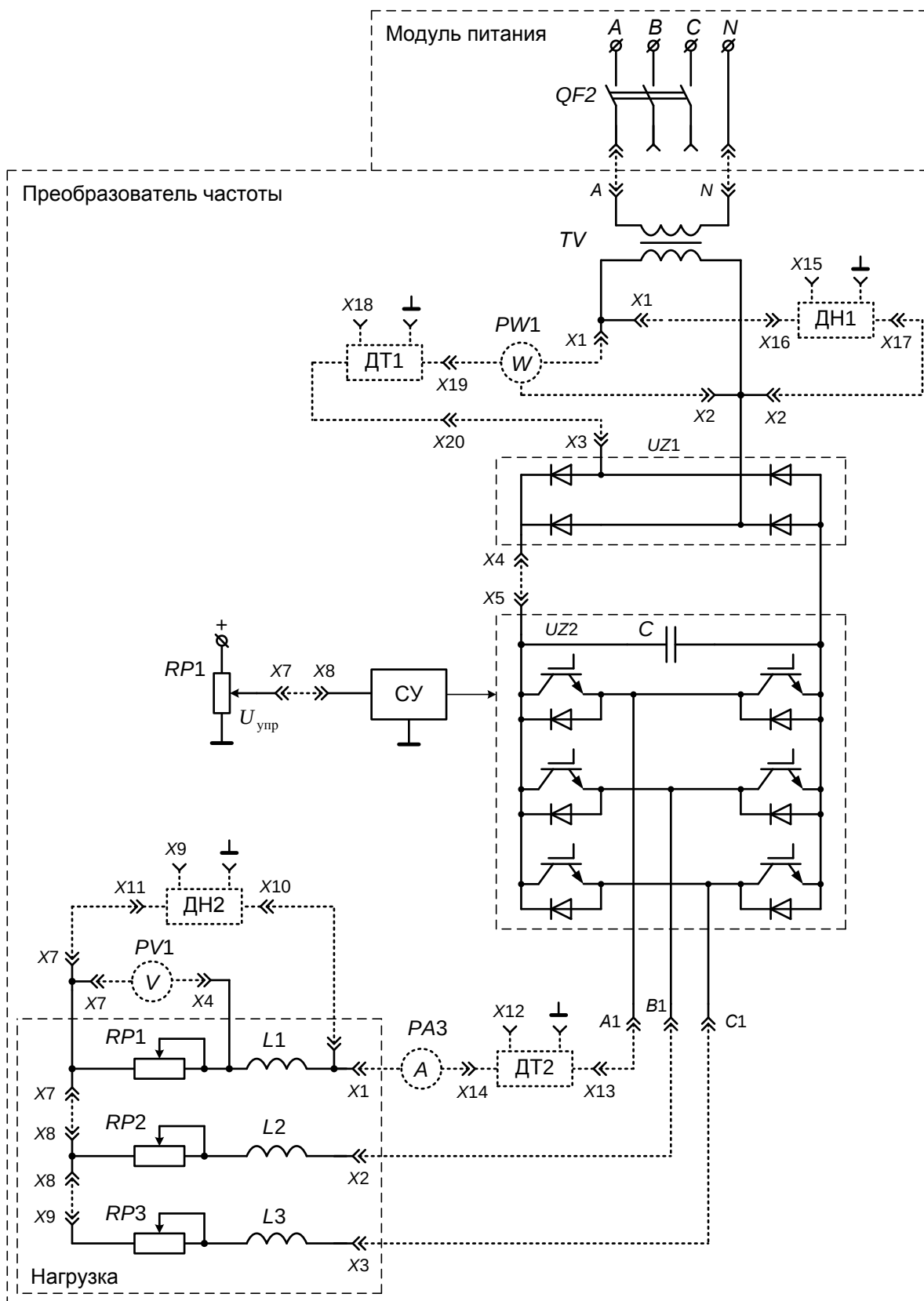


Рис. 1. Принципиальная схема для исследования двухзвенного преобразователя частоты при работе на активно-индуктивную нагрузку

Тумблеры SA2 и SA3 датчиков напряжения (ДН1 – ДН2) и тока (ДТ1 – ДТ2) в модулях «Тиристорный преобразователь» и «Преобразователь частоты» установить в положение «2» (фильтр выключен). Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 2;

б) снять осциллограммы первой гармоники фазного напряжения $u_{\text{нф}(1)}$ и тока $i_{\text{нф}(1)}$ на выходе ДПЧ при помощи осциллографа для заданного сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ и частоты управления f . Для этого подключить осциллограф к датчику тока ДТ2 (канал CH2 – гнездо X12, корпус осциллографа соединить с гнездом «⊥» ДТ2) и датчику напряжения ДН2 (канал CH1 – гнездо X9). Выполнить необходимые операции, указанные в порядке включения установки (см. работу № 8, часть 1). Потенциометром RP1 в модуле «Преобразователь частоты» установить заданное значение частоты управления f , а переключателем SA1 в модуле «Нагрузка» – заданное значение сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$.

Вначале посмотреть на осциллограммы при широкой полосе пропускания датчиков (положение «2» тумблеров SA2 и SA3 модуля «Преобразователь частоты»), а затем, переключив тумблеры SA2 и SA3 датчиков в положение «1», зарисовать осциллограммы первых гармоник фазного напряжения $u_{\text{нф}(1)}$ и тока $i_{\text{нф}(1)}$. Обратить внимание на фазовый сдвиг между ними (угол φ), а также на изменение фазового сдвига при изменении частоты управления f . Не забудьте определить масштабы по напряжению, току и времени с учетом коэффициентов датчиков;

в) снять осциллограммы напряжения u и тока i на входе ДПЧ при тех же значениях сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ и частоты управления f . Для этого подключить осциллограф к датчику тока ДТ1 (канал CH2 – гнездо X18, корпус осциллографа соединить с гнездом «⊥» ДТ1) и датчику напряжения ДН1 (канал CH1 – гнездо X15). Обратить внимание на формы тока и напряжения, оценить приближенно сдвиг по фазе тока относительно напряжения;

г) снять регулировочные $U_{\text{нф}(1)} = F(f)$ и энергетические $P = F(f)$, $S = F(f)$, $\cos\varphi = F(f)$, $\chi = F(f)$, $P_{\text{н}} = F(f)$, $\cos\varphi_{\text{н}} = F(f)$, $\eta_{\text{пч}} = F(f)$ характеристики двухзвенного преобразователя частоты при регулировании по закону $U/f = \text{const}$ и заданном значении $R_{\text{н}}$. Частоту изменять в диапазоне 10 – 50 Гц. Для повышения точности измерения за счет устранения помех соединить нулевую точку модуля «Нагрузка» (гнездо X7) с землей (гнездо N «Модуля питания»).

Фиксировать следующие величины и вносить их в табл. 3:

- f – частота на выходе ДПЧ;
- U , I – действующие значения напряжения и тока на входе ДПЧ, измеренные модулем «Измеритель мощности», соответственно;
- P , $\cos\varphi$ – активная мощность на входе ДПЧ и косинус преобразователя, измеренные модулем «Измеритель мощности», соответственно;
- $U_{\text{нф}(1)}$ – действующее значение первой гармоники фазного напряжения на активном сопротивлении нагрузки.

Расчетные значения в табл. 3 определять по формулам (5) – (9).

Полная мощность на входе ДПЧ

$$S = U \cdot I. \quad (5)$$

Коэффициент мощности преобразователя

$$\chi = P/S. \quad (6)$$

Активная мощность на выходе ДПЧ

$$P_H = \frac{3 \cdot U_{H\Phi R(1)}^2}{R_H}. \quad (7)$$

Таблица 3

f , Гц						Примечание
U , В						$R_H =$
I , А						
P , Вт						
S , В·А						
χ						
$\cos\varphi$						
$U_{H\Phi R(1)}$, В						
P_H , Вт						
ωL_H , Ом						
z_H , Ом						
$\cos\varphi_H$						
$U_{H\Phi(1)}$, В						
$\eta_{пч}$						

Действующее значение первой гармоники фазного напряжения на нагрузке

$$U_{H\Phi(1)} = U_{H\Phi R(1)} / \cos\varphi_H, \quad (8)$$

где $\cos\varphi_H = R_H / z_H$ – косинус нагрузки;

$z_H = \sqrt{R_H^2 + (\omega L_H)^2}$ – полное сопротивление нагрузки;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота.

Коэффициент полезного действия ДПЧ

$$\eta_{пч} = P_H / P. \quad (9)$$

д) повторить опыт 2 г при другом значении R_H , заданном преподавателем. По данным опытов 2 г, д построить зависимости $U_{H\Phi(1)} = F(f)$, $P = F(f)$, $S = F(f)$, $\cos\varphi = F(f)$, $\chi = F(f)$, $P_H = F(f)$, $\cos\varphi_H = F(f)$, $\eta_{пч} = F(f)$;

е) снять внешнюю $U_{H\Phi(1)} = F(I_{H\Phi(1)})$ и энергетические $P = F(I_{H\Phi(1)})$, $S = F(I_{H\Phi(1)})$, $\cos\varphi = F(I_{H\Phi(1)})$, $\chi = F(I_{H\Phi(1)})$, $P_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $\cos\varphi_H = F(I_{H\Phi(1)})$, $\eta_{пч} = F(I_{H\Phi(1)})$ характеристики двухзвенного преобразователя частоты при заданном значении частоты f . Для этого потенциометром $RP1$ в модуле «Преобразователь частоты» установить заданное значение частоты f (по прибору частота)

и изменять ток нагрузки $I_{\text{нф}}$ переключателем SA1 в модуле «Нагрузка». Фиксировать те же величины, что и в опыте 2 г, а также величины $R_{\text{н}}$ и $I_{\text{нф}(1)}$. Данные занести в табл. 4. При высоких сопротивлениях нагрузки $R_{\text{н}}$ вследствие нечувствительности амперметра переменного тока РАЗ действующее значение первой гармоники фазного тока нагрузки можно определить из выражения

$$I_{\text{нф}(1)} = U_{\text{нф}(1)} / R_{\text{н}} . \quad (10)$$

ж) повторить опыт 2 е при другом значении f , заданном преподавателем. По данным опытов 2 е, ж построить зависимости $U_{\text{нф}(1)} = F(I_{\text{нф}(1)})$, $P = F(I_{\text{нф}(1)})$, $S = F(I_{\text{нф}(1)})$, $\cos\varphi = F(I_{\text{нф}(1)})$, $\chi = F(I_{\text{нф}(1)})$, $P_{\text{н}} = F(I_{\text{нф}(1)})$, $\cos\varphi_{\text{н}} = F(I_{\text{нф}(1)})$, $\eta_{\text{пч}} = F(I_{\text{нф}(1)})$.

Таблица 4

$R_{\text{н}}$, Гц						Примечание
$I_{\text{нф}(1)}$, А						$f =$ $\omega L_{\text{н}} =$
U , В						
I , А						
P , Вт						
S , В·А						
χ						
$\cos\varphi$						
$U_{\text{нф}R(1)}$, В						
$P_{\text{н}}$, Вт						
$z_{\text{н}}$, Ом						
$\cos\varphi_{\text{н}}$						
$U_{\text{нф}(1)}$, В						
$\eta_{\text{пч}}$						

Выключить тумблер SA1 модуля «Преобразователь частоты», тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности», а также автоматы QF2 «Модуля питания» и QF1 «Модуля питания стенда».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполнения экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) сравнение результатов экспериментов и предварительных расчетов;

ж) выводы по работе:

- указать какой способ модуляции использован в ДПЧ;
- объяснить влияние тока нагрузки на регулировочные характеристики ДПЧ;
- объяснить влияние частоты управления и тока нагрузки на энергетические показатели ДПЧ.

–

Контрольные вопросы

1. Как изменить частоту выходного напряжения ДПЧ?
2. Какие ДПЧ наиболее перспективны в электроприводе в настоящее время?
3. Каков вид внешней характеристики ДПЧ? От чего зависит наклон характеристики?
4. Как снять внешнюю характеристику?
5. Что такое регулировочная (частотная) характеристика ДПЧ?
6. Какой вид и почему имеет регулировочная (частотная) характеристика ДПЧ для электропривода?
7. Как снять регулировочную (частотную) характеристику?
8. Как определить КПД ДПЧ?
9. Назначение элементов силовой схемы преобразователя частоты.
10. Сравните двухзвенный и непосредственный преобразователи частоты.
11. Порядок включения и выключения лабораторного стенда.

Работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Исследование электромагнитных процессов, регулировочных и энергетических характеристик однофазного преобразователя переменного напряжения при работе на активную и активно-индуктивную нагрузку.

Описание лабораторного стенда

В лабораторной работе используются следующие модули: «Тиристоры», «Миллиамперметры», «Мультиметры», «Измеритель мощности», а также двухканальный осциллограф.

Описание лабораторного стенда подробно описано в работе № 2.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Преобразователи переменного напряжения», «Энергетические показатели выпрямителей» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения u_2 , напряжения на нагрузке u_n , анодного тока (тока нагрузки) i_a и напряжения на вентиле u_a при активной нагрузке для заданного угла управления α и напряжения U_2 ;

в) построить регулировочную характеристику при активной нагрузке и идеальных вентилях, а также при учете падения напряжения на вентиле, для заданных параметров.

Уравнение регулировочной характеристики при активной нагрузке и идеальных вентилях

$$U_n = U_2 \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}, \quad (1)$$

где U_n – действующее значение напряжения на нагрузке;

U_2 – действующее значение вторичного напряжения трансформатора;

α – угол управления симистором (эл. град.).

Падение напряжения на вентиле приближенно можно учесть, вычтя пороговое напряжение U_0

$$U_n = (U_2 - U_0) \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}. \quad (2)$$

г) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения u_2 , напряжения на нагрузке u_n , анодного тока (тока нагрузки) i_a и напряжения на вентиле u_a при активно-индуктивной нагрузке для заданного угла управления α и напряжения U_2 . Построение тока выполнить приближенно.

2. Экспериментальное исследование однофазного преобразователя переменного напряжения на симисторе:

а) собрать схему однофазного преобразователя переменного напряжения на симисторе в соответствии с рис. 1. Дополнительные перемычки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

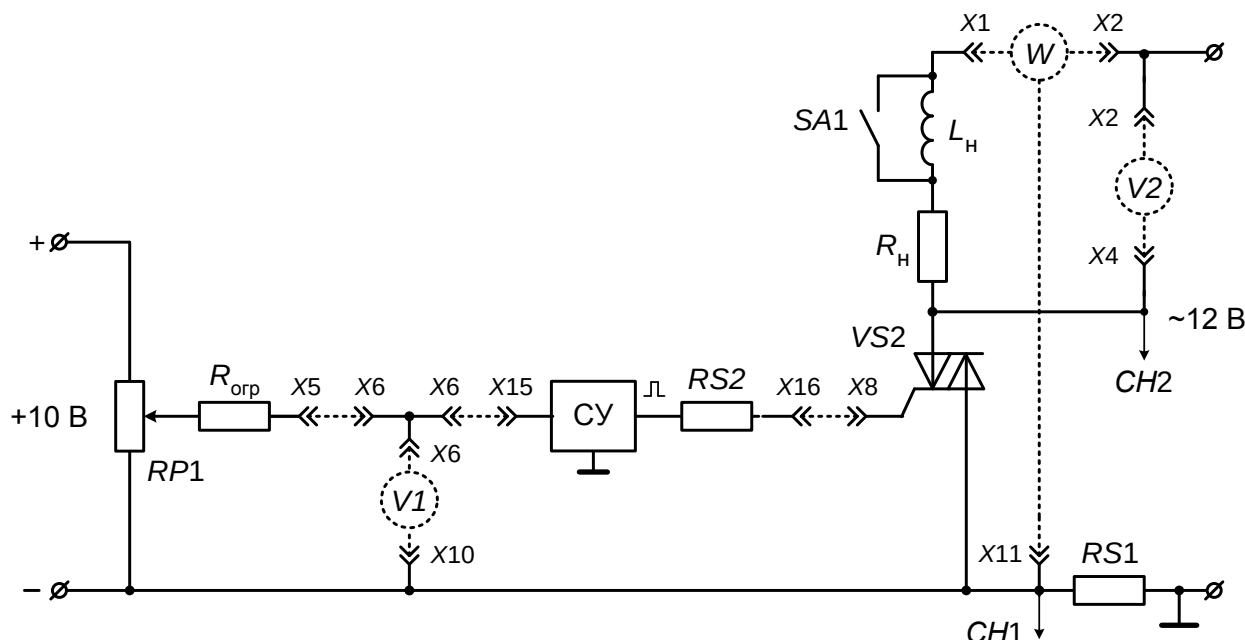


Рис. 1. Схема для исследования однофазного преобразователя переменного напряжения на симисторе

В табл. 1 приведены измерительные приборы, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на схеме (рис. 2).

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Действующее значение напряжения U_2 , тока I_2 и мощности на входе	W	$U_2 \sim 30 \text{ В};$ $I_2 \sim 0,2 \text{ А}$	Измеритель мощности
Действующее значение напряжения на нагрузке U_H	$V2$	$\sim 20 \text{ В}$	Мультиметры
Напряжение управления $U_{упр}$	$V1$	$= 20 \text{ В}$	Мультиметры

Переключить тумблер SA1 в верхнее положение, соответствующее активной нагрузке, а SA2 – в нижнее положение, подключив в цепь нагрузки симистора VS2 переменное напряжение ($\sim 12 \text{ В}$). Переключатель SA3 установить в среднее положение, соответствующее управлению симистором VS2. Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 1;

б) изучить влияние угла управления на напряжение на нагрузке u_n и определить возможный диапазон изменения угла управления α . Для этого подключить вход *CH2* осциллографа к гнезду X4, а корпус ($\perp$) – к гнезду X14 (напряжение на тиристоре u_a). Включить питание модуля «Тиристоры» и тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности». Регулировать угол управления α , изменяя напряжение управления $U_{упр}$. Снять зависимость угла управления от напряжения управления $\alpha = F(U_{упр})$.

Угол управления α определять при помощи осциллографа

$$\alpha = \frac{\alpha_{дел.}}{T_{дел.}} 360, \text{ град.} \quad (3)$$

где α – угол управления симистора (град.); $\alpha_{дел.}$ – угол управления на экране в делениях; $T_{дел.}$ – длительность периода на экране в делениях.

В дальнейшем, пользуясь этой характеристикой, можно определять угол управления α , не пользуясь осциллографом;

в) при активной нагрузке и заданном угле управления α снять осциллограммы напряжения на симисторе u_a (вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду X4, а корпус ($\perp$) – к гнезду X14) и анодного тока i_a (снимается с шунта *RS1* – вход *CH1* осциллографа к гнезду X13). Затем снять отдельно осциллограмму напряжения на нагрузке u_n (вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду X2, а корпус ($\perp$) – к гнезду X4, временно отключив мультиметр *V2* от измеряемой цепи). Определить коэффициент мощности в этой точке $\chi = P/S$. Активную P и полную S мощности измерить модулем «Измеритель мощности»;

г) переключить тумблер *SA1* в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки L_n . Снять те же осциллограммы при заданном по варианту угле управления α и активно-индуктивной нагрузке, сравнить осциллограммы;

д) снять регулировочную $U_n = F(\alpha)$ и энергетические характеристики $P = F(\alpha)$, $S = F(\alpha)$, $\chi = F(\alpha)$, $\cos\varphi = F(\alpha)$ при активной нагрузке. Для этого переключить тумблер *SA1* в верхнее положение, соответствующее активной нагрузке. Изменяя напряжение управления $U_{упр}$ ручкой потенциометра *RP1*, фиксировать по измерительным приборам требуемые величины. Экспериментальные данные занести в таблицу. Построить характеристики;

е) снять регулировочную характеристику $U_n = F(\alpha)$ при активно-индуктивной нагрузке для чего переключить тумблер *SA1* в нижнее положение. Сравнить снятые регулировочные характеристики и, пользуясь осциллограммами, объяснить причины их отличий. Выключить питание модуля «Тиристоры» и тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

а) наименование и цель работы;

- б) временные диаграммы и характеристики, построенные предварительно;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе. Обязательно ответить на контрольные вопросы 3, 4, 6.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение преобразователей переменного напряжения?
2. Что такое угол управления? По какой осциллограмме его можно определить?
3. На какие показатели влияет угол управления?
4. От чего зависит форма напряжения на нагрузке?
5. Что такое регулировочная характеристика?
6. От чего зависит вид регулировочной характеристики?
7. Можно ли снять регулировочную характеристику на холостом ходу?
Обосновать ответ.
8. Назвать виды импульсной модуляции переменного напряжения?
9. Сравнить способы импульсной модуляции переменного напряжения и указать их области применения.
10. Недостатки фазового регулирования скорости асинхронных двигателей.
11. Зачем применяют устройства мягкого пуска асинхронных двигателей?

Работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Цель работы

Изучение характеристик и режимов работы неуправляемого однофазного мостового выпрямителя, работающего на емкостной фильтр без корректора коэффициента мощности и с корректором коэффициента мощности (ККМ).

Описание лабораторного стенда

В комплект лабораторного стенда входят следующие модули: «Корректор коэффициента мощности», «Модуль измерительный», «Мультиметры», «Измеритель мощности», а также двухканальный осциллограф.

Лицевая панель модуля «Корректор коэффициента мощности» представлена на рис. 1.

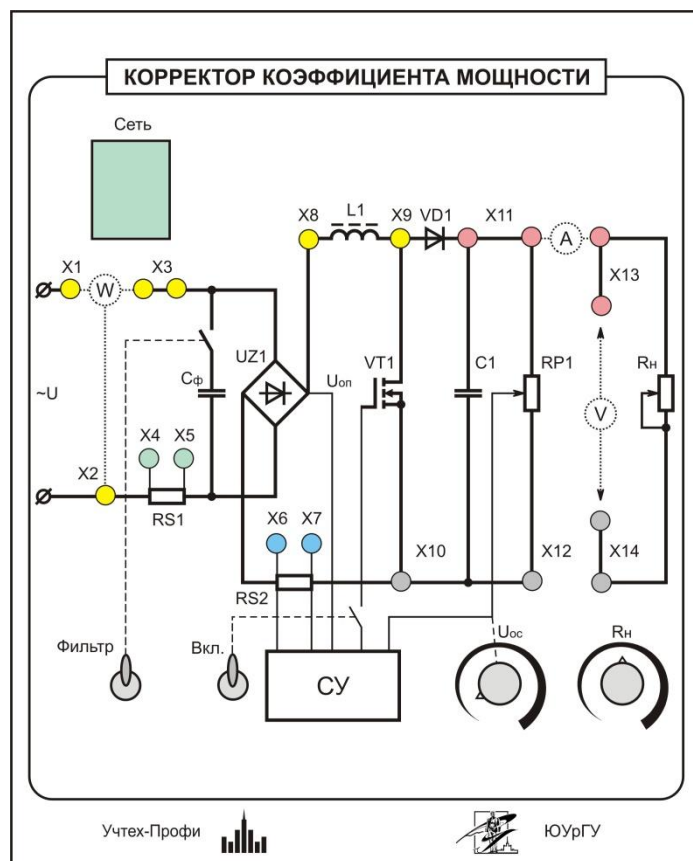


Рис. 1. Модуль «Корректор коэффициента мощности»

На лицевой панели изображена мнемосхема и установлены коммутирующие, регулирующие и измерительные элементы, а также гнезда для внешних соединений (X1 – X14).

Питание модуля осуществляется через понижающий трансформатор, непоказанный на мнемосхеме (см. рис. 1). Переменное напряжение $\sim U$ с вы-

хода вторичной обмотки трансформатора поступает на диодный мост $UZ1$, далее установлены высокочастотный дроссель малой индуктивности $L1$, блокирующий диод $VD1$, полевой транзистор $VT1$, работающий в ключевом режиме, и конденсатор фильтра $C1$. Управление транзистором осуществляется от системы управления (СУ), включить которую позволяет тумблер «Вкл». При выключении тумблера «Вкл», т.е. переключение его в нижнее положение, схема переходит в режим неуправляемого выпрямителя, работающего на емкостной фильтр (индуктивность $L1$ очень мала и не влияет на процессы в неуправляемом выпрямителе).

Потенциометром $RP1$ осуществляется регулирование напряжения на выходе ККМ, а переменным резистором R_n – тока в цепи нагрузки.

Переключение тумблера «Фильтр» в верхнее положение позволяет подключить сетевой фильтр C_f и уменьшить вредное влияние ККМ на форму напряжения сети, обусловленное его работой в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Для осциллографирования токов применяются шунты $RS1$ и $RS2$, сопротивление которых равно $0,22 \text{ Ом}$.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса: «Неуправляемые выпрямители», «Фильтры», «Корректор коэффициента мощности», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) по заданным параметрам определить ток на входе I_1 из уравнения баланса мощностей на входе и выходе схемы при допущении $\cos\varphi = 1$

$$U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi = U_{dH} \cdot I_{dH} + I_1^2 \cdot R. \quad (1)$$

где U_1, I_1 – действующее значение напряжения и тока на входе ККМ;

U_{dH}, I_{dH} – напряжение и ток на выходе (нагрузке) ККМ;

R – суммарное сопротивление ККМ, включающее сопротивление диодного моста $UZ1$, дросселя $L1$, шунтов $RS1, RS2$ и сопротивления транзистора $VT1$ во включенном состоянии;

в) по заданным параметрам определить КПД выпрямителя с корректором коэффициента мощности при допущении $\cos\varphi = 1$

$$\eta = \frac{U_{dH} \cdot I_{dH}}{U_1 \cdot I_1}. \quad (2)$$

Ток I_1 на входе ККМ определить из уравнения (1);

г) по заданным параметрам определить коэффициент пульсаций q неуправляемого выпрямителя, работающего на емкостной фильтр

$$q = \frac{I_{dH}}{2 \cdot m \cdot f \cdot C1 \cdot U_{dH}}. \quad (3)$$

Здесь f – частота питающей сети; m – пульсность выпрямителя $UZ1$; $C1$ – емкость на выходе выпрямителя.

2. Экспериментальные исследования неуправляемого выпрямителя, работающего на емкостной фильтр:

а) собрать схему для исследования неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром в соответствии с рис. 2. Дополнительные перемычки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

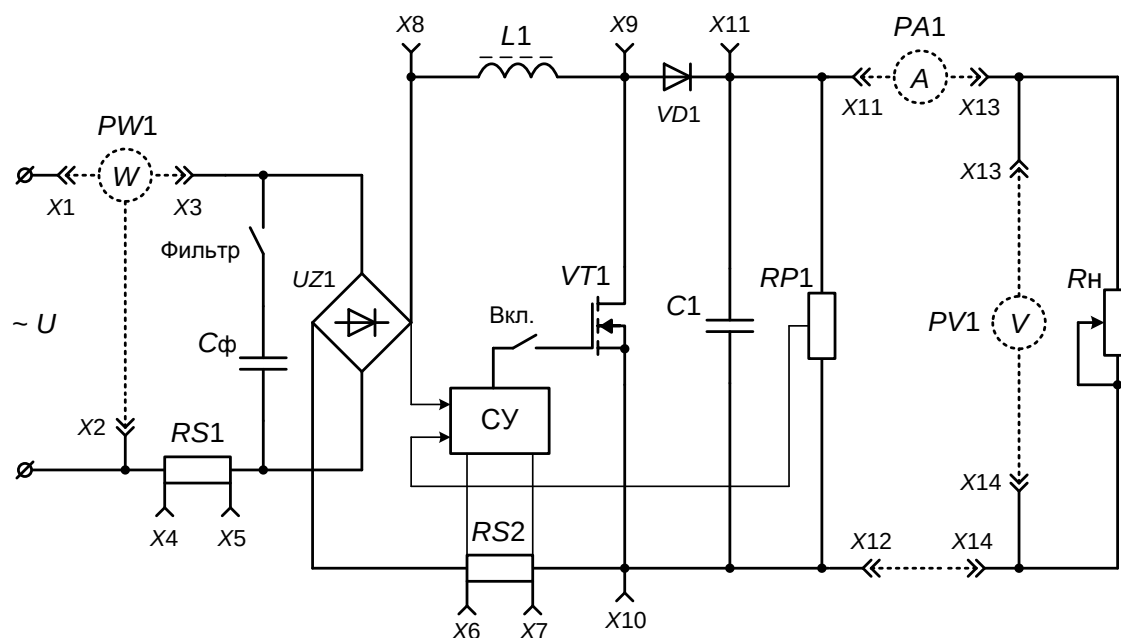


Рис. 2. Принципиальная схема для исследования неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром и с ККМ

В табл. 1 приведены измерительные приборы, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 2).

Тумблеры «Фильтр» и «Вкл» переключить в нижнее положение (фильтр C_ϕ и система управления ККМ выключены). Ручку реостата R_n перевести в крайнее правое положение, соответствующее максимально возможному сопротивлению нагрузки. Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 1. Включить автомат QF1 «Модуль питания стенда», а затем тумблеры «Сеть» в модулях «Корректор коэффициента мощности» и «Измеритель мощности»;

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Действующее значение напряжения U_1 , тока I_1 и мощности на входе	PW1	$U_1 \sim 30 \text{ В};$ $I_1 \sim 2,0 \text{ А}$	Измеритель мощности
Напряжение на нагрузке $U_{дн}$	PV1	$= 200 \text{ В}$	Мультиметры
Ток нагрузки $I_{дн}$	PA1	—	Модуль измерительный

б) снять осциллограммы напряжения u_1 и тока i_1 на входе ККМ. Для этого вход осциллографа $CH1$ подключить к гнезду $X3$ (напряжение u_1), а вход $CH2$ – к гнезду $X5$ (ток i_1), корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с гнездом $X4$. Реостатом R_H установить заданный ток нагрузки I_H . Зарисовать с экрана осциллографа требуемые осциллограммы. Определить и записать масштабы по напряжению, току и времени;

в) снять осциллограммы выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока i_d , подключив вход осциллографа $CH1$ к гнезду $X8$ (напряжение u_d), а вход $CH2$ – к гнезду $X7$ (ток i_d), корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с гнездом $X6$. Зарисовать с экрана осциллографа требуемые осциллограммы;

д) снять осциллограмму напряжения на конденсаторе $C1$ (нагрузке) u_{dH} , подключив вход $CH2$ осциллографа к гнезду $X11$, а корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с гнездом $X10$. Зарисовать осциллограмму;

е) исследовать влияние тока нагрузки I_{dH} на коэффициент пульсаций q напряжения на нагрузке u_{dH} . Для этого переключить канал $CH2$ осциллографа на открытый вход «АС» (переменная составляющая входного сигнала). Замерить двойную амплитуду пульсаций напряжения на нагрузке ΔU_{dH} при заданном токе нагрузки I_H . Определить коэффициент пульсаций $q = \Delta U_{dH} / (2 \cdot U_{dH})$, сравнив его с расчетным значением (см. п. 1 г). Определить коэффициент q при других значениях тока нагрузки I_{dH} , вращая ручку реостата R_H . Данные заносить в таблицу. Построить зависимость $q = F(I_{dH})$;

ж) снять и построить внешнюю $U_{dH} = F(I_{dH})$ и энергетические характеристики $P_1 = F(I_{dH})$, $S_1 = F(I_{dH})$, $P_H = F(I_{dH})$, $\chi = F(I_{dH})$, $\cos\varphi = F(I_{dH})$, $\eta = F(I_{dH})$ неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром, изменяя ток нагрузки I_{dH} реостатом R_H . Данные занести в табл. 2. Выключить тумблер «Сеть» в модуле «Корректор коэффициента мощности».

Таблица 2

U_1 , В										
I_1 , А										
P_1 , Вт										
S_1 , В·А										
U_{dH} , В										
I_{dH} , А										
P_{dH} , Вт										
χ										
$\cos\varphi$										
η										

Энергетические показатели выпрямителя с емкостным фильтром определить по формулам: полная мощность на входе – $S_1 = U_1 \cdot I_1$, мощность на нагрузке – $P_{dH} = U_{dH} \cdot I_{dH}$, коэффициент мощности – $\chi = P_1/S_1$, КПД – $\eta = P_{dH}/P_1$.

3. Экспериментальное исследование неуправляемого выпрямителя с корректором коэффициента мощности:

а) собрать схему выпрямителя с корректором коэффициента мощности в соответствии с рис. 2. Тумблеры «Фильтр» и «Вкл» переключить в верхнее положение (фильтр C_Φ и система управления ККМ включены). Ручку реостата R_H перевести в крайнее правое положение, соответствующее максимально возможному сопротивлению нагрузки. Включить тумблер «Сеть» в модуле «Корректор коэффициента мощности»;

б) снять осциллограммы напряжения u_1 и тока i_1 на входе ККМ. Для этого вход осциллографа $CH1$ подключить к гнезду $X3$ (напряжение u_1), а вход $CH2$ – к гнезду $X5$ (ток i_1), корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с гнездом $X4$. Потенциометром $RP1$ установить заданное напряжение на нагрузке $U_{дн}$, а реостатом R_H – заданный ток нагрузки $I_{дн}$. Значение напряжения на нагрузке $U_{дн}$ ручкой потенциометра $RP1$ не изменять во всех опытах. Зарисовать с экрана осциллографа требуемые осциллограммы. Определить и записать масштабы по напряжению, току и времени. Отключив сетевой фильтр C_Φ , исследовать его влияние на вид осциллограмм;

в) повторить пункты 2 в – ж для выпрямителя с корректором коэффициента мощности. Выключить тумблеры «Сеть» в модулях «Корректор коэффициента мощности» и «Измеритель мощности», а затем автомат $QF1$ «Модуля питания стенда».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) предварительные расчеты;
- в) принципиальную силовую схему установки;
- г) обработанные осциллограммы;
- д) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- е) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) выводы по работе:
 - пояснить влияние на осциллограммы сетевого фильтра;
 - объяснить влияние тока нагрузки $I_{дн}$ на коэффициент пульсаций q выпрямителя с емкостным фильтром и корректором коэффициента мощности;
 - сравнить основные энергетические показатели (χ , $\cos\varphi$) выпрямителя с емкостным фильтром и корректором коэффициента мощности;
 - указать, чем отличаются внешние характеристики неуправляемого выпрямителя с корректором коэффициента мощности и без него.

Контрольные вопросы

1. Как работают однофазные схемы выпрямления?
2. Каково назначение фильтров в преобразовательной технике?
3. Принцип действия, преимущества, недостатки и область применения емкостных фильтров.
4. Принцип работы неуправляемого выпрямителя, работающего на емкостной фильтр.
5. От каких параметров зависит коэффициент пульсаций q выпрямителя, работающего на емкостной фильтр? Как изменяется коэффициент q при увеличении тока нагрузки и почему?
6. Перечислить основные энергетические показатели выпрямителей.
7. Что такое коэффициент мощности и зачем его корректировать?
8. Назначение и принцип работы корректора коэффициента мощности.
9. Сформулировать главное условие работы неуправляемого выпрямителя с ККМ?
10. Зачем в схеме ККМ используется выпрямительный диод $VD1$?
11. Провести сравнительную оценку выпрямителя с емкостным фильтром и корректором коэффициента мощности по основным энергетическим показателем (χ , $\cos\varphi$).
12. Что такое внешняя характеристика, и какой вид она имеет для выпрямителя с емкостным фильтром и корректором коэффициента мощности?
13. Как снять внешние характеристики?

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Цель работы

Изучение принципа действия, характеристик и режимов работы источника вторичного электропитания (ИВЭП), а также получение навыков работы с высокочастотными преобразователями постоянного напряжения в постоянное (DC – DC преобразователей).

Описание лабораторного стенда

В комплект лабораторного стенда входят следующие модули: «Источник вторичного электропитания», «ККМ», «Измеритель мощности», а также двухканальный осциллограф.

Лицевая панель модуля «Источник вторичного электропитания» представлена на рис. 1.

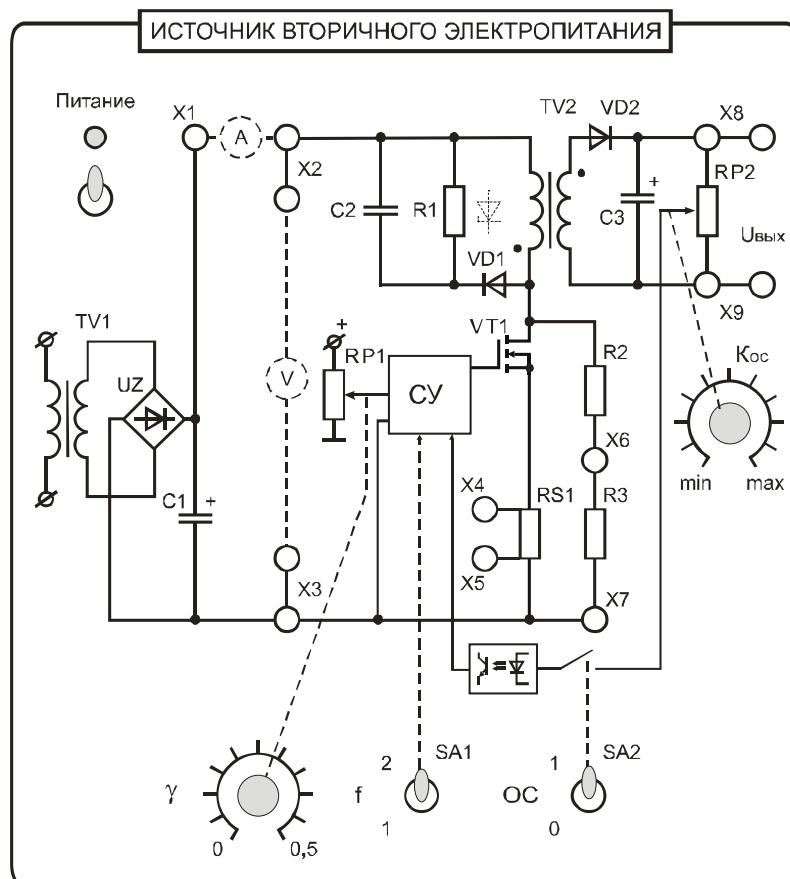


Рис. 1. Модуль «Источник вторичного электропитания»

На лицевой панели изображена мнемосхема и установлены коммутирующие, регулирующие и измерительные элементы, а также гнезда для внешних соединений ($X1 - X9$). На мнемосхеме модуля в упрощенном виде изображены составные части обратноходового преобразователя постоянного напряжения: система управления (СУ), полевой транзистор $VT1$, работающий в ключевом режиме, высокочастотный трансформатор $TV2$, выходной вы-

прямитель $VD2$ с емкостным фильтром $C3$, демпфирующая цепь $VD1, C2, R1$ (вместо резистора $R1$ в схеме источника вторичного электропитания установлен стабилитрон, обеспечивающий функцию ограничения напряжения на выходе модуля при отсутствии нагрузки), цепь обратной связи с гальванической развязкой (оптопарой).

Питание преобразователя может осуществляться либо от нестабилизированного источника постоянного тока, состоящего из понижающего трансформатора $TV1$, диодного моста UZ и емкостного фильтра $C1$, либо от стабилизированного источника питания, функцию которого выполняет «Модуль питания стенда».

Управление транзистором $VT1$ осуществляется от ШИМ-контроллера. Тумблером $SA2$ обеспечивается подключение обратной связи по напряжению, выполняющей функцию стабилизации напряжения на выходе источника вторичного электропитания (положение «1» – обратная связь включена, «0» – выключена). В разомкнутой системе относительное время включения транзистора $VT1$ (коэффициент заполнения) γ изменяется потенциометром $RP1$ в диапазоне $0 \leq \gamma < 0,5$. В замкнутой системе напряжение на выходе преобразователя задается потенциометром $RP2$. При этом выход потенциометра $RP1$ отключается от входа CY . Тумблером $SA1$ обеспечивается дискретное изменение частоты ШИМ транзистора $VT1$.

Для осциллографирования тока и напряжения на транзисторе $VT1$ используются шунт $RS1 = 0,41$ Ом и делитель напряжения $R2, R3$ с коэффициентом деления 10. Включение модуля осуществляется тумблером «Питание» и индицируется красным светодиодом.

В качестве нагрузки источника вторичного электропитания ИВЭП используется регулируемая активная нагрузка R_n , расположенная в модуле «ККМ».

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса: «Источники вторичного электропитания», содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) исходя из равенства нулю среднего тока трансформатора, рассчитать предельно возможное напряжение на нагрузке

$$U_n = U_d \cdot n \cdot \frac{\gamma}{1 - \gamma}; \quad (1)$$

где $n = w_2/w_1$ – коэффициент трансформации; U_d – постоянное напряжение на входе ИВЭП; γ – относительное время включения транзистора $VT1$ (коэффициент заполнения);

в) для заданного варианта рассчитать максимальное значение тока, протекающего через транзистор, в граничном режиме работы

$$I_{\max} = \frac{U_d \cdot \gamma \cdot T_{\text{шим}}}{L_1}, \quad (2)$$

где $T_{\text{шим}} = 1/f$ – период включения транзистора;

L_1 – индуктивность первичной обмотки трансформатора;

г) для заданного варианта определить мощность, рассеиваемую в защитном стабилитроне

$$P_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{ст}} \cdot I_{\max} \cdot t_{\text{ст}}}{T_{\text{шим}} \cdot 2}, \quad (3)$$

где $U_{\text{ст}}$ – напряжение стабилизации стабилитрона; $I_{\max}$ – максимальное значение тока через стабилитрон в момент выключения транзистора (определяется в соответствии с выражением (2)); $t_{\text{ст}} = (U_d \cdot \gamma \cdot T_{\text{шим}})/U_{\text{ст}}$ – время прохождения тока через стабилитрон.

2. Экспериментальное исследование источника вторичного электропитания без обратной связи:

а) собрать схему для исследования источника вторичного электропитания в соответствии с рис. 3. Дополнительные перемычки и измерительные приборы, подключаемые в схему, показаны штриховой линией.

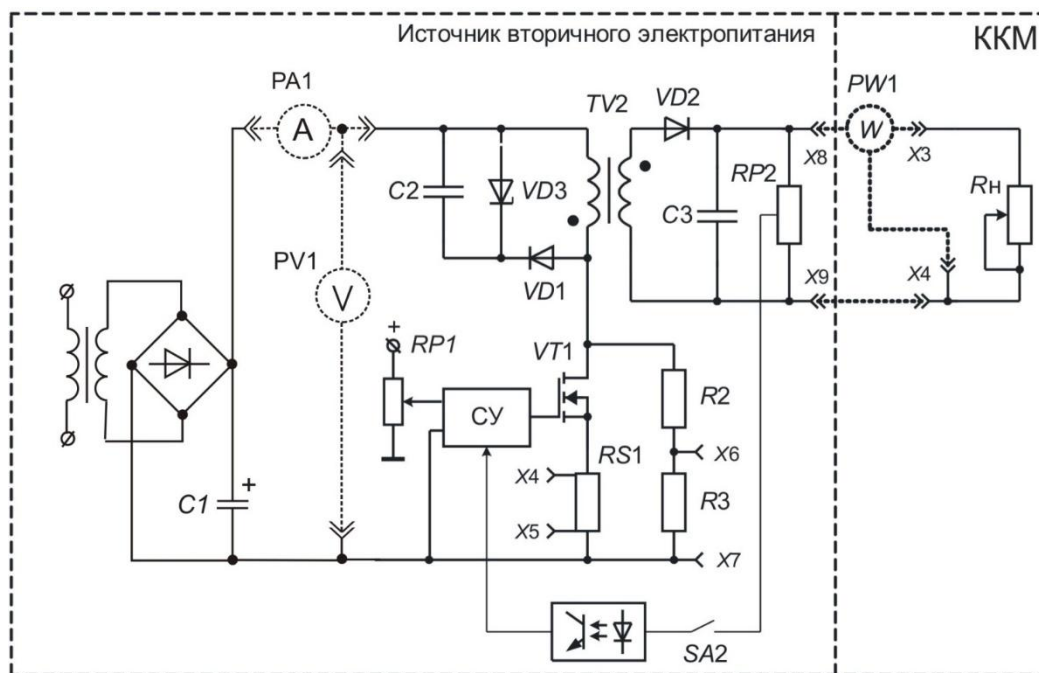


Рис. 3. Принципиальная схема для исследования источника вторичного электропитания

В табл. 1 приведены измерительные приборы, используемые в лабораторной работе, в соответствии с принятыми обозначениями на принципиальной схеме (см. рис. 3).

В модуле «Источник вторичного электропитания» тумблер SA1 установить в положение согласно таблице вариантов, а SA2 – в положение «0» (система без обратной связи). Ручку регулятора тока нагрузки R_n в модуле «ККМ» установить в правое положение, соответствующее минимальному то-

ку нагрузки (максимальному активному сопротивлению нагрузки R_H). Установить требуемые пределы измерений на измерительных приборах согласно табл. 1.

Таблица 1

Измеряемые величины	Обозначение прибора	Предел измерения	Месторасположение прибора (название модуля)
Напряжение на входе U_d	PV1	–	Модуль мультиметров
Ток на входе I_d	PA1	–	Модуль измерительный
Напряжение U_H и ток I_H на нагрузке	PW1	$U \sim 300 \text{ В};$ $I \sim 2 \text{ А}$	Измеритель мощности

Включить автомат QF1 «Модуля питания стенда», а также тумблер «Сеть» модуля «Измеритель мощности». Для перевода модуля «Измеритель мощности» в режим измерения постоянных токов и напряжений одновременно нажать кнопки «P/Q/S» и «f/cosφ/φ». Кнопки удерживать в нажатом состоянии до появления на табло надписи «Постоянный ток».

Включить тумблер «Питание» и SA1 в модулях «Источник вторичного электропитания» и «Модуль питания стенда» соответственно;

б) снять осциллограммы тока и напряжения на транзисторе VT1 для заданного коэффициента заполнения γ и двух значений тока нагрузки I_H (заданного по варианту и $I_H = 0$). Для этого выход осциллографа CH1 подключить к гнезду X6 (напряжение на транзисторе), а выход CH2 – к гнезду X4 (ток транзистора), корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом X5. В «Модуле питания стенда» ручкой потенциометра RP1 установить требуемое значение напряжения на входе U_d ИВЭП согласно таблице вариантов и на протяжении всех опытов не изменять положение RP1. В модуле «Источник вторичного электропитания» ручкой потенциометра RP1 установить заданный коэффициент заполнения γ , а затем реостатом R_H в модуле «Нагрузка» – заданный ток нагрузки I_H . Во всех опытах коэффициент заполнения γ измерять при помощи осциллографа. Зарисовать с экрана осциллографа ток и напряжение на транзисторе VT1. Определить и записать масштабы по току, напряжению и времени. Аналогичные действия выполнить при токе нагрузке $I_H = 0$. Объяснить различие в осциллограммах, определить частоту ШИМ транзистора и его режим работы (прерывистый или непрерывный);

в) снять и построить регулировочную $U_H = F(\gamma)$ и энергетические характеристики $P_d = F(\gamma)$, $P_H = F(\gamma)$, $\eta = F(\gamma)$ при постоянном напряжении на входе U_d и сопротивлении нагрузки R_H . Для этого для заданного коэффициента заполнения γ , указанного в таблице вариантов, установить заданный ток нагрузки I_H реостатом R_H в модуле «ККМ» и на протяжении всего опыта не трогать положение ручки потенциометра R_H . При измерении коэффициента заполнения γ осциллографом рекомендуется ручкой плавной подстройки подобрать развертку осциллографа таким образом, чтобы период исследуемого

сигнала составил ровно 10 делений. Тогда коэффициент заполнения γ можно с достаточной для практики точностью вычислить как отношение открытого состояния транзистора (в делениях) к периоду (10 делений). Изменяя коэффициент заполнения импульсов с шагом $\gamma \approx 0,05$, фиксировать показания U_d , I_d , U_H , I_H . Показания занести в табл. 2.

Таблица 2

γ											
U_d , В											
I_d , А											
P_d , Вт											
U_H , В											
I_H , А											
P_H , Вт											
η											

Энергетические показатели ИВЭП определить по формулам: мощность на входе $P_d = U_d \cdot I_d$, мощность на нагрузке $P_H = U_H \cdot I_H$, КПД $\eta = P_H / P_d$;

д) снять и построить внешнюю $U_H = F(I_H)$ и энергетические характеристики $P_d = F(I_H)$, $P_H = F(I_H)$, $\eta = F(I_H)$ при постоянном напряжении на входе U_d и коэффициенте заполнения $\gamma = 0,5$. Для этого ручку потенциометра $RP1$ в модуле «Источник вторичного электропитания» установить в крайнее правое положение, соответствующее $\gamma = 0,5$. Изменяя сопротивление нагрузки реостатом R_H в модуле «Нагрузка», фиксировать показания U_d , I_d , U_H , I_H . Показания занести в таблицу 2, построить характеристики.

3. Экспериментальное исследование источника вторичного электропитания с обратной связью:

а) снять и построить характеристику стабилизации $U_H = F(U_d)$, а также энергетическую характеристику $\eta = F(U_d)$ ИВЭП при постоянном напряжении задания U_3 и минимально возможном сопротивлении нагрузки R_H . Для этого в модуле «Источник вторичного электропитания» тумблер $SA2$ переключить в положение «2» (обратная связь включена). В «Модуле питания стенда» ручкой потенциометра $RP1$ установить требуемое значение напряжения U_d на входе ИВЭП, а реостат R_H модуля «Нагрузка» перевести в крайнее левое положение, соответствующее минимально возможному сопротивлению нагрузки R_H . В модуле «Источник вторичного электропитания» ручкой потенциометра $RP2$ установить заданное по варианту напряжение на нагрузке U_H . Изменяя напряжение U_d на входе ИВЭП, фиксировать показания U_d , I_d , U_H , I_H . Показания занести в таблицу 2, построить характеристики;

б) снять и построить внешнюю $U_H = F(I_H)$ и энергетические характеристики $P_d = F(I_H)$, $P_H = F(I_H)$, $\eta = F(I_H)$ при постоянном напряжении на входе U_d и напряжении задания U_3 . Для этого в «Модуле питания стенда» ручкой

потенциометра $RP1$ установить требуемое значение напряжения U_d на входе ИВЭП согласно таблице вариантов. В модуле «Источник вторичного электропитания» ручкой потенциометра $RP2$ установить заданное по варианту напряжение на нагрузке U_n . Изменяя сопротивление нагрузки реостатом R_n в модуле «Нагрузка», фиксировать показания U_d , I_d , U_n , I_n . Показания занести в таблицу, построить характеристики.

Выключить тумблеры $SA1$ и «Питание» в модулях «Модуль питания стенда» и «Источник вторичного электропитания» соответственно, а затем автомат $QF1$ «Модуля питания стенда».

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) предварительные расчеты и построения;
- в) принципиальную силовую схему установки;
- в) обработанные осциллограммы;
- г) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- д) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- е) выводы по работе:
 - пояснить влияние тока нагрузки I_n на вид осциллограмм на транзисторе в разомкнутой системе;
 - объяснить влияние коэффициента заполнения γ на энергетические характеристики ИВЭП в разомкнутой системе;
 - объяснить вид внешней характеристики ИВЭП в разомкнутой системе;
 - пояснить влияние напряжения U_d и тока нагрузки I_n на характеристики ИВЭП в замкнутой системе.

Контрольные вопросы

1. Назвать основные статические параметры стабилизаторов напряжения.
2. Назначение источника вторичного электропитания.
3. Какие требования предъявляются к ИВЭП?
4. Чем отличаются бестрансформаторные ИВЭП от централизованных?
5. Из каких элементов (блоков) состоят бестрансформаторные ИВЭП?
6. Перечислить основные схемы АИН, которые применяются в ИВЭП.
7. Как работает АИН с обратным включением диода?
8. Чем отличается АИН с прямым и обратным включением диода?
9. Какой вид имеет диаграмма тока транзистора в непрерывном, прерывистом и граничном режимах работы в схеме АИН с обратным включением диода?
10. Как снять внешние и регулировочные характеристики ИВЭП?
11. Зачем в ИВЭП введена обратная связь по напряжению?

Пронина Анна Константиновна

**СУДОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
И СИЛОВАЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ*

В авторской редакции

Изд. № 44/2024. Объем 5,5 п.л. Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 5,39.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»