

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы
«Трёхфазный управляемый выпрямитель»
по дисциплине «Энергетическая электроника»
для студентов специализации 171.01
«Промышленная электроника»

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,

Протокол № 2 от 25.06.2018.

Харьков
НТУ «ХПИ»
2018

Методические указания к выполнению лабораторной работы «**Трёхфазный управляемый выпрямитель**» по дисциплине «Энергетическая электроника» для студентов специализации 171.01 «Промышленная электроника» /Сост.: Г.Г. Жемеров, Д.С.Крылов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – 36 с. – Рус. яз.

Составители: Г.Г. Жемеров
 Д.С. Крылов

Рецензент В.В. Замаруев

Кафедра промышленной и биомедицинской электроники

ВСТУПЛЕНИЕ

Настоящими методическими указаниями рекомендуется пользоваться при выполнении лабораторной работы по дисциплинам «Энергетическая электроника» и «Преобразователи, ведомые сетью» при изучении работы трёхфазных схем управляемых выпрямителей на физическом макете преобразовательного оборудования, представляющем собой сварную конструкцию с вмонтированными в неё источником питания, измерительной аппаратурой, системой управления и индикации, а также контактными переключками, позволяющими собрать требуемую конфигурацию схемы.

Целью лабораторной работы является исследование электромагнитных процессов и характеристик трёхфазного управляемого выпрямителя (УВ) условно средней или большой мощности. В процессе лабораторной работы исследуются: формы выходного напряжения и сетевых токов, углы коммутации, регулировочные и внешние характеристики, пульсации выпрямленного тока, коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности УВ, а также искажения напряжения питающей сети, возникающие при работе УВ.

Лабораторный стенд позволяет легко устанавливать и изменять требуемые значения тока нагрузки, углов управления α УВ, а также изменять параметры преобразовательного трансформатора, нагрузки, соединительных кабелей, питающей сети.

Составители методических указаний стремились, чтобы ощущения и навыки, получаемые студентами при работе на стенде, были приближены к таковым при работе на физической модели УВ. Изучая работу управляемого выпрямителя на физическом макете, студент получает возможность лично ознакомиться с работой конкретного образца преобразовательной техники, получить практический опыт его эксплуатации, что, в конечном итоге, повысит конкурентоспособность будущего специалиста на рынке труда.

Перед выполнением лабораторной работы все студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности при работе с электроаппаратурой.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Исходные данные для выполнения лабораторной работы задаёт руководитель работы в виде конфигурации исследуемой схемы преобразователя, типа нагрузки, варианта соединения обмоток питающего трансформатора, параметров питающей сети, требуемого диапазона изменений токов нагрузки и углов управления α , режимов осциллографирования и количества снимаемых при исследовании осциллограмм, количества и типа характеристик, необходимых для дальнейшего построения.

Варианты таблиц исходных данных для исследования работы преобразователя с пассивной и двигательной нагрузкой приведены в Приложении А и Приложении Б соответственно.

2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

По указанию руководителя лабораторной работы необходимо выполнить все или часть следующих заданий:

1. Исследование формы выпрямленного напряжения u_d .
2. Исследование формы тока в вентильных обмотках и в фазах питающей сети.
3. Исследование формы тока и напряжения тиристора.
4. Исследование зависимости угла коммутации от угла управления и тока нагрузки.
5. Определение регулировочной характеристики УВ.
6. Исследование внешних характеристик.
7. Определение ограничительной характеристики.
8. Определение коэффициента мощности.
9. Определение коэффициента полезного действия.
10. Определение амплитуды переменной составляющей тока нагрузки.
11. Исследование влияния УВ на форму напряжения сети.

3. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Отчёт по лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально с соблюдением действующих стандартов оформления технической документации. Отчёт оформляется на листах бумаги формата А4, должен иметь титульный лист и быть скреплён в левом верхнем углу.

Отчёт должен содержать цель лабораторной работы, принципиальную электрическую схему исследованного преобразователя, нарисованную с использованием электротехнической линейки или с помощью ЭВМ, таблицы экспериментальных и расчётных данных, построенные по ним зависимости, комплект осциллограмм и выводы о проделанной работе.

Осциллограммы зарисовываются карандашом на листе миллиметровой бумаги с учётом масштаба, выбранного при осциллографировании, и располагаются одна под другой с чёткой временной синхронизацией. Все осциллограммы должны быть подписаны, рядом с каждой должен быть указан масштаб по осям X и Y .

Графические зависимости, построенные карандашом на бумаге или с помощью ЭВМ, должны быть подписаны, содержать проставленные точки, по которым они были построены. С учётом погрешности измерений, графические зависимости должны быть аппроксимированы в соответствии с теорией протекания исследуемых процессов в схеме.

В выводах о проделанной работе должны быть отмечены основные теоретические положения, которые были исследованы в ходе практического эксперимента, отражены совпадения или отличия работы схемы от теории её работы и указаны причины этого.

4. СТРУКТУРА СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд представляет собой сварную конструкцию в виде пульта (рис.1), на котором расположены две панели: вертикальная – приборная и горизонтальная – схемная.

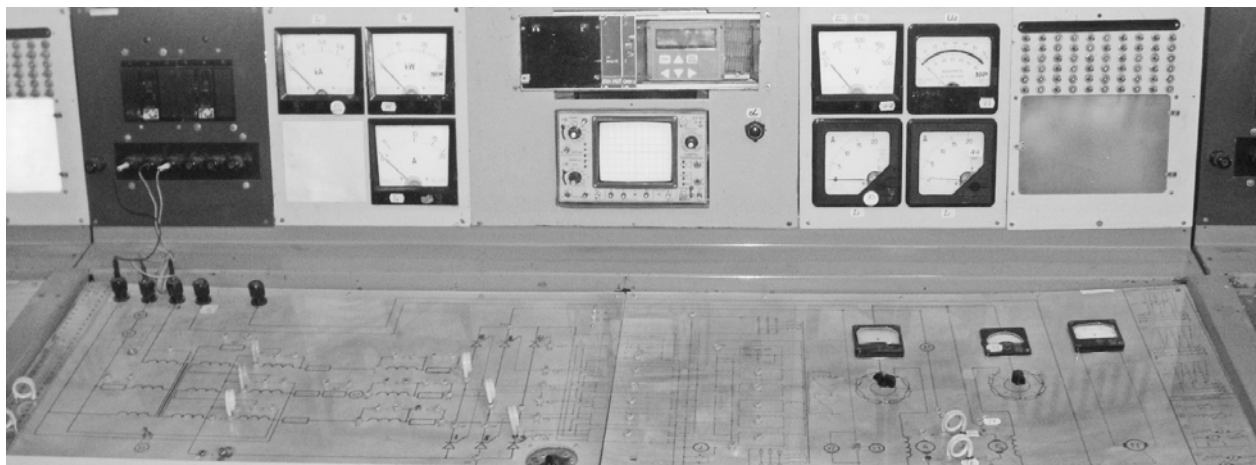


Рисунок 1 – Общий вид лабораторного стенда

На приборной панели расположены приборы измерительного комплекса и щит питания. На схемной панели изображена электрическая принципиальная схема установки, состоящая из преобразовательного трансформатора (ПТ) с секционированными вентиляльными обмотками, вентильного комплекта (ВК) и нагрузки с приборами, контролирующими работу машины постоянного тока. К схемной панели подсоединено все оборудование стенда, которое с помощью гнезд и вилок собирается в необходимую для исследования схему. Параметры оборудования стенда приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры оборудования стенда

Наименование оборудования	Параметры и краткая характеристика
Преобразовательный трансформатор	$U_{1ЛН} = 380 \text{ В};$ $\Delta: U_{2Н} = 164 \text{ В}$ $U_{К\%} = 6\%;$ $\wedge: U_{2Н} = 104 \text{ В}$ $I_{1Н} = 18 \text{ А};$ $\ast: U_{2Н} = 164 \text{ В}$
Вентильный комплект	Т 150 - 7 - 0,96
Дроссель (L_d)	$I_{дн} = 15 \text{ А}$
Реостат (R_d)	$U_H = 220 \text{ В};$ $I_{\max} = 24 \text{ А};$ $I_{\min} = 5 \text{ А};$ регулирование ступенчатое – 12 ступеней
Машина постоянного тока с независимым возбуждением	$U_{ЯН} = 220 \text{ В};$ $I_{ЯН} = 5 \text{ А};$ $L_z \approx 0,2 \text{ Гн};$ $n_H = 2850 \text{ об/мин};$ $R_{Я} \approx 1 \text{ Ом};$ $R_g = 220 \text{ Ом}$
Система управления	Диапазон изменения α от 10 до 121 эл.град.

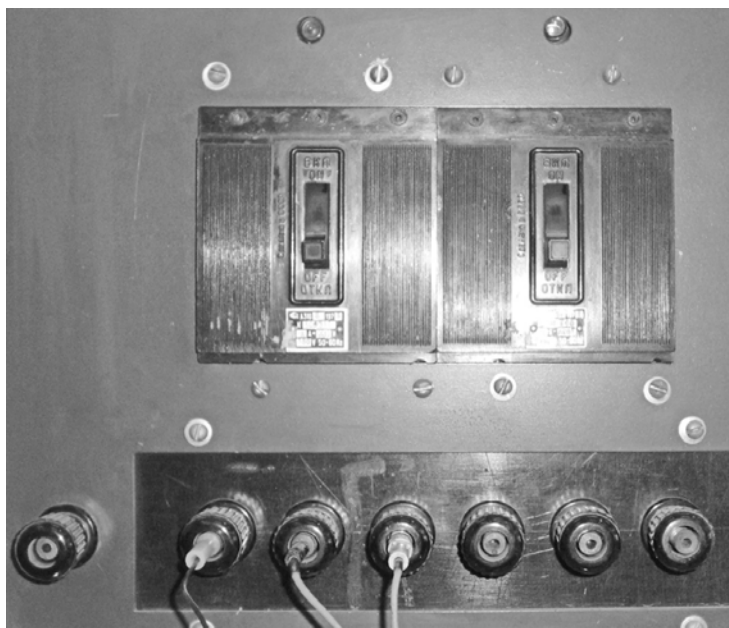


Рисунок 2 – Щит питания стенда

Трехфазное питающее напряжение от щита питания стенда (рис.2) через два автоматических выключателя подается с помощью гибких перемычек на вход силовой схемы установки (рис.3) – сетевую обмотку преобразовательного трансформатора и, при необходимости, на шину постоянного тока ДПТ.

Сетевая обмотка преобразовательного трансформатора собрана по схеме "звезда". По заданию преподавателя вентильная обмотка с помощью жестких перемычек может быть собрана в схемы "звезда", "треугольник" и "обратная звезда".

Возможные схемы соединения вентильных обмоток трансформатора изображены в крайней правой части схемной панели стенда.

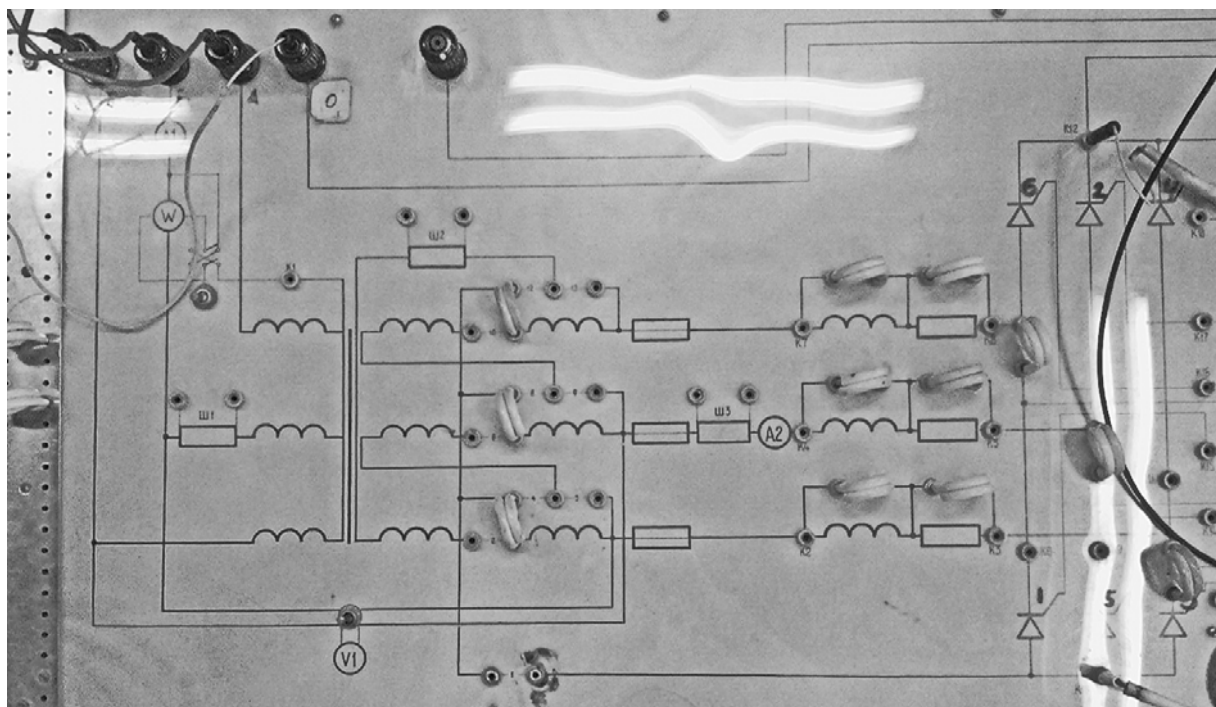


Рисунок 3 – Силовая схема преобразователя

Между вентильными обмотками преобразовательного трансформатора и вентильным комплектом могут быть дополнительно введены индуктивные и активные сопротивления для моделирования соединительных кабелей питающей сети.

Вентильная часть преобразователя состоит из шести тиристоров, собранных в две вентильных группы – катодную и анодную. Для работы схемы

в шестипульсном режиме их необходимо соединить жёсткими перемычками. Для работы в трёхпульсном режиме используется только катодная вентильная группа при условии обязательного подключения общего вывода к нулевой точке соединения вентильных обмоток преобразовательного трансформатора.

В зависимости от проводимого эксперимента по заданию преподавателя нагрузка стенда может иметь пассивный или активный характер (рис.4).

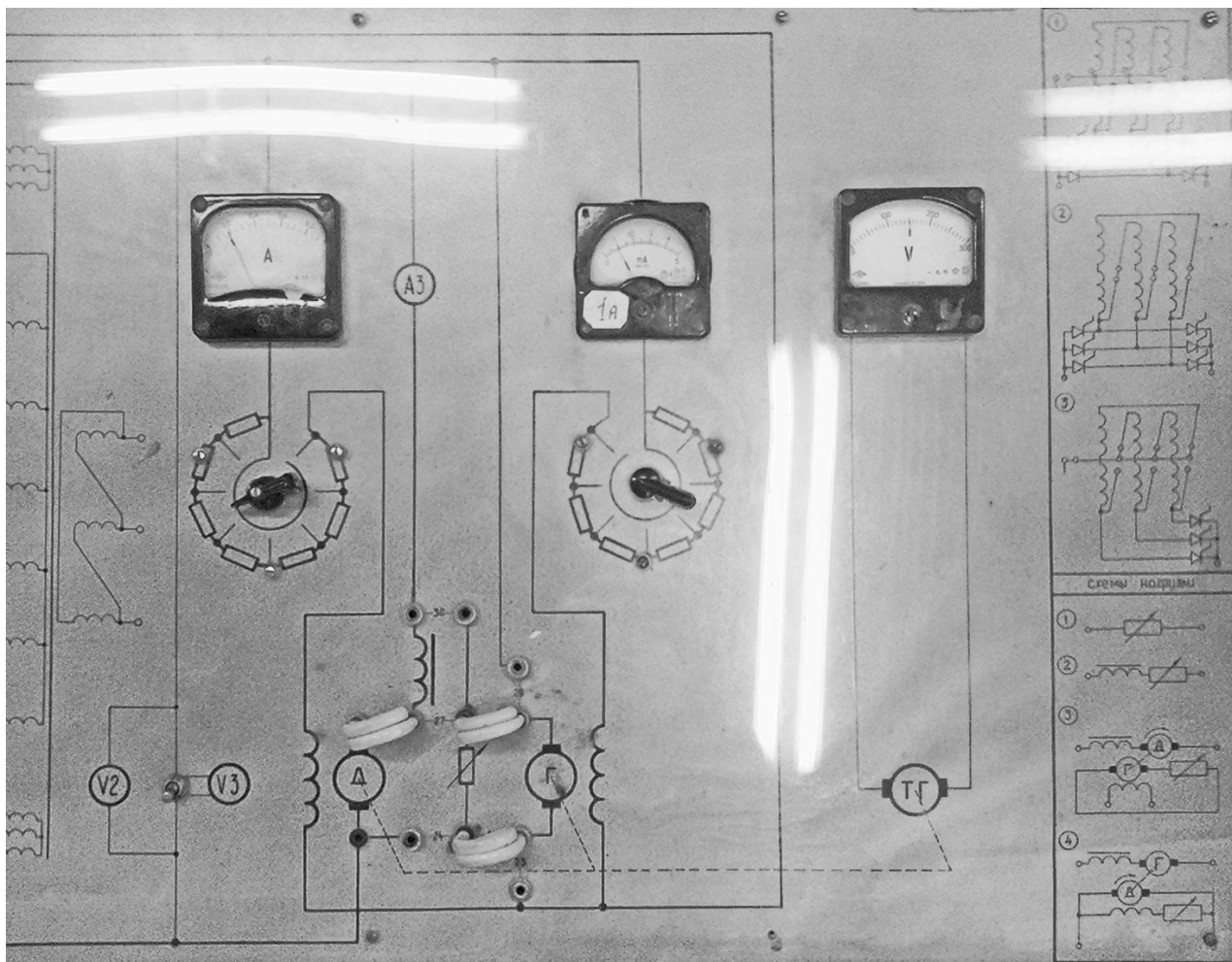


Рисунок 4 – Нагрузочная часть схемной панели

При пассивном характере, нагрузка может иметь либо чисто активный, либо активно-индуктивный характер. Выбор варианта осуществляется переключением жёстких перемычек.

При активном характере в качестве нагрузки подключается система, состоящая из двух машин постоянного тока, расположенных на общем валу. В зависимости от исследуемого режима работы схемы – выпрямительного или инверторного – одна из машин работает в двигательном, а другая в генераторном режиме. Для работы с активной нагрузкой необходимо дополнительное подключения шины постоянного тока от щита питания.

Возможные варианты подключения нагрузки изображены в крайней правой части схемной панели стенда.

Все характеристики лабораторного стенда могут быть исследованы с помощью панели приборов. Назначение и технические данные измерительных приборов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Тип прибора	Класс прибора	Пределы измерения	Измеряемая величина	Примечание
<i>PV1-2</i>	Э378	1.5	(0-500) В	$U_1(U_2)$	
<i>PV3</i>	М366	1.0	(0-300)В	$U_{d\alpha}$	имеется переключатель
<i>PA1</i>	Э378	1.5	(0-5) А	I_1	
<i>PA2</i>	Э378	1.5	(0-20) А	I_2	
<i>PA3</i>	М367	1.5	(0-20) А	I_d	
<i>PA4</i>	М367	1.5	(0-20) А	I_r	
<i>PW</i>	Д307	1.5	(0-1900) Вт	P_a	имеется переключатель
-	С1-93	3	-	-	2 луча

Приборы (рис.5) *PV1*, *PV2* (переключаются между собой с помощью тумблера) позволяют измерять линейное напряжение либо на первичных, либо на вторичных обмотках преобразовательного трансформатора.

В первичной обмотке подключен амперметр *PA1* для измерения действующего значения переменного тока на входе, *PA2* – в фазе вторичной об-

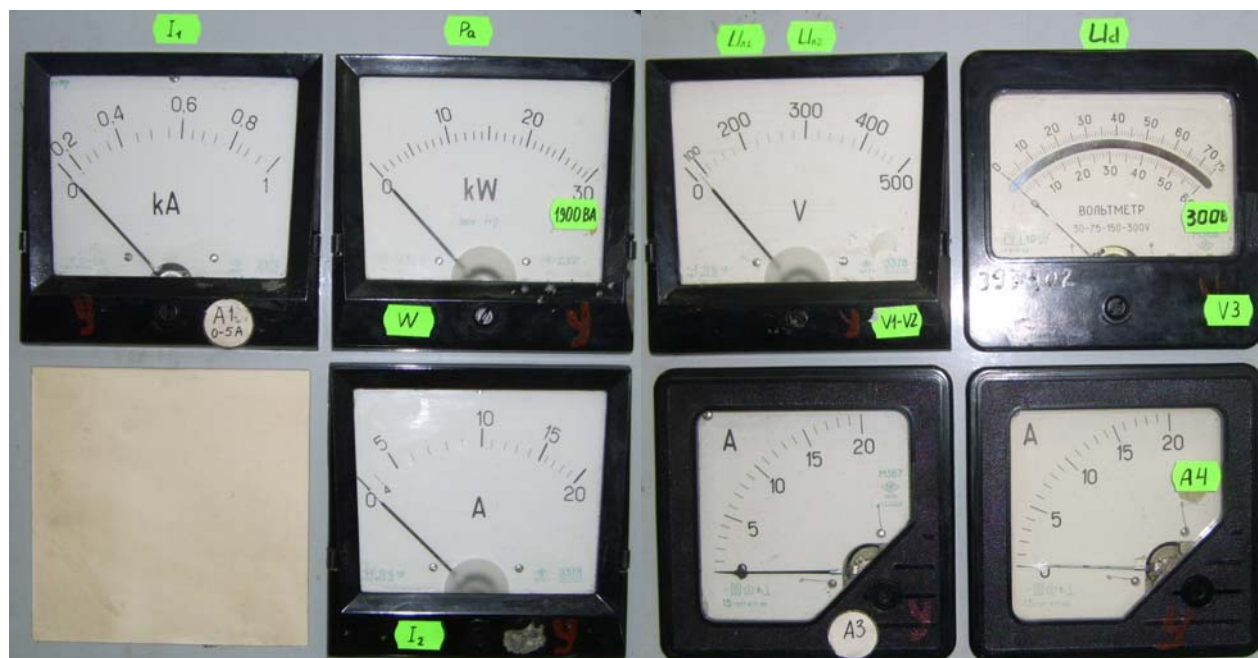


Рисунок 5 – Измерительные приборы лабораторного стенда

мотки. Ваттметр *PW* предназначен для измерения активной мощности фазы на входе схемы. Он позволяет измерять мощность не только в выпрямитель-

ном, но и генераторном режимах, для чего следует использовать переключатель непосредственно на схемной панели.

Амперметр *РА3* измеряет среднее значение тока пассивной или активной нагрузки на выходе выпрямителя. Амперметр *РА4* измеряет среднее значение тока генератора при исследовании активной нагрузки. Вольтметр *РВ3* измеряет среднее значение напряжения на выходе выпрямителя. Он имеет возможность переключения полярности измерения для работы преобразователя либо в выпрямительном, либо в инверторном режимах.

Также лабораторный стенд оборудован двухлучевым осциллографом типа С1-93 (рис.6) для снятия характеристик в различных точках работы схемы в зависимости от задания. Угол управления может быть замерен как с помощью осциллографа, так и отображён на панели индикации СИФУ.

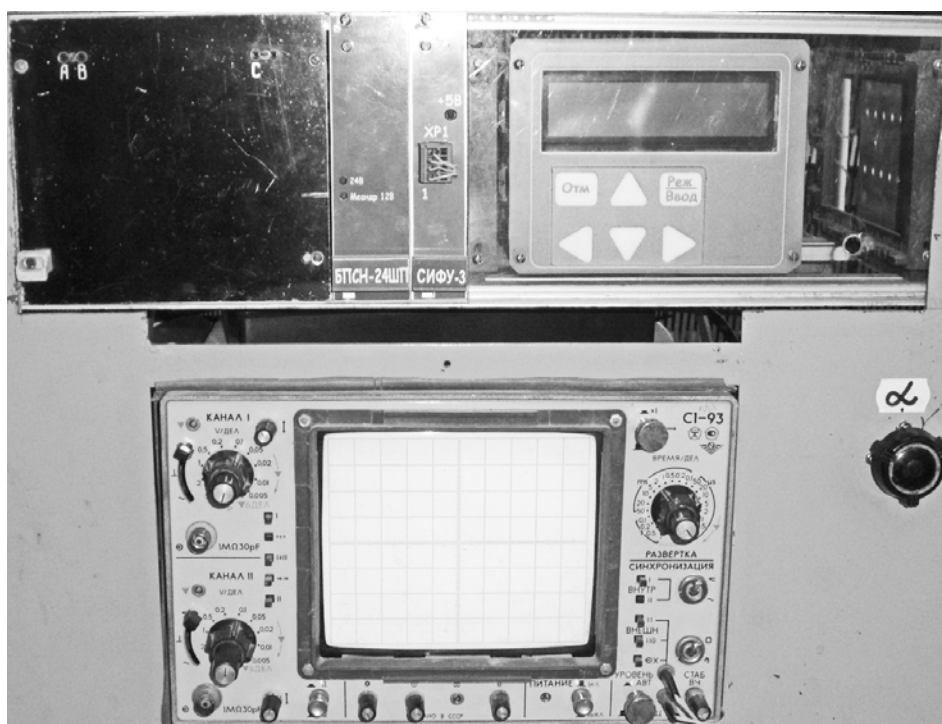


Рисунок 6 – Осциллограф и система управления выпрямителя

Осциллограммы токов схемы снимают с помощью шунтов, включенных в соответствующие цепи схемы.

Измерение углов коммутации производят по осциллограмме выпрямленного напряжения U_d , либо напряжений $U_{2л}$ или $U_{2ф}$.

5. ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1 Исследование пассивной нагрузки.

1. Замыкая с помощью перемычек и проводников нужные гнезда на обесточенном стенде, собрать питающую цепь, нагрузку и силовую схему преобразователя в соответствии с заданием преподавателя;
2. Подключить щуп осциллографа на выход вентильной части УВ;
3. Показать результат преподавателю для проверки;
4. Под контролем преподавателя включить правый автомат питания на силовом щите стенда, задействовав в работу СИФУ;
5. С помощью ручки управления выставить угол управления α равным 70-80 эл.град., контролируя его величину по жидкокристаллическому монитору СИФУ;
6. Включить питание осциллографа и проверить его калибровку;
7. Под контролем преподавателя включить левый автомат питания на силовом щите стенда, подав питающее напряжение на силовую часть схемы;
8. Убедиться в корректности работы собранной схемы по показаниям осциллографа и измерительных приборов;
9. Вращая ручку нагрузочного реостата по часовой стрелке до упора, выставить максимально возможное сопротивление нагрузки. Ток нагрузки, контролируемый амперметром *РАЗ*, должен быть при этом минимальным;
10. Плавно вращая ручку управления, выставить угол управления α равным 10 эл. град., контролируя ток нагрузки амперметром *РАЗ*. При изменении угла управления во всех режимах ток пассивной нагрузки не должен превышать 7А;
11. Для выставленного угла управления, изменяя сопротивление нагрузки выставить требуемое значения тока нагрузки;
12. Снять показания приборов стенда для выставленного угла управления и тока нагрузки и занести их в таблицу экспериментальных данных (см. приложение А);
13. Продолжить эксперимент и заполнить таблицу экспериментальных данных для других значений токов нагрузки и углов управления, последовательно выставляя для каждого из углов управления заданные значения токов нагрузки;
14. При проведении эксперимента изменять угол управления можно только после исследования работы схемы для всех заданных токов нагрузки и только в сторону увеличения;
15. После окончания экспериментов показать заполненную таблицу данных преподавателю для проверки результатов;
16. Выполнить пункт 9 данной программы исследований;
17. Аналогично пункту 10, выставить на стенде заданный преподавателем режим для проведения осциллографирования;
18. Под руководством преподавателя произвести осциллографирование в контрольных точках работы схемы. Перечень необходимых осциллограмм приведен в приложении А;

19. Выключить стенд, последовательно отключая левый и правый автоматы;

20. При оформлении отчёта о проведении лабораторной работы, заполнить расчетными данными две последние колонки таблицы экспериментальных данных и построить заданные преподавателем зависимости. Расчетные формулы и ориентировочный перечень зависимостей приведен в приложении А.

5.2 Исследование двигательной нагрузки.

а) исследование выпрямительного режима работы:

1. Замыкая с помощью перемычек и проводников нужные гнезда на обесточенном стенде, собрать питающую цепь и силовую схему преобразователя в соответствии с заданием преподавателя;

2. Соединить нулевой вывод источника на щите питания с выводом "0" лабораторного стенда для подключения шины постоянного тока;

3. Замкнуть перемычкой гнездо 26, включив нагрузочный реактор последовательно с двигателем постоянного тока;

4. Замкнуть перемычкой гнездо 25, подключив генератор постоянного тока к нагрузочному реостату;

5. Подключить щуп осциллографа на выход вентильной части УВ;

6. Показать результат преподавателю для проверки;

7. Под контролем преподавателя включить правый автомат питания на силовом щите стенда, задействовав в работу СИФУ;

8. С помощью ручки управления выставить угол управления α равным 70-80 эл.град., контролируя его величину по жидкокристаллическому монитору СИФУ;

9. Включить питание осциллографа и проверить его калибровку;

10. Вращая ручку нагрузочного реостата выставить его в среднее положение;

11. Под контролем преподавателя включить левый автомат питания на силовом щите стенда, подав питающее напряжение на силовую часть схемы;

12. Убедиться в корректности работы собранной схемы по показаниям осциллографа и измерительных приборов;

13. С помощью последовательно включенных в цепи возбуждения реостатов выставить токи возбуждения двигателя и генератора на уровне 200мА;

14. Убедиться, что токи якоря двигателя (РА3) и генератора (РА4) при этом не превышают 6А.

15. Под наблюдением преподавателя, плавно вращая ручку управления, выставить угол управления α равным 10 эл. град., контролируя токи якоря двигателя и генератора с помощью амперметров РА3 и РА4 соответственно. При изменении угла управления во всех режимах эти токи не должны превышать 6А. Установка требуемых значений якорных токов осуществляется изменением сопротивления нагрузочного реостата;

16. Снять показания приборов стенда для выставленного угла управления и тока якоря двигателя и занести их в таблицу экспериментальных данных (см. приложение Б);

17. Продолжить эксперимент и заполнить таблицу экспериментальных данных для других значений токов якоря двигателя и углов управления, последовательно выставляя для каждого из углов управления заданные значения токов якоря двигателя;

18. При проведении эксперимента изменять угол управления можно только после исследования работы схемы для всех заданных токов якоря двигателя и только в сторону увеличения;

19. Если при углах управления 10 или 70–80 эл. град. не получается выставить заданный ток якоря двигателя с помощью нагрузочного реостата, допускается его дополнительное регулирование изменением тока обмотки возбуждения двигателя. При этом важно, чтобы ток якоря двигателя и генератора оставались равны друг другу. Ток возбуждения генератора при этом должен оставаться на уровне 200 мА и изменять его не рекомендуется;

20. После окончания экспериментов показать заполненную таблицу данных преподавателю для проверки результатов;

21. Аналогично пункту 15, выставить на стенде заданный преподавателем режим работы схемы для проведения осциллографирования;

22. Под руководством преподавателя произвести осциллографирование двигательного режима работы в контрольных точках работы схемы. Перечень необходимых осциллограмм приведен в приложении Б;

23. По окончании осциллографирования, выставить угол управления в пределах 70–80 эл.град.;

24. Для перехода к исследованию работы схемы в инверторном режиме, перед выключением питания стенда установить ток обмотки возбуждения генератора на уровне 500 – 600 мА;

25. Выключить питание силовой части схемы, отключив левый автомат.

б) исследование инверторного режима работы:

26. Собрать схему работы выпрямителя в режиме инвертора, ведомого сетью. Для этого необходимо замкнуть перемычкой гнездо 23 и гибким проводником гнезда Г1 и Г2. При этом генератор подключается к шине постоянного тока и при данном эксперименте будет работать в двигательном режиме. Ток якоря генератора будет ограничиваться нагрузочным реостатом, включенным с ним последовательно. Перемычку 26 оставляем замкнутой.

27. Изменить полярность подключения нагрузочного вольтметра W_3 и ваттметра P_a , переключив соответствующие тумблеры на рабочей панели стенда.

28. Подключить щуп осциллографа на выход вентильной части УВ;

29. Показать результат преподавателю для проверки;

30. Под контролем преподавателя включить правый автомат питания на силовом щите стенда, задействовав в работу СИФУ;

31. С помощью ручки управления выставить угол управления α равным 120 эл.град., контролируя его величину по жидкокристаллическому монитору СИФУ;
32. Включить питание осциллографа и проверить его калибровку;
33. Вращая ручку нагрузочного реостата выставить его в среднее положение;
34. Под контролем преподавателя включить левый автомат питания на силовом щите стенда, подав питающее напряжение на силовую часть схемы;
35. Убедиться в корректности работы собранной схемы по показаниям осциллографа и измерительных приборов;
36. Убедиться, что токи якоря двигателя (РА3) и генератора (РА4) при этом не превышают 6А.
37. Провести эксперимент для инверторного режима работы и заполнить таблицу экспериментальных данных для значений углов управления от 120 до 90 эл град, последовательно выставляя для каждого из углов управления заданные значения токов якоря двигателя;
38. При проведении эксперимента выставлять заданные значения токов нагрузки возможно не только изменяя сопротивление нагрузочного реостата, но и токов обмоток возбуждения как двигателя, так и генератора. При этом важно, чтобы ток якоря двигателя и генератора оставались равны друг другу и во всех режимах не превышали 6А.
39. После окончания экспериментов показать заполненную таблицу данных преподавателю для проверки результатов;
40. Аналогично пункту 15, выставить на стенде заданный преподавателем режим работы схемы для проведения осциллографирования;
41. Под руководством преподавателя произвести осциллографирование инверторного режима работы в контрольных точках работы схемы. Перечень необходимых осциллограмм приведен в приложении Б;
42. Выключить стенд, последовательно отключая левый и правый автоматы;
43. При оформлении отчёта о проведении лабораторной работы, заполнить расчетными данными две последние колонки таблицы экспериментальных данных и построить заданные преподавателем зависимости. Расчетные формулы и ориентировочный перечень зависимостей приведен в приложении Б.

6. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ СХЕМ

6.1 Основные положения

Выпрямители предназначены для преобразования энергии источника переменного напряжения промышленной сети в энергию постоянного напряжения на нагрузке. *Управляемые выпрямители* имеют возможность регулирования среднего значения постоянного напряжения на нагрузке от номинального до нулевого.

В зависимости от типа источника переменного напряжения выпрямители могут быть однофазными и трёхфазными. В данной лабораторной работе исследуются выпрямители, питающиеся от трёхфазного источника переменного напряжения, их силовые схемы могут быть собраны по нулевой или мостовой схеме, реализуя, соответственно, трёхпульсную или шестипульсную схемы управляемого выпрямителя.

Пульсностью выпрямителя m называется количество пульсаций в кривой выпрямленного напряжения, формируемых схемой преобразователя за период напряжения питающей сети. Пульсность определяется *числом фаз* питающей сети и *тактностью* работы схемы. Нулевые схемы выпрямителей являются одноктактными, пропуская ток питающей сети в нагрузку в течении лишь одного полупериода напряжения питающей сети. Мостовые же схемы пропускают ток в нагрузку на обоих полупериодах напряжения питающей сети и являются двухтактными. Произведения числа фаз питающей сети выпрямителя на тактность используемой схемы определяет её пульсность.

6.2 Трёхфазные неуправляемые выпрямители

6.2.1 Трёхфазный трёхпульсный нулевой неуправляемый выпрямитель.

Простейшей схемой трёхфазного неуправляемого выпрямителя является нулевая схема, представленная на рис.7а.

Она *состоит из*: трёхфазного источника переменного напряжения; преобразовательного трансформатора T , вторичная (вентильная) обмотка которого соединяется в звезду или зигзаг с выводом нулевого провода; трёх диодов, включенных последовательно в каждую их фаз вентильной обмотки трансформатора и соединённых в общую точку катодами (или анодами); нагрузки, включенной между общей точкой соединения катодов (или анодов) вентиля и нулевым выводом вентильной обмотки преобразовательного трансформатора.

Работа схемы: Диоды, поочередно открываясь, прикладывают к нагрузке участки фазных напряжений вентильной обмотки преобразовательного трансформатора, формируя из них кривую выходного напряжения схемы (см. рис.7б, в).

Потенциалы анодов диодов в схеме определяет, изменяющееся по синусоидальному закону, трёхфазное переменное напряжение питающей сети, трансформированное в вентильную обмотку (см. рис.7б). Т.е. в любой мо-

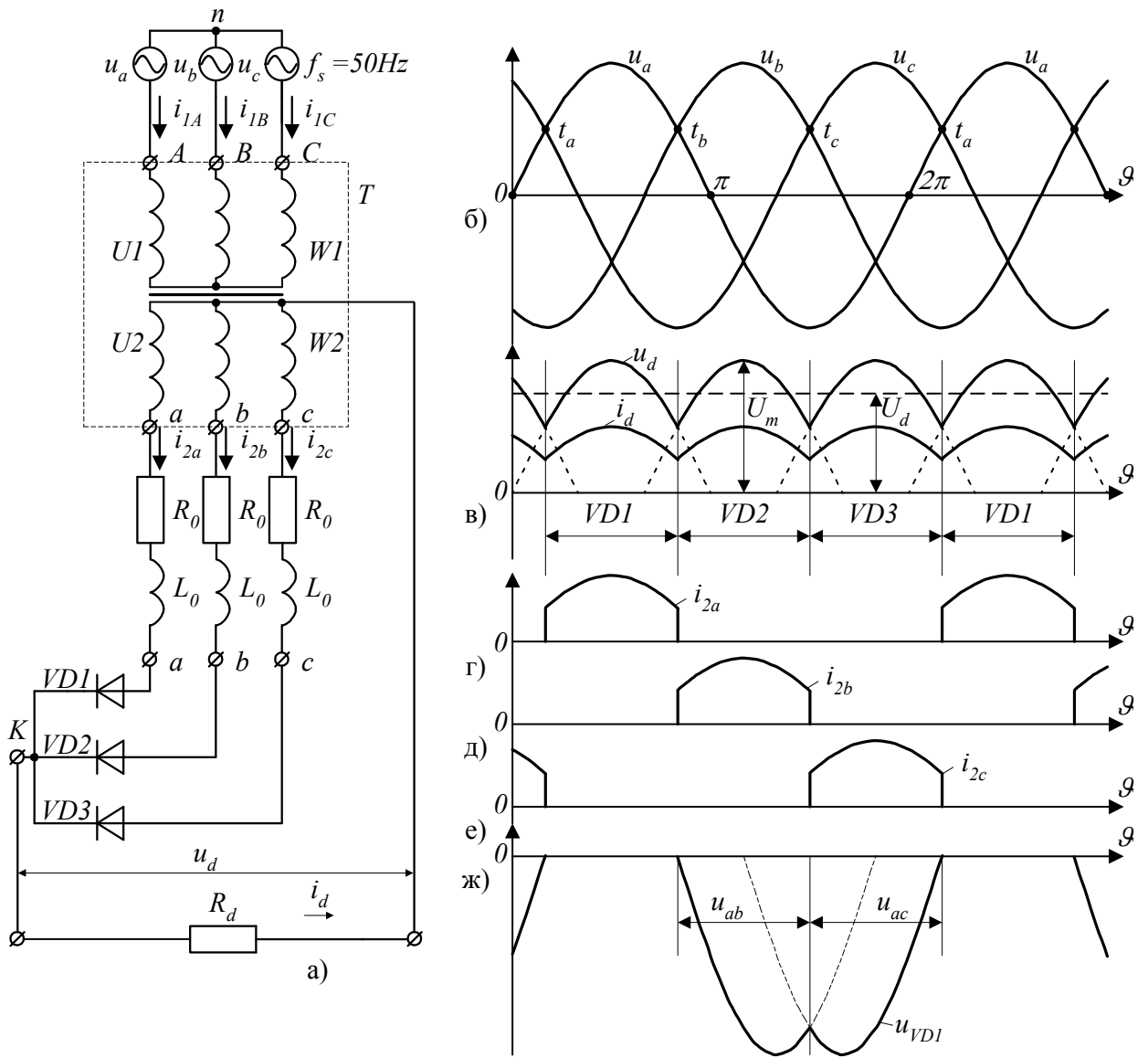


Рисунок 7 – Трёхфазный трёхпульсный нулевой неуправляемый выпрямитель

мент времени в схеме рис.1а будет открыт лишь один диод, потенциал анода которого будет больше, чем у двух других в соответствии с диаграммой распределения потенциалов трёхфазного переменного напряжения (см. рис.7б).

Переключение диодов будет происходить в так называемой **точке естественной коммутации** – моменте времени, когда потенциал анода диода становится больше потенциала его катода по условию работы схемы. Для трёхфазных схем это момент времени, когда потенциал соответствующей фазы станет больше, чем у двух других – моменте пересечения фазных синусоид в положительной (при соединении диодов катодами) полярности (см. рис.7б). При соединении диодов анодами это будут моменты пересечения фазных синусоид в отрицательно полярности.

Каждый диод будет открыт в течении трети периода напряжения питающей сети, т.е. 120 электрических градусов, и закроется с открытием очередного диода в схеме.

В случае чисто активной нагрузки её ток будет повторять по форме напряжение на ней, а ток фазы вентильной обмотки преобразовательного трансформатора формироваться из участка тока нагрузки на интервале открытого состояния диода. Таким образом, ток фаз вентильной обмотки преобразовательного трансформатора в схеме рис.1а однополярный и протекает на одном полупериоде напряжения питающей сети в течении 120 эл. град. Это вызывает эффект одностороннего подмагничивания трансформатора, для борьбы с которым вентильную обмотку, чаще всего, соединяют в зигзаг.

На аноде каждого вентиля всегда (см. рис.7а-в) действует напряжение соответствующей фазы, а к катоду будет приложено напряжение той из фаз, диод которой открыт в данный момент времени. За период повторяемости напряжение на диоде будет состоять из трёх участков длительностью в 120 эл. град.: интервалу напряжения, соответствующего падению на открытом диоде и двух участков линейного напряжения.

Средний ток диода будет равен трети среднего тока нагрузки.

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке схемы находится интегрированием кривой мгновенного выходного напряжения за интервал повторяемости и для схемы рис.7а будет равно:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} U_{2\phi}. \quad (1)$$

Схема трёхфазного трёхпульсного выпрямителя является простейшей трёхфазной схемой и обладает существенными недостатками: необходимость использования преобразовательного трансформатора с выводом нулевой точки вентильных обмоток; возможность одностороннего подмагничивания сердечника преобразовательного трансформатора однополярным током, протекающим в его вентильных обмотках; плохое использование трансформатора по напряжению.

6.2.2 Трёхфазный шестипульсный мостовой неуправляемый выпрямитель.

Недостатков, присущих трёхфазной нулевой схеме, практически лишена схема, приведенная на рис.8а.

Схема *состоит из*: трёхфазного источника переменного напряжения; преобразовательного трансформатора Т; трёхфазного мостового коммутатора, содержащего две трёхпульсные вентильные группы ВГк и ВГа с соединением трёх вентилях общими катодами а анодами соответственно; нагрузки, включенной между общими точками соединения катодов и анодов вентильных групп ВГк и ВГа.

Работа схемы: в каждой вентильной группе схема рис.8а диоды работают поочередно, переключаясь в соответствии с диаграммой фазных напряжений аналогично схеме рис.7а. При этом для ВГк отпирающими являются

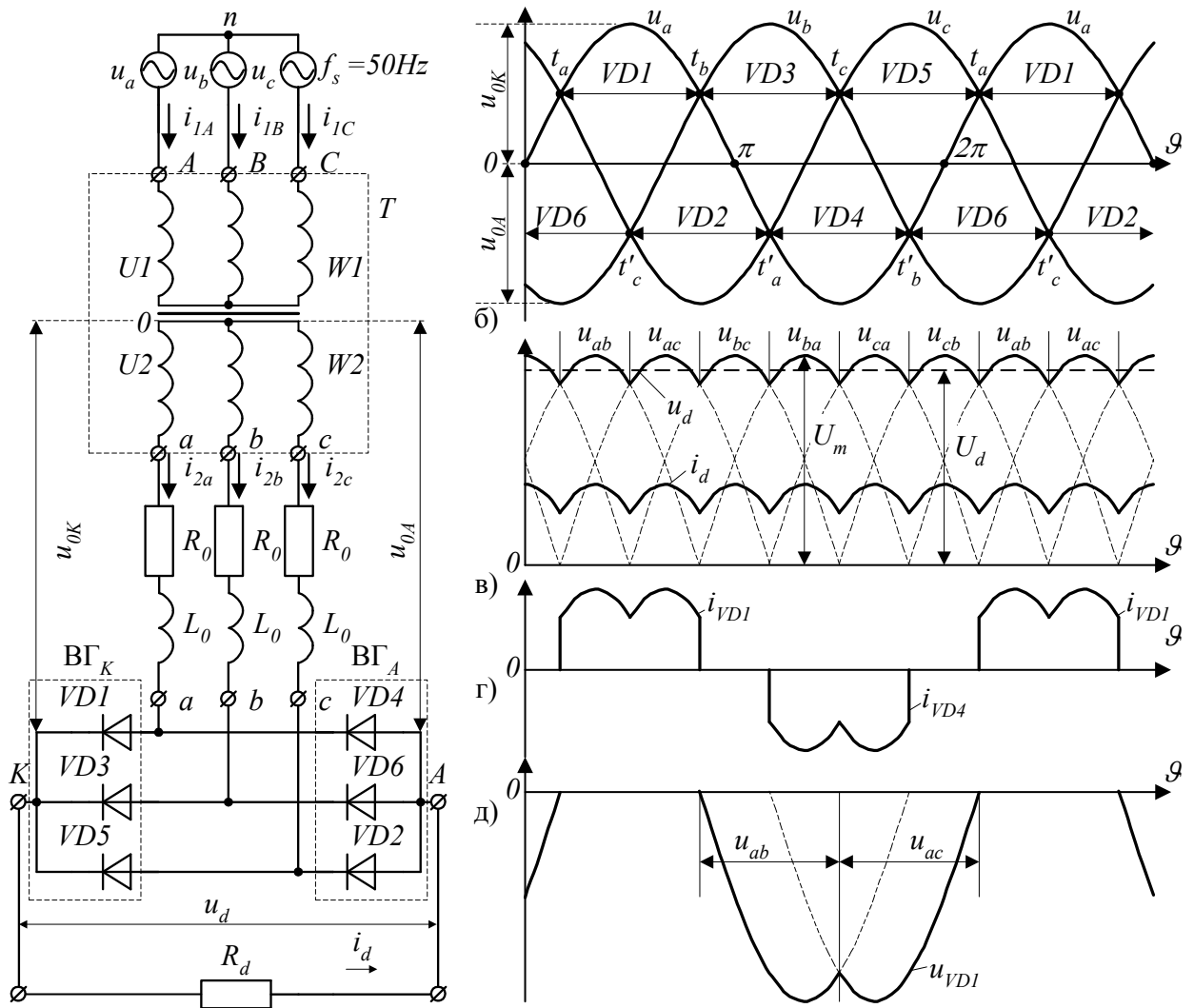


Рисунок 8 – Трёхфазный шестипульсный мостовой неуправляемый выпрямитель.

положительные полуволны фазных напряжений вентильных обмоток преобразовательного трансформатора, а для ВГк – отрицательные. Длительность открытого состояния диода также составляет 120 эл. град.. Напряжение на нагрузке формируется как разность выходных напряжений двух вентильных групп, т.е. линейными напряжениями. Ток нагрузки при этом протекает одновременно через две вентильные группы, т.е. через две фазы источника питания и два последовательно включенных диода – по одному из каждой вентильной группы. Ток каждой фазы источника формируется из участков тока нагрузки на интервалах проводимости диодов данной фазы: из ВГк – в положительном направлении, а из ВГа – в отрицательном и имеет, соответственно, переменный характер (см. рис.8г).

Обратное напряжение на диоде и его средний ток формируется аналогично схеме рис.7а.

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке схемы рис.8а равно

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2л}. \quad (2)$$

В сравнении со схемой нулевого выпрямителя, мостовая схема обладает рядом существенных преимуществ, а именно: хорошая пульсность $m=6$ снижает амплитуду пульсаций в выходном напряжении схемы; хорошее использование преобразовательного трансформатора за счёт формирования выходного напряжения в нагрузке из участков линейных напряжений; отсутствие подмагничивания трансформатора. Это привело к широкому распространению мостовых схем в современной промышленности.

6.3 Трёхфазные управляемые выпрямители

Предназначены для регулирования среднего выпрямленного напряжения на нагрузке в диапазоне от номинального до нулевого. При наличии источника энергии в цепи нагрузки, возможен режим передачи энергии из нагрузки в питающую сеть (*рекуперация*), сопровождающийся изменением полярности напряжения нагрузки без изменения направления протекания тока через неё.

Применяются, чаще всего, для регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока изменением подводимого к их якорю напряжения, или для задания и стабилизации требуемого напряжения на нагрузке при изменении напряжения питающей сети или сопротивления нагрузки.

Управляемые выпрямители получают заменой диодов в неуправляемых выпрямителях на тиристоры с отдельной системой импульсно-фазового регулирования, предназначенной для выдачи на них управляющих импульсов.

Принцип регулирования среднего выпрямленного напряжения на нагрузке в тиристорных схемах основан на изменении во времени моментов отпирания тиристоров относительно их *точек естественной коммутации*.

Точками естественной коммутации, как было сказано ранее, являются моменты времени, когда потенциал анода ключа становится больше потенциала его катода по условию работы схемы. Для диодных и тиристорных схем точки естественной коммутации совпадают. Однако, в отличие от диода, тиристор в этот момент не откроется вплоть до момента подачи на его управляющий электрод импульса напряжения управления, выдаваемого внешней системой импульсно-фазового управления с некоторой задержкой, называемой углом управления α .

Углом управления α называется интервал времени, отсчитываемый от точки естественной коммутации до момента подачи управляющего импульса на управляемый электрод тиристора. Угол управления выражают, чаще всего, в электрических градусах или радианах.

Изменяя угол управления α можно изменять интервалы времени, в течение которых нагрузка будет подключена к источнику переменного напряжения питающей сети и, соответственно, регулировать среднее за период по-

второяемости напряжение на нагрузке. Регулирование напряжения осуществляется от максимального, соответствующего работе диодного выпрямителя, до нулевого. Диапазон изменения угла управления α при этом зависит от используемой схемы коммутатора и характера нагрузки.

6.3.1 Трёхфазный трёхпульсный нулевой управляемый выпрямитель.

Схема рис.9а отличается от схемы рис.7а лишь наличием внешней системы импульсно-фазового управления (СИФУ), управляющей тиристорами, включенными вместо диодов.

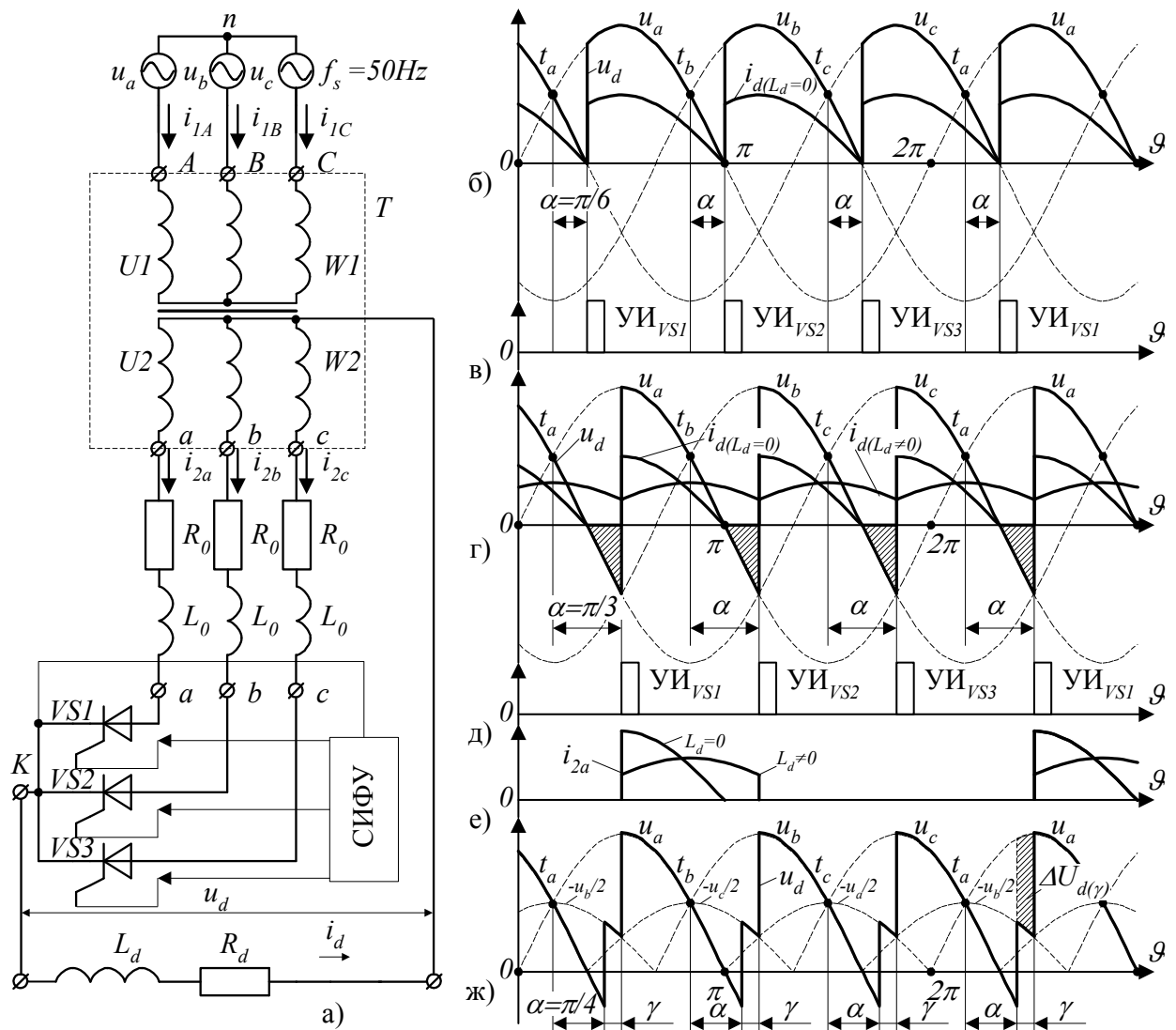


Рисунок 9 – Трёхфазный трёхпульсный нулевой управляемый выпрямитель.

Рассмотрим работу схемы для двух случаев – чисто активной нагрузки и активно индуктивной нагрузки.

Предположим, что индуктивность в цепи нагрузки схемы равна нулю и ток нагрузки повторяет по форме напряжение на ней. Обозначим моменты

естественной коммутации тиристоров в фазах a , b , и c точками t_a , t_b и t_c соответственно (см. рис.9б).

При подаче управляющего импульса на управляющий электрод тиристора $VS1$ с задержкой относительно t_a на угол α (см. рис.9б, в) он откроется, подключив к нагрузке потенциал фазы a . В момент времени t_b выключения $VS1$ не произойдет, так как управляющий импульс на $VS2$ пока не выдан и он выключен. $VS1$ пока будет открыт до тех пор, пока напряжение фазы a положительно и ток, протекающий через нагрузку и тиристор, больше нуля.

Если включить тиристор $VS2$ до момента естественного выключения $VS1$, т.е. в диапазоне изменения угла управления $0 \leq \alpha \leq \pi/6$, произойдет так называемая **коммутация** – процесс перехода тока нагрузки с одной фазы питающей сети на другую в результате переключения вентилей в схеме: так как к этому моменту напряжение фазы b уже больше напряжения фазы a , с открытием $VS2$ к $VS1$ приложится обратное напряжение, его ток спадет до нуля и он закроется. При индуктивности фазы питающей сети, стремящейся к нулю, процесс коммутации произойдет мгновенно и напряжение нагрузки будет формироваться напряжением фазы b (см. рис.9б) до момента следующей коммутации.

Таким образом, в работе схемы рис.9а можно выделить два режима:

1. $0 \leq \alpha \leq \pi/6$ – режим непрерывного тока нагрузки. Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке при этом находится по выражению

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha , \tag{3}$$

где U_{d0} – напряжение идеального холостого хода, определяемое для схемы рис.9а по выражению (1).

2. $\pi/6 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ – режим прерывистого тока, характеризующийся наличием безтоковых пауз в нагрузке. Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке в этом режиме находится по выражению

$$U_d = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} \left[1 + \sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha \right) \right]. \tag{4}$$

При достаточно большой индуктивности в цепи нагрузки, способной поддерживать непрерывный ток в ней во всем диапазоне регулирования, выключение отработавшего тиристора в схеме будет происходить лишь после включения очередного тиристора в следующей фазе. Длительность открытого состояния тиристоров при этом будет всегда составлять треть периода напряжения питающей сети, а среднее выпрямленное напряжение на нагрузке определяться выражением (3) для любого угла управления. При углах управления $\alpha \geq \pi/6$ в кривой выходного напряжения схемы начнут появляться участки отрицательного напряжения (см. рис.9г).

При ненулевой индуктивности фазы питающей сети коммутация тиристоров в схеме не будет происходить мгновенно, а будет занимать интервал времени, характеризующийся *углом коммутации* γ – *интервалом времени, в течении которого происходит перераспределение энергии, накопленной в индуктивности выходящей из работы фазы, во входящую*. На интервале коммутации γ будут одновременно открыты два тиристора и напряжение на нагрузке будет равно полусумме напряжений коммутирующих фаз.

Например, при коммутации тиристоров $VS1$ – $VS2$ (см. рис.9а, ж), между фазами a и b образуется коммутационный контур, где под действием линейного напряжения U_{ab} протекает коммутационный ток i_K . На интервале коммутации γ ток тиристора $VS1$ будет спадать от I_d до нуля, а ток тиристора $VS2$ будет нарастать от нуля до I_d . Напряжение на нагрузке при этом будет равно

$$u_{d(\gamma)} = \frac{u_a + u_b}{2} = -\frac{u_c}{2}. \quad (5)$$

Изменяющийся на интервале коммутации ток фазы вызовет на её индуктивности падение напряжения $\Delta U_{d(\gamma)}$ (см. рис.9ж), снижающее среднее выпрямленное напряжение на нагрузке. Величина $\Delta U_{d(\gamma)}$ зависит от среднего тока нагрузки I_d и угла управления α .

6.3.2 *Трёхфазный шестипульсный мостовой управляемый выпрямитель.*

Как и в нулевой схеме, схема мостового управляемого выпрямителя, приведенная на рис.10а, отличается от схемы рис.8а лишь наличием внешней системы импульсно-фазового управления (СИФУ), управляющей тиристорами, включенными вместо диодов.

Принцип работы схемы, формирование выходного напряжения и тока фазы, порядок открытия вентиля и формирования их тока и напряжения полностью аналогичен схеме рис.8а. Принцип фазового регулирования выходного напряжения вентильных групп ВГа и ВГк аналогичен принципу, описанному для схемы рис.9а, за исключением того, что импульсы управления тиристорами катодной вентильной группы формируются относительно моментов естественной коммутации t_a , t_b и t_c (см. рис.10б), а анодной – относительно t'_a , t'_b и t'_c .

В данной схеме, как и в нулевой, в зависимости от характера нагрузки, можно рассматривать два случая.

В случае чисто активной нагрузки в схеме рис.10а возможны режимы непрерывного и прерывистого тока нагрузки:

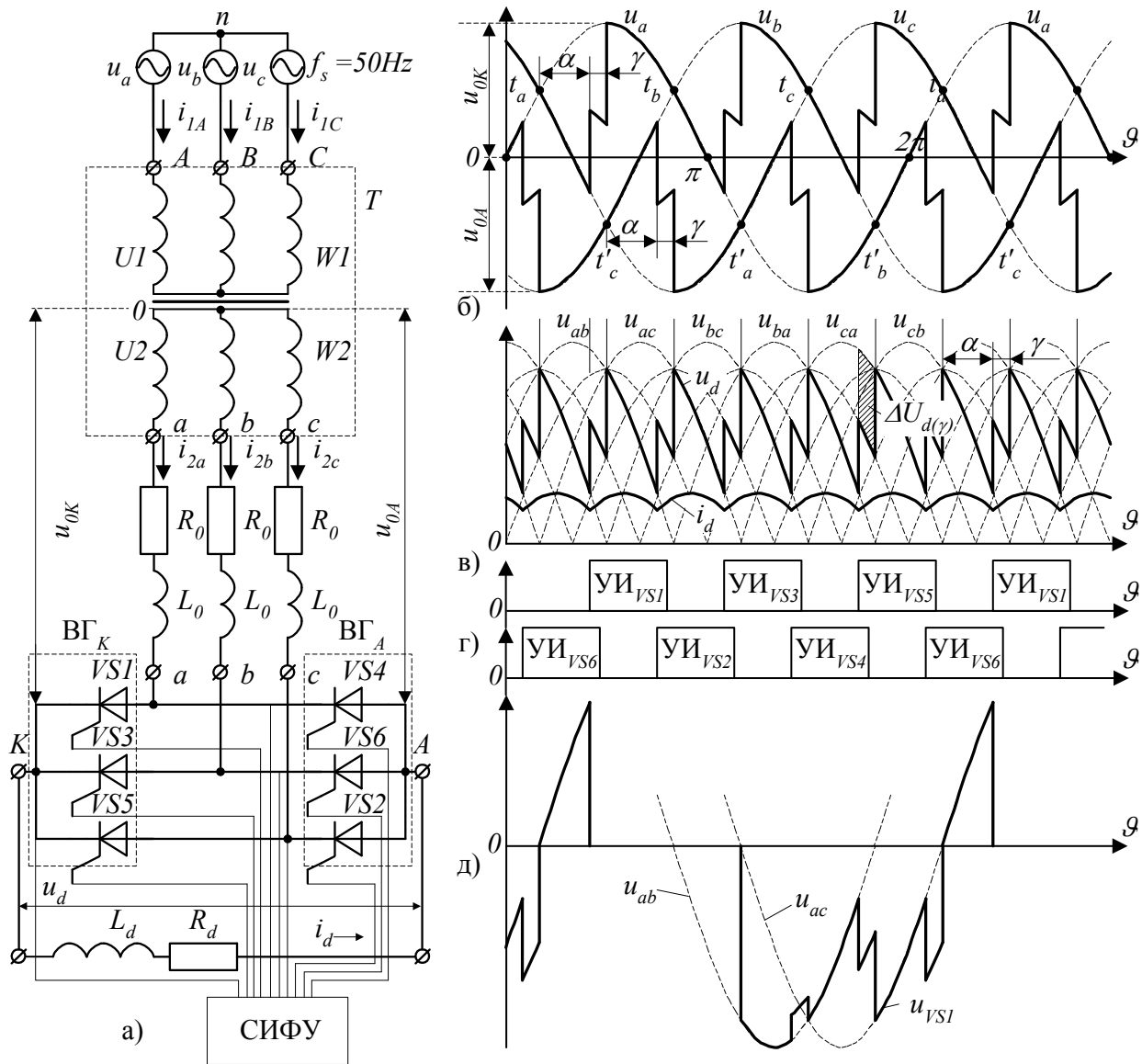


Рисунок 10 – Трёхфазный шестипульсный мостовой управляемый выпрямитель.

1. $0 \leq \alpha \leq \pi/3$ – режим непрерывного тока нагрузки. Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке при этом находится по выражению (3), в котором U_{d0} – напряжение идеального холостого хода, определяется уже по выражению (2).

2. $\pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3$ – режим прерывистого тока, характеризующийся наличием безтоковых пауз в нагрузке. Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке в этом режиме находится по выражению

$$U_d = U_{d0} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right]. \quad (6)$$

В режиме прерывистого тока для обеспечения одновременной работы тиристоров двух вентильных групп, управляющие импульсы должны иметь

длительность не менее 60 эл.град. для обеспечения повторного открытия тиристора, вышедшего из работы во время безтоковой паузы.

При достаточно большой индуктивности в цепи нагрузки, способной поддержать непрерывный ток в ней во всём диапазоне регулирования, выключение отработавшего тиристора в схеме будет происходить лишь после включения очередного тиристора в следующей фазе данной вентильной группы. Длительность открытого состояния тиристоров при этом будет всегда составлять 120 эл.град., а среднее выпрямленное напряжение на нагрузке определяться выражением (3) для любого угла управления в диапазоне $0 \leq \alpha \leq \pi/2$. При углах управления $\alpha \geq \pi/3$ в кривой выходного напряжения схемы начнут появляться участки отрицательного напряжения.

Регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя называется зависимость среднего выпрямленного напряжения на нагрузке U_d от угла управления α .

Для шестипульсного мостового управляемого выпрямителя, в зависимости от характера нагрузки, регулировочная характеристика будет определяться выражениями (3) и (6). Она представлена на рис.11.

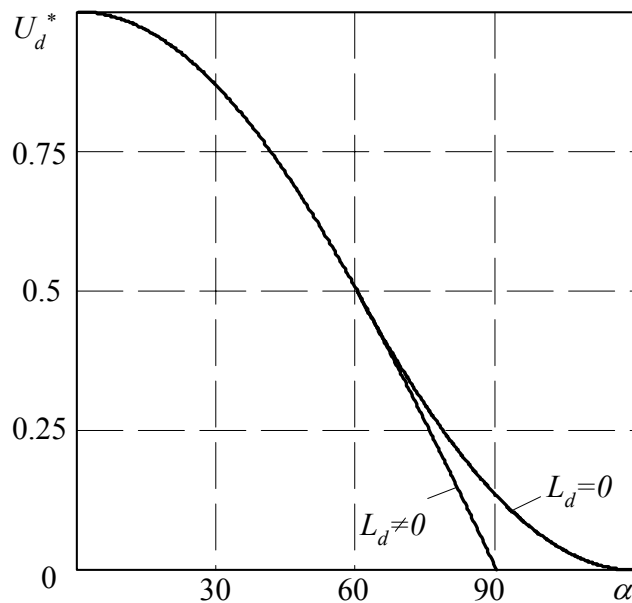


Рисунок 11 – Регулировочная характеристика.

На практике индуктивность в цепи нагрузки имеет конечную величину и накопленной в ней энергии может быть недостаточно для поддержания неизменного тока в нагрузке во всём диапазоне изменения угла управления α . При конечном значении индуктивности нагрузки, ток нагрузки пульсирует с некоторой амплитудой вокруг своего среднего значения. С ростом угла управления возрастает и амплитуда пульсаций тока нагрузки и при некотором граничном угле управления $\alpha = \alpha_{гр}$ пульсации достигают нулевого значения тока – возникает так называемый *гранично-непрерывный режим работы схемы*.

Граничное значение угла управления $\alpha_{гр}$ определяется постоянной времени цепи протекания нагрузки.

При углах управления, больших граничного, ток нагрузки становится прерывистым, с безтоковыми паузами. При этом среднее выпрямленное напряжение на нагрузке становится больше, чем рассчитанное по (3), за счёт уменьшения участков обратных выбросов с кривой мгновенного напряжения на нагрузке. В результате регулировочная характеристика приближается к характеристике для чисто активной нагрузки (см. рис.11).

При ненулевой индуктивности фазы питающей сети переключение тиристоров в каждой вентильной группе будет приводить к коммутационным процессам, аналогичным рассмотренным для схемы рис.9а. Однако в мостовой схеме рис.10а, напряжение на нагрузке в интервале коммутации при этом будет определяться разностью потенциалов на выходах коммутирующей вентильной группы и вентильной группы, остающейся в работе.

Так, например, при коммутации тиристоров $V_{S1} - V_{S3}$ (см. рис.10а, в), напряжение на выходе ВГк будет равно $(u_a + u_b)/2$, а на выходе ВГа – u_c . То есть на интервале коммутации γ

$$u_{d(\gamma)} = u_H = \frac{u_a + u_b}{2} - u_c = \frac{u_a - u_c + u_b - u_c}{2} = \frac{u_{ac} + u_{bc}}{2}, \quad (7)$$

т.е. мгновенное значение напряжения на нагрузке на интервале коммутации будет равно **полусумме коммутирующих линейных напряжений** (см. рис.10в).

Получить зависимость угла коммутации γ от угла управления и среднего тока нагрузки можно, рассмотрев коммутационный контур перераспределения энергии между индуктивностями фаз питающей сети под действием линейного напряжения коммутации (см. рис.10а).

Например, при коммутации тиристоров $V_{S1} - V_{S3}$ линейное напряжение коммутационного контура связано с током контура коммутации как

$$u_{ba} = 2X_k \frac{di_k}{d\vartheta}, \quad (8)$$

где X_k – суммарное индуктивное сопротивление коммутирующей фазы.

$$X_k = X_0 + X'_T, \quad (9)$$

где X_0 – индуктивное сопротивление фазы питающей сети;

X'_T – суммарное приведенное сопротивление фазы преобразовательного трансформатора;

i_k – мгновенное значение тока в контуре коммутации, изменяющегося от 0 до I_d .

С другой стороны, u_{ba} изменяется во времени по синусоидальному закону как

$$u_{ba} = E_{am} \sin \vartheta, \quad (10)$$

где E_{am} – амплитуда анодного напряжения тиристора равная, для схемы рис.4а, амплитуде линейного напряжения вентильной обмотки преобразовательного трансформатора.

Приравняв (9) и (11) и проинтегрировав обе части уравнения по изменяющейся величине получим:

$$\frac{6}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} E_{am} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{6}{2\pi} \int_0^{I_d} 2X_k di_k,$$

т.е.

$$E_{am} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] = 2X_k I_d. \quad (11)$$

Параметр X_k трудно определить практически. Но его можно выразить через *относительное суммарное напряжение короткого замыкания преобразовательного трансформатора* $e_{k\Sigma}$ как

$$X_k = \frac{E_{am}}{2I_{dH}} e_{k\Sigma}, \quad (12)$$

где I_{dH} – номинальное значение среднего тока нагрузки схемы.

Подставив (12) в (11) получим выражение, определяющее зависимость между углом коммутации, углом управления и током нагрузки

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_d}{I_{dH}} e_{k\Sigma}. \quad (13)$$

Пример зависимости угла коммутации от угла управления при фиксированном значении среднего тока нагрузки приведен на рис.12.

Внешней характеристикой управляемого выпрямителя называется *зависимость среднего выпрямленного напряжения на нагрузке U_d от среднего тока нагрузки I_d при фиксированных углах управления α .*

В мощных управляемых выпрямителях снижение среднего выпрямленного напряжения с ростом тока нагрузки обуславливается, прежде всего, коммутационными потерями напряжения на индуктивностях фазы питающей сети.

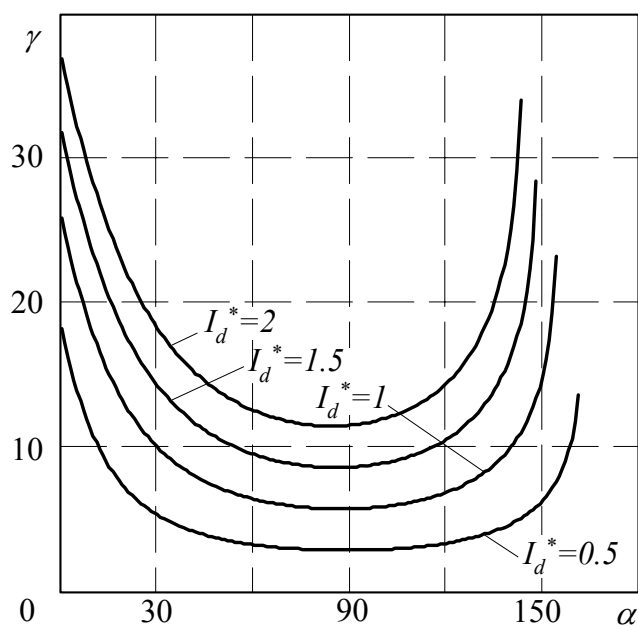


Рисунок 12 – Зависимость угла коммутации от угла управления.

Из (13) видно, что угол коммутации увеличивается с ростом тока нагрузки. То есть, с ростом тока нагрузки увеличивается коммутационное падение напряжения $\Delta U_{d(\gamma)}$ (см. рис.10в), вычитающееся из мгновенного напряжения нагрузки.

Найдём величину $\Delta U_{d(\gamma)}$ для управляемого выпрямителя, работающего в режиме непрерывного тока.

Мгновенное коммутационное падение напряжение фазы определяется выражением

$$u_{d(\gamma)} = X_{\kappa} \frac{di_{\kappa}}{d\vartheta}. \quad (14)$$

Его среднее за период повторяемости значение найдём интегрированием, как

$$\Delta U_{d(\gamma)} = \frac{m}{2\pi} \int_0^{I_d} X_{\kappa} di_{\kappa} = \frac{m}{2\pi} X_{\kappa} I_d, \quad (15)$$

где m – пульсность схемы управляемого выпрямителя.

Среднее значение выпрямленного напряжения в режиме непрерывного тока найдём как

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_{d(\gamma)} = U_{d0} \cos \alpha - \frac{m}{2\pi} X_{\kappa} I_d, \quad (16)$$

или в относительных единицах для шестипульсного мостового управляемого выпрямителя с учётом (12) получим

$$U_d^* = \frac{U_d}{U_{d0}} = \cos \alpha - \frac{1}{2} \frac{I_d}{I_{dH}} e_{\kappa \Sigma}. \quad (17)$$

Из (16)–(17) видно, что при фиксированном значении угла управления α , внешняя характеристика представляет собой семейство прямых линий, параллельных друг другу, с наклоном, определяемым коммутационным падением напряжения в фазе источника питания схемы.

Пример семейства внешних характеристик шестипульсного мостового управляемого выпрямителя, построенных в относительных единицах, приведен на рис.13.

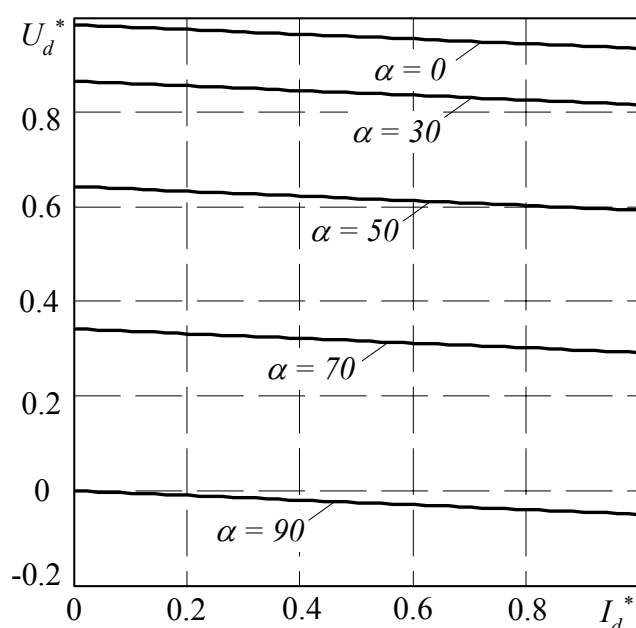


Рисунок 13 – Семейство внешних характеристик.

7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Объясните работу исследованной схемы в выпрямительном режиме.
2. Объясните работу исследованной схемы в инверторном режиме.
3. Как влияет характер нагрузки на работу схемы?
4. Объясните влияние индуктивного сопротивления фазы питающей сети на работу схемы.
5. Объясните потребление реактивной мощности преобразователем.
6. Каковы возможные причины опрокидывания преобразователя в инверторном режиме работы?
7. Опишите порядок включения схемы в инверторный режим.

8. Какие требования предъявляются к измерительным приборам при проведении экспериментальных исследований преобразователя?
9. От чего зависят энергетические показатели преобразователя?
10. Каковы причины коммутации вентилей в схеме?
11. Постройте и объясните форму тока вентильной обмотки исследованного преобразователя.
12. Постройте и объясните форму напряжения вентильной обмотки преобразовательного трансформатора.
13. Что такое режим прерывистого тока вентильного преобразователя и каковы условия его возникновения?
14. Имеет ли преобразовательный трансформатор в исследованной схеме поток вынужденного намагничивания и чем вызываются эти потоки?
15. Что такое коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения и от чего он зависит?
16. Объясните ход внешней характеристики – $U_d = f(I_d)_{\alpha=Const}$.
17. Объясните ход регулировочной характеристики – $U_d = f(\alpha)_{I_d=Const}$.
18. Объясните зависимость угла коммутации от угла управления при постоянном токе нагрузки – $\gamma = f(\alpha)_{I_d=Const}$.
19. Объясните зависимость угла коммутации от тока нагрузки при постоянном угле управления – $\gamma = f(I_d)_{\alpha=Const}$.
20. Объясните зависимость коэффициента мощности от угла управления при постоянном токе нагрузки – $K_m = f(\alpha)_{I_d=Const}$.
21. Объясните зависимость коэффициента мощности от тока нагрузки при постоянном угле управления – $K_m = f(I_d)_{\alpha=Const}$.
22. Объясните зависимость КПД преобразователя от угла управления при постоянном токе нагрузки – $\eta = f(\alpha)_{I_d=Const}$.
23. Объясните зависимость КПД преобразователя от тока нагрузки при постоянном угле управления – $\eta = f(I_d)_{\alpha=Const}$.
24. Какие требования предъявляются к системе управления преобразователя в выпрямительном и инверторном режимах работы?
25. Какие требования предъявляются к системе управления преобразователя в режимах непрерывного и прерывистого токов нагрузки?
26. Каков гармонический состав сетевого тока исследованного преобразователя?
27. Каков гармонический состав выпрямленного напряжения исследованного преобразователя.
28. Постройте и объясните форму обратного напряжения вентиля исследованного преобразователя.
29. Какими показателями обычно характеризуются исследуемые преобразователи?
30. Что такое напряжение идеального холостого хода управляемого выпрямителя и чему оно равно в исследуемой схеме?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по выполнению курсового проекта "Расчет многопульсных управляемых выпрямителей" по дисциплине "Преобразователи, ведомые сетью" и "Преобразователи для электропривода". / Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов. – Харьков.: НТУ"ХПИ", 2009. – 52с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М.: Высш. шк., 1982. – 496с.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
4. Руденко В.С. Основы преобразовательной техники / В.С. Руденко, В.И. Сенько, Н.М. Чиженко – Высшая школа, 1980. – 424 с.
5. Semikron. Innovation + Service. Semikron International. Germany, 1997..
6. Шавьолкін О.О. Енергетична електроніка: навчальний посібник / О.О. Шавьолкін. – К. :КНУТД, 2017. – 396 с.
7. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power Electronics. Converters, Application and Design. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1995. – 802 p.
8. Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод / В.П. Шипилло/ – М.: Энергия, 1969. – 400с.
9. Маевский О.А. Энергетические показатели электроэнергии вентильных преобразователей / О.А. Маевский – М.: Энергия, 1968, – 304 с.
10. Горбачев Г.Н. Промышленная электроника / Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин; под ред. В.А. Лабунцова.– М.: Энергоатомиздат, 1988.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Программа исследования характеристик управляемого выпрямителя с пассивной нагрузкой

Нагрузка:			Сеть:			Схема:		
α , эл.град.	I_d, A	U_d, V	γ , эл.град.	I_1, A	U_1, V	P_a, W	η	K_m
10	3							
	5							
	7							
20	3							
	5							
	7							
30	3							
	5							
	7							
40	3							
	5							
	7							
50	3							
	5							
	7							
60	3							
	5							
	7							
70	3							
	5							
	7							
80	3							
	5							
	7							

где:

$$K_m = \frac{3P_a}{S_1} = \frac{3P_a}{\sqrt{3}U_1I_1} \text{ – коэффициент мощности преобразователя;}$$

$$\eta = \frac{P_d}{3P_a} = \frac{U_dI_d}{3P_a} \text{ – коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя.}$$

По полученным данным **построить** следующие зависимости:

1. $\gamma = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – зависимость угла коммутации от угла управления при постоянном токе нагрузки;
2. $\gamma = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – зависимость угла коммутации от тока нагрузки при постоянном угле управления;
3. $U_d = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – регулировочная характеристика;
4. $U_d = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – внешняя характеристика;
5. $K_m = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – зависимость коэффициента мощности от угла управления при постоянном токе нагрузки;
6. $K_m = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – зависимость коэффициента мощности от тока нагрузки при постоянном угле управления;
7. $\eta = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – зависимость КПД преобразователя от угла управления при постоянном токе нагрузки;
8. $\eta = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – зависимость КПД преобразователя от тока нагрузки при постоянном угле управления.

При проведении эксперимента **снять осциллограммы:**

1. Напряжения и тока нагрузки;
2. Напряжения и тока вентиля;
3. Напряжения и тока фазы вентильной обмотки трансформатора;
4. Напряжения и тока фазы сетевой обмотки трансформатора;
5. Напряжений анодной и катодной вентильных групп.

Приложение Б – Программа исследования характеристик управляемого выпрямителя с двигательной нагрузкой

Нагрузка:			Сеть:			Схема:		
α , эл.град.	I_d, A	U_d, V	γ , эл.град.	I_1, A	U_1, V	P_a, W	η	K_m
10	2							
	4							
	6							
20	2							
	4							
	6							
30	2							
	4							
	6							
40	2							
	4							
	6							
50	2							
	4							
	6							
60	2							
	4							
	6							
70	2							
	4							
	6							
80	2							
	4							
	6							
90	2							
	4							
	6							
100	2							
	4							
	6							
110	2							
	4							
	6							
120	2							
	4							
	6							

где:

$$K_m = \frac{3P_a}{S_1} = \frac{3P_a}{\sqrt{3}U_1 I_1} - \text{коэффициент мощности преобразователя;}$$

$$\eta = \frac{P_d}{3P_a} = \frac{U_d I_d}{3P_a} - \text{коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя.}$$

По полученным данным **построить** следующие **зависимости**:

1. $\gamma = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – зависимость угла коммутации от угла управления при постоянном токе нагрузки;
2. $\gamma = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – зависимость угла коммутации от тока нагрузки при постоянном угле управления;
3. $U_d = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – регулировочная характеристика;
4. $U_d = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – внешняя характеристика;
5. $K_m = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – зависимость коэффициента мощности от угла управления при постоянном токе нагрузки;
6. $K_m = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – зависимость коэффициента мощности от тока нагрузки при постоянном угле управления;
7. $\eta = f(\alpha)_{I_d=Const}$ – зависимость КПД преобразователя от угла управления при постоянном токе нагрузки;
8. $\eta = f(I_d)_{\alpha=Const}$ – зависимость КПД преобразователя от тока нагрузки при постоянном угле управления.

При проведении эксперимента **снять осциллограммы**:

1. Напряжения и тока нагрузки;
2. Напряжения и тока вентиля;
3. Напряжения и тока фазы вентильной обмотки трансформатора;
4. Напряжения и тока фазы сетевой обмотки трансформатора;
5. Напряжений анодной и катодной вентильных групп.

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ.....	3
1. Исходные данные для выполнения лабораторной работы	3
2 Задание на выполнение лабораторной работы	4
3. Оформление результатов лабораторной работы.....	4
4. Структура силовой части лабораторного стенда	5
5. Программа проведения эксперимента.....	10
5.1. Исследование пассивной нагрузки.....	10
5.2 Исследование двигательной нагрузки.....	11
6. Теоретическое обоснование работы схем	14
6.1 Основные положения.....	14
6.2 Трёхфазные неуправляемые выпрямители.....	14
6.2.1 Трёхфазный трёхпульсный нулевой неуправляемый выпрямитель.....	14
6.2.2 Трёхфазный шестипульсный мостовой неуправляемый выпрямитель.....	16
6.3 Трёхфазные управляемые выпрямители.....	18
6.3.1 Трёхфазный трёхпульсный нулевой управляемый выпрямитель.....	19
6.3.2 Трёхфазный шестипульсный мостовой управляемый выпрямитель.....	21
7. Вопросы для самопроверки	27
Список литературы.....	29
Приложение А. Программа исследования характеристик управляемого выпрямителя с пассивной нагрузкой.....	30
Приложение Б. Программа исследования характеристик управляемого выпрямителя с двигательной нагрузкой.....	32

Навчальне видання

**Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
«Трифазний керований випрямляч»
по дисципліні «Енергетична електроніка»
для студентів спеціалізації 171.01
«Промислова електроніка»**

Російською мовою

Укладачі ЖЕМЕРОВ Георгій Георгійович
 КРИЛОВ Денис Сергійович

В авторській редакції

Відповідальний за випуск Є.І. Сокол
Роботу рекомендував до друку В. В. Воїнов

В авторській редакції

План 2018, поз. 187
Підп. до друку 10.07.2018г. Формат 60x84 1/16. Папір офсет. №2.
Друк – ризографія. Гарнітура – Times New Roman.
Ум. друк. арк. 2.0 Тираж 100 прим.
Зам. № 218 . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ"ХПІ", 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009р.
