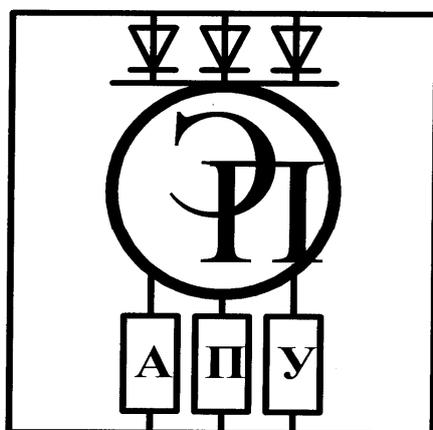


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности  
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов  
и производств» очной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 621.314  
ББК 31.264.5  
С36

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «22» декабря 2025 г.,  
протокол № 5

Составители: ст. преподаватель Г. В. Бочкарев;  
ст. преподаватель В. А. Лапицкий

Рецензент канд. техн. наук С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Силовая преобразовательная техника».

Учебное издание

## СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2026

## Содержание

1 Содержание отчета.....	4
2 Графическая часть отчета.....	4
3 Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы и определение параметров нереверсивного управляемого выпрямителя типа БУ3509...	4
4 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и определение параметров реверсивного управляемого выпрямителя в составе электропривода ЭТ-6.....	12
5 Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы и определение параметров тиристорного широтно-импульсного преобразователя...	18
6 Лабораторная работа № 4. Исследование режимов работы и определение параметров тиристорного преобразователя частоты со звеном постоянного тока типа ЭКТД-25.....	24
7 Лабораторная работа № 5. Исследование режимов работы и определение параметров тиристорного регулятора напряжения.....	34
8 Лабораторная работа № 6. Исследование режимов работы и определение параметров устройства плавного пуска АДКЗ.....	41
Список литературы .....	47

## 1 Содержание отчета

При выполнении лабораторных работ обязательному рассмотрению и отражению в отчете подлежат следующие разделы.

- 1 Изучение методических указаний и учебной литературы.
- 2 Анализ выполнения этапов лабораторной работы.
- 3 Изучение схемы электрической принципиальной стенда для исследования преобразователя.
- 4 Изучение схемы электрической принципиальной силовой части преобразователя.
- 5 Математическое моделирование силовой части преобразователя.

Рекомендуемый объем отчета – 10–12 с. из расчета, что отчет отпечатан на принтере, шрифт – Courier New 14, допускается применение других шрифтов.

Отчет выполняется на листах формата А4, оформление производится в соответствии с рекомендациями и требованиями ГОСТа.

## 2 Графическая часть отчета

Графическая часть отчета выполняется на двух листах формата А4.

На первом листе выполняется схема электрическая принципиальная стенда для исследования преобразователя; на втором – схема электрическая принципиальная силовой части преобразователя.

Оформление производится в соответствии с рекомендациями и требованиями ГОСТа.

## 3 Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы и определение параметров нереверсивного управляемого выпрямителя типа БУ3509

**Цель работы:** исследование статических характеристик нереверсивного трехфазного мостового управляемого выпрямителя (УВ); исследование электромагнитных процессов в силовой части нереверсивного трехфазного мостового УВ.

### 3.1 Краткие теоретические сведения

Выпрямитель – устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное.

Выпрямители классифицируются по ряду признаков.

- 1 Однофазное питание (50 Гц, 220 В). Выпрямители питаются от одной фазы электросети. Число фаз  $m$  первичной обмотки трансформатора выпрямителя равно единице.

2 Трехфазное питание (50 Гц, 220 / 380 В). Выпрямители питаются от трех фаз электросети. Число фаз  $m_1$  первичных обмоток трансформатора выпрямителя равно трем.

Схема выпрямления характеризуется числом фаз и числом тактов.

1 Число фаз  $m_2$  схемы выпрямления определяется числом вентильных обмоток трансформатора, т. е. вторичных обмоток, в которые включены выпрямительные диоды (вентили).

2 Число тактов  $p$  схемы выпрямления определяется возможностью протекания тока по вентильным обмоткам трансформатора в одном или двух направлениях, т. е. использованием одного или обоих полупериодов (тактов) переменного выпрямляемого напряжения. Соответственно, схемы выпрямления могут быть либо одноктактными ( $p = 1$ ), либо двухтактными ( $p = 2$ ). Двухтактные схемы реализуются на базе диодных мостовых схем, поэтому их называют мостовыми схемами выпрямления.

Различают следующие режимы работы выпрямителя:

- работа на индуктивную нагрузку;
- работа на нагрузку с противоЭДС;
- работа на активно-ёмкостную нагрузку.

Основными параметрами, характеризующими эксплуатационные свойства выпрямителей, являются:

- 1) среднее значение выпрямительного напряжения и тока  $U_d, I_d$ ;
- 2) коэффициент полезного действия  $\eta$ ;
- 3) коэффициент мощности  $K_m$ ;
- 4) внешние характеристики, представляющие зависимость напряжения на выходе от тока нагрузки  $U_d = f(I_d)$  при различных углах управления  $\alpha$ ;
- 5) регулировочная характеристика, представляющая зависимость выпрямленного напряжения от угла регулирования  $U_{d\alpha} = f(\alpha)$ ;
- 6) коэффициент пульсаций, представляющий отношение величины амплитуды пульсаций к величине среднего значения:

$$K_n(q) = \frac{U_m(q)}{U_d}. \quad (1)$$

Особенность работы управляемого выпрямителя заключается в задержке на угол  $\alpha$  момента отпирания очередных тиристоров относительно точек естественного отпирания. Это обусловлено задержкой на угол  $\alpha$  моментов подачи отпирющих импульсов на тиристоры от системы управления.

При активной нагрузке в мостовой схеме одновременно пропускают ток два вентиля.

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha. \quad (2)$$

Отсюда видно, что предельный угол регулирования при  $L_d = \infty$  равен  $90^\circ$ . Коэффициент мощности выпрямителя при  $L_d = \infty$  и  $L_a = 0$

$$\cos \phi = \frac{3}{\pi} \cos \alpha. \quad (3)$$

Коэффициент пульсаций

$$K_n(q) = \frac{U(q)_m}{U_{da}} = \frac{\sqrt{|U'(q)_m|^2 + |U''(q)_m|^2}}{U_{da}}, \quad (4)$$

где

$$U'(q)_m = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} E_{2m} \sin v \cdot \sin q \cdot m_n \cdot v \cdot dv; \quad (5)$$

$$U''(q)_m = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} E_{2m} \cdot \sin v \cdot \cos q \cdot m_n \cdot v \cdot dv. \quad (6)$$

Закономерность изменения внешних характеристик зависит от угла регулирования  $\alpha$ . Поэтому для управляемых выпрямителей строят семейства внешних характеристик  $U_d = f(I_d)$  при различных значениях угла  $\alpha$ .

### **Нереверсивный управляемый выпрямитель БУ3509.**

Тиристорный преобразователь нереверсивный унифицированный серии БУ3509 осуществляет питание якорных цепей и цепей возбуждения двигателей постоянного тока и рассчитан на использование обратной связи по ЭДС двигателя (тахомост) или по частоте вращения (тахогенератора) в зависимости от требуемого диапазона регулирования 1:50/100 и 1:1000 соответственно.

Питание БУ3509 осуществляется непосредственно от промышленной сети напряжением 220, 380 В и частотой 50 Гц для внутрисоюзных и напряжением 220, 380, 415 В и частотой 60 Гц для поставок на экспорт.

Устройства управления БУ3509 изготавливают в климатическом исполнении У и Т категории размещения 4 по ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543–70.

Нормальная работа обеспечивается при следующих условиях:

- высота над уровнем моря – не более 1000 м;
- окружающая среда – не взрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, значительного количества агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию;
- группа условий эксплуатации – М1 по ГОСТ 17516–72;
- рабочее положение – вертикальное. Допускается отклонение не более чем на 5 град в любую сторону.

При работе в замкнутой системе регулирования частоты вращения двигателя устройства управления с уровнем задающего сигнала 10 В обеспечивают следующие характеристики.

Диапазон регулирования частоты вращения двигателя:

- для устройства с обратной связью по ЭДС – 1:100;
- для устройства с обратной связью по частоте вращения при использовании тахогенераторов с выходным напряжением 20 В при номинальной частоте вращения – 1:1000.

Динамические характеристики: полоса пропускания в линейной зоне при скачкообразном изменении задающего сигнала не более 0,3 с во всем диапазоне регулирования частоты вращения при перерегулировании не более 20 %.

Диапазон 1:100 для устройства с обратными связями по ЭДС обеспечивается с несколько большими погрешностями на нижней скорости (ориентировочно суммарная погрешность  $\Delta_c = 30\%$ ).

Устройства при работе на якоре двигателя обеспечивают коэффициент двигателя по току не ниже 0,8. Устройство управления состоит из силовой части с элементами защиты его от коротких замыканий и перенапряжения, системы регулирования с источниками питания, сглаживающими дросселями.

### **Задание**

- 1 Записать паспортные данные электрических машин и УВ в отчет.
- 2 Записать данные измерительных приборов в таблицу 1.

Таблица 1 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

3 Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

4 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке.

5 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на активно-индуктивной нагрузке.

6 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке.

7 Снять внешнюю характеристику преобразователя.

8 Снять регулировочную характеристику преобразователя.

9 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

### **3.2 Порядок выполнения работы**

Исследование характеристик управляемого выпрямителя проводится по схеме, представленной на рисунке 1.

Перед началом проведения опыта следует ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки (рисунок 2).



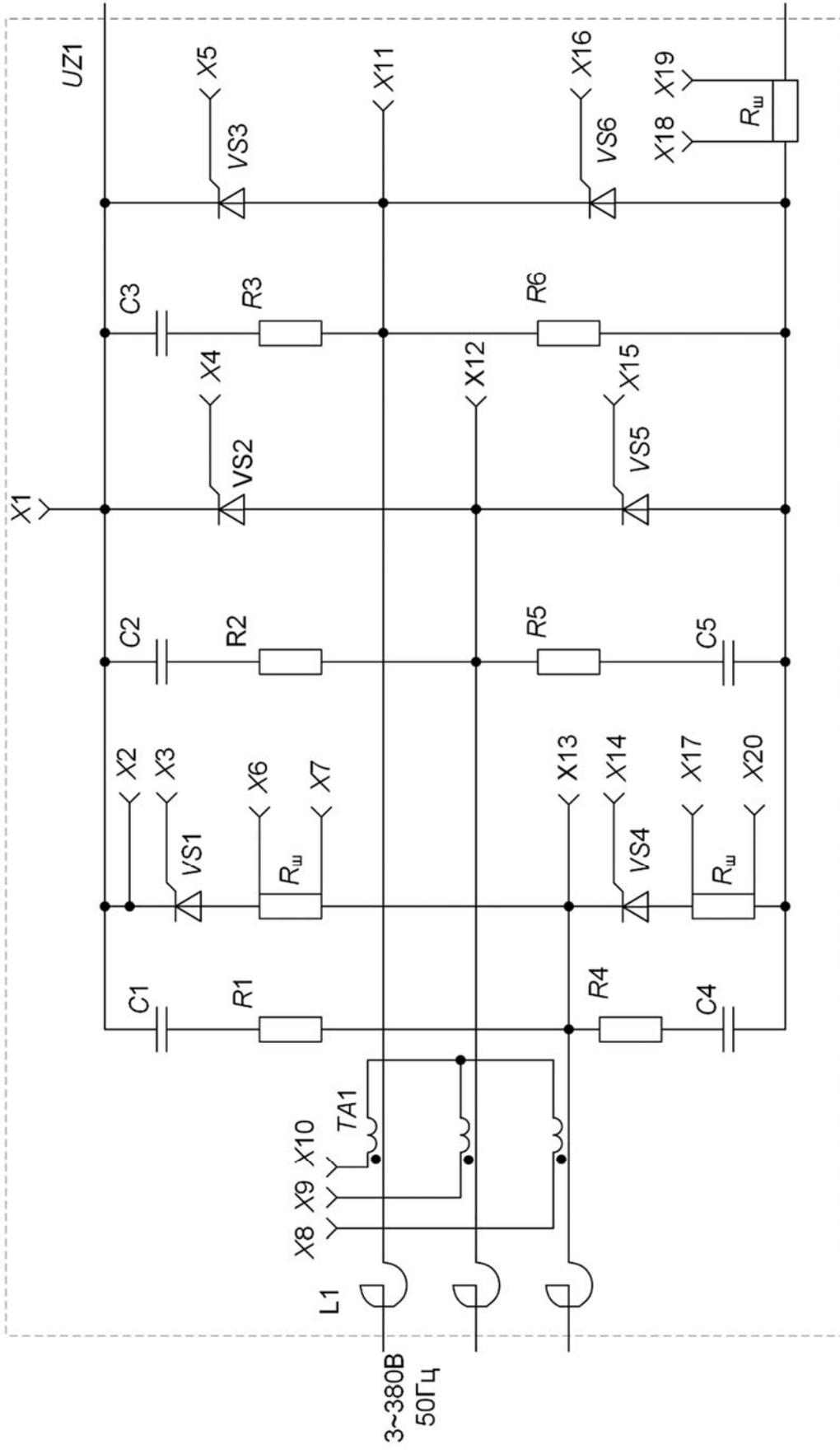


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная силовой части преобразователя БУ3509

### **Исследование электромагнитных процессов при активной нагрузке.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ3–ХТ4, ХТ6–ХТ7 (см. рисунок 1).
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ10.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 4 Нажать кнопку SB3.
- 5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 6 Для снятия напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS14, а щуп в XS9.
- 7 Для снятия тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS10, а щуп в XS9.
- 8 Для снятия формы напряжения фазы А включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS2.
- 9 Для снятия формы напряжения фазы В включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS3.
- 10 Для снятия формы напряжения фазы С включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS4.
- 11 Отключить стенд, нажав SB1, выключить QF1.

### **Исследование электромагнитных процессов при индуктивной нагрузке.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ3–ХТ4, ХТ6–ХТ7.
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на активно-индуктивной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ12.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 4 Нажать кнопку SB3.
- 5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 6 Для снятия напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS14, а щуп в XS9.
- 7 Для снятия тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS10, а щуп в XS9.
- 8 Для снятия формы напряжения фазы А включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS2.
- 9 Для снятия формы напряжения фазы В включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS3.
- 10 Для снятия формы напряжения фазы С включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS4.
- 11 Отключить стенд, нажав SB1, выключить QF1.

### **Исследование электромагнитных процессов при двигательной нагрузке.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ3–ХТ4, ХТ6–ХТ7.
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ11.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.

- 4 Увеличить напряжение на обмотке возбуждения М1 путем поворота РР4.
- 5 Нажать кнопку SB3.
- 6 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 7 Для снятия напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS14, а щуп в XS9.
- 8 Для снятия тока на нагрузке включаем общий провод осциллографа в XS10, а щуп в XS9.
- 9 Для снятия формы напряжения фазы А включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS2.
- 10 Для снятия формы напряжения фазы В включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS3.
- 11 Для снятия формы напряжения фазы С включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS4.
- 12 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF1.
- 13 Повторить пп. 7–11 для нескольких значений нагрузки.
- 14 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF2 и QF1.

### **Исследование внешней характеристики.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ3–ХТ4, ХТ6–ХТ7.
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ11.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.
- 4 Увеличить напряжение на обмотке возбуждения М1 путем поворота РР4.
- 5 Регулятор скорости РР2 вывести в крайнее левое положение, которое соответствует минимуму скорости двигателя.
- 6 Нажать кнопку SB3.
- 7 Изменяя напряжение управления регулятором скорости РР2, снять показания вольтметра РV1 и амперметра РA1 (таблица 2).

Таблица 2 – Внешняя характеристика для минимума диапазона регулирования

$I_d, A$						
$U_d, B$						

- 8 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF2 и QF1.

### **Исследование регулировочной характеристики.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ3–ХТ4, ХТ6–ХТ7.
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ11.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.
- 4 Увеличить напряжение на обмотке возбуждения М1 путем поворота РР4.
- 5 Регулятор скорости РР2 вывести в крайнее левое положение, которое соответствует минимуму скорости двигателя.

6 Нажать кнопку SB3.

7 Плавно изменяя напряжение задания скорости регулятором RP2, снять регулировочную характеристику  $U_d = f(\alpha)$  (таблица 3).

Таблица 3 – Регулировочная характеристика

$\alpha$ , град						
$U_d$ , В						

8 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF2 и QF1.

Выполнить построение графиков внешней и регулировочной характеристик.

### **Контрольные вопросы**

1 Классификация нереверсивных УВ.

2 Особенности работы несимметричных УВ.

3 Работа выпрямителя на индуктивную нагрузку.

4 Каким образом зависят статические характеристики УВ от состава нагрузки?

5 Объяснить причину резкого подъема внешних характеристик УВ при переходе в режим прерывистого тока нагрузки.

6 Пояснить закономерность изменения электромагнитных процессов при изменении индуктивности нагрузки.

7 Какое влияние оказывает обратный диод на статические характеристики и электромагнитные процессы УВ?

8 Работа УВ в режиме  $\gamma = \pi/3$ .

9 Работа УВ в режиме  $\gamma > \pi/3$ .

10 Работа УВ в режиме  $\gamma < \pi/3$ .

## **4 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и определение параметров реверсивного управляемого выпрямителя в составе электропривода ЭТ-6**

**Цель работы:** исследование статических характеристик реверсивного трехфазного управляемого выпрямителя (УВ) с нулевым выводом силового трансформатора; исследование электромагнитных процессов силовой части реверсивного трехфазного УВ с нулевым выводом.

### **4.1 Основные теоретические сведения**

В реверсивных преобразователях применяются две вентильные группы для работы: «вперед» и «назад». Если одна из них работает в выпрямительном режиме, то вторая должна быть готова к инверторному режиму.

Получили распространение два метода управления реверсивными группами – раздельное и совместное, а их разновидностью могут быть согласованное и несогласованное управление.

При согласованном управлении выполняется равенство средних значений напряжений обеих групп, т. е.

$$\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{н}} = 180^\circ \text{ или } \alpha_{\text{в}} = \beta_{\text{н}},$$

где  $\alpha_{\text{в}}$ ,  $\alpha_{\text{н}}$  – углы регулирования выпрямителя и инвертора.

Для уменьшения уравнивающих токов в силовой схеме включают уравнивательные дроссели. При несогласованном управлении угол  $\beta_{\text{н}}$  может поддерживаться неизменным на уровне  $15^\circ \dots 20^\circ$ . Его величина определяет величину уравнивающего тока.

### **Реверсивный управляемый выпрямитель ЭТ-6.**

Электроприводы серии ЭТ-6-3 предназначены для механизмов подачи универсальных металлорежущих станков, станков с ЧПУ и других механизмов и устройств. Один тиристорный преобразователь может одновременно управлять тремя двигателями различных типов. Диапазон регулирования скорости 1:10000.

Привод питается от промышленной трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Область применения: в станкостроении – в механизмах подачи и главного движения, в том числе в станках с ЧПУ, роботах и других механизмах различных отраслей промышленности.

### **Условия эксплуатации электропривода ЭТ-6.**

Электропривод предназначен для работы в закрытых отапливаемых помещениях при следующих условиях:

- высота над уровнем моря – 1000 м;
- размещается в электрошкафах;
- температура окружающего воздуха (внутри шкафа) – от плюс  $5^\circ\text{C}$  до плюс  $45^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность окружающего воздуха – 80 % при температуре  $30^\circ\text{C}$ ;
- окружающая среда – не взрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в помещениях, разрушающих металлы и изоляцию;
- содержание масел и пыли – в пределах санитарных норм.

### **Состав тиристорного электропривода ЭТ-6.**

В состав комплектного тиристорного электропривода входят:

- электродвигатель постоянного тока с тахогенератором и центробежным выключателем (при необходимости);
- ТП для питания якоря электродвигателя, состоящий из силовых тиристорных с системой охлаждения, защитных предохранителей, разрядных и защитных, С-цепей, СИФУ, устройств выделения аварийного режима, контроля

предохранителей и защиты от перенапряжений;

- ТП для питания обмотки возбуждения;
- силовой трансформатор или анодный реактор;
- коммутационная и защитная аппаратура в цепях постоянного и переменного токов (автоматические выключатели, линейные контакторы, рубильники);
- сглаживающий реактор в цепи постоянного тока (при необходимости);
- устройство динамического торможения (при необходимости);
- шкаф высоковольтного ввода, используемый при подключении нескольких электроприводов к одному масляному выключателю;
- система управления электроприводом (якорем и обмоткой возбуждения электродвигателя);
- комплект аппаратов, приборов и устройств, обеспечивающих оперативное управление, контроль состояния и сигнализацию электропривода;
- узлы питания обмотки возбуждения тахогенератора и электромеханического тормоза;
- контрольно-испытательные стенды;
- датчики, устанавливаемые на механизме, которые не включаются в комплект поставки, т. к. их выбор и установка осуществляются предприятиями, изготавливающими механическую часть технологического агрегата, однако электропривод должен иметь возможность работы с этими датчиками.

### Задание

1 Ознакомиться с конструкцией преобразователя. Ознакомиться с электрооборудованием стенда. Изучить схему электрическую принципиальную силовой части преобразователя ЭТ-6 (рисунок 3).

2 Выполнить описание работы силовой части преобразователя на уровне временных диаграмм напряжения и тока её элементов.

3 Записать данные измерительных приборов в таблицу 4.

Таблица 4 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

4 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке.

5 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке.

6 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

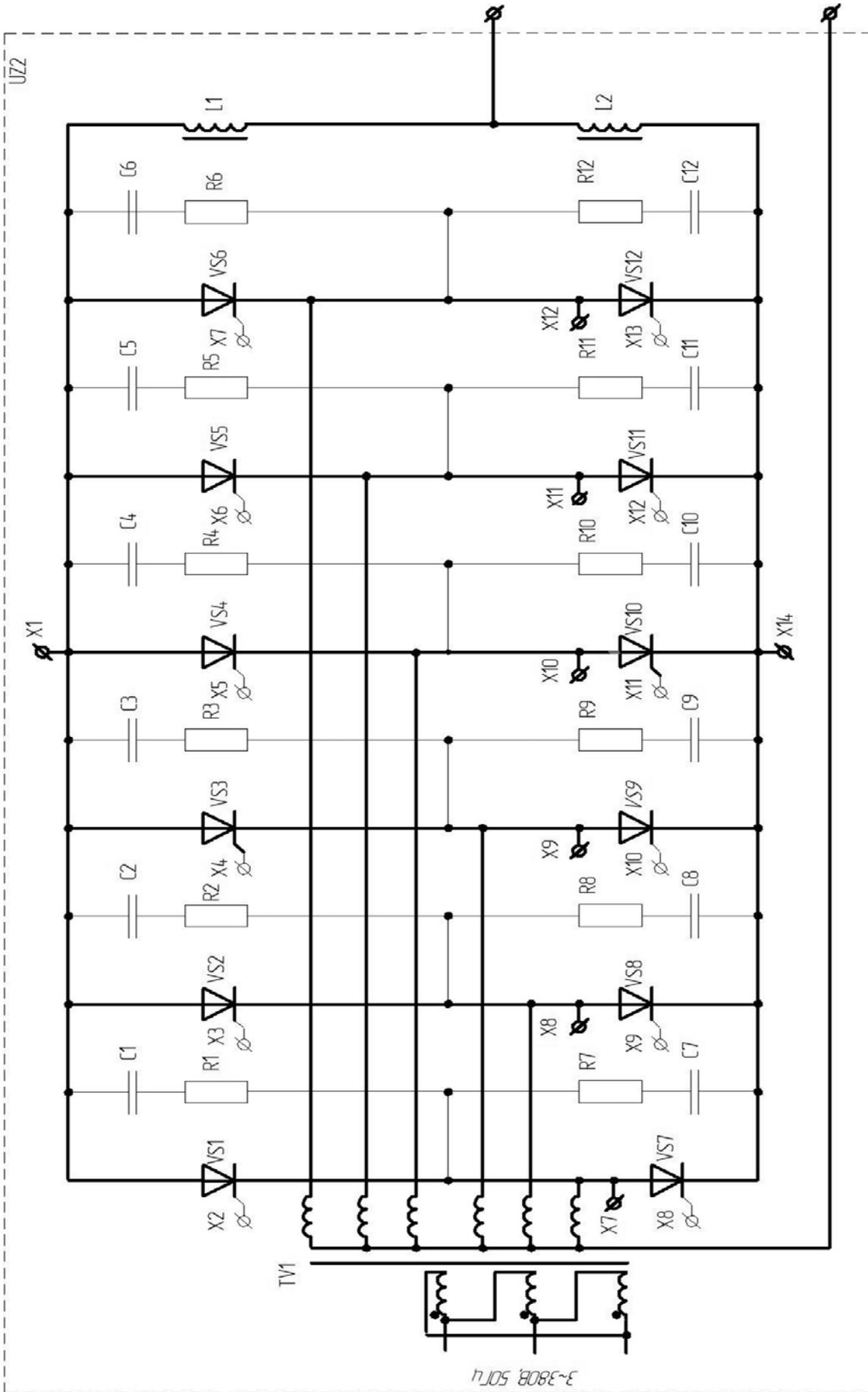


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная силовой части преобразователя ЭТ-6

## 4.2 Порядок выполнения работы

Перед началом проведения опыта следует ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. В процессе проведения опыта необходимо выполнить описание режимов работы силовой части ЭТ-6, согласно схеме, на уровне временных диаграмм напряжений и токов ее элементов; рассчитать регулировочную характеристику ЭТ-6; рассчитать внешние характеристики ЭТ-6 (для режима непрерывных токов); определить последовательность подключения контрольных гнезд для исследования электромагнитных процессов.

### **Исследование электромагнитных процессов при активной нагрузке.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ1–ХТ4, ХТ2–ХТ7 (см. рисунок 1).
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ10.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 4 Нажать кнопку SB3.
- 5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 6 Для снятия напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS14, а щуп в XS9.
- 7 Для снятия тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS10, а щуп в XS9.
- 8 Для снятия формы напряжения фазы А включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS2.
- 9 Для снятия формы напряжения фазы В включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS3.
- 10 Для снятия формы напряжения фазы С включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS4.
- 11 Отключить стенд, нажав SB1, выключить QF1.

### **Исследование электромагнитных процессов при двигательной нагрузке.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ1–ХТ4, ХТ2–ХТ7 (см. рисунок 1).
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ11 (см. рисунок 1).
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2 (см. рисунок 1).
- 4 Увеличить напряжение на обмотке возбуждения М1 путем поворота RP4.
- 5 Нажать кнопку SB3.
- 6 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 7 Для снятия напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS14, а щуп в XS9.
- 8 Для снятия тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS10, а щуп в XS9.
- 9 Для снятия формы напряжения фазы А включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS2.

10 Для снятия формы напряжения фазы В включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS3.

11 Для снятия формы напряжения фазы С включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS4.

12 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF1.

13 Повторить пп. 7–11 для нескольких значений нагрузки.

14 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF2 и QF1.

### **Исследование внешней характеристики.**

1 Собрать схему, соединив клеммы XT1–XT4, XT2–XT7.

2 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы XT9–XT11.

3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.

4 Увеличить напряжение на обмотке возбуждения M1 путем поворота RP4.

5 Регулятор скорости RP2 вывести в крайнее левое положение, которое соответствует минимуму скорости двигателя.

6 Нажать кнопку SB3.

7 Изменяя напряжение управления регулятором скорости RP2, снять показания вольтметра PV1 и амперметра PA1 (таблица 5).

Таблица 5 – Внешняя характеристика для минимума диапазона регулирования

$I_d, A$						
$U_d, B$						

8 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF2 и QF1.

### **Исследование регулировочной характеристики.**

1 Собрать схему, соединив клеммы XT1–XT4, XT2–XT7.

2 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы XT9–XT11.

3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.

4 Увеличить напряжение на обмотке возбуждения M1 путем поворота RP4.

5 Регулятор скорости RP2 вывести в крайнее левое положение, которое соответствует минимуму скорости двигателя.

6 Нажать кнопку SB3.

7 Плавно изменяя напряжение задания скорости регулятором RP2, снять регулировочную характеристику  $U_d = f(\alpha)$  (таблица 6).

Таблица 6 – Регулировочная характеристика

$\alpha, \text{град}$						
$U_d, B$						

8 Отключить стенд, нажав кнопку SB1, выключить QF2 и QF1.

Выполнить построение графиков внешней и регулировочной характеристик.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Трёхфазные неуправляемые выпрямители с нулевым выводом.
- 2 Классификация реверсивных УВ.
- 3 Реверсивные выпрямители. Схемы реверсивных вентильных преобразователей.
- 4 Преимущества и недостатки отдельного и совместного способов управления РУВ.
- 5 Согласованное и несогласованное управление вентильными группами РУВ.
- 6 Внешние и регулировочные характеристики РУВ при различных видах нагрузки.
- 7 Влияние способов управления группами вентилей РУВ на вид электромагнитных процессов.

## **5 Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы и определение параметров тиристорного широтно-импульсного преобразователя**

***Цель работы:*** исследование статических характеристик нереверсивного тиристорного ШИП с последовательной коммутацией; исследование электромагнитных процессов в коммутирующем устройстве и силовой части нереверсивного тиристорного ШИП.

### ***5.1 Краткие теоретические сведения***

Регулирование постоянного напряжения потребителя посредством импульсных преобразователей (ИП) принято называть импульсным регулированием.

Широтно-импульсные преобразователи находят все более широкое применение для регулирования и стабилизации различного рода нагрузок (на электротранспорте, в приводе металлообрабатывающих станков, для питания бортовых систем и т. д.), что объясняется рядом их преимуществ. Перечислим основные из них:

- 1) высокий КПД, т. к. потери мощности на регулирующем элементе преобразователя незначительны по сравнению с потерями мощности в случае непрерывного регулирования;
- 2) слабая чувствительность к изменениям температуры окружающей среды, поскольку регулирующим фактором является время проводимости ключа, а не величина внутреннего сопротивления регулирующего элемента, что имеет место при непрерывном регулировании;

- 3) высокое быстродействие, что особо важно для автоматизированного электропривода;
- 4) возможность получения значительных пусковых моментов электрических двигателей;
- 5) высокая точность управления при сохранении устойчивости;
- 6) гибкость регулирования выходного напряжения в широком диапазоне.

Однако широтно-импульсным преобразователям присущи и некоторые недостатки:

- 1) импульсный режим работы регулирующего элемента обуславливает значительные пульсации выходного напряжения, что приводит к необходимости устанавливать громоздкие фильтры;
- 2) наличие громоздких фильтров вызывает инерционность процесса регулирования в замкнутых системах;
- 3) импульсные преобразователи неустойчиво работают на импульсную нагрузку;
- 4) высокие скорости включения и выключения тока в силовой цепи ШИП приводят к возникновению радиопомех.

Импульсные преобразователи постоянного напряжения делятся на две большие группы: нереверсивные и реверсивные. Группу нереверсивных ШИП можно разделить на два больших класса: параллельные и последовательные.

### Последовательные ШИП.

В последовательных ШИП (рисунок 4) рабочий тиристор  $VS$  включен последовательно с нагрузкой.

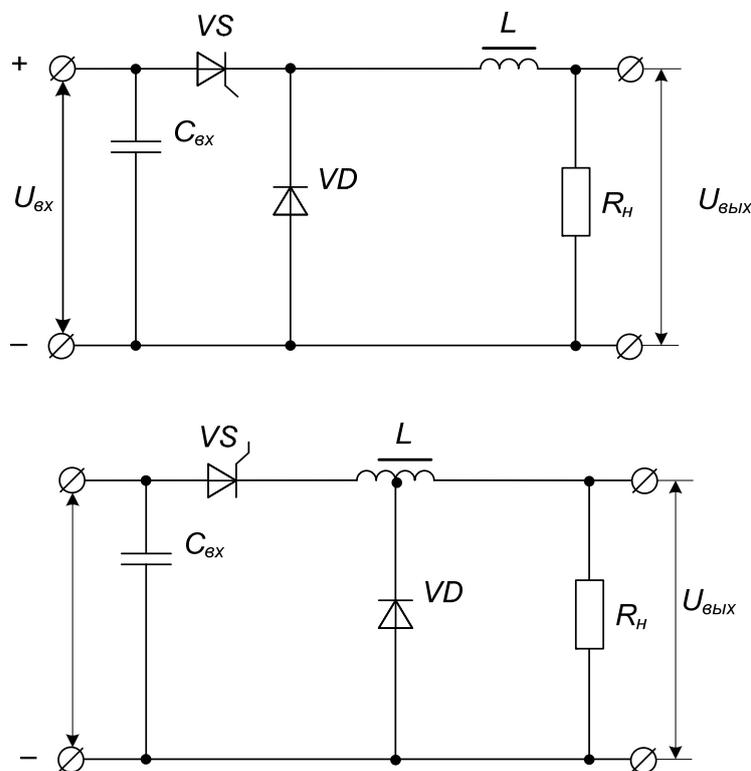


Рисунок 4 – Схемы последовательных ШИП

Кроме того, в схеме предусмотрены коммутирующий узел (предназначен для запирающего рабочего тиристора) и система управления. Выходная часть устройства состоит из фильтрующего дросселя  $L$ , нагрузки  $R_n$  и диода  $VD$ . На входе схемы включен блокировочный конденсатор  $C_{вх}$ , емкость которого определяется внутренним сопротивлением источника питания и частотной коммутации.

Нагрузочная часть схемы может быть выполнена либо с автотрансформаторным включением диода  $VD$ , либо с подключением его к отпайке фильтрующего дросселя.

Первая схемная модификация выходной цепи применима тогда, когда напряжение на нагрузке не регулируется до значений, близких к нулевым. Такое включение дает возможность скомпенсировать внутренние потери напряжения в схеме.

В данной схеме обе секции дросселя  $L$  включены последовательно с нагрузкой, что приводит к снижению бросков тока через тиристор  $VD$ , когда он работает в режиме больших токов и малых скважностей  $\gamma = t/T$ . Характерной особенностью последовательных ШИП является невозможность получения напряжения на их выходе выше напряжения источника питания.

Классификацию последовательных импульсных преобразователей необходимо проводить с учетом особенностей их коммутирующих цепей. Схемы последовательных ШИП строятся двояко в зависимости от выполнения узлов коммутации. В одних устройствах узел коммутации связан либо с цепью рабочего тиристора, либо с цепью нагрузки, в других он отделен от этих цепей.

### Задание

- 1 Ознакомиться со схемой электрической принципиальной силовой части тиристорного ШИП (рисунок 5) и порядком включения стенда.
- 2 Заполнить таблицу данных измерительных приборов (таблица 7).

Таблица 7 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

3 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке.

4 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке.

5 Провести опыты для снятия внешней характеристики.

6 Провести опыты для снятия регулировочной характеристики.

7 Рассчитать статические характеристики (внешнюю и регулировочную).

8 Построить графики электромагнитных процессов.



9 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

## **5.2 Порядок выполнения работы**

Перед началом проведения опыта следует ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. В процессе проведения опыта необходимо выполнить описание режимов работы силовой части ШИП, согласно схеме, на уровне временных диаграмм напряжений и токов ее элементов.

Исследование характеристик тиристорного ШИП проводится по схеме, представленной на рисунке 1.

### **Исследование преобразователя при активной нагрузке.**

- 1 Собрать схему, соединив клеммы ХТ4–ХТ5, ХТ7–ХТ8.
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ10.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 4 Нажать кнопку SB4.
- 5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 6 Для снятия напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS14, а щуп в XS9.
- 7 Для снятия тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS10, а щуп в XS9.
- 8 Для снятия формы напряжения фазы А включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS2.
- 9 Для снятия формы напряжения фазы В включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS3.
- 10 Для снятия формы напряжения фазы С включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS4.
- 11 Отключить стенд, нажав SB1, выключить QF1.

### **Исследование преобразователя при двигательной нагрузке.**

- 1 Собрать схему соединив клеммы ХТ4–ХТ5, ХТ7–ХТ8.
- 2 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы ХТ9–ХТ11.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 4 Нажать кнопку SB4.
- 5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 6 Для снятия напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS14, а щуп в XS9.
- 7 Для снятия тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в XS10, а щуп в XS9.
- 8 Для снятия формы напряжения фазы А включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS2.

9 Для снятия формы напряжения фазы В включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS3.

10 Для снятия формы напряжения фазы С включить общий провод осциллографа в XS1, а щуп в XS4.

11 Отключить стенд, нажав SB1, выключить QF1.

### **Исследование внешней характеристики.**

1 Собрать схему, соединив клеммы XT4–XT5, XT7–XT8.

2 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы XT9–XT11.

3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.

4 Нажать кнопку SB4.

5 Изменяя угол управления с помощью RP3, снять показания вольтметра PV1 и амперметра PA1, данные занести в таблицу 8.

Таблица 8 – Внешняя характеристика

$I_d, A$						
$U_d, B$						

6 Отключить стенд, нажав SB1, выключить QF1.

По полученным данным построить внешнюю характеристику.

### **Исследование регулировочной характеристики.**

1 Собрать схему, соединив клеммы XT4–XT5, XT7–XT8.

2 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы XT9–XT11.

3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.

4 Нажать кнопку SB4.

5 Изменяя угол управления с помощью RP3, снять показания вольтметра PV1, данные занести в таблицу 9.

Таблица 9 – Регулировочная характеристика

$\alpha, \text{град}$						
$U_d, B$						

6 Отключить стенд, нажав SB1, выключить QF1.

7 Построить зависимость  $U_d = f(\alpha)$ .

### **Контрольные вопросы**

- 1 Классификация тиристорных ШИП.
- 2 Способы управления нереверсивными тиристорными преобразователями постоянного тока.
- 3 Регулировочные и внешние характеристики тиристорных ШИП с последовательной коммутацией при различном характере нагрузки.
- 4 Особенности работы ШИП с коммутирующим трансформатором.
- 5 Пояснить зависимость электромагнитных процессов в коммутирующем контуре от величины тока нагрузки.

## **6 Лабораторная работа № 4. Исследование режимов работы и определение параметров тиристорного преобразователя частоты со звеном постоянного тока типа ЭКТД-25**

**Цель работы:** исследование электромагнитных процессов в силовой части тиристорного автономного инвертора напряжения (АИН).

### **6.1 Краткие теоретические сведения**

Преобразователь частоты (ПЧ) – это устройство, предназначенное для преобразования переменного тока (напряжения) одной частоты в переменный ток (напряжение) другой частоты.

Выходная частота в современных преобразователях может изменяться в широком диапазоне и быть как выше, так и ниже частоты питающей сети.

Преобразователи частоты, применяемые в регулируемом электроприводе, в зависимости от структуры и принципа работы силовой части разделяются на два класса:

- 1) преобразователи частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока;
- 2) преобразователи частоты с непосредственной связью (без промежуточного звена постоянного тока).

Наиболее широкое применение в современных частотно-регулируемых приводах находят преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока (рисунок 6).

В преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе (В), фильтруется фильтром (Ф), сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором (И) в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению КПД и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

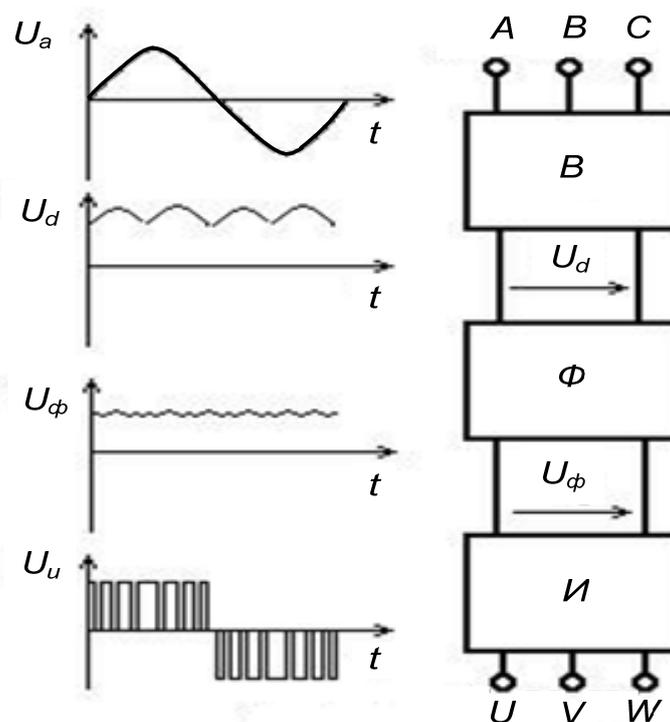


Рисунок 6 – ТПЧ со звеном постоянного тока

## 6.2 Назначение и применение ТПЧ

Тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ) предназначен для плавного пуска и непрерывного регулирования частоты вращения синхронного электродвигателя, обеспечивающего привод таких агрегатов, как компрессор, вентилятор (дымосос), насос, шаровая мельница и т. п. При этом двигатель должен иметь щеточное возбуждение от статического тиристорного возбудителя.

Применение ТПЧ позволяет:

- осуществлять плавный частотный пуск ненагруженного или нагруженного двигателя с ограничением пускового тока до уровня, не превышающего номинального значения;
- вести плавное регулирование частоты вращения двигателя от номинального значения в диапазоне 10 % ... 105 % либо по внешнему заданию, либо по сигналу от собственного регулятора, обеспечивающего поддержание регулируемого параметра (давления, расхода, момента).

## 6.3 Устройство и принцип работы

Автономные инверторы (АИ) в основном подразделяются на три группы:

- 1) автономные инверторы напряжения (АИН);
- 2) автономные инверторы тока (АИТ);
- 3) автономные резонансные инверторы (АРИ).

Тип инвертора обычно определяется видом источника питания либо фильтра (рисунок 7).

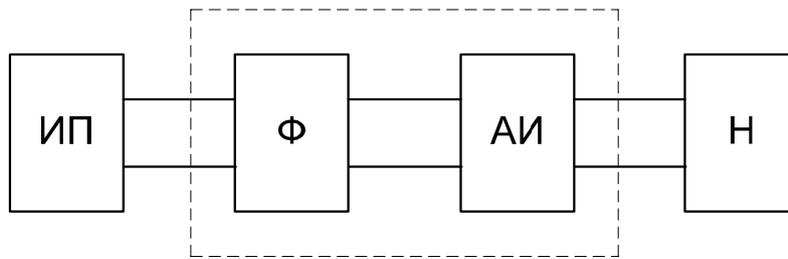


Рисунок 7 – Устройство автономного инвертора

Для АИН форма выходного напряжения не зависит от величины тока нагрузки и носит прямоугольный характер.

Для АИТ форма тока является прямоугольной и не зависит от величины выходного напряжения.

Для формирования выходного напряжения и тока нагрузки, близких по форме к синусоидальному виду, применяют резонансные автономные инверторы (РАИ).

По количеству формируемых фаз АИ делятся на однофазные, трехфазные и многофазные (рисунки 8 и 9).

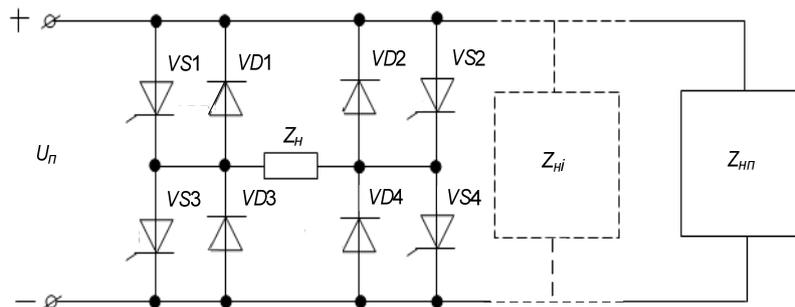


Рисунок 8 – Схема многофазного АИ на базе однофазных АИ

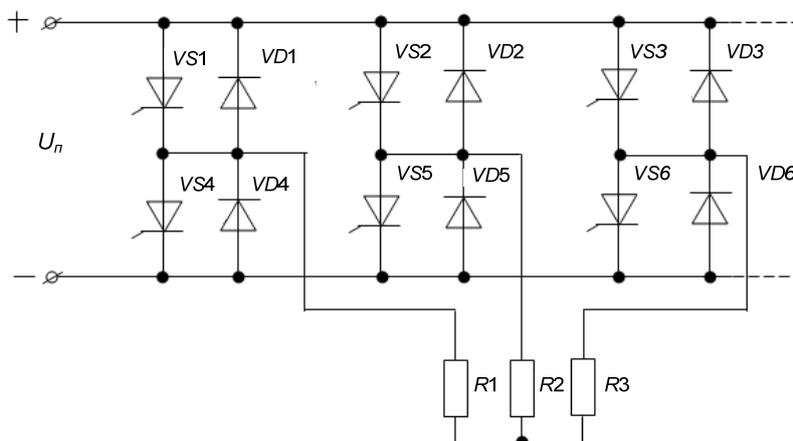


Рисунок 9 – Совмещенная многофазная мостовая схема АИ

В зависимости от способа питания нагрузки трехфазные и многофазные

АИ можно рассматривать как состоящие из требуемого количества однофазных или как выполненные по совмещенной мостовой схеме.

Для трехфазных АИ возможны два способа включения нагрузки (по схеме «треугольник» и по схеме «звезда»), что определяет напряжение питания АИ и нагрузки.

В зависимости от алгоритма переключения силовых ключей рассматривают два возможных закона формирования  $U_{\text{вых}}$ :

- 1) закон управления  $180^\circ$ ;
- 2) закон управления  $120^\circ$ .

Существует три возможных способа формирования выходного напряжения АИ:

- 1) амплитудный;
- 2) регулирование на основной частоте;
- 3) регулирование на несущей частоте.

При амплитудном методе регулирования выходного напряжения применяют УВ или ШИП в качестве источника питания АИ. Упрощенная структура такого преобразователя представлена на рисунке 10.

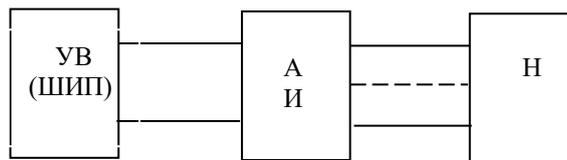


Рисунок 10 – Упрощенная структура преобразователя

Регулирование выходного напряжения на основной частоте применяется в ЭП малой мощности (до 600 Вт). Принцип регулирования поясняется диаграммой напряжения, которая представлена на рисунке 11.

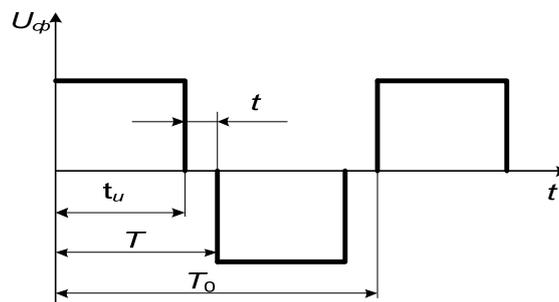


Рисунок 11 – Диаграмма напряжения при регулировании выходного напряжения на основной частоте

Регулирование выходного напряжения на несущей частоте применяется в ЭП средней мощности (до 100 кВт). Принцип регулирования поясняется диаграммами напряжения, представленными на рисунке 12.

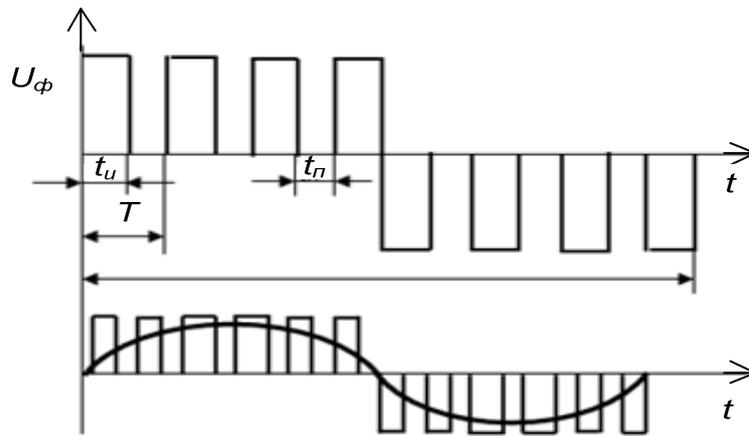


Рисунок 12 – Диаграмма напряжения при регулировании выходного напряжения на несущей частоте

#### 6.4 Тиристорный автономный инвертор напряжения с пофазной коммутацией

Схема предназначена для преобразования постоянного напряжения в переменное напряжение регулируемой частоты и амплитуды.

Схема силовой части ТПЧ содержит следующие функциональные узлы:

- силовой управляемый выпрямитель;
- LC-фильтр;
- автономный инвертор напряжения;
- тормозное устройство;
- источник напряжения.

Силовой УВ представляет собой трехфазный мостовой выпрямитель. Регулирование величины выпрямленного напряжения в УВ достигается изменением угла управления тиристором. УВ подключается к сети с помощью автоматического выключателя QF. На выходе УВ установлен токоограничивающий реактор  $L$ . В цепь каждой фазы включены трансформаторы тока, выполняющие функции датчиков тока. К выходу УВ подключен LC-фильтр. Фильтр выполняет функцию сглаживания пульсаций выпрямленного тока и напряжения и токоограничения в аварийных режимах.

В состав АИН (рисунок 13) входят следующие функциональные группы элементов:

- группа основных тиристоров (V3, V4, V7, V8, V11, V12);
- группа коммутационных тиристоров (V13–V18);
- группа обратных диодов (V1, V2, V5, V6, V9, V10);
- коммутирующие конденсаторы (C3, C4, C5);
- коммутирующие дроссели (L1, L2);
- разделительные диоды (V25, V26);
- мост сброса энергии (V19–V24);
- вспомогательные источники подзарядки.

Вспомогательные источники подзарядки обеспечивают автоматический и непрерывный подзаряд коммутирующего конденсатора в течение процесса

коммутации.

Разделительные диоды V25, V26 служат для развязки источника основного питания от вспомогательных источников подзаряда.

Цель сброса энергии (V19–V24) служит для обеспечения стабилизации напряжения на коммутирующих конденсаторах, поддерживая его на уровне, не превышающем величины напряжения на источниках.

Защита тиристоров силовой части от перенапряжения осуществляется RC-цепями.

В электроприводе для обеспечения режима торможения используется тормозное устройство, состоящее из двух цепей (последовательно включенные резистор и тиристор), средней точкой подключенных к общей точке тиристоров АИН (рисунки 13 и 14).

### **Задание**

1 Записать паспортные данные электрических машин и преобразователя в отчет.

2 Записать данные измерительных приборов в таблицу 10.

Таблица 10 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

3 Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

4 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке.

5 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке.

6 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

### **6.5 Порядок выполнения работы**

Перед началом проведения опыта необходимо ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. В процессе проведения опыта следует выполнить описание режимов работы силовой части, согласно схеме, на уровне временных диаграмм напряжений и токов ее элементов, определить последовательность подключения контрольных гнезд для исследования преобразователя.

Исследование характеристик преобразователя проводится по схеме, представленной на рисунке 15.

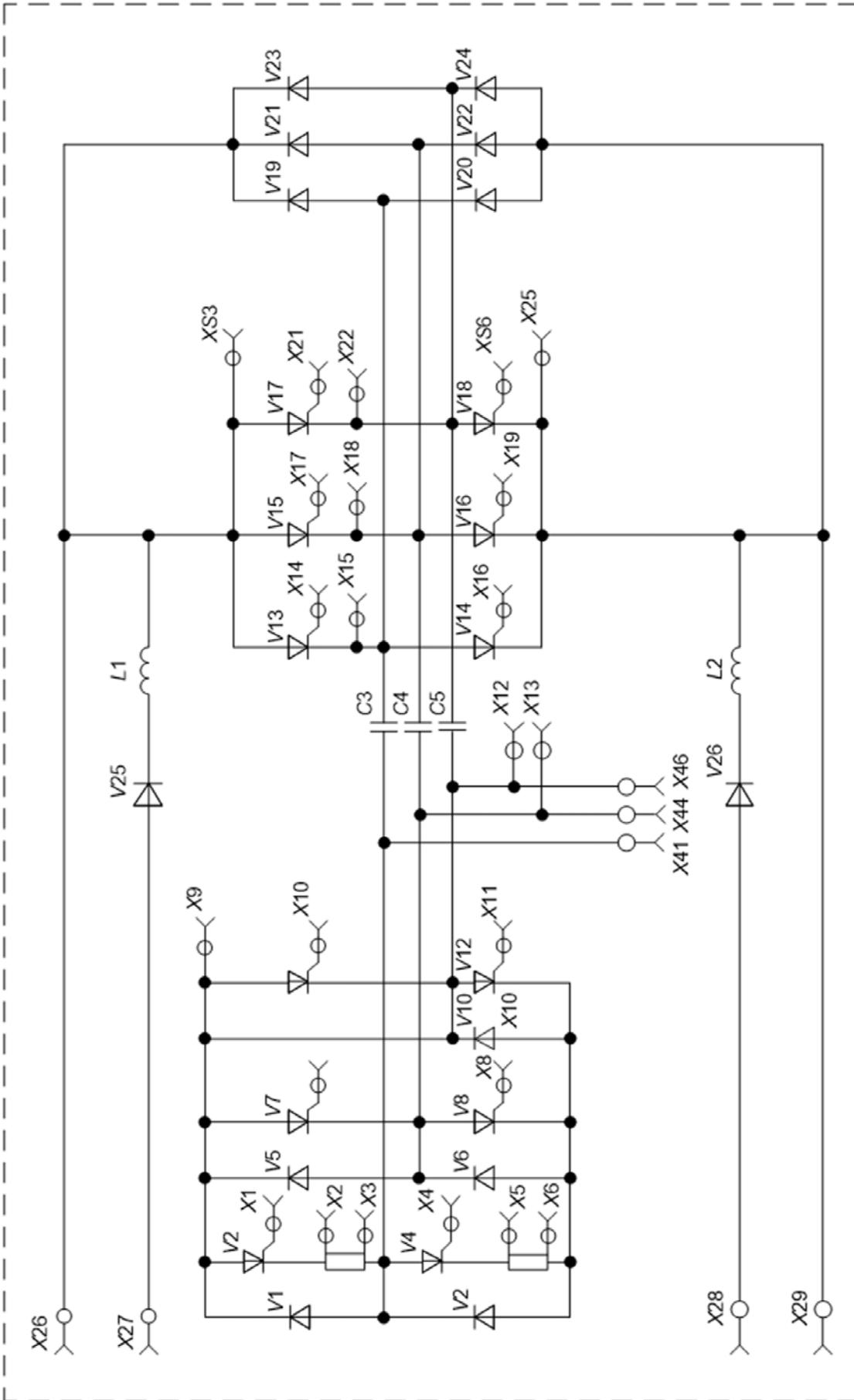


Рисунок 13 – Схема силовой части ЭКТД-25



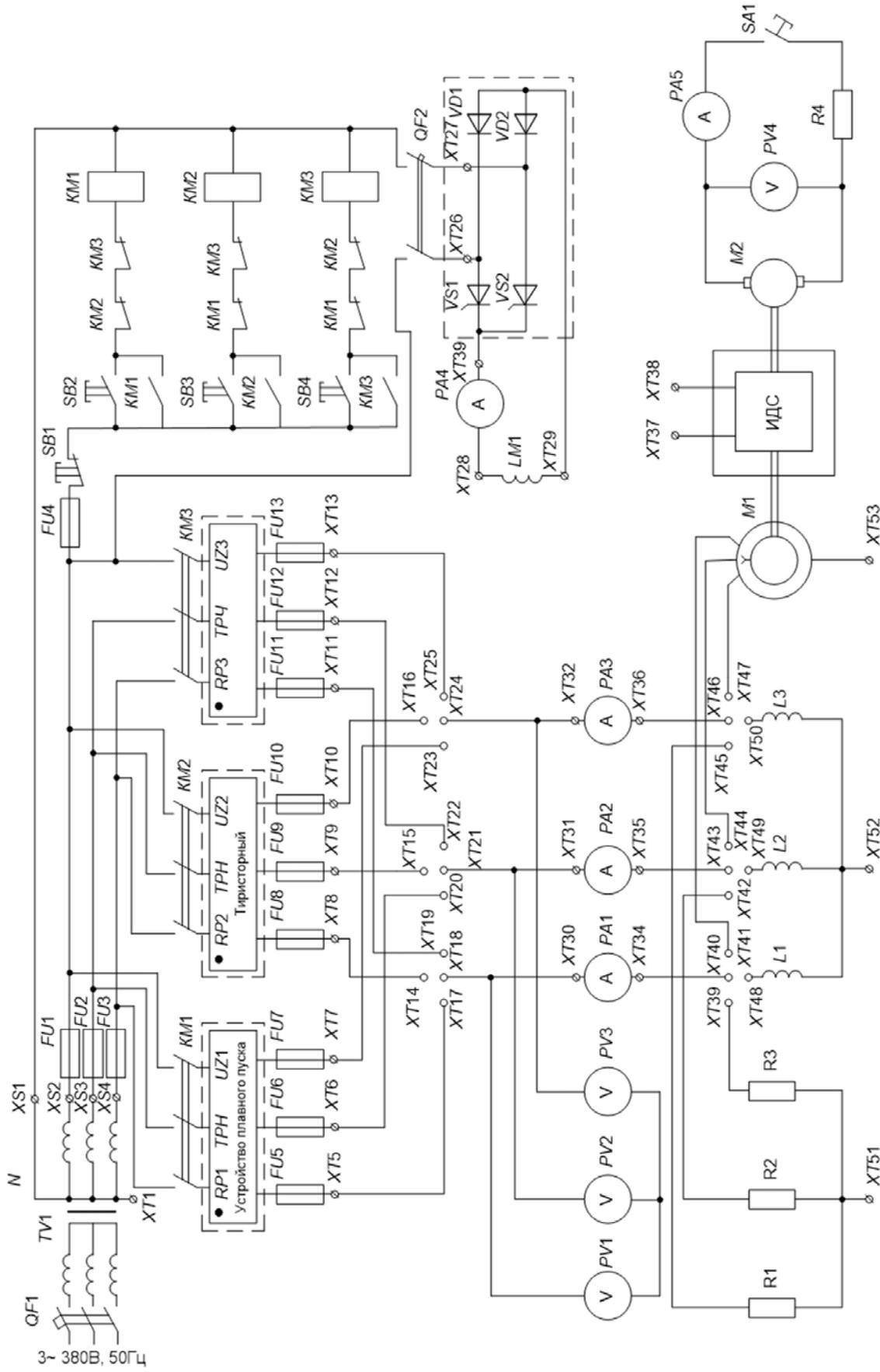


Рисунок 15 – Схема электрическая принципиальная преобразователей переменного тока

### **Исследование электромагнитных процессов при активной нагрузке.**

- 1 Собрать электрическую схему по рисунку 15, соединив точки ХТ18–ХТ19, ХТ21–ХТ22, ХТ24–ХТ25.
- 2 Общий вывод осциллографа соединить с клеммой ХТ51.
- 3 Установить регулятор напряжения РР3 в крайнее левое положение, которое соответствует минимальному выходному напряжению.
- 4 Включить вводной автоматический выключатель QF1.
- 5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 6 Нажать кнопку SB4.
- 7 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ30.
- 8 Снять диаграмму напряжения в фазе С. Занести её в отчёт.
- 9 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ31.
- 10 Снять диаграмму напряжения в фазе В. Занести его в отчёт.
- 11 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ32.
- 12 Снять диаграмму напряжения в фазе А. Занести её в отчёт.
- 13 Нажать кнопку SB1.
- 14 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.
- 15 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы ХТ39–ХТ40, ХТ42–ХТ43, ХТ45–ХТ46.
- 16 Для снятия формы напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ51, а щуп в ХТ30.
- 17 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 18 Нажать кнопку SB4.
- 19 Снять диаграмму напряжения на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 20 Нажать кнопку SB1.
- 21 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.
- 22 Для снятия формы тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ34, а щуп в ХТ30.
- 23 Снять диаграмму тока на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 24 Нажать кнопку SB1.
- 25 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.

### **Исследование электромагнитных процессов при двигательной нагрузке.**

- 1 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы ХТ40–ХТ41, ХТ43–ХТ44, ХТ46–ХТ47.
- 2 Для снятия формы напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ51, а щуп в ХТ30.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.
- 4 Нажать кнопку SB4. Включить переключатель SA1.
- 5 Нагрузить двигатель М1, увеличив напряжение на обмотке возбуждения генератора М2 путем поворота ручки регулятора РР4. Снять диаграмму напряжения на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 6 Нажать кнопку SB1.
- 7 Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2.

8 Для снятия формы тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ34, а щуп в ХТ30.

9 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.

10 Нажать кнопку SB4.

11 Снять диаграмму тока на нагрузке. Занести её в отчёт.

12 Нажать кнопку SB1.

13 Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2.

### ***Контрольные вопросы***

1 Классификация тиристорных АИ.

2 Способы управления тиристорами АИ.

3 Основные способы формирования выходного напряжения АИ.

4 Влияние электромагнитных процессов в коммутирующем оборудовании на электромагнитные процессы в цепи нагрузки.

5 Регулировочные характеристики АИ при различных способах формирования выходного напряжения и частоты.

6 Недостатки тиристорных ключевых элементов.

7 Чем определяется длительность межкоммутационного и коммутационного интервалов времени при рассмотрении инвертора напряжения, выполненного на тиристорах?

8 От чего зависят электромагнитные процессы в интервалах коммутации?

9 Факторы, влияющие на работу трёхфазного инвертора напряжения.

10 Какие функциональные группы входят в состав АИН?

## **7 Лабораторная работа № 5. Исследование режимов работы и определения параметров тиристорного регулятора напряжения**

***Цель работы:*** исследование статических и динамических характеристик ТРН – АД.

### ***7.1 Краткие теоретические сведения***

Одним из возможных способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является изменение напряжения на зажимах его статора, при этом частота такого напряжения постоянна и равна частоте промышленной сети переменного тока.

На рисунке 16 приведена принципиальная блок-схема рассматриваемого электропривода. Между зажимами питающей сети и статором асинхронного двигателя включен преобразователь напряжения, при использовании которого изменяется напряжение, подводимое к статору двигателя.

На рисунке 16 приведены механические характеристики при отсутствии и. Из графиков следует, что при постоянном моменте  $M_c$  нагрузки в случае асин-

хронного двигателя с короткозамкнутым ротором частота вращения изменяется в небольших пределах между точками 1 и 3 при отсутствии добавочных активных сопротивлений  $R1$  в цепи обмотки ротора, а при наличии добавочных активных сопротивлений  $R1$  в цепи обмотки ротора видно, что пределы возможного изменения частоты вращения более широкие.

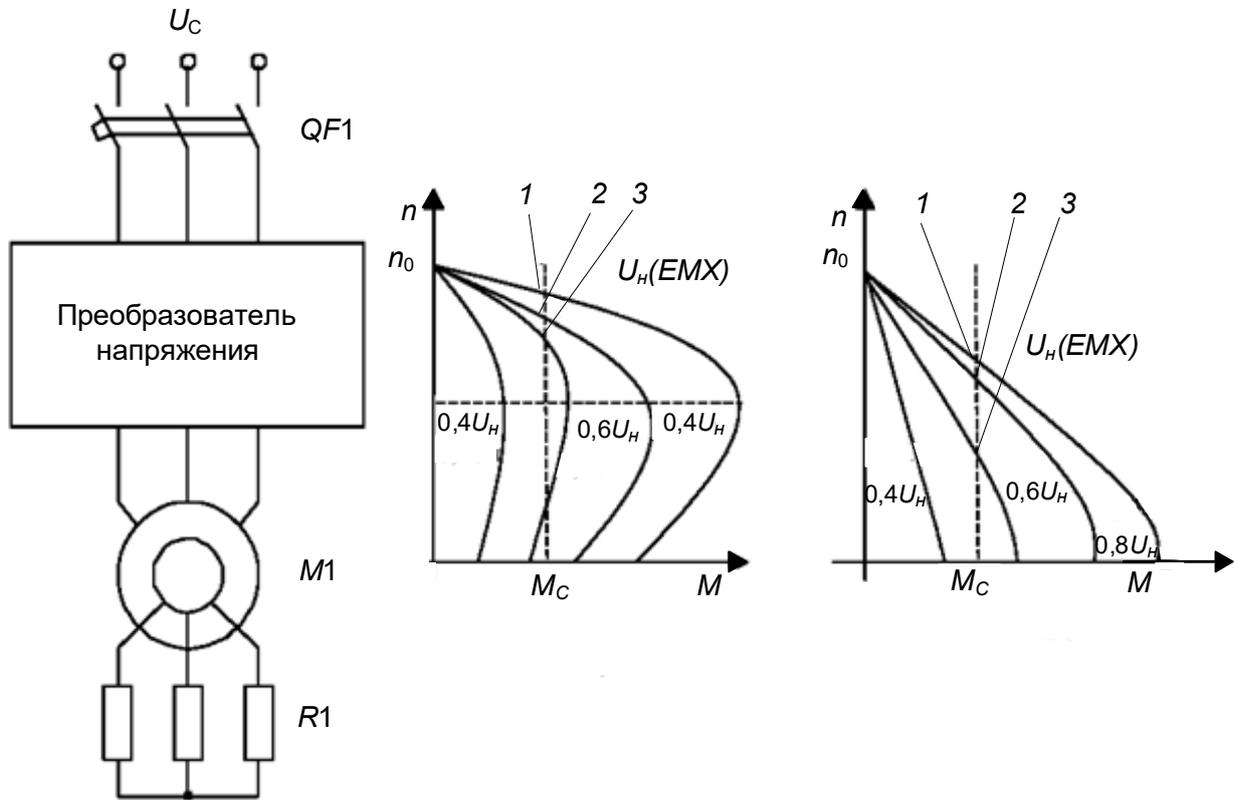


Рисунок 16 – Блок-схема и механические характеристики при регулировании напряжением для случаев отсутствия и наличия добавочного сопротивления в роторе

Рассмотрим широко используемые в настоящее время преобразователи напряжения – так называемые *тиристорные регуляторы напряжения* (ТРН).

Предварительно для ознакомления с принципом действия регулятора напряжения проанализируем работу однофазной схемы на рисунке 17, а.

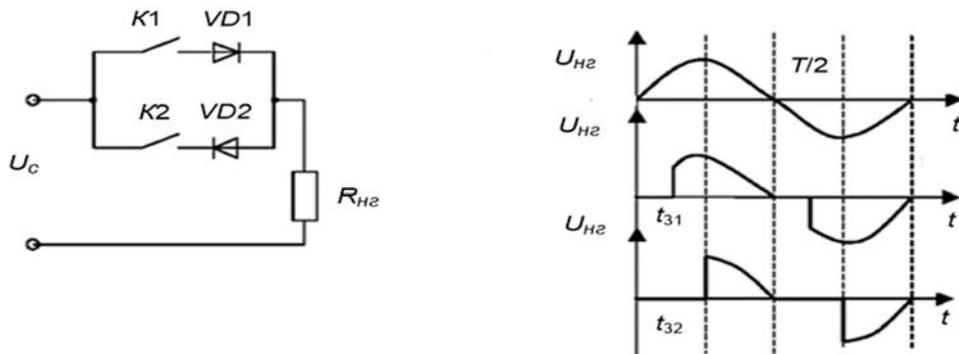


Рисунок 17 – Принципиальная схема однофазного регулятора напряжения и зависимости напряжений на нагрузке при разном угле управления

В схеме напряжение  $U$  переменного тока синусоидальной формы подводится к электрической цепи, содержащей сопротивление нагрузки и две параллельные цепочки, каждая из которых содержит ключ  $K$  и неуправляемый вентиль (диод).

Допустим, что ключ  $K1$  может замыкаться только в положительный полупериод напряжения, а в отрицательный он разомкнут. Ключ  $K2$  работает аналогичным образом, но только замкнутое его состояние возможно в отрицательном полупериоде, а разомкнутое – в положительном. Рассмотрим работу схемы при следующих условиях.

В начале каждого положительного полупериода кривой напряжения ключ  $K1$  замыкается и остается замкнутым до конца этого полупериода, а  $K2$  при этом разомкнут; в течение каждого отрицательного полупериода состояния  $K1$  и  $K2$  изменяются на противоположные.

Если же  $K1$  и  $K2$  замыкаются с некоторым запаздыванием, то имеются интервалы времени, когда ток не проходит через нагрузку и напряжение на нагрузке равно нулю.

При изменении времени задержки изменяется амплитуда первой гармоники напряжения на нагрузке. Поскольку один период синусоидального напряжения соответствует 360 град, то времени задержки соответствует пропорциональный этому времени угол регулирования:

$$a = \frac{t}{T} \cdot 360. \quad (7)$$

Показанное на рисунке 17 соединение тиристоров называется встречно-параллельным. Оно обеспечивает поочередную работу каждого из тиристоров в течение одного полупериода частоты сети.

На рисунке 18 приведена практическая схема управления АД с помощью ТРН, состоящего из трех пар встречно-параллельно соединенных тиристоров, каждая из которых включена в фазу нагрузки.

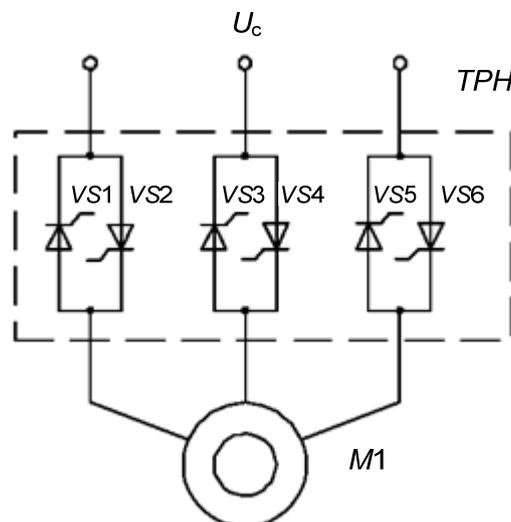


Рисунок 18 – Схема управления асинхронного двигателя с тиристорным регулятором напряжения

## 7.2 Описание тиристорного регулятора напряжения ТРН-380-10-3 УХЛ4

Условия эксплуатации:

- высота над уровнем моря – не более 1000 м;
- температура окружающей среды – от плюс 1 °С до плюс 35 °С;
- относительная влажность окружающей среды – до  $(80 \pm 2)$  % при температуре плюс 25 °С без конденсации влаги.

Тиристорные регуляторы могут работать в двух режимах: в режиме поддержания заданного тока нагрузки и режиме пропорционального регулирования выходного напряжения (таблица 11).

Таблица 11 – Технические характеристики ТРН-380-10-3 УХЛ4

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение сети $U_n$ , В	380 В $\pm$ 20 %
Частота сети, Гц	(50 $\pm$ 2)
Количество фаз	3
Номинальный ток $I_n$ , А	100 А $\pm$ 10 %
Диапазон регулирования выходного напряжения, В	0 – ( $U_n$ )
Диапазон регулирования тока, А	0 – ( $I_n$ )
Погрешность измерения среднеквадратичного значения тока, %	$\pm$ 3
Аналоговые входы	3
Сигнал управления на аналоговом входе (по выбору)	От 0 до 20 мА ( $R_{вх} = 250$ Ом); от 0 до + 5 В ( $R_{вх} > 100$ кОм); от 0 до + 10 В ( $R_{вх} > 5$ кОм)
Аналоговые выходы	Три неизолированных токовых выхода от 0 до 20 мА ( $R_n < 750$ Ом)
Дискретные входы	Три неизолированных входа
Напряжение управления дискретных входов, В	От 0 до +12 или (+ 24)
Входное сопротивление дискретного входа не менее, кОм	4,7
Два релейных дискретных выходов	«Работа» «Отказ»
Нагрузочная способность дискретного выхода	2 А, 220 В
Коммуникационный интерфейс	Изолированный ( $U_{из} = 1000$ В) RS-485; протокол MODBUS RTU; скорости 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200; нагрузочная способность – 128 устройств
Степень защиты от внешних воздействий	IP22
Рабочее положение	Вертикальное $\pm$ 15°
Охлаждение	Воздушное, принудительное

### Функции защиты.

Электрическая схема регулятора обеспечивает следующие виды защит:

- от токовой перегрузки более 100 % от номинального тока ТРН;
- от обрыва фазы в нагрузке;
- от обрыва фазы питающей сети;
- от превышения температуры радиатора силовых полупроводниковых элементов;
- от минимального тока (невключение одного из тиристорov);
- от пониженного (менее 70 % от номинального) и повышенного (более 20 % от номинального) напряжения сети.

**Конструкция.**

Регулятор выполнен в виде прямоугольного закрытого металлического корпуса двух типоразмеров. Сверху и снизу на задней стенке корпуса имеется по отверстию для крепления ТРН на плоскую вертикальную поверхность. Спереди корпус закрывается съемной крышкой, на которой расположен пульт индикации и настройки.

**Особенности работы.**

Регулирование производится путем управления фазой открытия тиристорov. Степень открытия тиристорov контролируется встроенными регуляторами тока, которые непрерывно следят за величинами фазных токов (измеряемых тремя датчиками тока). Регуляторы, изменяя угол управления тиристорами, стремятся сделать среднеквадратичное значение тока нагрузки равным заданному значению (рисунок 19).

**Задание**

1 Ознакомиться с конструкцией преобразователя. Ознакомиться с электрооборудованием стенда. Изучить схему установки (см. рисунок 15).

2 Выполнить описание работы силовой части преобразователя на уровне временных диаграмм напряжения и тока её элементов.

3 Записать данные измерительных приборов в таблицу 12.

Таблица 12 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

4 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов при активной нагрузке.

5 Провести опыты для снятия электромагнитных процессов при двигательной нагрузке.

6 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

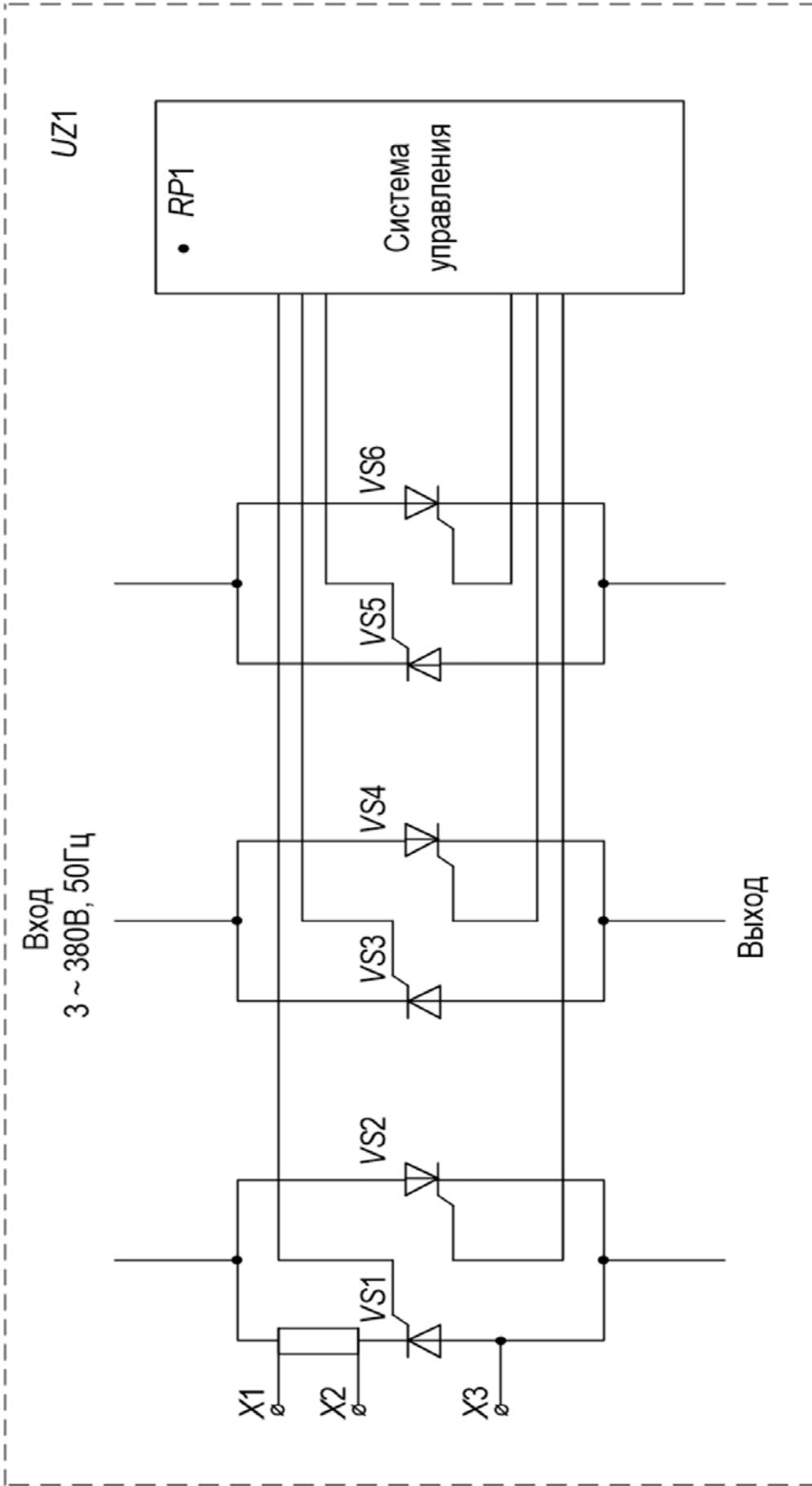


Рисунок 19 – Схема электрическая принципиальная силовой части преобразователя ТРН

### 4.3 Порядок выполнения работы

Перед началом проведения опыта необходимо ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. В процессе проведения опыта следует выполнить описание режимов работы силовой части, согласно схеме, на уровне временных диаграмм напряжения и токов ее элементов, определить последовательность подключения контрольных гнезд для исследования электромагнитных процессов.

#### **Исследование электромагнитных процессов при активной нагрузке.**

- 1 Собрать электрическую схему по рисунку 15, соединив точки ХТ18–ХТ19, ХТ21–ХТ22, ХТ24–ХТ25.
- 2 Общий вывод осциллографа соединить с клеммой ХТ51.
- 3 Установить регулятор напряжения РР2 в крайнее левое положение, которое соответствует минимальному выходному напряжению.
- 4 Включить вводной автоматический выключатель QF1.
- 5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.
- 6 Нажать кнопку SB3.
- 7 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ30.
- 8 Снять диаграмму напряжения в фазе С. Занести её в отчёт.
- 9 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ31.
- 10 Снять диаграмму напряжения в фазе В. Занести его в отчёт.
- 11 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ32.
- 12 Снять диаграмму напряжения в фазе А. Занести её в отчёт.
- 13 Нажать кнопку SB1.
- 14 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.
- 15 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы ХТ39–ХТ40, ХТ42–ХТ43, ХТ45–ХТ46.
- 16 Для снятия формы напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ51, а щуп в ХТ30.
- 17 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 18 Нажать кнопку SB3.
- 19 Снять диаграмму напряжения на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 20 Нажать кнопку SB1.
- 21 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.
- 22 Для снятия формы тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ34, а щуп в ХТ30.
- 23 Снять диаграмму тока на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 24 Нажать кнопку SB1.
- 25 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.

#### **Исследование электромагнитных процессов при двигательной нагрузке.**

- 1 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы ХТ40–ХТ41, ХТ43–ХТ44, ХТ46–ХТ47.

2 Для снятия формы напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ51, а щуп в ХТ30.

3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.

4 Нажать кнопку SB3. Включить переключатель SA1.

5 Нагрузить двигатель М1, увеличив напряжение на обмотке возбуждения генератора М2 путем поворота ручки регулятора RP4. Снять диаграмму напряжения на нагрузке. Занести её в отчёт.

6 Нажать кнопку SB1.

7 Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2.

8 Для снятия формы тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ34, а щуп в ХТ30.

9 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.

10 Нажать кнопку SB3.

11 Снять диаграмму тока на нагрузке. Занести её в отчёт.

12 Нажать кнопку SB1.

13 Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2.

### ***Контрольные вопросы***

1 Принцип действия и назначение узлов ТРН.

2 Области применения ТРН. Классификация ТРН.

3 Принцип горизонтального управления в СИФУ.

4 Принцип вертикального управления в СИФУ.

5 Способы регулирования частоты вращения АД.

6 Эквивалентная схема ТРН.

7 Схема управления АД с помощью ТРН.

8 Механические характеристики АД с ТРН при различных углах регулирования.

9 Описание тиристорного регулятора напряжения.

10 Методы управления АД с ТРН.

## **8 Лабораторная работа № 6. Исследование режимов работы и определение параметров устройства плавного пуска АДКЗ**

***Цель работы:*** исследование режимов работы устройств для плавного пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

### ***5.1 Краткие теоретические сведения***

Асинхронные двигатели массово используются в промышленности и потребляют около 80 % электрической энергии, которая производится в мире. Наряду с многочисленными преимуществами, асинхронные двигатели имеют существенный недостаток – большой пусковой ток, который в 5–7 раз превышает номинальный ток.

шает номинальный.

Устройство плавного пуска позволяет ограничивать пусковой ток асинхронного двигателя за счет изменения (регулирования) напряжения на его обмотках.

## 8.2 Общие сведения о ТРН серии ES

«Мягкий пускатель» осуществляет плавный бесконтактный пуск двигателя, вследствие чего удается избежать искрения или эрозии контактных элементов, альтернативой которым в пускателе являются полупроводниковых элементы – тиристоры. При достижении номинального напряжения двигателя тиристоры шунтируются встроенным контактором и двигатель включается напрямую в сеть. Срок службы пускателей серии ES значительно превышает период эксплуатации традиционных контакторов. «Мягкие пускатели» просты в установке и управлении. Управление в «мягких пускателях» серии ES может осуществляться как путем подачи внешнего сигнала, так и путем прямой подачей напряжения на двигатель через пускатель.

Тиристорный регулятор напряжения ES-400-3 (внешний вид изображен на рисунке 20) применяется при пуске трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 1,1 кВт. Номинальный ток преобразователя – 3 А. Номинальное напряжение – 380 В. Масса – 270 г.



Рисунок 20 – Внешний вид «мягкого пускателя» ES-400-3

«Мягкий пускатель» предназначен для плавного пуска и останова трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. При его использовании достигается уменьшение напряжения (износа) на зубчатых, ременных/цепных передачах и обеспечивается уравновешенная работа электродвигателя.

Плавный запуск обеспечивается изменением уровня напряжения, подаваемого на двигатель. По окончании процедуры пуска полупроводниковые элементы шунтируются встроенным электромеханическим контактором.

«Мягкий пускатель» типа ES-400-3 не может функционировать в нормальном режиме, если температура на радиаторе превышает 100 °С, соответственно, «мягкий пускатель» не может осуществить разгон двигателя. При уменьшении температуры ниже критической запуск двигателя будет снова доступен. Кроме того, при обрыве цепи питания имеется возможность перезапустить двигатель.

Чтобы осуществить плавный запуск (управление от сети) двигателя, необходимо включить в цепь «мягкий пускатель»:

- подсоединить кабель, идущий к двигателю, на клеммы «мягкого пускателя»;

- подсоединить к управляющим клеммам две фазы. Установить минимальный начальный момент, а время разгона и торможения поставить на максимум;

- подать питание, а после отрегулировать начальный момент так, чтобы ротор двигателя начал вращаться мгновенно после подачи питания, и отрегулировать время пуска.

Технические характеристики «мягкого пускателя» ES-400-3 представлены в таблицах 13 и 14.

Таблица 13 – Технические характеристики пускателя ES-400-3.

Точность установок при разгоне, с	< 0,5 с – в положении минимум; 5,5 – 7,5 с – в положении максимум
Точность установок при останове, с	< 0,5 с – в положении минимум; 6 – 10 с – в положении максимум
Точность установок начального момента, %	15 % в положении максимум; < 5 % в положении минимум
Соответствие нормам EMC	Электромагнитная совместимость по стандарту EN 50-082-2
Степень защиты	IP20
Рабочая температура, °С	От –20 до +50
Температура хранения, °С	От –50 до +85
Сечения клемм, мм <sup>2</sup>	2,5
Минимальное сечения клемм, мм <sup>2</sup>	0,5
Максимальный момент затяжки, Н·м	0,4
Начальный момент, % от номинального	0...85
Время разгона, с	0,5...5
Время торможения, с	0,5...5

При использовании контактора К1 пускатель будет осуществлять плавный пуск двигателя. Когда К1 будет выключен, двигатель остановится самостоятельно, а пускатель сбросится в исходное состояние. Следующий запуск может быть осуществлен через 0,5 с.

Пускатель не обеспечивает изоляции двигателя от источника питания. Поэтому контактор К1 необходим в качестве такого устройства для осуществления выключения.

Таблица 14 – Время разгона и торможения для ТРН ES-400-3

I, А	Время разгона/торможения		
	Положение 1, с	Положение 2, с	Положение 3, с
18	15	30	900
15	12	20	60
12	10	20	50
9	8	12	30
6	5	9	25
3	2	5	20
1.5	1	2	5

Мягкий пуск и остановка двигателя: когда контакты контактора К1 находятся в замкнутом положении, мягкий пуск двигателя будет осуществлен согласно установке времени разгона потенциометром и начального момента. Когда выключатель S1 находится в разомкнутом состоянии, плавный останов будет осуществлен согласно установке времени останова.

«Мягкий пускатель» обеспечивает шунтирование полупроводниковых элементов во время работы двигателя. Следовательно, полупроводниковые элементы могут быть повреждены только током короткого замыкания в течение разгона или торможения. Кроме использования трехполюсного автомата защиты, возможно дополнительно защитить полупроводниковые элементы от тока короткого замыкания быстродействующими предохранителями в соответствии с рекомендациями производителя.

### Задание

1 Ознакомиться с конструкцией преобразователя. Ознакомиться с электрооборудованием стенда. Изучить схему установки.

2 Выполнить описание работы силовой части преобразователя на уровне временных диаграмм напряжения и тока ее элементов.

3 Записать паспортные данные электрических машин, преобразователя и измерительных приборов в таблицу 15.

Таблица 15 – Данные измерительных приборов

Обозначение на схеме	Система прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

4 Собрать схему, представленную на рисунке 15.

5 Исследовать временные диаграммы преобразователя при активной нагрузке.

6 Исследовать временные диаграммы преобразователя при двигательной нагрузке.

7 Построить графики электромагнитных процессов.

8 Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

### 8.3 Порядок выполнения работы

Перед началом проведения опыта необходимо ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки, представленной на рисунке 21.

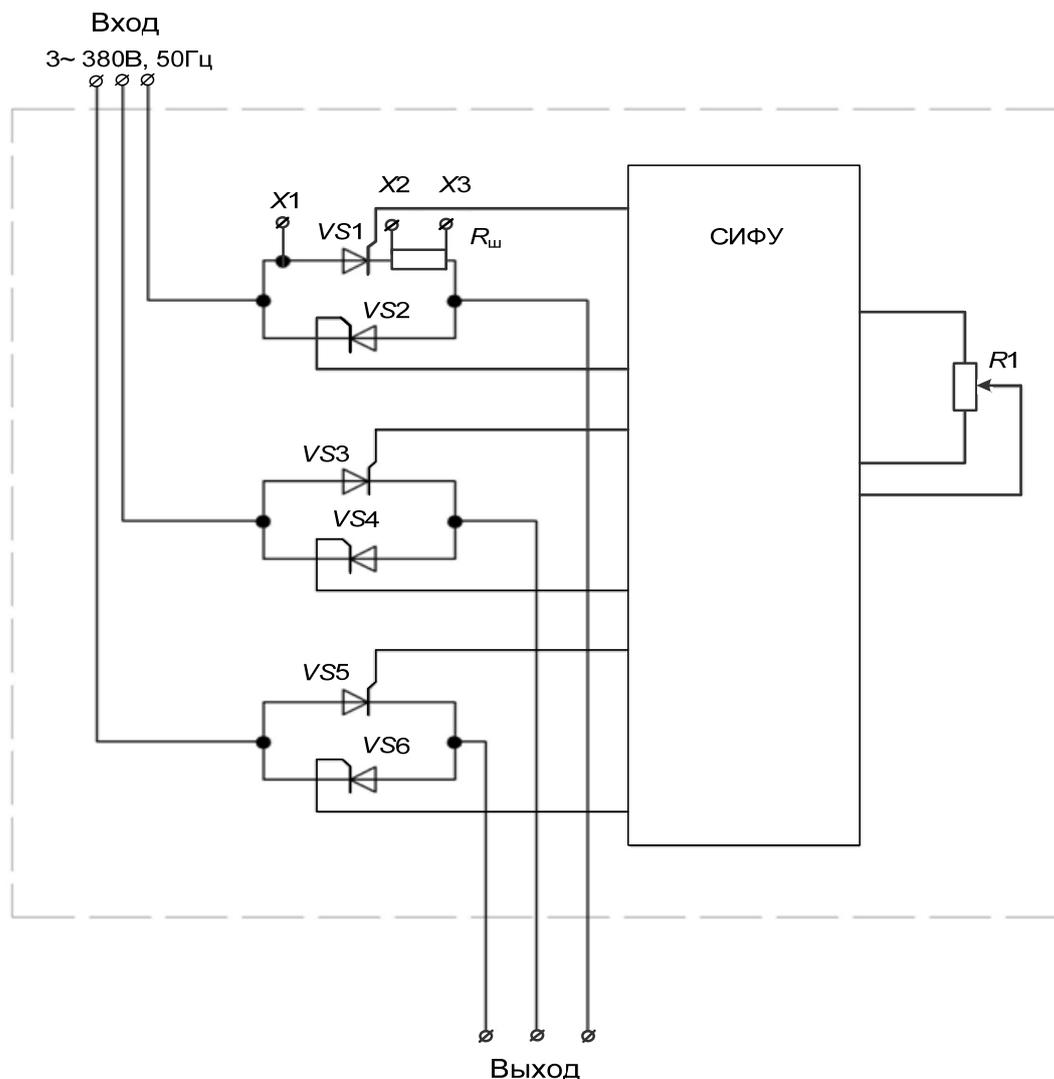


Рисунок 21 – Схема силовой части устройства плавного пуска на тиристорах

#### Исследование электромагнитных процессов при активной нагрузке.

1 Собрать электрическую схему по рисунку 15, соединив точки ХТ17–ХТ18, ХТ19–ХТ21, ХТ23–ХТ24.

2 Общий вывод осциллографа соединить с клеммой ХТ51.

3 Установить регулятор напряжения RP1 в крайнее левое положение, которое соответствует минимальному выходному напряжению.

4 Включить вводной автоматический выключатель QF1.

5 Включить осциллограф в сеть и прогреть 10 мин.

6 Нажать кнопку SB2.

- 7 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ30.
- 8 Снять диаграмму напряжения в фазе С. Занести её в отчёт.
- 9 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ31.
- 10 Снять диаграмму напряжения в фазе В. Занести её в отчёт.
- 11 Щуп осциллографа поставить в точку ХТ32.
- 12 Снять диаграмму напряжения в фазе А. Занести её в отчёт.
- 13 Нажать кнопку SB1.
- 14 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.
- 15 Для снятия электромагнитных процессов на активной нагрузке соединить клеммы ХТ39–ХТ40, ХТ42–ХТ43, ХТ45–ХТ46.
- 16 Для снятия формы напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ51, а щуп в ХТ30.
- 17 Для подачи напряжения на стенд включить QF1.
- 18 Нажать кнопку SB2.
- 19 Снять диаграмму напряжения на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 20 Нажать кнопку SB1.
- 21 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.
- 22 Для снятия формы тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ34, а щуп в ХТ30.
- 23 Снять диаграмму тока на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 24 Нажать кнопку SB1.
- 25 Выключить вводной автоматический выключатель QF1.

### **Исследование электромагнитных процессов при двигательной нагрузке.**

- 1 Для снятия электромагнитных процессов на двигательной нагрузке соединить клеммы ХТ40–ХТ41, ХТ43–ХТ44, ХТ46–ХТ47.
- 2 Для снятия формы напряжения на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ51, а щуп в ХТ30.
- 3 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.
- 4 Нажать кнопку SB2. Включить переключатель SA1.
- 5 Нагрузить двигатель М1, увеличив напряжение на обмотке возбуждения генератора М2 путем поворота ручки регулятора RP4. Снять диаграмму напряжения на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 6 Нажать кнопку SB1.
- 7 Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2.
- 8 Для снятия формы тока на нагрузке включить общий провод осциллографа в ХТ34, а щуп в ХТ30.
- 9 Для подачи напряжения на стенд включить QF1 и QF2.
- 10 Нажать кнопку SB2.
- 11 Снять диаграмму тока на нагрузке. Занести её в отчёт.
- 12 Нажать кнопку SB1.
- 13 Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Особенности работы тиристора.
- 2 Устройство тиристорного регулятора напряжения.
- 3 Способ управления работы ТРН.
- 4 Назначение устройства для плавного пуска ES-400-3.
- 5 Основные узлы и элементы устройств плавного пуска.
- 6 Возможно ли применение симисторов в схемах ТРН и почему?
- 7 Причины появления преобразователей для плавного пуска асинхронных двигателей.
- 8 Особенности устройства плавного пуска УБПВД-ВЦ.
- 9 Достоинства и недостатки устройств плавного пуска, применение в промышленности.
- 10 Основные проблемы АД.
- 11 Виды устройств плавного пуска. В чем их особенность?
- 12 Разработка уникальных устройств плавного пуска.
- 13 Схемы регулирования устройств плавного пуска.

### **Список литературы**

- 1 **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн. : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
- 2 **Замятин, В. Я.** Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: справочник / В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, В. М. Петухов. – М. : Радио и связь, 1987. – 576 с.
- 3 **Попков, О. З.** Основы преобразовательной техники : учеб. пособие / О. З. Попков. – 2-е изд., стер. – М. : МЭИ, 2007. – 200 с.
- 4 **Руденко, В. С.** Преобразовательная техника / В. С. Руденко, В. Н. Сенько, И. М. Чиженко. – Киев : Вища шк., 1978. – 430 с. : ил.
- 5 **Рама Редди, С.** Основы силовой электроники / С. Рама Редди. – М. : Техносфера, 2006. – 288 с.
- 6 **Чванов, В. А.** Перспективная преобразовательная техника / В. А. Чванов // Электротехника. – 2006. – № 9. – С. 61–65.
- 7 **Виноградов, А. Б.** Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 57–61.
- 8 **Евзеров, И. Х.** Комплектные тиристорные электроприводы: справочник / И. Х. Евзеров, А. С. Городец, Б. Н. Мошкович ; под ред. В. М. Перельмутера. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 319 с. : ил.
- 9 **Глазенко, Т. А.** Тиристорные ШИП для систем ЭП постоянного тока / Т. А. Глазенко. – Л. : ЛДНТП, 1968. – 38 с. : ил.

10 **Герман-Галкин, С. Г.** Широтно-импульсные преобразователи / С. Г. Герман-Галкин. – Л. : Энергия, 1979. – 96 с. : ил.

11 **Руденко, В. С.** Основы преобразовательной техники / В. С. Руденко. – Л. : Высш. шк., 1980. – 421 с.

12 **Алексеева, Н. Н.** Тиристорные регулируемые электроприводы постоянного тока / Н. Н. Алексеева, Г. И. Андреев, Ю. Я. Морговский. – М. : Энергия, 1970. – 136 с.

13 **Онищенко, Г. Б.** Силовая электроника. Силовые полупроводниковые преобразователи для электропривода и электроснабжения : учеб. пособие / Г. Б. Онищенко, О. М. Соснин. – М. : ИНФРА-М, 2023. – 122 с.

14 **Прохоров, В. А.** Полупроводниковые преобразователи электрической энергии : учеб. пособие / В. А. Прохоров. – М. : ИНФРА-М, 2022. – 315 с.