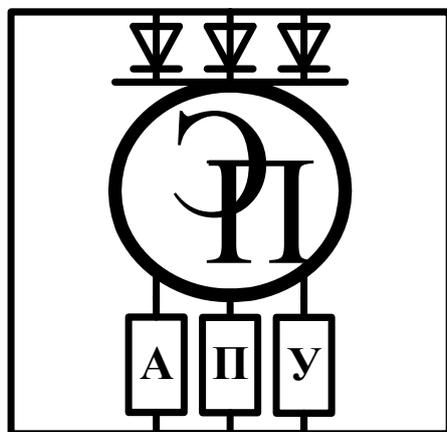


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

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



Могилев 2025

УДК 621.3
ББК 31.26
Э75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «30» августа 2024 г., протокол № 1

Составитель О. А. Капитонов

Рецензент канд. техн. наук С. В. Болотов

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

Учебное издание

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

| | |
|-------------------------|------------------|
| Ответственный за выпуск | А. С. Коваль |
| Корректор | А. А. Подошево |
| 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 26 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, 2025

Содержание

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение..... | 4 |
| 1 Лабораторная работа № 1. Исследование силового блока управляемого выпрямителя..... | 5 |
| 2 Лабораторная работа № 2. Исследование системы импульсно-фазового управления управляемым выпрямителем | 7 |
| 3 Лабораторная работа № 3. Исследование регулятора скорости в системе УВ-ДПТ..... | 10 |
| 4 Лабораторная работа № 4. Исследование регулятора тока в системе УВ-ДПТ..... | 13 |
| 5 Лабораторная работа № 5. Исследование силового блока ШИП постоянного тока | 16 |
| 6 Лабораторная работа № 6. Исследование системы управления ШИП постоянного тока | 17 |
| 7 Лабораторная работа № 7. Исследование силового блока тиристорного регулятора напряжения | 21 |
| 8 Лабораторная работа № 8. Исследование системы управления тиристорным регулятором напряжения..... | 23 |
| 9 Лабораторная работа № 9. Исследование транзисторного регулятора напряжения с ШИМ | 29 |
| 10 Лабораторная работа № 10. Исследование транзисторного автономного инвертора напряжения..... | 33 |
| 11 Лабораторная работа № 11. Исследование системы управления автономным инвертором напряжения..... | 36 |
| 12 Лабораторная работа № 12. Исследование датчиков частоты вращения | 40 |
| Список литературы..... | 47 |

Введение

Современный автоматизированный электропривод представляет собой весьма сложную структуру, состоящую из различного рода электронных, электромеханических и механических устройств, которые принято называть элементами автоматизированного электропривода. Типаж этих элементов, их конструктивная реализация достаточно многообразны.

В объеме рассматриваемого курса упор сделан на изучение элементной базы силовой преобразовательной техники: преобразователей постоянного напряжения и тока, преобразователей частоты, различного рода датчиков и исполнительных электромеханических устройств.

1 Лабораторная работа № 1. Исследование силового блока управляемого выпрямителя

Цель работы: практическое ознакомление с принципом действия силового блока преобразователя электропривода.

1.1 *Ход выполнения работы*

1.1.1 Изучить схему электрическую принципиальную силовой части. Дать объяснение назначения каждого элемента схемы.

1.1.2 Измерить форму напряжения в характерных точках схемы: 0, 1, 2, 4.

1.2 *Краткие теоретические сведения*

Электропривод состоит из двух замкнутых контуров подчиненного регулирования: контура тока (КТ) и контура скорости (КС).

Работа электропривода осуществляется следующим образом:

При наличии рассогласования (ΔU_1) на входе регулятора скорости (РС) на его выходе формируется сигнал, пропорциональный данному рассогласованию, который, сравниваясь с текущим значением тока якоря, поступает на вход регулятора тока УА. Регулятор тока усиливает эту разность и подает управляющее напряжение на схему формирования управляющих импульсов (СИФУ), функция которой заключается в формировании и распределении импульсов управления силовыми тиристорами. По мере уменьшения рассогласования (под действием отрицательной обратной связи по частоте вращения) происходит стабилизация частоты вращения двигателя на уровне, пропорциональном напряжению.

Схема силовой части электропривода показана на рисунке 1.1.

Коэффициент усиления системы регулирования обеспечивает необходимый диапазон регулирования и достаточную точность поддержания частоты вращения при различных возмущающих воздействиях.

Ограничения тока якоря двигателя осуществляются путем ограничения напряжения выхода регулятора скорости.

Предусмотрено зависимое ограничение тока в функции частоты вращения.

В состав тиристорного преобразователя электропривода входят:

- силовой блок;
- схема формирования управляющих импульсов;
- усилитель – регулятор скорости;
- усилитель – регулятор тока с датчиком тока и схемой ограничения производной регулятора тока;
- схема ограничения минимального угла управления;
- схема ограничения тока якоря;
- схема защиты;
- блок питания;

– схемы дополнительного управления.

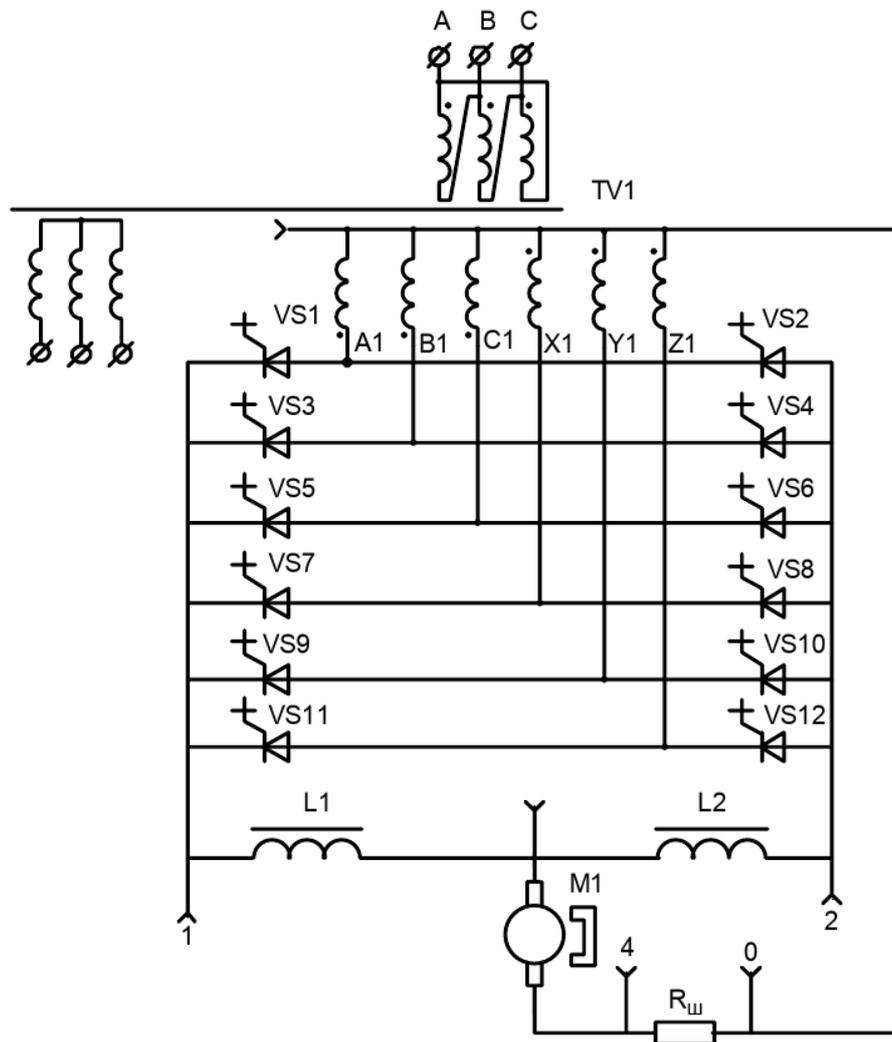


Рисунок 1.1 – Силовая схема электропривода

1.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- осциллограммы напряжений в характерных точках схемы: 0, 1, 2, 4;
- анализ полученных экспериментальных данных и вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните принцип работы силовой части электропривода ЭТ-6.
- 2 Поясните назначение дросселей $L1$, $L2$.
- 3 Перечислите блоки, входящие в состав электропривода ЭТ-6.

2 Лабораторная работа № 2. Исследование системы импульсно-фазового управления управляемым выпрямителем

Цель работы: практическое ознакомление с принципом действия системы формирования управляющих импульсов (СИФУ) тиристоров комплектного электропривода ЭТ-6.

2.1 Ход выполнения работы

2.1.1 Включить стенд в работу.

2.1.2 Подключить осциллограф $UZ4$ в розетку $X4$ и измерить форму напряжений в контрольных точках. Построить графики прохождения сигналов по контрольным точкам СИФУ. Дать необходимые объяснения измеренных форм напряжений в контрольных точках.

2.1.3 При определении порядка расчета и выбора основных элементов СИФУ следует дифференцировать СИФУ по узлам: генератор пилообразного напряжения, узел отсечки по входному напряжению, усилитель, дифференциатор импульсов, усилитель импульсов, блок развязки с силовой частью.

2.2 Краткие теоретические сведения

СИФУ осуществляет формирование и распределение управляющих импульсов на тиристоры силовой схемы и состоит из шести идентичных каналов управления.

Принцип работы схемы рассмотрим на примере канала фазы $A1$. На рисунке 2.1 приведена векторная диаграмма формирования опорного напряжения для канала $A1$. На рисунке 2.2 приведены графики опорного и фазного напряжений.

На рисунке 2.3 показана принципиальная схема СИФУ.

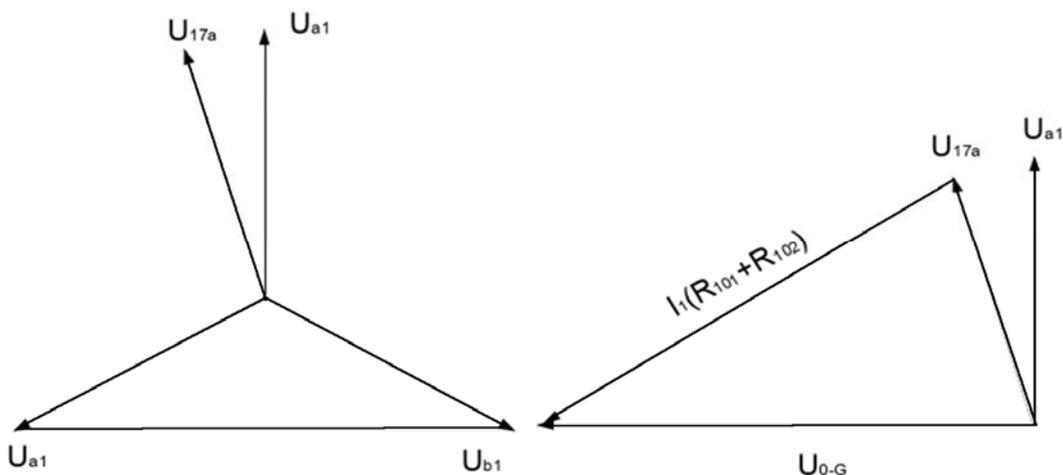


Рисунок 2.1 – Графики векторов напряжений

Синусоидальное напряжение U_{A1} , синхронизированное с фазой $A1$, с помощью трансформатора $TV14$ подается на вход СИФУ. Это напряжение в

контуре $R101, R102, C101$ распределяется таким образом, что на конденсаторе $C101$ вектор опорного напряжения U_{17a} будет опережать по фазе вектор фазного напряжения U_{1a} на угол (см. рисунок 2.1). Это обстоятельство позволяет практически полностью использовать передний фронт синусоиды опорного напряжения для отпирания катодного тиристора фазы $A1$ в диапазоне углов $0^\circ \dots 180^\circ$ (см. рисунок 2.2).

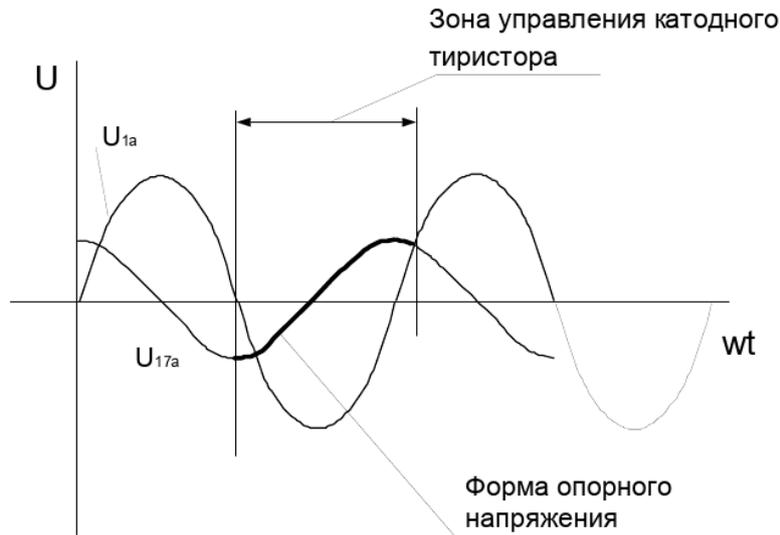


Рисунок 2.2 – Графики опорного и фазного напряжений

Отфильтрованное напряжение синусоидальной формы снимается с конденсатора $C101$ и через резистор $R103$ подается на вход нуля-органа $A101$. Ноль-орган выполнен на интегральном операционном усилителе с большим коэффициентом усиления. Моменты времени переключения нуля-органа $A1 = 1$ выделяются дифференцирующей цепочкой $R105, C105, C106$, производные напряжений усиливаются транзисторами $VT101, VT102$ и через импульсный трансформатор $TV102$ поступают на управление тиристорной анодной группы, а импульсы, усиленные транзистором $VT103$ через импульсный трансформатор $TV101$, поступают на управление тиристором катодной группы. Резисторы $R13$ и $R14$ служат для ограничения тока через первичные обмотки импульсных трансформаторов и являются общими для всех шести каналов СИФУ. Ширина импульса $10 \dots 15$ электрических градусов.

2.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- осциллограммы напряжений в контрольных точках;
- анализ полученных экспериментальных данных и вывод.

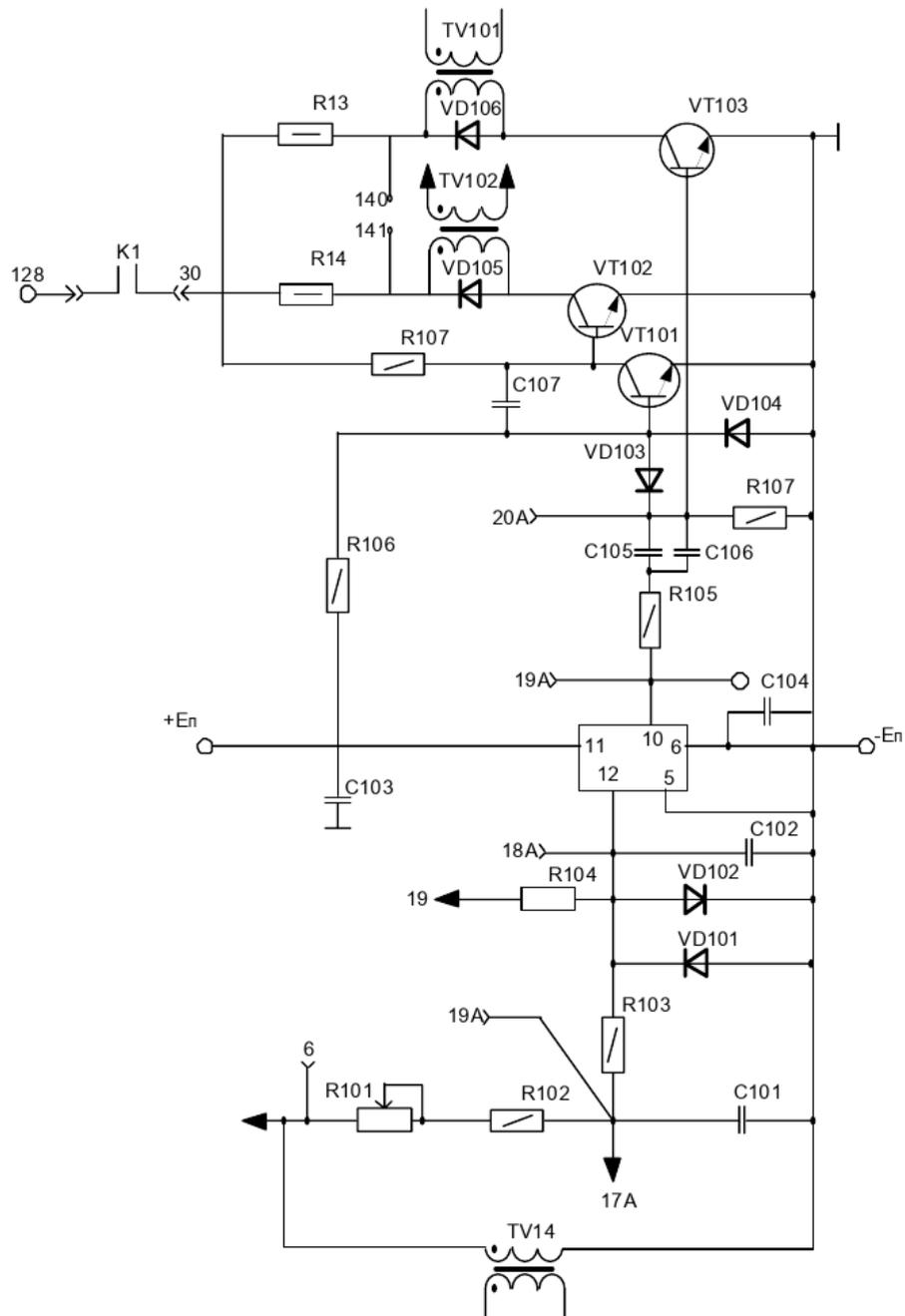


Рисунок 2.3 – Схема формирования управляющих импульсов

Контрольные вопросы

- 1 Объясните принцип действия схемы СИФУ.
- 2 Объясните назначение каждого элемента схемы СИФУ.
- 3 Объясните формы напряжений в контрольных точках СИФУ.
- 4 Дайте определение характеристики управления сифу и нарисуйте их графики.
- 5 Объясните частотные свойства СИФУ.
- 6 Рассчитайте и выберите по заданию преподавателя отдельные элементы СИФУ.

3 Лабораторная работа № 3. Исследование регулятора скорости в системе УВ-ДПТ

Цель работы: практическое ознакомление с действием регулятора скорости в структуре электропривода ЭТ-6, изучение влияния параметров цепей коррекции регулятора скорости на качественные характеристики электропривода, изучение принципа настройки регулятора скорости, особенности работы его узлов и принципов стабилизации параметров.

3.1 Ход выполнения работы

3.1.1 Включить стенд в работу.

3.1.2 Входное и выходное сопротивления регулятора скорости следует определять при включенном электроприводе, измерив значения тока приборами $PA4$ (на входе), $PA5$ (на выходе) регулятора и электронным вольтметром напряжения в точках 91–92 (вход), 156 (выход).

3.1.3 При определении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) регулятора скорости на вход регулятора (клеммы 91–92) подключают выход генератора частоты $UZ3$ и один канал входа осциллографа $UZ4$, второй канал входа осциллографа $UZ4$ подключают к выходу регулятора скорости (клемма 156). После этого, включают кнопкой $SB2$ преобразователь $UZ2$.

Двигатель $M2$ переключателем $S3$ должен быть отключен.

Входное напряжение генератора частоты подбирается таким образом, чтобы при частотах до 1 Гц. выходной сигнал имел синусоидальную форму. В дальнейших опытах это напряжение фиксируется постоянным по амплитуде и меняется только частота входного сигнала.

Результаты опыта заносятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Снятие амплитудно-частотной характеристики регулятора скорости

| Параметры | Номер опыта | | | | | |
|-----------------------|-------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Частота, Гц | | | | | | |
| $U_{\text{твых}}$, В | | | | | | |

Амплитудно-частотная характеристика определяется как $U_{\text{твых}} = f(\omega)$, где $U_{\text{твых}}$ – амплитуда выходного напряжения при $U_{\text{твх}} = \text{const}$.

При определении фазочастотной характеристики следует измерять разность фаз $\Delta\varphi$ синусоид входного и выходного напряжения на осциллографе $UZ4$ при различных частотах входного сигнала на регуляторе.

Результаты заносятся в таблицу 3.2.

Фазочастотная характеристика определяется как $\Delta\varphi = f(\omega)$.

Таблица 3.2 – Снятие фазочастотной характеристики регулятора скорости

| Параметры | Номер опыта | | | | | |
|----------------------------|-------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Частота, Гц | | | | | | |
| $\Delta\varphi$, эл. град | | | | | | |

3.1.4 При определении переходной функции регулятора скорости один канал входа осциллографа $UZ4$ подключают к выходу регулятора скорости (клемма 156). Преобразователь $UZ2$ должен быть включен, а двигатель $M2$ – отключен. При нахождении выключателя $S7$ в положении 1 регулятором $R112$ устанавливается напряжение на выходе преобразователя $UZ2$, равное $0,8 \cdot U_H$. После чего, переключателем $S7$ со второго положения в первое возбуждают вход регулятора скорости единичным сигналом, при этом, на выходе регулятора, на экране осциллографа будет показана переходная характеристика регулятора скорости. Эту характеристику в масштабе следует зарисовать в отчет.

3.2 Краткие теоретические сведения

Регулятор скорости совместно с регулятором тока и их корректирующими цепями обеспечивают необходимыми показателями электропривода в статике и динамике.

Регулятор скорости представляет собой многокаскадный усилитель постоянного тока с цепями обратной связи, собранный из трех микросхем. Первый каскад состоит из двух интегральных усилителей 301, 302. Структура первого каскада и соответствующий выбор, входящих в его каскад элементов, обеспечили термостабильность характеристик электропривода за счет компенсации теплового дрейфа усилителя 301 параллельно включенным усилителем 302. Второй каскад, собранный на операционном усилителе 303, служит для получения необходимого коэффициента усиления усилителя- регулятора скорости.

Усилитель имеет два входа:

- 1) 91 – вход задающего сигнала;
- 2) 90 – вход сигнала обратной связи (тахогенератора).

Цепи подстроек и коррекции:

- $R323, R324$ – резисторы смещения «нуля» усилителя;
- $R302, R307$ – резисторы подстройки максимальной скорости;
- $R319, R320, C315, C316, C317$ – элементы коррекции скоростного контура, которые подбираются в процессе наладки.

На рисунке 3.1 показана схема регулятора скорости.

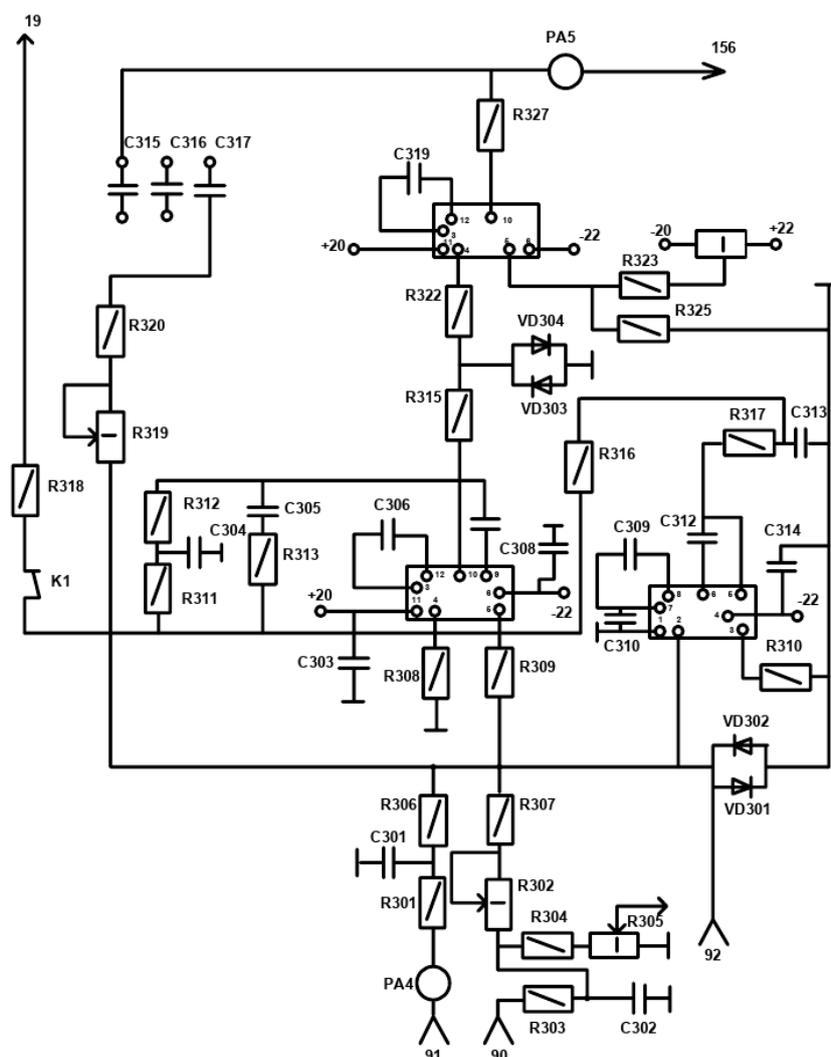


Рисунок 3.1 – Схема регулятора скорости

3.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- таблицы 3.1 и 3.2, графики, построенные по экспериментальным данным;
- анализ полученных экспериментальных данных и вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Объясните принцип работы схемы регулятора скорости.
- 2 Объясните назначение каждого элемента схемы.
- 3 Нарисуйте и объясните форму амплитудно-частотной характеристики регулятора скорости.
- 4 Нарисуйте и объясните форму фазочастотной характеристики регулятора скорости.
- 5 Определите звено С/Р регулятора скорости.

4 Лабораторная работа № 4. Исследование регулятора тока в системе УВ-ДПТ

Цель работы: практическое ознакомление с действием регулятора тока (РТ) в структуре электропривода ЭТ-6; изучение влияния параметров цепей коррекции регулятора тока на качественные характеристики электропривода; изучение принципов настройки регулятора тока, особенности работы его узлов и принципов стабилизации параметров.

4.1 Ход выполнения работы

4.1.1 Включить стенд в работу.

4.1.2 Входное и выходное сопротивления регулятора тока следует определять при включенном электроприводе, измерив значения тока приборами $PA6$ (на входе), $PA7$ (на выходе) регулятора и электронным вольтметром напряжения в точках 121–122 (вход), 19 (выход).

4.1.3 При определении амплитудно-частотных характеристик регулятора тока на вход регулятора (клеммы 121–122) подключают выход генератора частоты $UZ3$ и один канал входа осциллографа $UZ4$, второй канал входа осциллографа $UZ4$ подключают к выходу регулятора тока (клемма 19). После этого включают кнопкой $SB2$ преобразователь $UZ2$. Двигатель $M2$ переключателем $S3$ должен быть отключен.

Входное напряжение генератора частоты подбирается таким образом, чтобы при частотах до 1 Гц выходной сигнал имел синусоидальную форму. В дальнейших опытах это напряжение фиксируется постоянным по амплитуде и меняется только частота входного сигнала.

Результаты опыта заносятся в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Снятие амплитудно-частотной характеристики

| Параметры | Номер опыта | | | | | |
|----------------------------|-------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Частота, Гц | | | | | | |
| $U_{\text{вых}}, \text{В}$ | | | | | | |

При определении фазочастотной характеристики следует измерять разность фаз ($\Delta\varphi$) синусоид входного и выходного напряжения на осциллографе $UZ 4$ при различных частотах сигнала на регуляторе.

Фазочастотная характеристика определяется как $\Delta\varphi = f(\omega)$.

Результаты заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Снятие фазочастотной характеристики

| Параметры | Номер опыта | | | | | |
|----------------------------|-------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Частота, Гц | | | | | | |
| $\Delta\varphi$, эл. град | | | | | | |

4.2 Краткие теоретические сведения

Регулятор тока (рисунок 4.1) выполнен на операционном усилителе А601 и представляет собой пропорционально-интегральный регулятор.

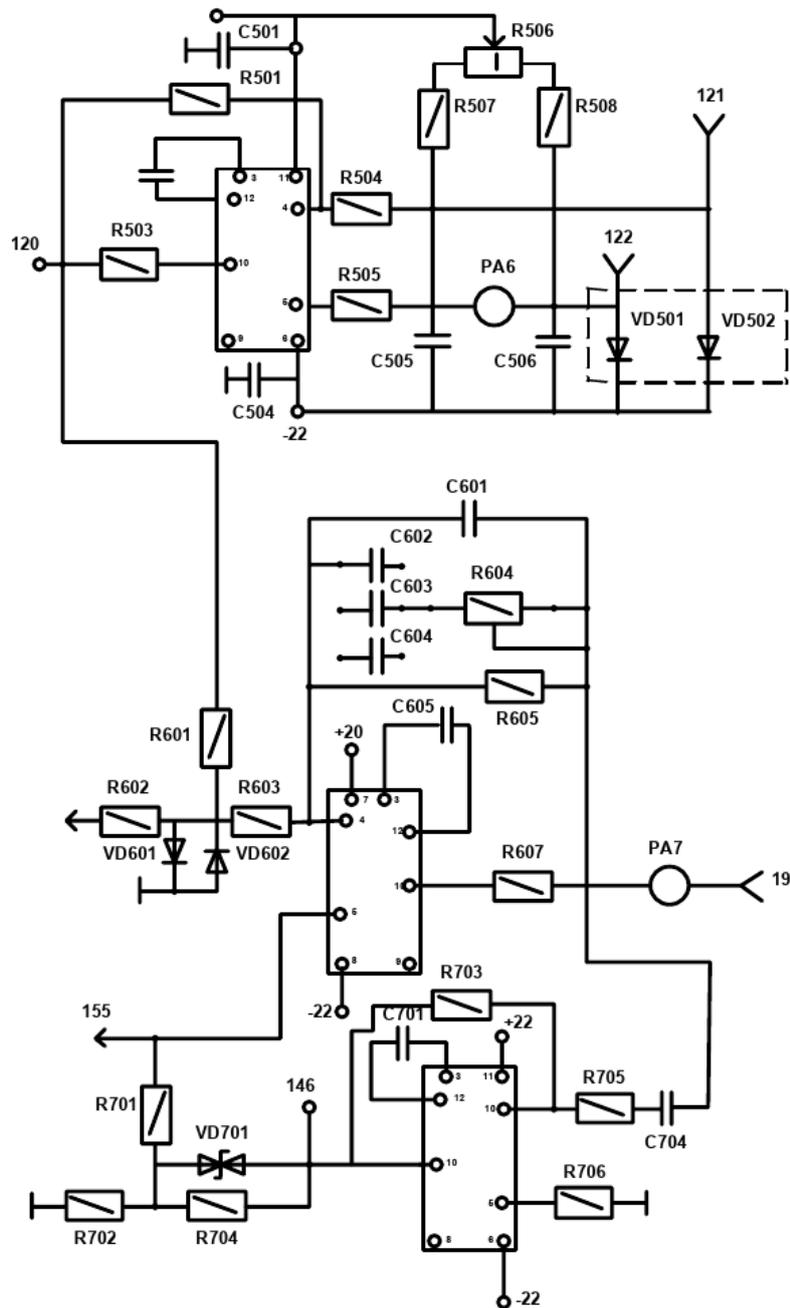


Рисунок 4.1 – Схема регулятора тока с датчиком тока и схемой ограничения производной напряжения на выходе регулятора

$R604$, $C601...C604$ – элементы коррекции токового контура, которые подбираются при наладке.

Датчик тока предназначен для передачи на вход регулятора тока сигнала обратной связи, пропорционального току якоря электродвигателя.

Датчик тока выполнен на основе магнитодиодов.

В состав датчика входят:

- два магнитодиода ($VD501$, $VD502$), включенные в мостовую схему;
- операционный усилитель постоянного тока $A501$;
- магнитная система на керамических магнитах. Балансировка датчика тока производится резистором $R506$.

Схема ограничения производной (СОП) входит в контур регулирования тока якоря и осуществляет ограничение наибольшего значения производной напряжения на выходе РТ с целью включения динамического уравнительного тока. СОП состоит из дифференцирующей цепочки $R705...C704$, операционного усилителя $A701$, стабилитрона $VD701$, делителя на резисторах $R701$, $R702$.

Схема работает следующим образом.

Выходной сигнал регулятора на выходе тока дифференцируется при величине выходного напряжения $A701$, большей, чем напряжение пробоя стабилитрона $VD701$, поступает на неинвертирующий вход усилителя РТ $A601$, осуществляя ограничение производной выходного сигнала РТ на заданном уровне.

4.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- таблицы 4.1 и 4.2, графики, построенные по экспериментальным данным;
- анализ полученных экспериментальных данных и вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Объясните принцип работы схемы регулятора тока.
- 2 Объясните назначение каждого элемента схемы.
- 3 Нарисуйте и объясните форму амплитудно-частотной характеристики регулятора тока.
- 4 Нарисуйте и объясните форму фазочастотной характеристики регулятора тока.
- 5 Определите звено САР регулятора тока.

5 Лабораторная работа № 5. Исследование силового блока ШИП постоянного тока

Цель работы: изучение силового блока преобразователя ЭПБ-2.

5.1 Ход выполнения работы

5.1.1 Изучить схему электрическую принципиальную силовой части электропривода ЭПБ-2.

5.1.2 Дать объяснение назначения каждого из элементов блока.

5.2 Краткие теоретические сведения

Схема силового блока (см. документацию на электропривод ЭПБ-2) представляет собой трехфазный мостовой транзисторный инвертор напряжения. В качестве силовых транзисторов и обратных диодов используются транзисторы типа ТКД ($VT1...VT6$), диоды Д4151 ($VD3...VD8$). Имеются исполнения силовых блоков, выполненные на модулях 2М2 или модулях иностранного производства. Питание инвертора производится через неуправляемый выпрямитель непосредственно от сети 380 или 220, 230 В, если напряжение на блоке соответственно 520 или 300 В. При других напряжениях на блоке питание от сети производится через трансформатор. Каждый из силовых транзисторов имеет индивидуальный предварительный усилитель – узел управления ключом $E1.1...E1.3$, $E2.2...E2.4$, обеспечивающий гальваническую развязку между силовой цепью и цепью управления, и предварительное усиление сигнала управления. Каждый из ключей зашунтирован RC-цепочкой $E3.1...E3.3$, $E4.1...E4.3$, обеспечивающей замедление нарастания напряжения при запираании транзистора, т. е. формировании траектории запираания. В цепи питания включены рабочие обмотки двух двухобмоточных реакторов $L1.1$ и $L2.1$, замедляющие нарастание тока при коротких замыканиях, а также ограничивающие «забросы» тока через обратный диод при открывании транзисторов. С измерительной обмотки $L1.2$ и силовой $L2.1$ сигнал используется для получения информации о токе для защиты преобразователя.

Рабочие обмотки зашунтированы разрядными цепями из диодов и резисторов $R1...R4$, $VD1$, $R5...R8$, $VD2$. К зажимам постоянного тока транзисторного моста подключен варистор $R17$ и через диоды разрядных цепей подключена дополнительная RC-цепь для снятия перенапряжений.

В цепи двух фаз выхода инвертора включены трансформаторы тока $TA1...TA4$ датчиков тока фаз U и V . К выходным зажимам инвертора подключается обмотка статора синхронного двигателя M , на валу которого размещается датчик положения ротора ПДФ8 или ПДФ9, включающий в себя также бесконтактный тахогенератор. Терморезистор $R18$ тепловой защиты ключей располагается на верхнем охладителе. Терморезистор $R19$ тепловой защиты двигателя встроен в лобовые части его обмоток (на схеме не показан).

5.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- ответы на контрольные вопросы к лабораторной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Объясните принцип работы силового блока электропривода ЭПБ-2.
- 2 Поясните назначение RC-цепочек $E3.1...E3.3$, $E4.1...E4.3$.
- 3 Поясните назначение реакторов $L1.1$ и $L2.1$.
- 4 Поясните назначение цепей $R1...R4$, $VD1$, $R5...R8$, $VD2$.

6 Лабораторная работа № 6. Исследование системы управления ШИП постоянного тока

Цель работы: изучение блоков питания, управления, задания электропривода ЭПБ-2.

6.1 Ход выполнения работы

6.1.1 Изучить схему электрическую принципиальную блоков питания, управления, задания электропривода ЭПБ-2.

6.1.2 Дать объяснение назначения каждого из элементов блока.

6.2 Краткие теоретические сведения

Блок питания состоит из силовой части – для подачи постоянного напряжения на силовой транзисторный частотный инвертор, и части – для питания цепей управления переменным напряжением повышенной частоты $f = 6000$ Гц, $U = 24$ В.

Блок питания на напряжение 520 В подключается к сети 380 В через автоматический выключатель $QF1$, предохранители $F1...F3$ и схему ограничения токов при пуске. При других напряжениях сети дополнительно включается трансформатор или автотрансформатор. Блоки питания на 300 В подключаются к сети 220 или 230 В. При других напряжениях сети подключаются через трансформатор.

Блок питания (см. документацию на электропривод ЭПБ-2) включает в себя следующие основные узлы:

– силовой выпрямитель на диодах $V1...V6$ с защитными RC-цепочками ($R1...R3$, $C1...C3$) и емкостной фильтр на конденсаторах $C16...C27$ с выравнивающими резисторами $R9$, $R10$;

– узел сброса энергии торможения, состоящий из транзисторных ключей $V15$, $V16$ с нагрузочными резисторами $R6$, $R7$, вместо которых через внешний клеммник может подключаться внешний, более мощный резистор;

– разрядник фильтра, состоящий из внешнего контакта $K1.2$ и резистора $R11$, причем контакт замыкает источник на резистор $R11$ при отключении силового питания;

– трансформатор и выпрямитель для питания цепей управления $T1$, $V9...V14$ с фильтром на конденсаторе $C15$;

– части блока питания для управления и контроля включающие в себя, в свою очередь, импульсный стабилизатор и автогенератор для цепей управления напряжением 24 В ($f \approx 6000$ Гц), блок управления и контроля, обеспечивающий управление включением силового напряжения, ключом узла сброса, а также формирующий сигналы готовности блока питания.

Импульсный стабилизатор напряжения ($A1$) (см. документацию на электропривод ЭПБ-2).

Импульсный стабилизатор напряжения выполнен на транзисторах $V14$, $V17$, $V18$, операционных усилителях $DA1$, $DA2$ по двухконтурной схеме с внутренним контуром регулирования тока и внешним контуром регулирования напряжения. Регулятор тока выполнен релейным на усилителе $DA2$, пропорционально-интегральный регулятор напряжения – на усилителе $DA1$.

В схеме предусмотрены защиты от перегрузок и от пробоя регулирующих транзисторов $V14$, $V17$, $V18$. При перегрузке на выходе регулятора напряжения сигнал возрастает, пробивается стабилитрон $V4$, открываются транзисторы $V7$, $V8$, запираются $V14$, $V17$, $V18$, в результате $DA1$ выходит на насыщение и остается в насыщенном состоянии («запоминает» срабатывание защиты). Загорается светодиод $V12$ «Перегрузка стабилизатора».

При пробое одного из транзисторов $V14$, $V17$, $V18$ выходное напряжение стабилизатора превышает заданное. На выходе $DA1$ появляется положительное напряжение, открывается транзистор $V13$ и запирает выходной каскад автогенератора отрицательным сигналом U_0 . Загорается светодиод $V11$ в блоке $A2$ «Генератор отключен».

Узел автогенератора $A2$ (см. документацию на электропривод ЭПБ-2).

Узел автогенератора выполнен на операционном усилителе $DA1$ и транзисторах $V12...V17$. Операционный усилитель охвачен положительной обратной связью через делитель $R5$, $R3$, кроме того, в схеме предусмотрена отрицательная обратная связь через интегрирующую цепочку $R6$, $C3$, в результате действий этих двух связей возникает режим автоколебаний.

Выходной каскад выполнен на полумостовой схеме, когда в два плеча моста включены транзисторы усилителя мощности $V17$, $V16$. В схеме управления для исключения сквозных токов ключей предусмотрена нелинейная отрицательная обратная связь по выходному напряжению автогенератора через резистор $R20$ и диоды $V9$, $V10$ на базы транзисторов предварительного каскада усиления $V12$, $V13$, обеспечивающая запертое состояние выходных транзисторов при наличии на выходе напряжения противоположной полярности. Дополнительная задержка

при открывании ключа обеспечивается конденсатором $C4$. В схеме предусмотрена автоматическая балансировка напряжений на емкостях $C4...C7$ и $C8...C11$ за счет отрицательной обратной связи на вход $DA1$ через резистор $R4$.

Узел для управления и контроля $A3$ (см. документацию на электропривод ЭПБ-2).

Питание узла осуществляется от автогенератора через трансформатор $T1$.

К вторичным обмоткам трансформатора подключены выпрямители источника питания базовой цепи ключа сброса энергии ± 7 В на диодах $V1, V2, V8, V9$; источника питания цепей управления $+12$ В, выполненного по схеме удвоителя напряжения на $C2, C8, V3, V4$; стабилизированный источник $+15$ В на $C9, R12, V16$, питающийся от схемы утроения напряжения на $C3, V5, V6$.

Схема управления ключом сброса энергии выполнена на операционном усилителе $DA1$ ($P3$), элементе $DD2.1$, транзисторе $V18$. Управление сбросом энергии осуществляется в функции разности напряжений измерительного источника напряжения на $C4...C6, R6$, образованного диодом $V7$ и диодами $V1, V3, V5, V18...V20$ в силовой схеме, и напряжения на конденсаторах фильтра $C16...C27$ (зажимы L_+, L_-). Если напряжение на зажимах L_+, L_- превышает напряжение измерительного источника, отслеживающего напряжение сети, к резистору $R10$ прикладывается положительное напряжение U_{ex} , равное разности:

$$U_{ex} = U_{изм} - U_{нум}, \quad (6.1)$$

где $U_{изм}$ – напряжение между зажимами L_+ и «Контроль сети»;

$U_{нум}$ – напряжение между зажимами L_+ и L_- .

В момент, когда U_{ex} достигает 30 В, на выходе релейного элемента (РЭ) на усилителе $DA1$ появляется положительное напряжение, на входе 5 $DD2$ логический сигнал 1, на выходе 6 $DD2$ логический 0. Открываются транзистор $V18$ и транзисторы сброса $V15, V16$. Одновременно загорается светодиод $V22$ «Сброс энергии». При снижении напряжения U_{ex} до величины 10 В переключается РЭ и отключается сброс энергии.

В узле предусмотрена цепь контроля неисправности сброса энергии. Для контроля производится сравнение состояния выхода РЭ ($DA1$) с напряжением на коллекторе транзистора узла сброса $V15$, которое контролируется пороговым элементом ПЭ4, выполненным на $DD2.3$ с входным делителем напряжения на резисторах $R1, R4$. Если транзистор $V15$ не закрывается при выключении РЭ, на выходе 8 $DD2$ появляется 0, включается триггер T ($DD3.4; DD1.4$) загорается светодиод $V28$ «Авария», отключается реле $K1$, запираются $V17, V11...V13$, т. е. снимаются сигналы готовности работы блока питания.

Для исключения ложных срабатываний цепей сброса энергии при обрыве фазы силового напряжения введена цепь блокировки узла сброса на $DD1.1, R5, R7$ – пороговый элемент ПЭ1 на функциональной схеме.

Для исключения ложного срабатывания триггера цепи контроля исправности сброса при отключении силового напряжения введена блокировка по

сигналу защиты от понижения напряжения на элементе $DD3.2$.

Защита от обрыва фазы выполнена на пороговом элементе $DD1.1$, элементах $V30$, $V31$, $C13$ и $DD3.3$ и воздействует на снятие готовности блока питания.

Схема защиты от понижения напряжения состоит из цепи контроля напряжения сети на резисторах $R1$, $R11$ и порогового элемента $ПЭ2$ на $DD1.2$, $DD1.3$ и $R18$. Защита от повышения напряжения выполняется с помощью цепи контроля напряжения на операционном усилителе $DA2$, с входными цепями опорного напряжения $R24$, $R25$ и входным делителем на $R8$, $R11\dots ПЭ3$ на функциональной схеме.

Выходы защит от понижения напряжения и перенапряжения суммируются на входах 9 и 10 $DD3$, выход которого 8 $DD3.8$ управляет сигналом «Готовность БП». При понижении напряжения в силовой цепи более чем на 20 %...25 % на выходе входного делителя на резисторах $R8$, $R11$ напряжение достигает уровня логического 0, становится менее порога, на выходе 8 $DD1$ напряжение равно «0», на выходе 8 $DD3 - 1$. Снимается сигнал «Готовность БП», запирая силовые ключи в блоке регулирования. При восстановлении напряжения вновь появляется сигнал «Готовность БП».

При возникновении на конденсаторах блока питания перенапряжения более 25 % на выходе усилителя $DA2$ появляется отрицательное напряжение, на входе 10 $DD3 - 0$. Одновременно исчезает сигнал «Готовность БП», гаснет светодиод $V10$. При уменьшении перенапряжения до допустимого уровня вновь появляется сигнал «Готовность БП».

Для управления включением силового напряжения в схеме предусмотрено реле $K1$, катушка которого подключается транзистором $V29$, управляемым с выхода 6 $DD3.4$. Включение силового напряжения возможно лишь при наличии напряжения питания цепей управления. При неисправном узле сброса энергии силовое напряжение отключается.

При включении автоматического выключателя $QF1$ подается напряжение на зажимы питания цепей управления $U1$, $V1$, $W1$, включаются в работу импульсный стабилизатор и автогенератор. Появляется напряжение питания в блоке управления и контроля. Срабатывает реле $K1$ в блоке управления и контроля и замыкает цепь питания катушки реле $K3$, которое также срабатывает, обеспечивая замыкание цепи катушки магнитного пускателя $K1$. $K1$ включается и подает напряжение на силовые зажимы U , V , W через резисторы $R1\dots R3$, начинается заряд конденсаторов фильтра $C16\dots C27$ через резисторы и диодный мост. Последовательные резисторы обеспечивают апериодический закон изменения напряжения на конденсаторах, исключая перенапряжение в момент включения. Блок-контакт пускателя $K1$ замыкает цепь питания катушки магнитного пускателя $K2$, и он срабатывает, шунтируя пусковые резисторы $R1\dots R3$. При достижении напряжения величины 75 %...80 % номинального происходит выключение защиты от понижения напряжения в блоке питания, управления и контроля, и если цепь сброса исправна, то появляются сигналы «Готовность БП». Блок питания готов к работе. Если цепь сброса не исправна (пробит ключ $V15$ или $V16$, отсутствует перемычка на клеммнике между зажимами «Резистор» и «Сброс энергии» или не подключен резистор $R_{внеш}$), то сигналы готовности не

появляются, срабатывают триггеры $DD3.4$, $DD1.4$, отключается $K1$ в узле управления и контроля, обесточивается катушка пускателя $K1$, отключая силовое напряжение и разряжая блок-контактом фильтры $C16...C27$ на резистор $R11$.

6.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- ответы на контрольные вопросы к лабораторной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните принцип работы блока питания.
- 2 Поясните принцип работы импульсного стабилизатора напряжения.
- 3 Поясните принцип работы автогенератора.
- 4 Поясните принцип работы схемы управления и контроля.

7 Лабораторная работа № 7. Исследование силового блока тиристорного регулятора напряжения

Цель работы: изучить работу силового блока тиристорного регулятора напряжения.

7.1 Ход выполнения работы

7.1.1 Изучить схему силовой части тиристорного регулятора напряжения.

7.1.2 Изучить алгоритм управления силовыми тиристорами.

7.1.3 Изучить принципы регулирования напряжения методом фазового управления.

7.1.4 Снять осциллограммы токов и напряжений на фазах статора электродвигателя при работе от лабораторного образца тиристорного регулятора напряжения при пяти различных значениях угла управления.

7.1.5 Проанализировать полученные осциллограммы, сделать вывод о соответствии полученных экспериментальных данных теории работы тиристорного регулятора.

7.2 Краткие теоретические сведения

Тиристорные регуляторы напряжения представляют собой устройства, предназначенные для регулирования частоты вращения и момента электродвигателей. Регулирование частоты вращения и момента производится за счет изменения напряжения, подводимого к статору двигателя, и осуществляется

изменением угла открытия тиристорov. Такой способ управления электродвигателем получил название фазового управления. Этот способ является разновидностью параметрического (амплитудного) управления.

Тиристорные регуляторы напряжения могут выполняться как с замкнутой, так и с разомкнутой системой регулирования. Регуляторы с разомкнутой системой не обеспечивают удовлетворительного качества процесса регулирования частоты вращения. Основное их назначение – регулирование момента для получения нужного режима работы привода в динамических процессах.

На рисунке 7.1 показана схема силовой части тиристорного регулятора напряжения.

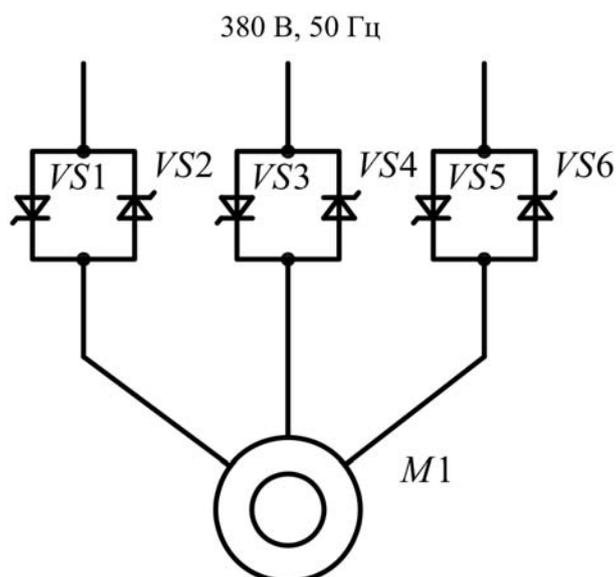


Рисунок 7.1 – Схема силовой части тиристорного регулятора напряжения

Силовая часть ТРН включает в себя шесть встречно-параллельно включенных тиристорov.

Принцип работы ТРН поясняется на рисунке 7.2 и заключается в следующем. Отпирательный импульс подается на тиристоры с заданной задержкой относительно момента перехода напряжения через ноль. Эта задержка называется углом управления φ . Выходное напряжение ТРН снижается при увеличении угла управления.

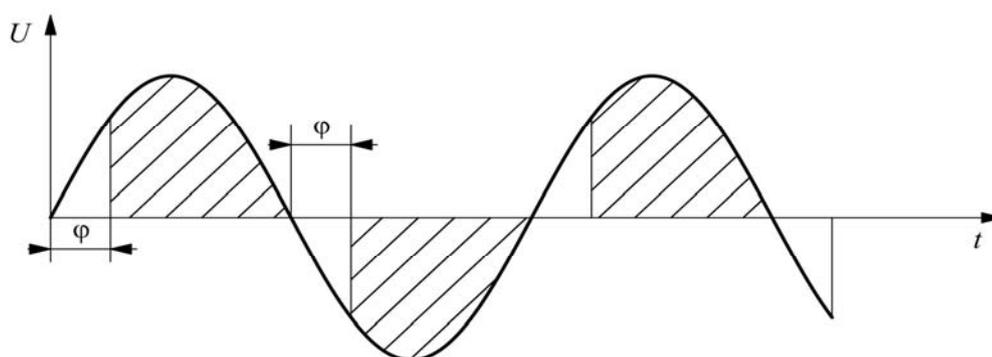


Рисунок 7.2 – Принцип работы тиристорного регулятора напряжения

Управляющие импульсы, подаваемые на каждый из тиристоров, синхронизированы с моментами перехода напряжения соответствующей фазы через ноль. Таким образом обеспечивается симметричное регулирование напряжения на трех фазах статора асинхронного электродвигателя.

7.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- осциллограммы токов и напряжений на фазах статора электродвигателя при работе от лабораторного образца тиристорного регулятора напряжения при пяти различных значениях угла управления;
- анализ полученных экспериментальных данных и вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Изобразите схему силовой части ТРН.
- 2 Поясните алгоритм управления силовыми тиристорами ТРН.
- 3 Поясните принцип фазового регулирования напряжения на статоре электродвигателя.
- 4 Поясните необходимость наличия синхронизации между управляющими импульсами и напряжением фаз питающей сети.

8 Лабораторная работа № 8. Исследование системы управления тиристорным регулятором напряжения

Цель работы: изучение схемотехники и принципа работы блоков системы управления тиристорным регулятором напряжения.

8.1 Ход работы

8.1.1 Изучить схему и принцип работы блока синхронизации с питающей сетью.

8.1.2 Получить осциллограммы трех выходных сигналов блока синхронизации в составе лабораторного образца ТРН.

8.1.3 Сделать вывод о работоспособности блока синхронизации и соответствии полученных осциллограмм теории работы блока.

8.1.4 Изучить схему и алгоритм работы микропроцессорной системы управления ТРН.

8.1.5 Получить осциллограммы шести выходных сигналов управления тиристорами, снятых с выходов микроконтроллера системы управления в составе лабораторного образца ТРН.

8.1.6 Сделать вывод о корректности работы микропроцессорной системы

управления.

8.1.7 Измерить напряжение на выходе блока питания лабораторного образца ТРН.

8.1.8 Сделать вывод о работоспособности блока питания.

8.2 Краткие теоретические сведения

Схема блока синхронизации показана на рисунке 8.1.

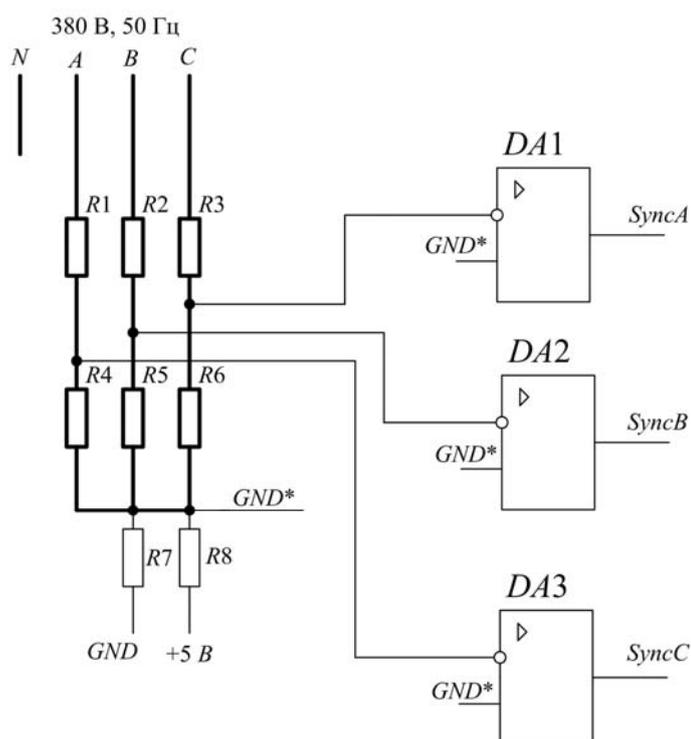


Рисунок 8.1 – Схема блока синхронизации

Блок синхронизации содержит делители на резисторах $R1...R6$, три операционных усилителя $DA1...DA3$ в режиме компаратора. Резисторы $R7$ и $R8$ служат для создания напряжения смещения снимаемых с делителей сигналов, что позволяет использовать однополярное питание операционных усилителей.

Резисторы $R1, R2, R3$ имеют сопротивления порядка сотен килоом, а резисторы $R4, R5, R6$ – сотен ом. Таким образом, высокое входное напряжение делителя уменьшается до долей вольта на входах операционных усилителей.

При положительном значении напряжения фазы питающей сети U_{ex} компараторы на операционных усилителях $DA1...DA3$ вырабатывают положительное постоянное напряжение $U_{вых}$, соответствующее уровню логической единицы. При отрицательном значении напряжения питающей сети на выходе компараторов формируется нулевое напряжение (уровень логического нуля). Таким образом, блок синхронизации формирует на входах микроконтроллера системы управления логические единицы на протяжении положительной полуволны питающего напряжения и логические нули на протяжении отрицательной полуволны.

Принцип работы блока синхронизации поясняется на рисунке 8.2.

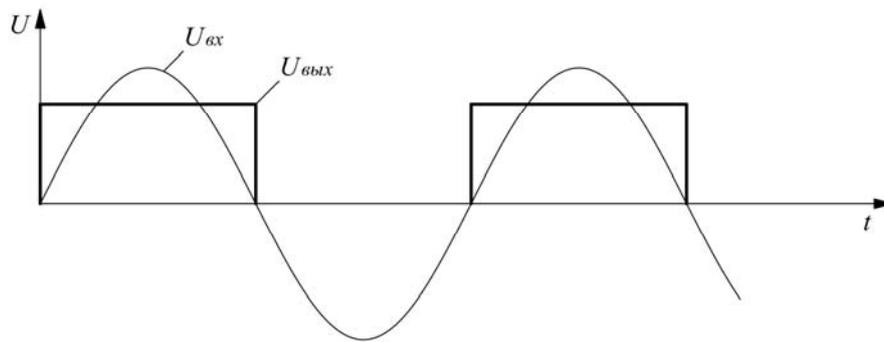


Рисунок 8.2 – Принцип работы блока синхронизации

Функциональная схема блока управления тиристорным регулятором напряжения показана на рисунке 8.3.

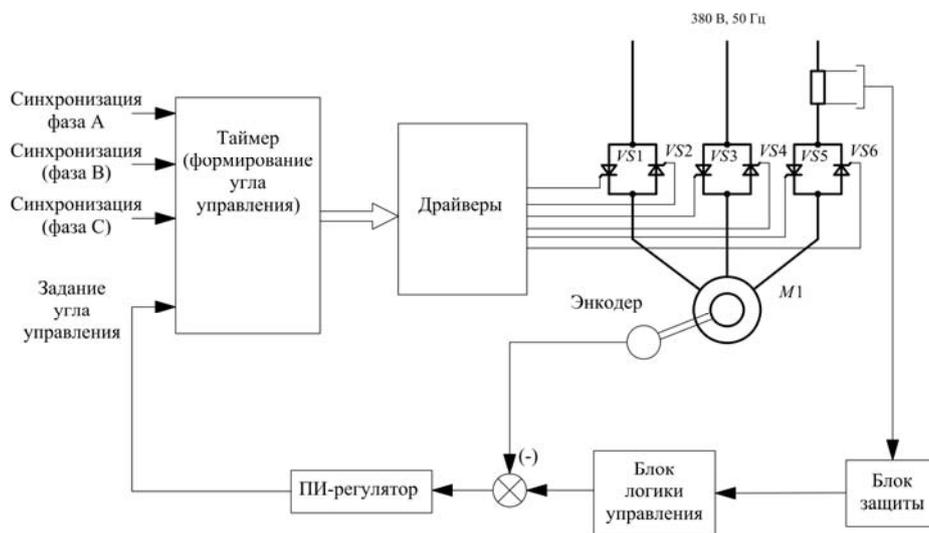


Рисунок 8.3 – Функциональная схема системы управления тиристорным регулятором напряжения

Система управления работает следующим образом. Сигналы, вырабатываемые рассмотренным ранее блоком синхронизации, поступают на входы шестиканального таймера. Задание величины угла управления осуществляется пропорционально-интегральным регулятором (ПИ-регулятор) на основании разности между заданной и измеренной скоростью вращения ротора электродвигателя. Блок драйверов осуществляет усиление управляющих сигналов и передачу их на тиристоры с гальванической развязкой. Блок защиты контролирует величину тока фазы электродвигателя, рассчитывает температуру на основании тепловой модели и вырабатывает команду отключения электропривода при перегреве электродвигателя.

Схема электрическая принципиальная системы управления показана на рисунке 8.4.

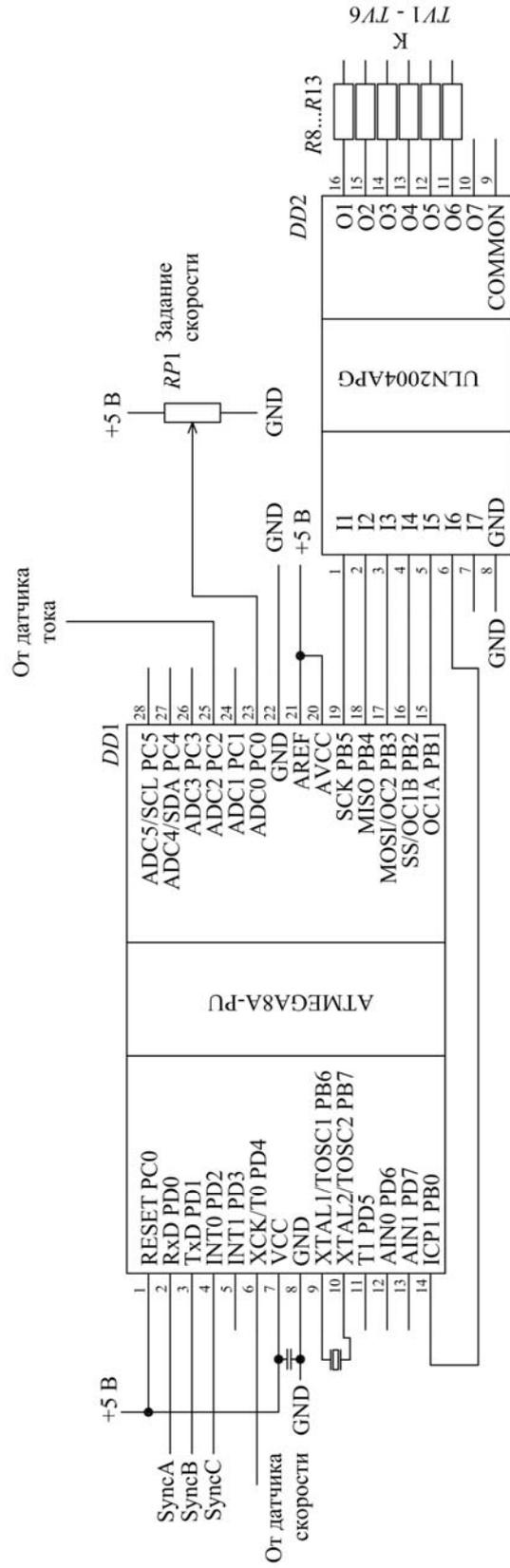


Рисунок 8.4 – Схема системы управления

Таймер, блок логики управления, ПИ-регулятор и блок защиты реализованы в виде микропрограммы, выполняющейся на микроконтроллере *DD1*. Блок драйверов включает в себя транзисторные ключи *DD2* и импульсные трансформаторы *TV1...TV6*. Схема включения импульсных трансформаторов для управления одной фазой тиристорного регулятора показана на рисунке 8.5.

Блок драйверов работает следующим образом. При подаче сигнала с уровнем логической единицы на один из шести задействованных входов транзисторных ключей *DD2* замыкается цепь первичной обмотки соответствующего импульсного трансформатора. Протекание тока по вторичной обмотке при этом блокируется диодами *VD1...VD6*, включенными в обратном направлении. При переходе входного сигнала к логическому нулю разрывается цепь первичной обмотки импульсного трансформатора, и запасенная в магнитопроводе энергия создает ток во вторичной обмотке. В результате этого происходит отпирание силового тиристора.

На рисунке 8.6 показана схема блока питания системы управления. Входное напряжение понижается трансформатором *TV1* до величины 8 В. Затем пониженное напряжение выпрямляется при помощи диодного моста *VD1...VD4*. Микросхема *DA1* представляет собой параметрический стабилизатор, который обеспечивает постоянное напряжение 5 В на выходе. Светодиод *VD5* является индикатором работы блока питания. Резистор *R1* служит для ограничения тока светодиода.

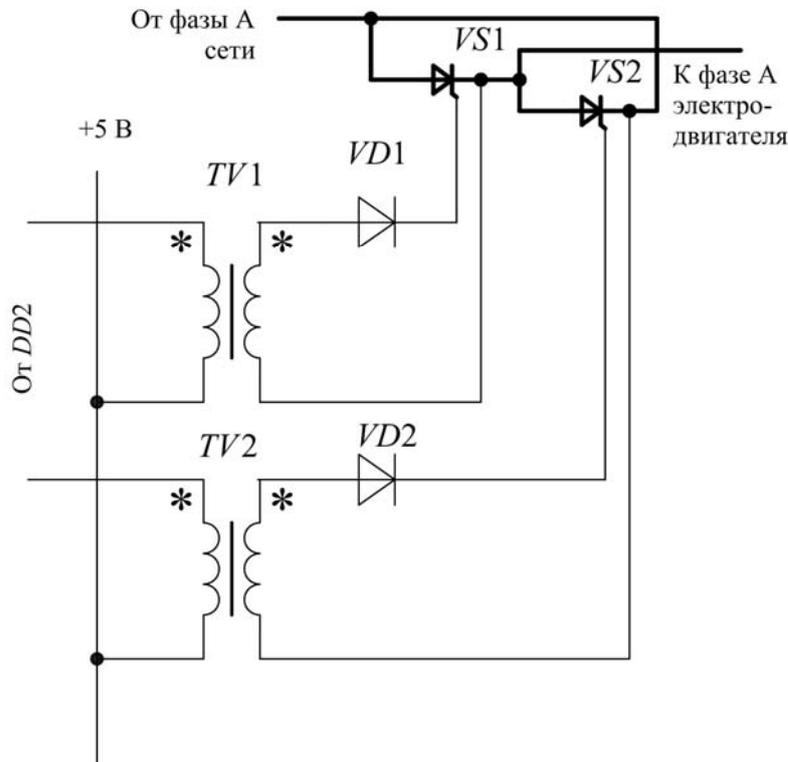


Рисунок 8.5 – Схема включения импульсных трансформаторов (фаза А)

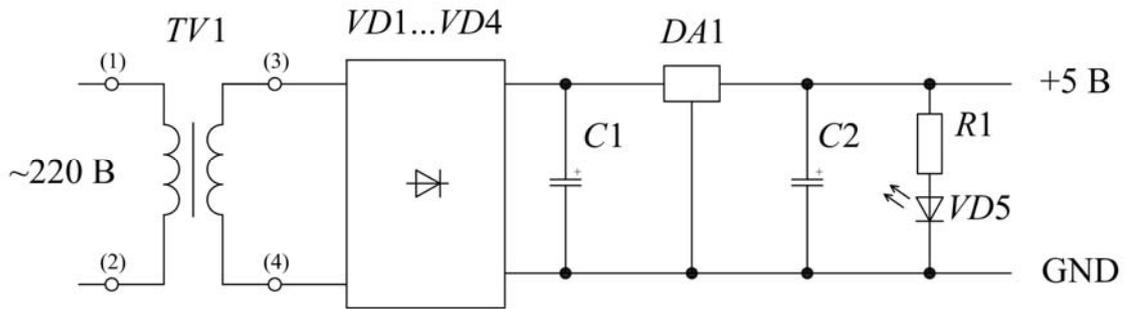


Рисунок 8.6 – Схема блока питания

8.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- осциллограммы трех выходных сигналов блока синхронизации в составе лабораторного образца ТРН;
- вывод о работоспособности блока синхронизации и соответствии полученных осциллограмм теории работы блока;
- изучить схему и алгоритм работы микропроцессорной системы управления ТРН;
- осциллограммы шести выходных сигналов управления тиристорами, снятых с выходов микроконтроллера системы управления в составе лабораторного образца ТРН;
- вывод о корректности работы микропроцессорной системы управления.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните принцип работы блока синхронизации.
- 2 Поясните алгоритм работы микропроцессорной системы управления.
- 3 Поясните схему и принцип работы блока драйверов силовых тиристор.
- 4 Поясните принцип работы блока питания лабораторного образца ТРН.

9 Лабораторная работа № 9. Исследование транзисторного регулятора напряжения с ШИМ

Цель работы: изучить схемотехнику и принцип работы блоков транзисторного регулятора напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ТРН-ШИМ).

9.1 *Ход работы*

9.1.1 Изучить схему силовой части ТРН-ШИМ.

9.1.2 Изучить алгоритм управления силовыми транзисторами ТРН-ШИМ.

9.1.3 Изучить схему и принцип работы блока синхронизации.

9.1.4 Получить осциллограммы выходных сигналов блока синхронизации с лабораторного образца ТРН-ШИМ.

9.1.5 Сделать выводы о корректности работы блока синхронизации и соответствии полученных осциллограмм изученному алгоритму работы.

9.1.6 Изучить схему блока драйверов силовых транзисторов.

9.1.7 Получить осциллограммы входных сигналов блока драйверов, поступающих от микропроцессорной системы управления лабораторного образца ТРН-ШИМ.

9.1.8 Сделать вывод о соответствии полученных осциллограмм изученному алгоритму управления силовыми транзисторами.

9.2 *Краткие теоретические сведения*

Силовая часть регулятора напряжения с ШИМ-управлением показана на рисунке 9.1 и содержит две группы транзисторов – основную $VT1...VT3$ и дополнительную $VT4...VT6$. Основная группа транзисторов подключает статор электродвигателя к питающей сети через входной фильтр, дополнительная группа транзисторов служит для обеспечения пути протекания тока в течение периода времени, когда основная группа отключена. Регулирование напряжения на статоре электродвигателя осуществляется методом широтно-импульсной модуляции напряжения питающей сети.

В зависимости от направления протекания тока в каждой фазе статора электродвигателя в основной группе должен быть открыт либо один из транзисторов, либо два. Транзистор должен быть открыт в тех фазах, где ток протекает в прямом направлении, а в обратном направлении ток протекает через обратные диоды. Таким образом, система управления преобразователем должна получать информацию о направлении протекания тока в каждой фазе при помощи датчиков тока.

Отключение статора электродвигателя от питающей сети осуществляется запираем всех находившихся в открытом состоянии транзисторов основной группы. При этом необходимо обеспечить путь для протекания токов фаз статора в обход питающей сети, для чего открываются транзисторы дополнительной

группы. К тому же нужно открыть транзисторы только тех фаз, ток в которых протекает в обратном направлении. При этом, если в основной группе было включено два транзистора, в дополнительной должен быть включен один, и наоборот. Для реализации импульсного регулятора необходимо решить проблему одновременного переключения основной и дополнительной групп транзисторов, исключая наличие пауз в протекании тока статора и наличие путей протекания токов короткого замыкания.

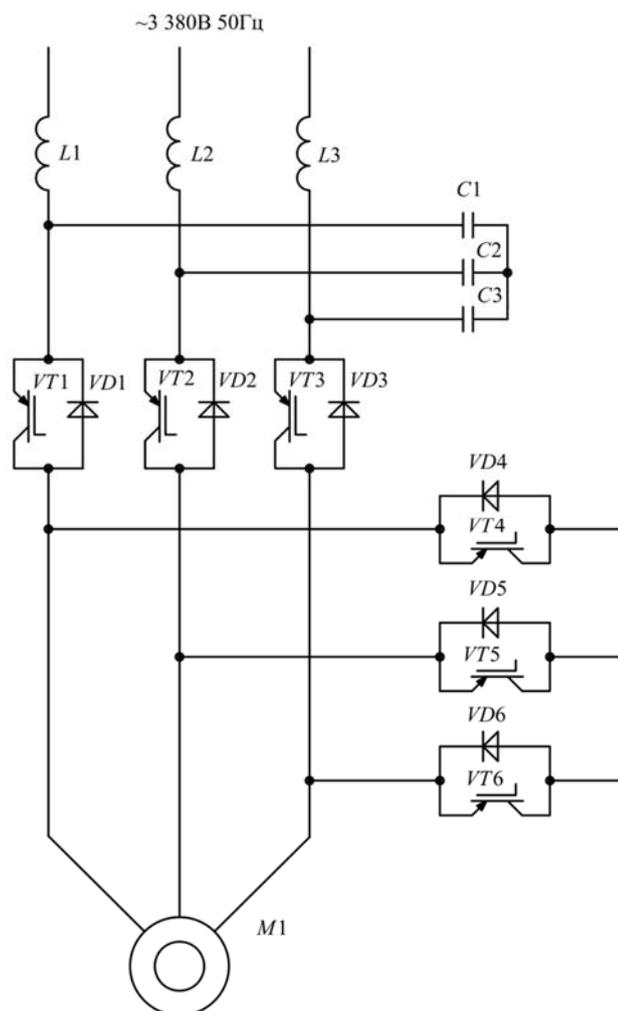


Рисунок 9.1 – Схема силовой части ТРН-ШИМ

Исключение пауз протекания тока в данной схеме реализуется за счет применения алгоритма переключения групп транзисторов с перекрытием. При этом транзисторы дополнительной группы отпираются раньше, чем запираются транзисторы основной группы. Протекание токов короткого замыкания во время интервала перекрытия исключается за счет того, что в работу включаются только те транзисторы, которые расположены в фазе с прямым направлением протекания тока, таким образом, для каждой фазы обеспечивается возможность протекания тока только в одном направлении, противоположном направлению возможного протекания тока короткого замыкания.

Таким образом, цикл работы предлагаемого устройства содержит шесть

интервалов, на каждом из которых три транзистора находятся в открытом состоянии и три транзистора – в закрытом. Номер текущего интервала в каждый момент времени определяется направлениями протекания токов в фазах обмоток статора электродвигателя (таблица 9.1).

Таблица 9.1 – Алгоритм переключения силовых транзисторов

| Интервал | I_a | I_b | I_c | Открытый транзистор |
|----------|-------|-------|-------|---------------------|
| 1 | + | - | + | $VT1, VT3, VT5$ |
| 2 | + | - | - | $VT1, VT5, VT6$ |
| 3 | + | + | - | $VT1, VT2, VT6$ |
| 4 | - | + | - | $VT2, VT4, VT6$ |
| 5 | - | + | + | $VT2, VT3, VT4$ |
| 6 | - | - | + | $VT3, VT4, VT5$ |

На рисунке 9.2 показана схема узла синхронизации по напряжению. На входные клеммы $XT1.1, XT1.2, XT1.3$ подается трехфазное напряжение питающей сети. Резисторы $R1...R6$ представляют собой делители напряжения. На выходе делителей величина напряжения составляет десятые доли вольта. Резисторы $R7$ и $R8$ служат для формирования положительного смещения выходных сигналов делителей. Это позволяет использовать операционный усилитель $DA1$ с однополярным питанием.

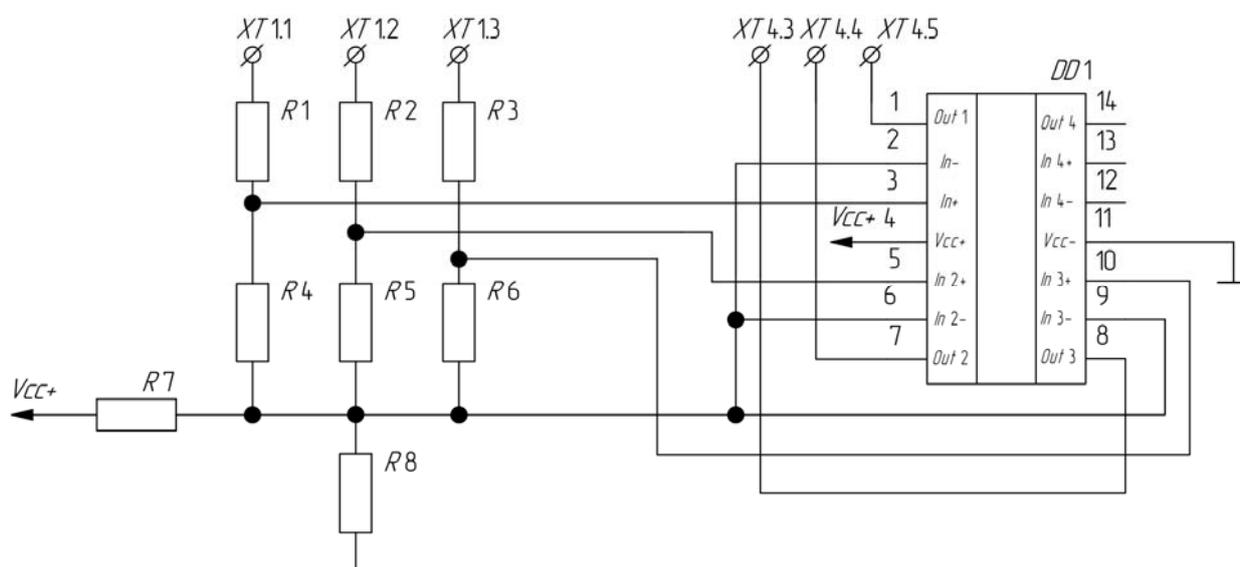


Рисунок 9.2 – Схема узла синхронизации по напряжению

На рисунке 9.3 показана схема одного узла синхронизации по току.

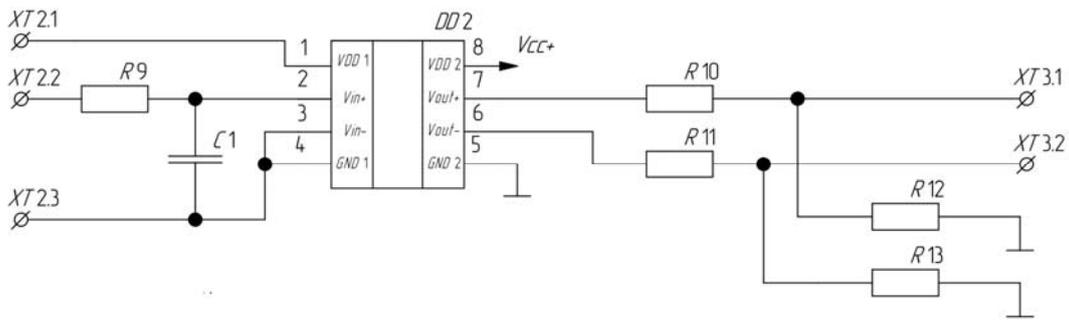


Рисунок 9.3 – Схема одного канала узла синхронизации по току

На рисунке 9.4 показана схема одного из трех идентичных каналов блока драйверов. Оптопары *DD1* и *DD3* осуществляют гальваническую развязку поступающих от микропроцессорной системы управления сигналов. Драйвер полумоста *DD2* осуществляет усиление управляющих сигналов до уровня, достаточного для отпирания силовых транзисторов. Затворы силовых транзисторов подключаются к клеммам *XT5.1* и *XT5.3*. Эмиттеры подключаются к клеммам *XT5.2* и *XT5.4*.

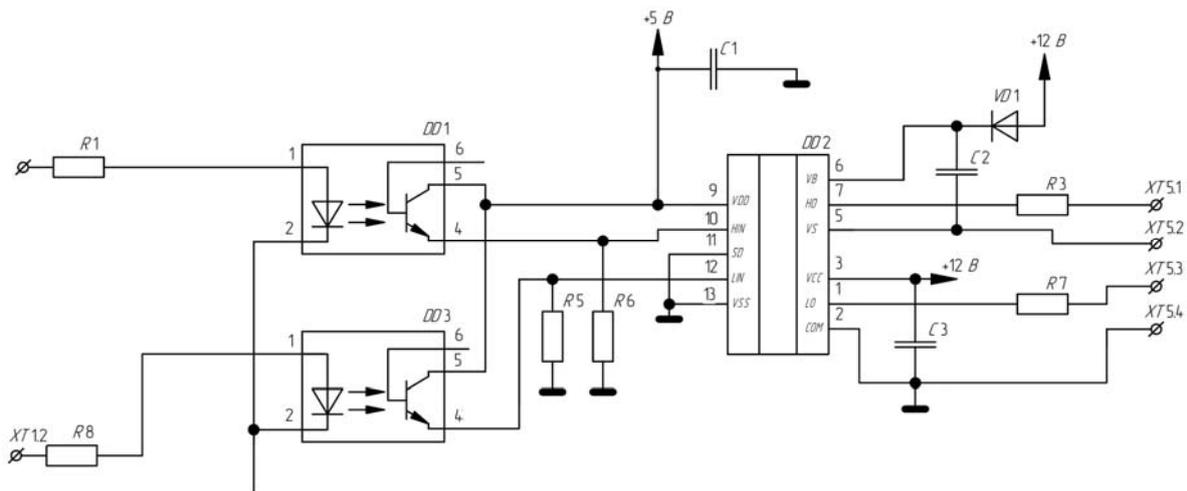


Рисунок 9.4 – Схема одного канала блока драйверов силовых транзисторов

9.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- осциллограммы выходных сигналов блока синхронизации с лабораторного образца ТРН-ШИМ;
- выводы о корректности работы блока синхронизации и соответствии полученных осциллограмм изученному алгоритму работы;
- осциллограммы входных сигналов блока драйверов, поступающих от микропроцессорной системы управления лабораторного образца ТРН-ШИМ;
- вывод о соответствии полученных осциллограмм изученному алгоритму управления силовыми транзисторами.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните алгоритм управления силовыми транзисторами ТРН-ШИМ.
- 2 Поясните схему и принцип работы блока синхронизации ТРН-ШИМ.
- 3 Поясните принцип работы блока драйверов.
- 4 Поясните назначение элементов в составе блока драйверов.

10 Лабораторная работа № 10. Исследование транзисторного автономного инвертора напряжения

Цель работы: изучение силовой части автономного инвертора напряжения, реализованного на IGBT-транзисторах.

10.1 Ход работы

10.1.1 Изучить схему транзисторного автономного инвертора напряжения и алгоритм управления его транзисторами.

10.1.2 Получить осциллограммы напряжений и токов фаз электродвигателя, работающего от лабораторного образца автономного инвертора. Выполнить измерения для пяти различных значений частоты выходного напряжения.

10.1.3 Сделать вывод о соответствии полученных осциллограмм теории работы транзисторного автономного инвертора.

10.2 Краткие теоретические сведения

Основными элементами современного частотного преобразователя являются силовая часть (преобразователь электрической энергии) и управляющее устройство (контроллер). Современные частотные преобразователи обычно имеют модульную архитектуру, что позволяет расширять возможности устройства. Также зачастую имеется возможность установки дополнительных интерфейсных модулей и модулей расширения каналов ввода/вывода.

Современная эра полупроводниковой силовой электроники началась с коммерческого представления управляемого кремниевого выпрямителя (тиристора) компанией General Electric в 1958 г. Затем развитие продолжалось в области новых полупроводниковых структур, материалов и в производстве, давая рынку много новых устройств с более высокой мощностью и улучшенными характеристиками. Сегодня силовая электроника строится на металл-оксид-полупроводниковых полевых транзисторах и биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT), а для диапазона очень высоких мощностей – на тиристорах с интегрированным управлением. Также сейчас доступны интегрированные силовые модули. Новая эра высоковольтных, высокочастотных и высокотемпературных технологий открывается многообещающими полупроводниковыми устройствами, основанными на широкой запрещенной зоне карбида

кремния. Новые силовые полупроводниковые устройства всегда инициируют развитие новых топологий преобразователей.

Инвертор напряжения наиболее распространен среди силовых преобразователей.

Двухуровневый инвертор напряжения – наиболее широко применяемая топология преобразователя энергии. Он состоит из конденсатора и двух силовых полупроводниковых ключей на фазу. Управляющий сигнал для верхнего и нижнего силовых ключей связан и генерирует только два возможных состояния выходного напряжения (нагрузка соединяется с положительной или отрицательной шиной источника постоянного напряжения).

Схема принципиальная инвертора напряжения показана на рисунке 10.1.

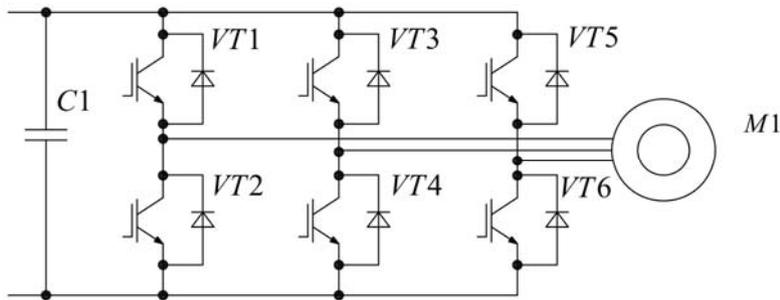


Рисунок 10.1 – Схема инвертора напряжения

Используя методы модуляции для генерирования управляющих импульсов, возможно синтезировать выходное напряжение с желаемыми параметрами (формой, частотой, амплитудой). Из-за содержания высоких гармоник в выходном сигнале для генерирования синусоидальных токов выходной сигнал необходимо фильтровать, но так как данные преобразователи обычно имеют индуктивную нагрузку (электродвигатели), дополнительные фильтры используются только при необходимости.

На рисунке 10.2 показана диаграмма выходного напряжения автономного инвертора с ШИМ модуляцией.

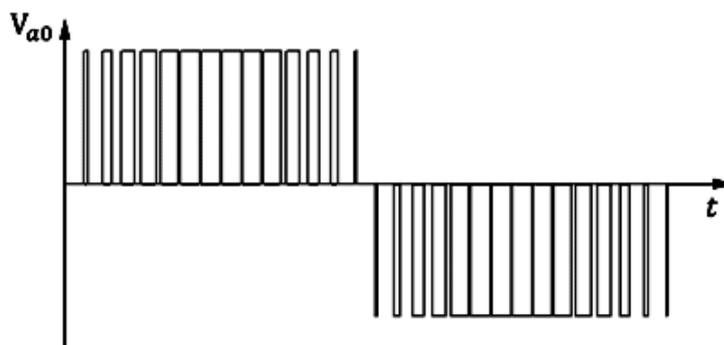


Рисунок 10.2 – Диаграмма выходного напряжения транзисторного АИН-ШИМ

Инвертор тока.

Инвертор тока имеет схему силовых ключей наподобие инвертора напряжения, но в качестве силовых ключей используются тиристоры с интегрированным управлением (IGCT). Выходной ток имеет форму ШИМ и не может быть напрямую применен к индуктивной нагрузке (электродвигателю), поэтому инвертор тока обязательно включает выходной емкостной фильтр, который сглаживает ток и выдает гладкое напряжение на нагрузку. Этот преобразователь может быть реализован для работы на средних напряжениях и более того он по природе имеет возможность рекуперации энергии.

Схема автономного инвертора тока показана на рисунке 10.3.

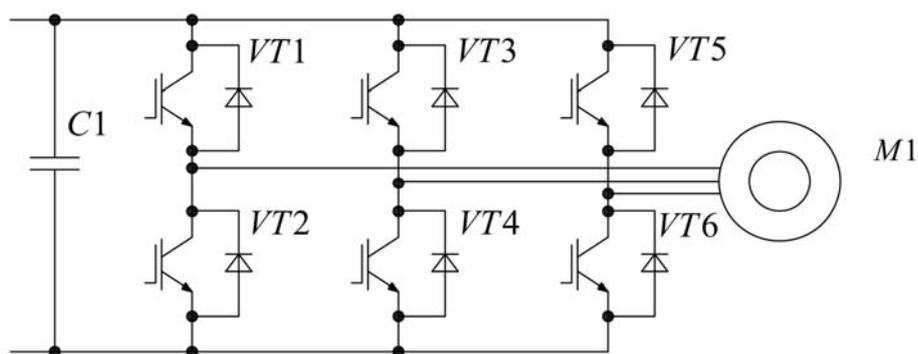


Рисунок 10.3 – Схема инвертора тока

10.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- осциллограммы напряжений и токов фаз электродвигателя, работающего от лабораторного образца автономного инвертора;
- вывод о соответствии полученных осциллограмм теории работы транзисторного автономного инвертора.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните схему и принцип работы автономного инвертора напряжения.
- 2 Поясните отличия автономного инвертора тока от автономного инвертора напряжения.
- 3 Поясните метод формирования синусоидальной формы тока фаз электродвигателя при работе от транзисторного автономного инвертора.

11 Лабораторная работа № 11. Исследование системы управления автономным инвертором напряжения

Цель работы: изучить состав, схемотехнику и принцип работы блоков системы управления транзисторным автономным инвертором.

11.1 Ход работы

11.1.1 Изучить функциональную схему системы управления автономным инвертором и назначение ее элементов.

11.1.2 Изучить алгоритмы работы системы управления автономным инвертором.

11.1.3 Получить осциллограммы выходных напряжений микропроцессорной системы управления в составе лабораторного образца транзисторного автономного инвертора.

11.1.4 Сделать вывод о соответствии полученных осциллограмм изученным алгоритмам работы системы управления.

11.1.5 Изучить схему и принцип работы блока драйверов силовых транзисторов.

11.2 Краткие теоретические сведения

Принцип скалярного управления может использоваться для построения контуров автоматического управления скоростью (рисунок 11.1), в которых отклонение желаемой скорости от фактического измеренного значения скорости поступает в ПИ-регулятор, где вычисляется значение частоты напряжения статора.

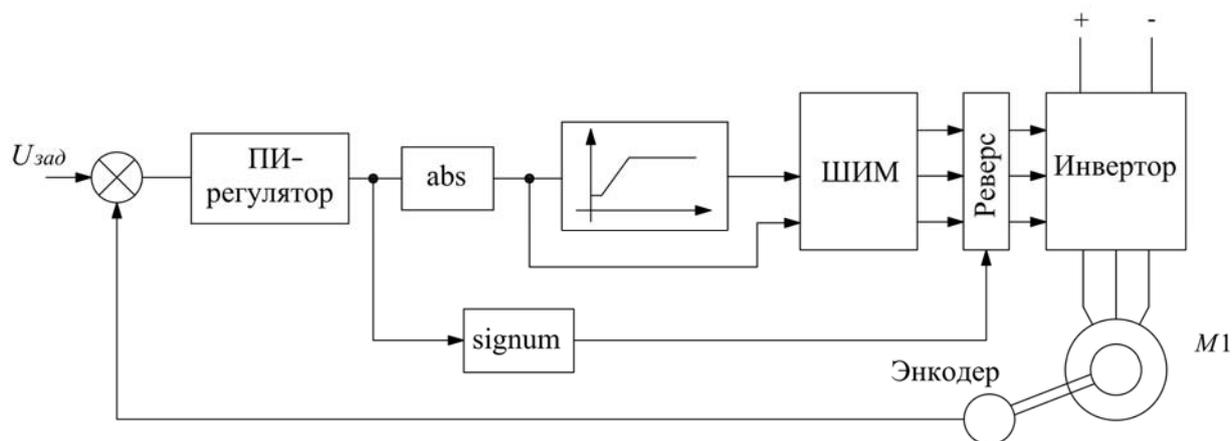


Рисунок 11.1 – Структурная схема системы управления

В целях снижения сложности регулятора в качестве исходных данных для правила V/f и векторного ШИМ-алгоритма используется абсолютное значение частоты статорного напряжения. Если на выходе ПИ-регулятора присутствует отрицательное значение, то для реверсирования электродвигателя обменивается

содержимое двух переменных, управляющее силовыми транзисторами инвертора. Необходимо заметить, что принцип управления, рассмотренный здесь, может использоваться только в приложениях, где поддерживается постоянный уровень скорости при любом допустимом моменте сопротивления. В приложениях, где необходимо поддерживать постоянство момента сопротивления при любых значениях частоты вращения, требуется измерение статорных токов и более сложные принципы управления.

Структурная схема системы автоматического управления скоростью по принципу V/f показана на рисунке 11.1.

Одним из способов решения задачи формирования с помощью инвертора трехфазной синусоидальной системы напряжений со сдвигом по фазе 120° градусов на обмотках статора является использование таблицы синусов.

В этом случае частота статора s определяет три дискретных времени интеграторов, которые вычисляют мгновенные значения фаз для каждого статорного напряжения:

$$\begin{aligned}\theta_1[k] &= \theta_1[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\ \theta_2[k] &= \theta_2[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\ \theta_3[k] &= \theta_3[k-1] + \omega_s[k]T_s,\end{aligned}\tag{11.1}$$

где $\theta_1[0] = 0$; $\theta_2[0] = -\frac{2\pi}{3}$; $\theta_3[0] = -\frac{4\pi}{3}$;

T_s – период дискретизации для алгоритма управления.

Если одно из этих значений становится больше 2π , то для поддержания области значений в диапазоне от 0 до 2π из результирующего значения вычитается 2π . Таблица синусов используется для вычисления трех напряжений, которые необходимо приложить к статору:

$$\begin{aligned}V_a[k] &= V_{sm}(\omega_s[k])\sin(\theta_1[k]); \\ V_b[k] &= V_{sm}(\omega_s[k])\sin(\theta_2[k]); \\ V_c[k] &= V_{sm}(\omega_s[k])\sin(\theta_3[k]),\end{aligned}\tag{11.2}$$

где V_{sm} – амплитуда напряжения статора, определенная по принципу постоянства отношения «напряжение – частота».

Данные значения сравнивают с выходом реверсивного счетчика (используется в качестве генератора треугольных импульсов). Когда выходное значение реверсивного счетчика перешагивает через данные значения, переключается

соответствующий выход компаратора. Как результат, в каждом ШИМ-канале генерируются импульсы, коэффициент заполнения которых пропорционален соответствующему значению напряжения статора.

На рисунке 11.2 показана функциональная схема системы, реализующей описанный выше алгоритм.

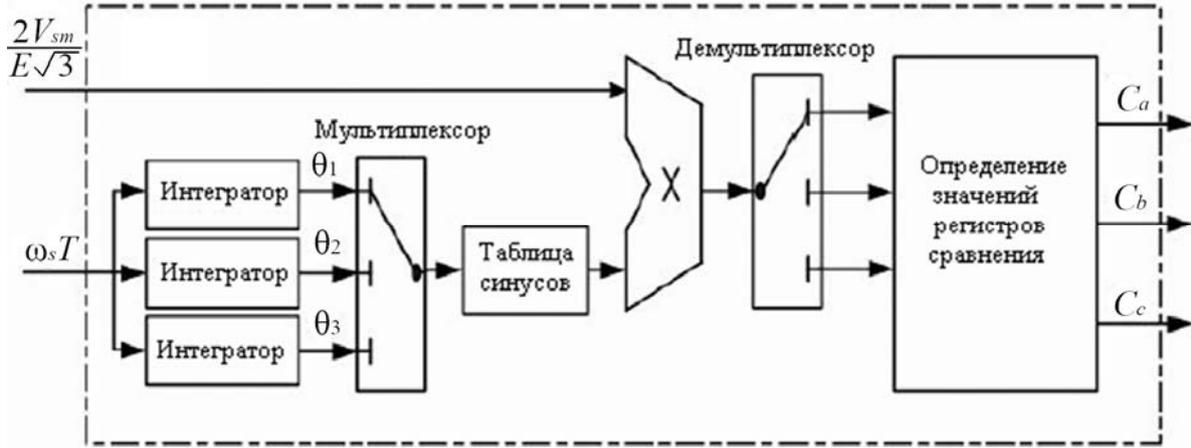


Рисунок 11.2 – Структурная схема ШИМ-управления

Аппаратная реализация современной системы управления транзисторным инвертором содержит два основных элемента – микроконтроллер и блок драйверов силовых транзисторов. При этом ПИ-регулятор, алгоритм управления широтно-импульсным модулятором реализуются программным путем. Формирование шести каналов ШИМ-сигналов осуществляется таймером, входящим в состав микроконтроллера. Блок драйверов силовых транзисторов служит для усиления выходных сигналов с ножек микроконтроллера до уровня, достаточного для отпираания и запираания IGBT-транзистора.

Схема принципиальная одного из трех каналов драйвера силовых транзисторов показана на рисунке 11.3.

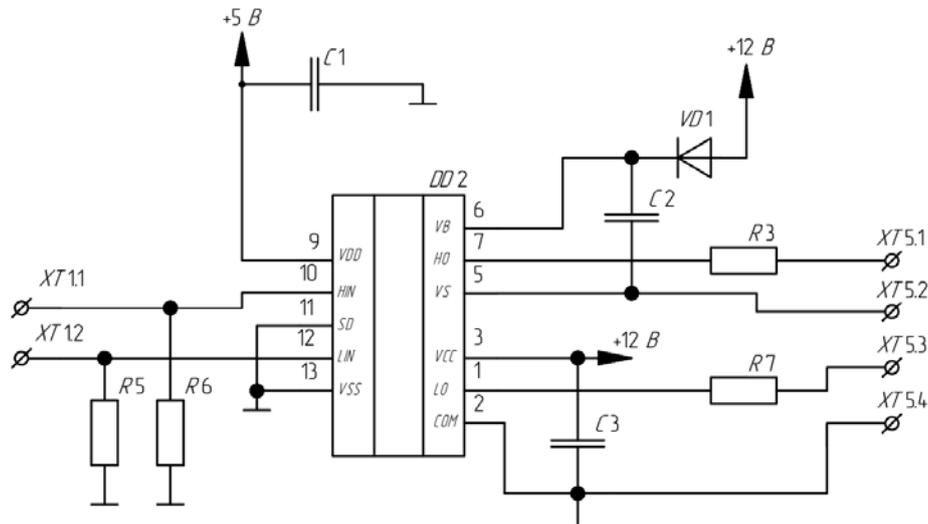


Рисунок 11.3 – Схема принципиальная канала драйвера силовых транзисторов

Сигналы ШИМ от микроконтроллера подаются на клеммы $XT1.1$, $XT1.2$. Затворы силовых транзисторов подключаются к клеммам $XT5.1$, $XT5.3$. Эмиттеры силовых транзисторов подключаются к клеммам $XT5.2$ и $XT5.4$.

Микросхема $DD2$ представляет собой драйвер полумоста. Она осуществляет управление двумя транзисторами, включенными в одном плече инвертора. Транзистор, соединенный эмиттером с минусом входного постоянного напряжения, называется «нижним». Второй транзистор соединен эмиттером с коллектором первого транзистора и называется «верхним». Напряжение управления верхним транзистором относительно эмиттера нижнего транзистора, к которому подключена ножка SOM микросхемы драйвера, должно составлять $U_C + U_{GT}$, где U_C – напряжение постоянного тока на входе инвертора, U_{GT} – напряжение управления, подаваемое на затвор транзистора. Данная сумма может составлять до 620 В, что создает проблему в связи с отсутствием в системе управления источника такого высокого напряжения. Для формирования напряжения управления верхнего транзистора используется специальный преобразователь в микросхеме драйвера и цепь $VD1...C1$. Когда нижний транзистор находится в открытом состоянии, напряжение на ножке 5 микросхемы составляет 1...2 В и происходит заряд конденсатора $C2$ от источника питания 12 В через диод $VD1$. Когда нижний транзистор закрывается, напряжение на ножке 5 повышается примерно до 600 В. На ножке 6 формируется напряжение $U_C + U_{GT}$, используемое для управления верхним транзистором. Диод $VD1$ при этом не пропускает высокое напряжение на источник питания 12 В.

11.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- осциллограммы выходных напряжений микропроцессорной системы управления в составе лабораторного образца транзисторного автономного инвертора;
- вывод о соответствии полученных осциллограмм изученным алгоритмам работы системы управления;
- описание схемы и принципа работы блока драйверов силовых транзисторов.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните функциональную схему системы управления автономным инвертором и назначение ее элементов.
- 2 Поясните алгоритмы работы системы управления автономным инвертором.
- 3 Поясните принцип работы блока драйверов силовых транзисторов.
- 4 Поясните назначение элементов блока драйверов.

12 Лабораторная работа № 12. Исследование датчиков частоты вращения

Цель работы: изучить варианты реализации, устройство и принципы работы датчиков частоты вращения.

12.1 Ход работы

12.1.1 Изучить устройство датчиков частоты вращения:

- емкостных;
- фотоэлектрических;
- ультразвуковых;
- магниторезистивных.

12.1.2 Изучить паспортные данные энкодера BE-178А.

12.1.3 Получить осциллограммы выходных сигналов энкодера BE-178А.

12.1.4 Изучить зависимость частоты выходных импульсов энкодера от скорости вращения электродвигателя, на валу которого установлен энкодер.

12.1.5 Сделать выводы о корректности работы энкодера.

12.2 Краткие теоретические сведения

Датчики скорости вращения представляют собой так называемые частотные датчики. Их принцип действия состоит в преобразовании скорости вращения (углового перемещения) в частоту изменений потока энергии (электрического тока или напряжения). Скорость вращения в технике представляет собой число оборотов в единицу времени и носит название частоты вращения (измеряется в герцах).

Выходной сигнал датчика скорости вращения может быть представлен в виде синусоидального изменения величины (напряжения) или в виде последовательности коротких импульсов. Для использования в цифровых системах контроля последний вид сигнала более предпочтителен.

Методы измерения угловых скоростей вращения:

- абсолютный метод; основан на определении числа оборотов вала и измерении соответствующего промежутка времени;
- метод сравнения числа оборотов; основан на сравнении при помощи измерительных средств числа оборотов испытываемого вала с известной частотой какого-либо независимого периодического процесса.

Прибор для измерения угловых скоростей в технике называется тахометром. Обычно при помощи тахометров измеряют среднюю скорость вращения, постоянную в заданном промежутке времени.

Тахометры представляют собой современные модули автоматики и могут применяться в системах управления автоматическими линиями, станками и т. д.

Принцип работы тахометров. С помощью кнопок на лицевой панели задается установка количества импульсов датчика на оборот вала, которая

высвечивается на индикаторе, и запоминается в энергонезависимой памяти. Ввод установки аналогичен вводу у счетчиков. На вход тахометра поступают импульсы с датчика (индуктивного/оптического или другого выключателя), контролирующего одну или несколько меток на валу. По частоте следования импульсов производится вычисление частоты вращения вала (обороты в минуту) и выдача значения на индикатор.

Индукционные датчики скорости вращения.

Индукционные датчики скорости вращения преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в ЭДС индукции.

Принцип действия основан на использовании закона электромагнитной индукции.

Согласно закону Фарадея, индуцированное напряжение или электродвижущая сила (ЭДС) в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока, сквозь поверхность, ограниченную этим контуром, т. е.

$$e = -\frac{d\varphi}{dt}. \quad (12.1)$$

Следовательно, магнитный поток, пересекающий контур, описывается функцией вида:

$$\varphi(x) = \varphi_0 F(x), \quad (12.2)$$

где x – переменная углового положения.

Отсюда видно, что относительное перемещение между источником потока и контуром наводит в последнем ЭДС, амплитуда которой пропорциональна скорости перемещения, вследствие чего на выходе датчика формируется сигнал:

$$e = -\varphi_0 \frac{F(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (12.3)$$

В качестве датчиков скорости вращения обычно применяют тахогенераторы, выполненные в виде небольших генераторов постоянного или переменного тока с независимым возбуждением от постоянного магнита.

Устройство тахогенератора постоянного тока.

Статор (индуктор), представляющий собой ферромагнитный каркас, несущий два ($2p$ в общем случае) полюса, направляющих поле магнитной индукции, образуемое током через катушки или постоянными магнитами. Ротор, представляющий собой многослойный цилиндр из листового железа, вращающийся между полюсами статора, его ось совпадает с осью статора. По его периферии параллельно оси в углублениях располагается $n = 2k$ медных проводников, называемых активными. Активные проводники соединены с пассивными, расположенными вдоль диаметра ротора. Коллектор – это цилиндр с осью, что и у ротора, но имеющей меньший диаметр, несущий изолированные между собой

пластинки, каждая из которых связана с активным проводником. Щётки, которые закрепляются на двух диаметрально противоположных клеммах коллектора, располагаются перпендикулярно направлению индукции, служат для снятия максимальной величины ЭДС.

Принцип действия тахогенератора постоянного тока заключается в следующем: $2k$ проводников соединяются так, чтобы образовать два одинаковых комплекта по k последовательно соединённых проводников. В каждом из них возникает ЭДС, пропорциональная угловой скорости ω . Эта ЭДС поступает во внешнюю цепь через две щётки, расположенных на коллекторе. Если ротор связан со внешним контуром, то ЭДС вызывает в нём ток I , проходящий через активные проводники по разные стороны от нейтральной линии. Если проводники составлены попарно и симметрично относительно нейтральной линии, они создают поперечную индукцию, перпендикулярную линии полюсов и пропорциональную I (реакция ротора). Реакция ротора вызывает искривление силовых линий поля и приводит к смещению нейтральной линии в направлении движения. Величина ЭДС ускоренно убывает с ростом тока I .

Достоинства: знак выходного сигнала изменяется одновременно с изменением направления вращения.

Недостатки: вследствие реакции ротора выходное напряжение не является линейной функцией скорости вращения.

Тахогенератор переменного тока отличается тем, что в нём отсутствует коллектор и щётки.

Устройство тахометрического асинхронного генератора. Ротор состоит из тонкого немагнитного цилиндра, вращающегося со скоростью ω . Статор состоит из магнитного листового железа и несёт две обмотки: возбуждающую обмотку, к которой прикладывается напряжение; измерительную обмотку, в которой наводится ЭДС.

ЭДС, наводимая в измерительной обмотке, формирует периодический сигнал, амплитуда которого пропорциональна скорости вращения ω .

Достоинства: увеличение срока службы, отсутствие флуктуаций выходного напряжения, малый момент инерции.

Недостатки: более сложная схема включения.

Фотоэлектрические датчики скорости вращения.

Регистрируют изменение светового потока, связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин.

В качестве датчика скорости вращения применяется фотоэлектрический датчик с прерывателем.

Устройство фотоэлектрического датчика с прерывателем: фотосопротивление, диск с калиброванными отверстиями, который насаживается на вал измеряемого объекта. Фотосопротивление подключается последовательно с сопротивлением к источнику постоянного напряжения.

Принцип действия. Освещенность рабочей поверхности фотосопротивления прерывается диском с отверстиями. Если фотосопротивление не освещено, по нему течет темновой ток I_T . В случае освещенности фотосопротивления, по нему течет световой ток I_C .

Так как проводимость фотосопротивления при облучении его световым потоком F растет, то его световое сопротивление R_C становится меньше темнового сопротивления R_T .

При вращении диска освещенность фотосопротивления модулируется, и в его цепи течет пульсирующий ток. Таким образом, ток, проходящий через фотосопротивление, является функцией светового потока F . Частота пульсаций тока определяется числом отверстий в диске и его скоростью вращения:

$$F_d = \frac{n}{60} S, \quad (12.4)$$

где n – скорость вращения диска, об/мин;

S – число отверстий в диске.

Достоинства: универсальность, простота конструкции, широкий рабочий диапазон измеряемой синхронной частоты, малая нагрузка на вал испытываемого объекта, возможность простого промежуточного преобразования частоты обычных серийных датчиков.

Емкостные датчики скорости вращения.

Используются для преобразования механических перемещений в изменение емкости.

Устройство: конденсатор переменной емкости C с воздушным диэлектриком, маломощный трансформатор, со вторичной обмотки которого снимается сигнал, напряжение которого пропорционально скорости вращения. Емкостные датчики питаются переменным напряжением (обычно повышенной частоты – до десятков мегагерц). В качестве измерительных схем обычно применяют мостовые схемы и схемы с использованием резонансных контуров. В последнем случае, как правило, используют зависимость частоты колебаний генератора от емкости резонансного контура, т. е. датчик имеет частотный выход.

Принцип действия датчиков этого типа основан на изменении зарядного тока конденсатора пропорционально скорости изменения его емкости.

Вращение вала может быть функционально связано с изменением диэлектрической проницаемости ϵ , площади обкладок или расстояния между обкладками h .

Для двухобкладочного плоского конденсатора электрическая емкость определяется выражением

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{h}, \quad (12.5)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками;

S – активная площадь обкладок;

h – расстояние между обкладками конденсатора.

Для преобразования механических перемещений в изменение емкости используются зависимости $C(S)$ и $C(h)$.

Если емкость конденсатора изменяется пропорционально изменению площади его обкладок S с частотой ω , то

$$C = m \cdot S, \quad (12.6)$$

где $m = \varepsilon / \delta$.

Емкостное сопротивление конденсатора X_C линейно зависит от расстояния между пластинами конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{\delta}{\omega \varepsilon C}. \quad (12.7)$$

Достоинства: простота, высокая чувствительность и малая инерционность.

Недостатки: влияние внешних электрических полей, относительная сложность измерительных устройств.

Ультразвуковые датчики скорости вращения.

Применяются для измерения скорости вращения деталей, установленных в труднодоступных местах или для измерения в агрессивных средах.

Устройство. Датчик состоит из генератора ультразвуковых колебаний, излучающей головки, вертушки, вращающейся в трубопроводе, принимающей головки и демодулятора.

Принцип действия основан на различном поглощении или отражении ультразвуковых колебаний разнородными средами. При вращении металлической вертушки за счет различной проводящей способности жидкости и металла несущая частота ультразвуковых колебаний модулируется частотой вращения вертушки. С приемной головки сигнал поступает на измерительную аппаратуру. После демодуляции сигнала получается напряжение с частотой, пропорциональной скорости вращения вертушки.

Достоинства: высокая точность измерения.

Недостатки: шум, вибрация, производимые при движении излучателя, а также низкое разрешение.

Магниторезистивные датчики скорости вращения.

Преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в изменение сопротивления ферромагнитных материалов.

Устройство. Датчик состоит из измерительной катушки, которая снабжается магнитным сердечником. Катушка помещена перед диском или перед вращающимся ферромагнитным телом.

Принцип действия основан на магниторезистивном эффекте. Этот эффект заключается в том, что некоторые ферромагнитные материалы изменяют свое электрическое сопротивление при воздействии магнитного поля. Степень этого изменения зависит от величины напряженности магнитного поля и угла между вектором напряженности и направлением тока. На магнитный сердечник

катушки воздействует поток индукции постоянного магнита. Последовательность скачков магнитных свойств диска или вращающегося тела вызывает периодическое изменение магнитного сопротивления в магнитной цепи катушки, которое наводит в ней ЭДС с частотой, пропорциональной скорости вращения.

Магнит, установленный на оси вращения, при каждом обороте проходит один раз мимо магниторезистивного датчика, вызывая изменение его сопротивления (рисунок 12.1).

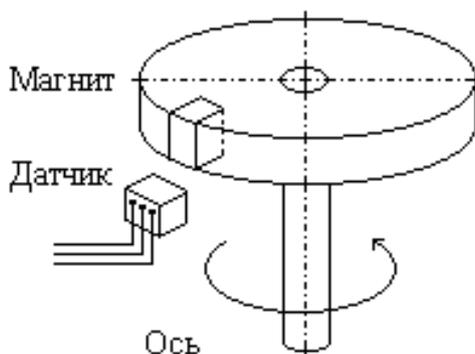


Рисунок 12.1 – Схема реализации магниторезистивного датчика вращения

Изменение сопротивления с помощью схемы, показанной на рисунке 12.2, преобразуется в изменение напряжения U_a . Зависимость выходного напряжения сигнала от времени показана на рисунке 12.3.

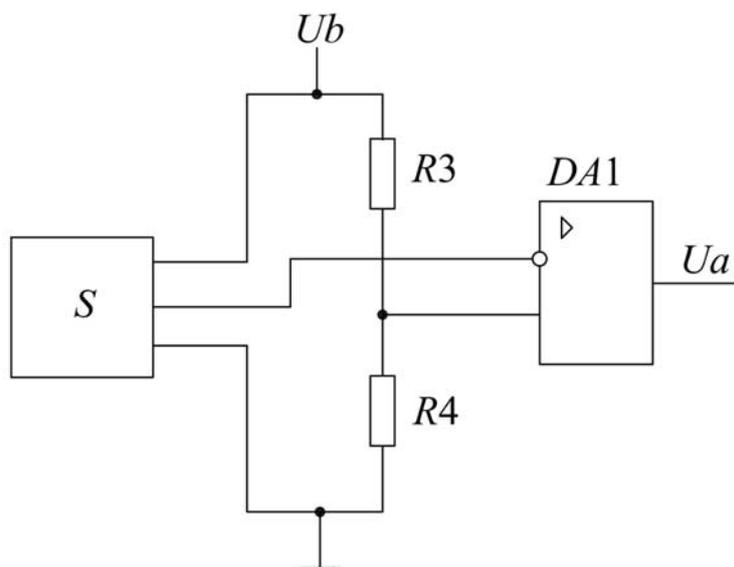


Рисунок 12.2 – Схема изменения сопротивления

Достоинства: простота устройства, надёжность, дешевизна.

Благодаря своим достоинствам микроэлектронные магниторезистивные датчики скорости вращения нашли широкое применение в автомобильной и бытовой технике.

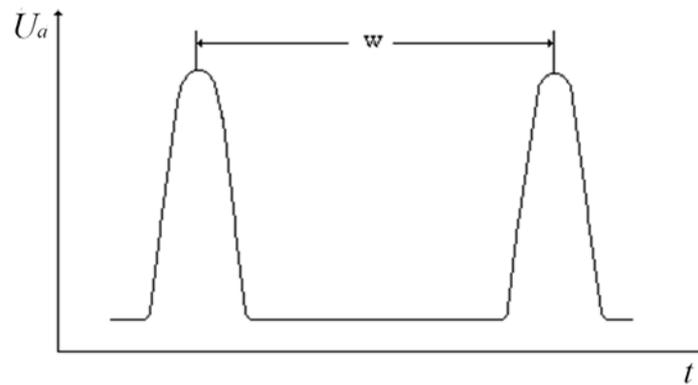


Рисунок 12.3 – Зависимость выходного напряжения сигнала от времени

12.3 Содержание отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на компьютере в текстовом редакторе. Отчет должен содержать:

- цель работы;
- описание устройства датчиков частоты вращения;
- осциллограммы выходных сигналов энкодера BE-178A;
- зависимость частоты выходных импульсов энкодера от скорости вращения электродвигателя, на валу которого установлен энкодер;
- выводы о корректности работы энкодера.

Контрольные вопросы

1 Изложите устройство и принцип работы емкостных датчиков частоты вращения.

2 Изложите устройство и принцип работы фотоэлектрических датчиков частоты вращения.

3 Изложите устройство и принцип работы ультразвуковых датчиков частоты вращения.

4 Изложите устройство и принцип работы магниторезистивных датчиков частоты вращения.

Список литературы

1 **Поляков, А. Е.** Электрические машины, электропривод и системы интеллектуального управления электротехническими комплексами: учеб. пособие / А. Е. Поляков, А. В. Чесноков, Е. М. Филимонова. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2023. – 224 с.

2 **Чернышев, А. Ю.** Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – 2-е изд. – Томск: Том. политехн. ун-т, 2015. – 210 с.

3 **Васильев, Б. Ю.** Электропривод. Энергетика электропривода: учебник / Б. Ю. Васильев. – М.: СОЛОН-Пр., 2015. – 268 с.

4 **Бондарев, М. Б.** Электропривод и электроавтоматика. Лабораторный практикум: учеб. пособие / М. Б. Бондарев. – Минск: РИПО, 2016. – 74 с.

5 **Симаков, Г. М.** Автоматизированный электропривод в современных технологиях / Г. М. Симаков. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 103 с.