

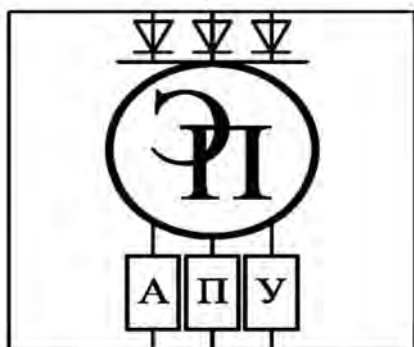
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация  
промышленных установок»

# ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности  
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
дневной и заочной форм обучения*

Часть 2



Могилев 2019

УДК 658.26  
ББК 31.19  
Э 75

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «7» февраля 2018 г., протокол № 7

Составитель О. А. Капитонов

Рецензент М. И. Миронова

Методические рекомендации предназначены для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

## ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### Часть 2

Ответственный за выпуск	Г. С. Леневский
Технический редактор	С. Н. Красовская
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 115 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, Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2019



## Содержание

Введение.....	4
Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ .....	5
1 Лабораторная работа № 1. Исследование тиристорного регулятора напряжения (ТРН) – силовой блок (фазовое управление) .....	6
2 Лабораторная работа № 2. Исследование ТРН – блоки питания, управления и защиты (фазовое управление) .....	8
3 Лабораторная работа № 3. Исследование ТРН – блоки управления и защиты (ШИМ управление) .....	13
4 Лабораторная работа № 4. Исследование ПЧАИ – силовой блок, тиристорный.....	18
5 Лабораторная работа № 5. Исследование ПЧАИ – блоки управления и защиты .....	21
6 Лабораторная работа № 6. Исследование автономного инвертора (АИ) на базе IGBT-технологии – силовой блок .....	25
7 Лабораторная работа № 7. Исследование АИ на базе IGBT-технологии – блоки управления .....	28
8 Лабораторная работа № 8. Исследование датчиков частоты вращения...	32
Список литературы .....	38



## 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.



## Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ

При проведении лабораторных работ имеются четыре основных вида опасностей по возможности нанесения существенного вреда здоровью студентов, лаборантов, преподавателей и других лиц, которые выполняют на лабораторном оборудовании определенные работы:

- 1) напряжение переменного тока 220 В частотой 50 Гц (агрегат электромашинный, станция управления, ПЭВМ);
- 2) напряжение постоянного тока 220 В (агрегат электромашинный);
- 3) вращающиеся части (агрегат электромашинный);
- 4) элементы лабораторного комплекса, имеющие рабочую температуру 100 °С и более.

### **Запрещается:**

- выполнение лабораторной работы без прохождения инструктажа по технике безопасности;
- выполнение лабораторной работы без разрешения преподавателя, проводящего лабораторную работу;
- подача напряжения питания на комплекс без разрешения преподавателя;
- коммутация органов управления комплекса при поданном напряжении питания без разрешения преподавателя;
- во время выполнения лабораторных работ шуметь, громко разговаривать, заниматься посторонними делами, быть одетыми в одежду с длинными рукавами, длинными полами.



# 1 Лабораторная работа № 1. Исследование тиристорного регулятора напряжения (ТРН) – силовой блок (фазовое управление)

**Цель работы:** изучить работу силового блока тиристорного регулятора напряжения.

## 1.1 *Ход выполнения работы*

1.1.1 Изучить схему силовой части тиристорного регулятора напряжения.

1.1.2 Изучить алгоритм управления силовыми тиристорами.

1.1.3 Изучить принципы регулирования напряжения методом фазового управления.

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

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

## 1.2 *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 1.1 показана схема силовой части тиристорного регулятора напряжения.

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

Принцип работы ТРН поясняется на рисунке 1.2 и заключается в следующем. Отпирающий импульс подается на тиристоры с заданной задержкой относительно момента перехода напряжения через ноль. Эта задержка называется углом управления  $\varphi$ . Выходное напряжение ТРН снижается при увеличении угла управления.

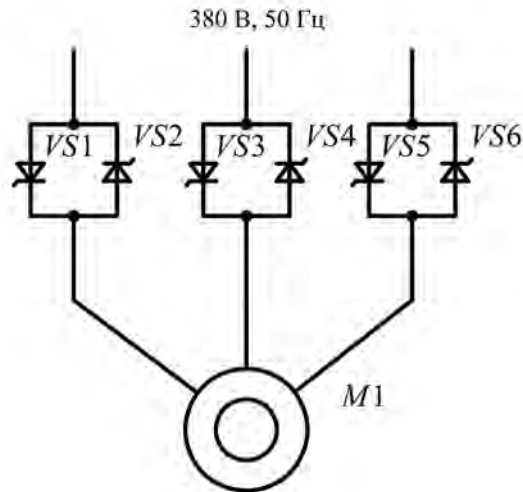


Рисунок 1.1 – Схема силовой части тиристорного регулятора напряжения

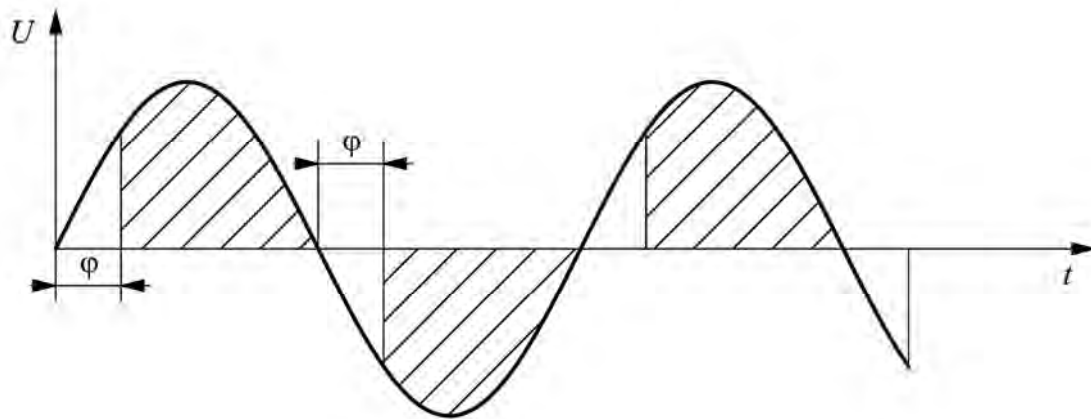


Рисунок 1.2 – Принцип работы тиристорного регулятора напряжения

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.

### 1.3 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.

## **2 Лабораторная работа № 2. Исследование ТРН – блоки питания, управления и защиты (фазовое управление)**

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

### **2.1 Ход работы**

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

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

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

2.1.4 Изучить схему и алгоритм работы микропроцессорной системы управления ТРН.

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

2.1.6 Сделать вывод о корректности работы микропроцессорной системы управления.

2.1.7 Измерить напряжение на выходе блока питания лабораторного образца ТРН.

2.1.8 Сделать вывод о работоспособности блока питания.

### **2.2 Краткие теоретические сведения**

Схема блока синхронизации показана на рисунке 2.1.

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.

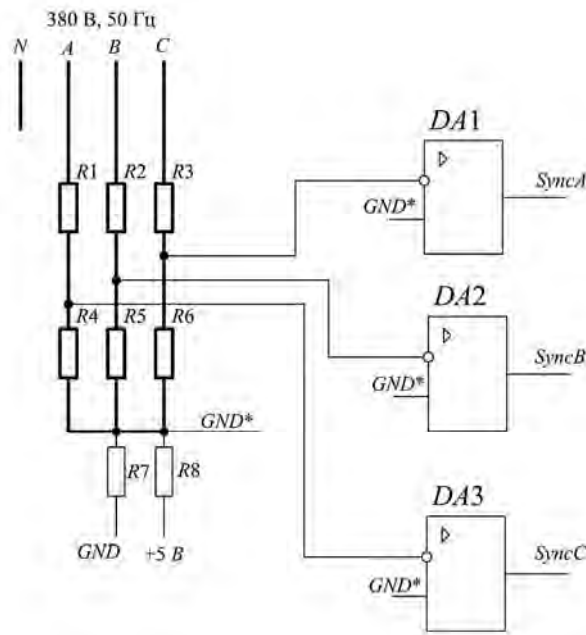


Рисунок 2.1 – Схема блока синхронизации

Принцип работы блока синхронизации поясняется на рисунке 2.2.

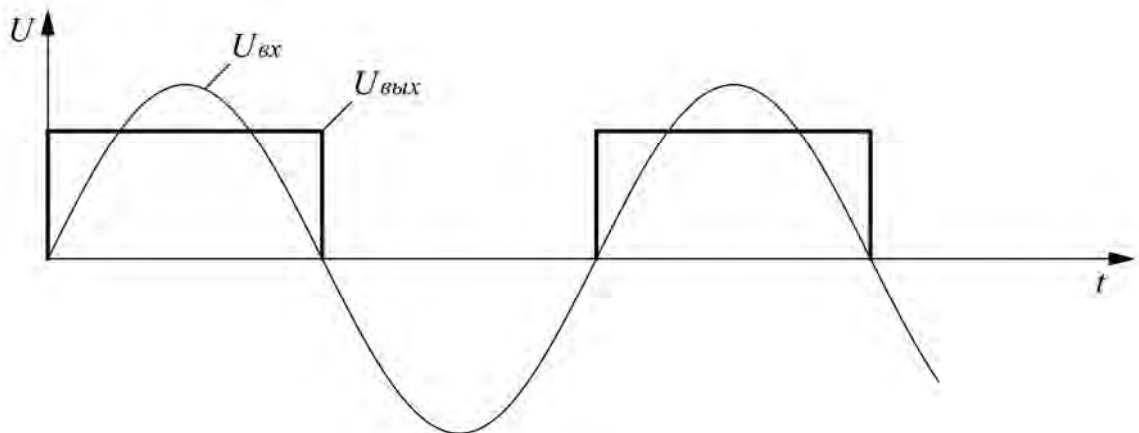


Рисунок 2.2 – Принцип работы блока синхронизации

При положительном значении напряжения фазы питающей сети  $U_{вх}$  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.

Функциональная схема блока управления тиристорным регулятором напряжения показана на рисунке 2.3.

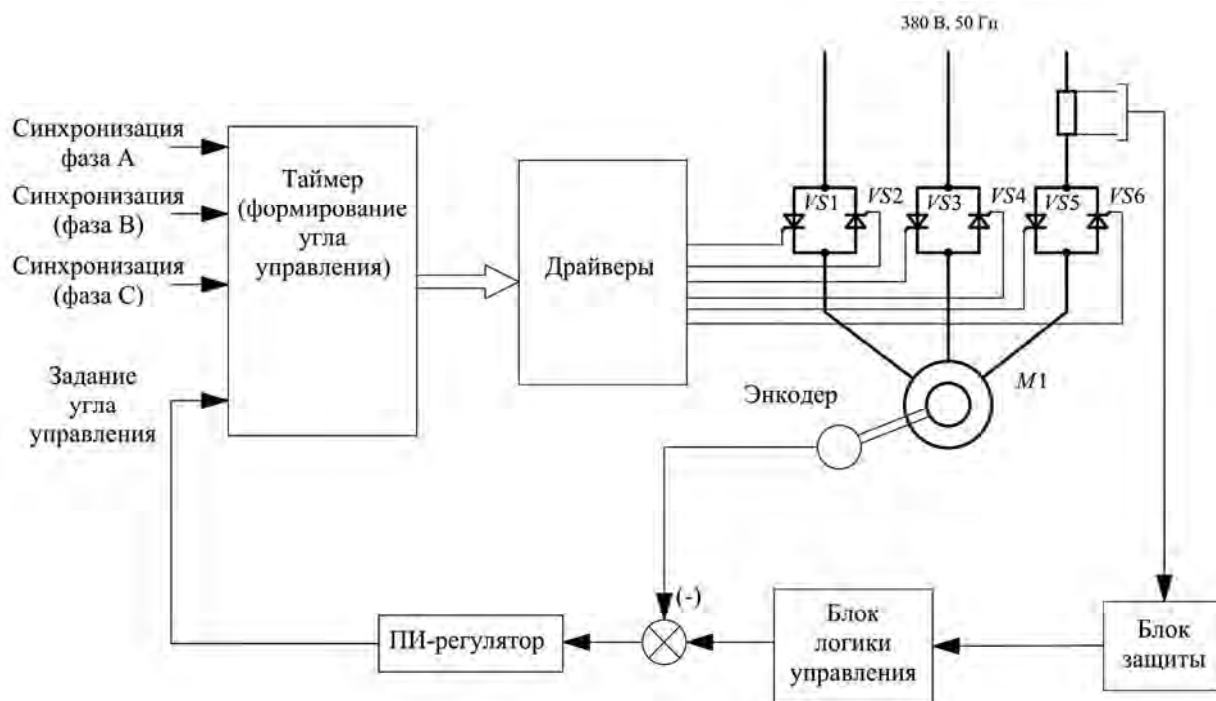


Рисунок 2.3 – Функциональная схема системы управления тиристорным регулятором напряжения

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 2.4.

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 2.5.

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.

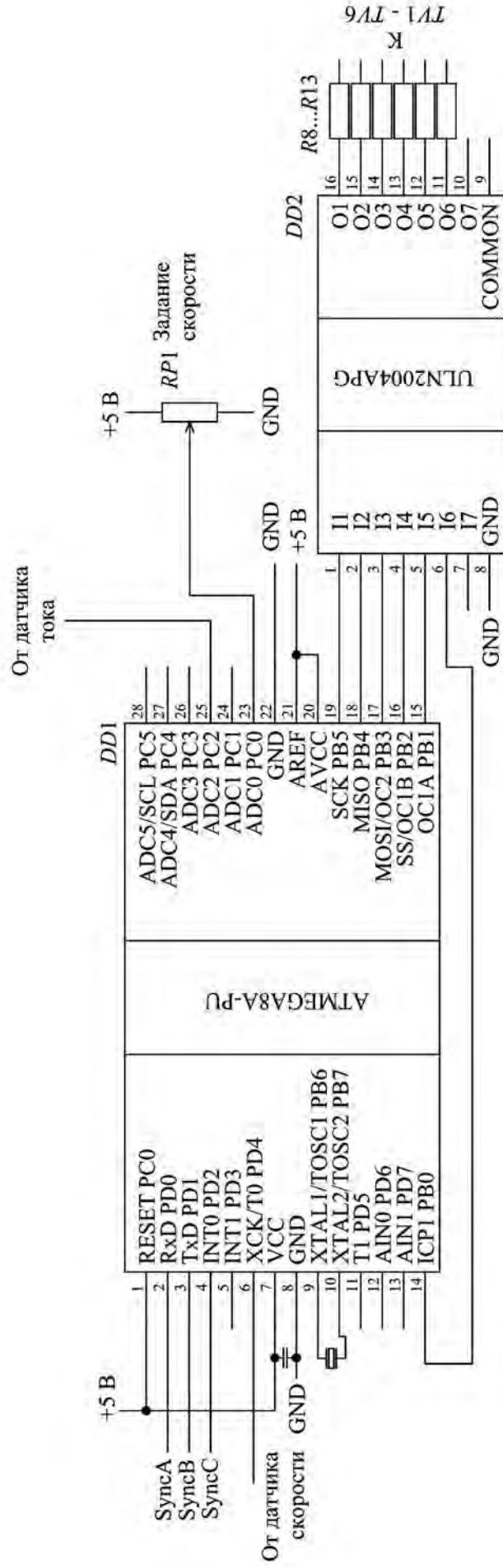


Рисунок 2.4 – Схема системы управления

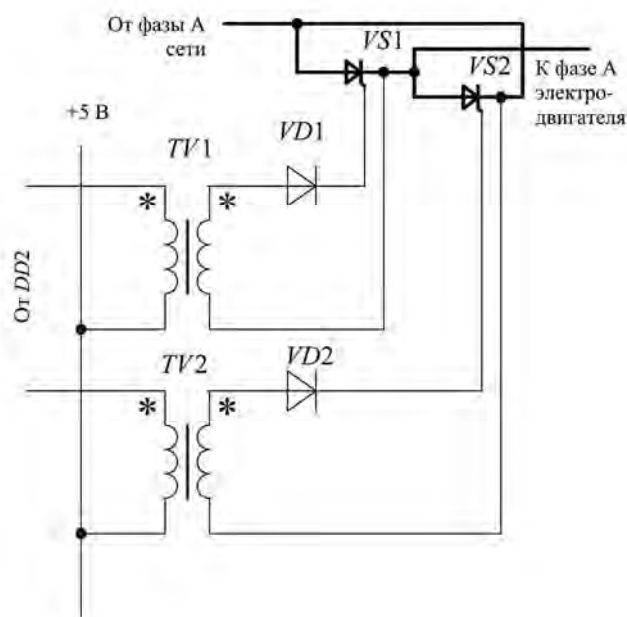


Рисунок 2.5 – Схема включения импульсных трансформаторов (фаза А)

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 2.6 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.

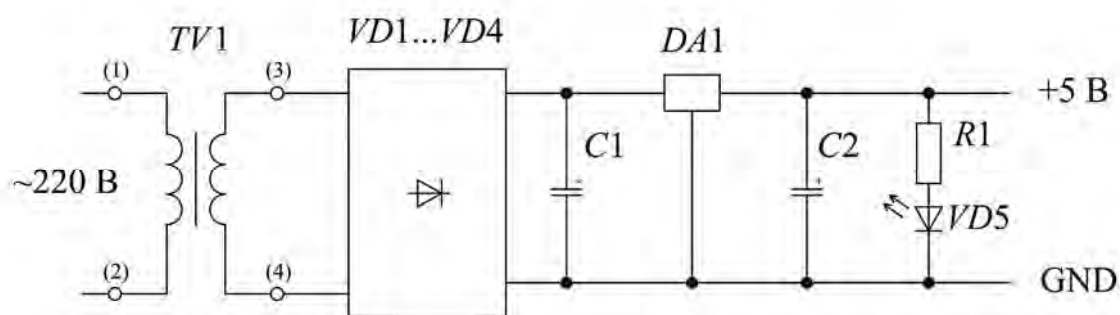


Рисунок 2.6 – Схема блока питания

### 2.3 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 тиристоров.
- 4 Поясните принцип работы блока питания лабораторного образца ТРН.

## **3 Лабораторная работа № 3. Исследование ТРН – блоки управления и защиты (ШИМ-управление)**

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

### ***3.1 Ход работы***

- 3.1.1 Изучить схему силовой части ТРН-ШИМ.
- 3.1.2 Изучить алгоритм управления силовыми транзисторами ТРН-ШИМ.
- 3.1.3 Изучить схему и принцип работы блока синхронизации.
- 3.1.4 Получить осциллограммы выходных сигналов блока синхронизации с лабораторного образца ТРН-ШИМ.
- 3.1.5 Сделать выводы о корректности работы блока синхронизации и соответствии полученных осциллограмм изученному алгоритму работы.
- 3.1.6 Изучить схему блока драйверов силовых транзисторов.
- 3.1.7 Получить осциллограммы входных сигналов блока драйверов, поступающих от микропроцессорной системы управления лабораторного образца ТРН-ШИМ.
- 3.1.8 Сделать вывод о соответствии полученных осциллограмм изученному алгоритму управления силовыми транзисторами.

### ***3.2 Краткие теоретические сведения***

Силовая часть регулятора напряжения с ШИМ-управлением показана на рисунке 3.1 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.

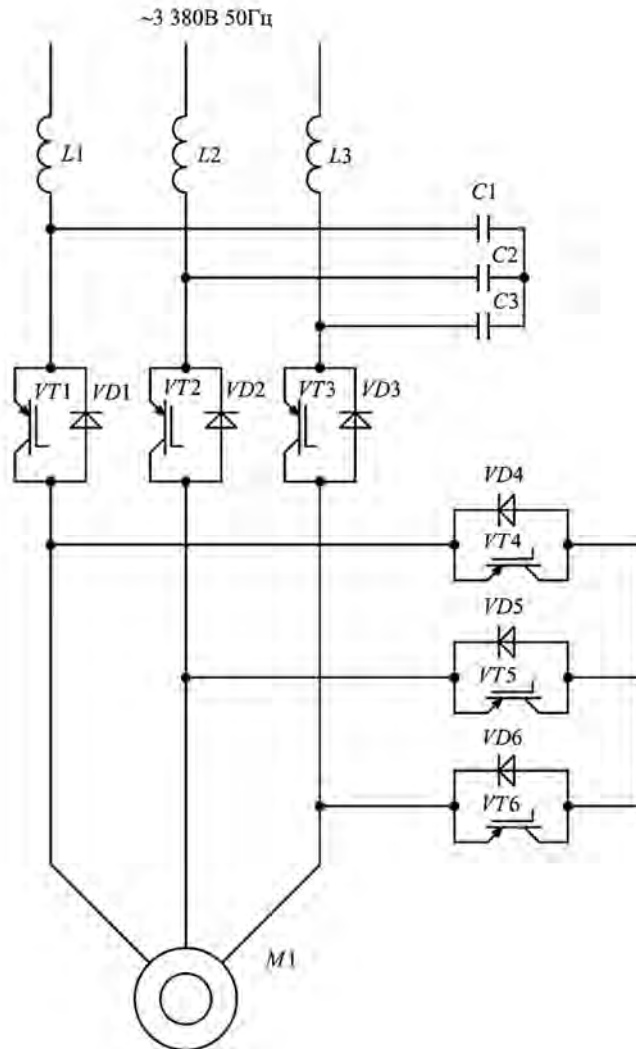


Рисунок 3.1 – Схема силовой части ТРН-ШИМ

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 дополни-

тельной 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.

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 3.1).

Таблица 3.1 – Алгоритм переключения силовых транзисторов

Интервал	$I_a$	$I_b$	$I_c$	Открытый транзистор
1	+	–	+	$VT_1, VT_3, VT_5$
2	+	–	–	$VT_1, VT_5, VT_6$
3	+	+	–	$VT_1, VT_2, VT_6$
4	–	+	–	$VT_2, VT_4, VT_6$
5	–	+	+	$VT_2, VT_3, VT_4$
6	–	–	+	$VT_3, VT_4, VT_5$

На рисунке 3.2 показана схема узла синхронизации по напряжению. На входные клеммы  $X_{T1.2}, X_{T1.2}, X_{T1.3}$  подается трехфазное напряжение питающей сети. Резисторы  $R_1 \dots R_6$  представляют собой делители напряжения. На выходе делителей величина напряжения составляет десятые доли вольта. Резисторы  $R_7$  и  $R_8$  служат для формирования положительного смещения выходных сигналов делителей. Это позволяет использовать операционный усилитель  $DA1$  с однополярным питанием.



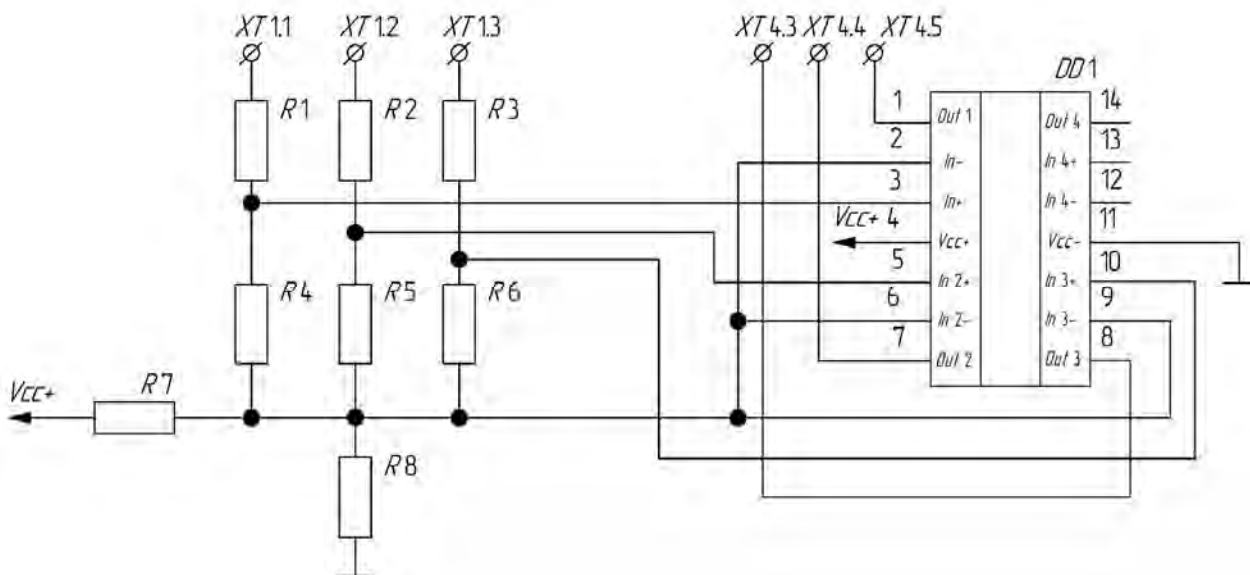


Рисунок 3.2 – Схема узла синхронизации по напряжению

На рисунке 3.3 показана схема узла синхронизации по току. Ко входным клеммам  $XT2.2$  и  $XT2.3$  подключается измерительный шунт. Микросхема  $DD2$  представляет собой изолирующий усилитель, обеспечивающий гальваническую развязку. Резисторы  $R10...R13$  представляют собой делители напряжения. На выходе делителей формируется дифференциальный сигнал, пропорциональный силе тока в измеряемой фазе.

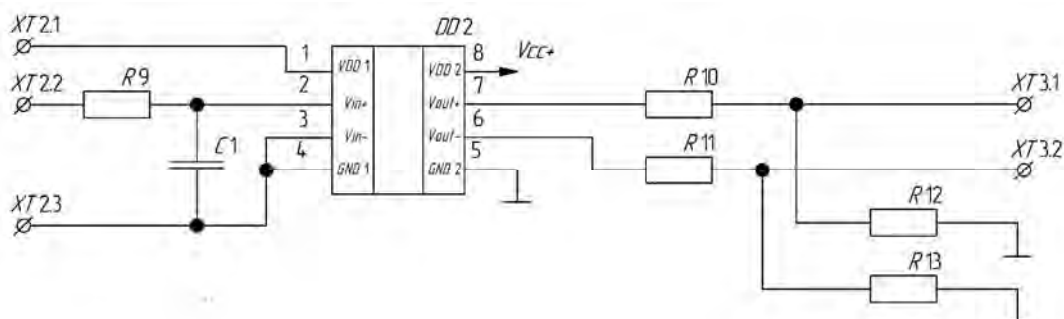


Рисунок 3.3 – Схема одного канала узла синхронизации по току

На рисунке 3.4 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 отпириания силовых транзисторов. Затворы силовых транзисторов подключаются к клеммам  $XT5.1$  и  $XT5.3$ . Эмиттеры подключаются к клеммам  $XT5.2$  и  $XT5.4$ .



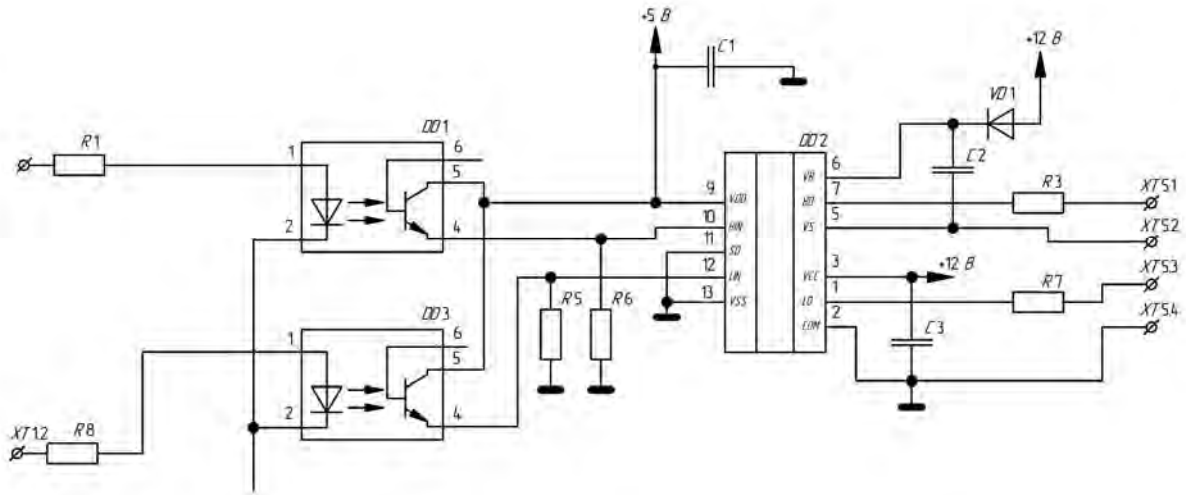


Рисунок 3.4 – Схема одного канала блока драйверов силовых транзисторов

### 3.3 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.

## 4 Лабораторная работа № 4. Исследование ПЧАИ – силовой блок, тиристорный

**Цель работы:** изучить схему и принцип работы силового блока преобразователя частоты с тиристорным автономным инвертором.

### 4.1 Ход работы

4.1.1 Изучить схему, назначение и принцип работы управляемого выпрямителя в составе преобразователя частоты.

4.1.2 Изучить схему, назначение и принцип работы автономного инвертора в составе преобразователя.

4.1.3 Изучить способы торможения и конструкцию тормозного устройства, реализованные в данном преобразователе.

### 4.2 Краткие теоретические сведения

Силовая схема электропривода предназначена для преобразования переменного напряжения питающей сети в переменное напряжение регулируемой частоты и амплитуды и показана на рисунке 4.1.

Силовая схема содержит следующие функциональные узлы:

- силовой управляемый выпрямитель (УВ);
- LC – фильтр (Ф);
- автономный инвертор напряжения (АИН);
- тормозное устройство (ТУ);
- источники напряжения подзаряда ( $UП1$ ,  $UП2$ ).

Силовой управляемый выпрямитель представляет собой трехфазную мостовую схему. Регулирование величины выпрямленного напряжения в УВ достигается изменением угла управления тиристоров, которое осуществляется системой фазо-импульсного управления (СУВ).

На входе УВ установлен токоограничивающий реактор  $L1$ . В цепь каждой фазы включены трансформаторы тока  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ , выполняющие функции датчиков тока. К выходу УВ подключен LC-фильтр (Ф). Фильтр выполняет функцию сглаживания пульсации выпрямленного тока и напряжения, и токоограничения в аварийных режимах. В электроприводе использован автономный инвертор напряжения (АИН) с пофазной коммутацией.

Элементы схемы необходимо рассматривать как следующие функциональные группы:

- мост основных тиристоров ( $V3$ ,  $V4$ ,  $V7$ ,  $V8$ ,  $V11$ ,  $V12$ );
- мост коммутирующих тиристоров ( $V13$  –  $V18$ );
- мост 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 подзаряда  $UЛ1, UЛ2$ .

Вспомогательные источники подзаряда  $UЛ1$  и  $UЛ2$  обеспечивают автоматический и непрерывный дозаряд коммутирующего конденсатора в течение процесса коммутации, что обуславливает постоянство коммутационной способности АИН во всех режимах его работы.

Разделительные диоды  $V25, V26$ , служат для развязки источника основного питания (УВ) от вспомогательных источников подзаряда ( $ИП1, ИП2$ ).

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

Работа одной фазы АИН происходит в следующей последовательности. Предположим, что работают основные тиристоры  $V3, V7, V12$ . Коммутирующий конденсатор  $C3$  заряжен полярностью, указанной на рисунке 4.1. Ток нагрузки протекает по цепи:  $V3 - V7 -$  фазы двигателя нагрузки  $V12$ . Затем отпирается коммутирующий тиристор  $V13$  для коммутации тока в  $V3$ , амплитуда импульса разрядного тока (тока коммутации) через  $C3, V3 (V1), V25, L1, L3$  превосходит ток нагрузки  $I_n$ , вследствие чего ток через  $V3$  спадает до нуля.

После этого избыток тока коммутации  $I_k$ , на который он превышает ток нагрузки  $I_n$ , направляется в обратный диод  $V1$ . Достигнув максимального значения  $I_k$  начинает уменьшаться, создавая заряд обратной полярности на конденсаторе  $C3$ . В течение времени, когда  $V1$  проводит ток, прямое падение напряжения в цепи  $V1$ , являясь обратным для тиристора  $V3$ , запирает его.

Время приложения отрицательного напряжения к запираемому основному тиристоры определяется величиной емкости конденсатора  $C3$ , индуктивностью  $L1$  и током нагрузки. На холостом ходу АИН время приложения отрицательного напряжения  $t$  определяется выражением

$$t = \pi\sqrt{LC}, \quad (4.1)$$

где  $L$  – индуктивность коммутирующего дросселя  $L1$ ;

$C$  – емкость коммутирующего конденсатора  $C3$ .

После окончания перезаряда конденсатора  $C3$ , включается тиристор  $V4$ , и конденсатор  $C3$  дозарядается до первоначального напряжения, но с обратной полярностью, от источника подзаряда  $ИП1$  по цепи  $ИП1-V13-C3-V4-ИП1$ . К тиристоры  $V3$  вновь приложено прямое напряжение. К коммутирующему тиристоры  $V13$  прикладывается обратное напряжение реактора  $L1$ , при коммутации в другой фазе и он запирается. Конденсатор  $C3$  подготовлен для запираения тиристора  $V4$ , осуществляемого в конце его проводящего полупериода отпираем  $V14$ . Защита тиристоры силовой схемы от перенапряжения осуществляется RC-цепями.



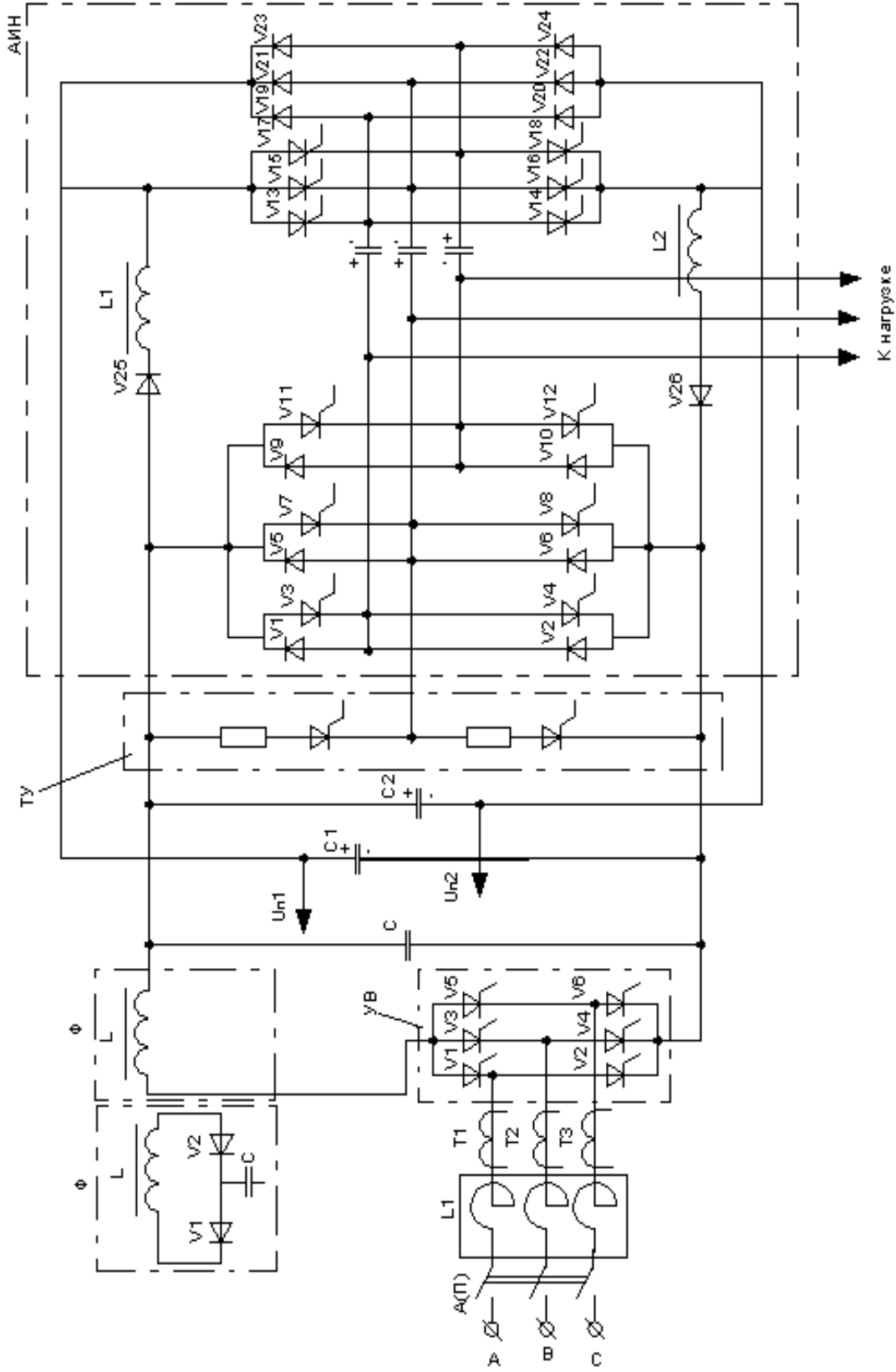


Рисунок 4.1 – Схема силовой части преобразователя частоты с тиристорным инвертором

В электроприводе для защиты тиристоров АИН при срабатывании защит одновременно включаются все основные тиристоры АИН по команде от платы защиты. В электроприводе для обеспечения режима торможения используется тормозное устройство (ТУ), состоящее из двух цепей (последовательно включенный тиристор и резистор), средней точкой подключенных к общей точке тиристоров фазы АИН.

Включение тормозного устройства задается от сигнала регулятора ЭДС (РЭ) или частоты (РЧ). Отрицательный сигнал регулятора является сигналом на торможение привода. При торможении все тиристоры АИН продолжают включаться, по рабочей диаграмме импульсами с задающего генератора (ЗГ), а импульсы УВ переводятся в инверторную зону.

### **4.3 Содержание отчета**

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

- цель работы;
- описание схемы, назначения и принципа работы управляемого выпрямителя в составе преобразователя частоты;
- описание схемы, назначения и принципа работы автономного инвертора в составе преобразователя;
- описание способов торможения и конструкции тормозного устройства, реализованных в данном преобразователе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Поясните принцип работы и назначение управляемого выпрямителя в составе преобразователя частоты.
- 2 Поясните назначение и принцип работы автономного инвертора.
- 3 Поясните назначение и принцип работы тормозного устройства.
- 4 Объясните алгоритм управления силовыми тиристорами инвертора.

## **5 Лабораторная работа № 5. Исследование ПЧАИ – блоки управления и защиты**

**Цель работы:** изучить схемотехнику и принцип работы блоков управления тиристорным автономным инвертором в составе преобразователя частоты.

### **5.1 Ход работы**

- 5.1.1 Изучить схему и принцип работы задающего генератора частоты.
- 5.1.2 Изучить схему и принцип работы кольцевого счетчика.
- 5.1.3 Изучить алгоритм работы логического формирователя импульсов.
- 5.1.4 Изучить схему электрическую принципиальную в составе докумен-



тации на преобразователь частоты ЭКТ2Д. Выделить на схеме блоки задающего генератора частоты, кольцевого счетчика, распределителя импульсов, формирователя импульсов.

## 5.2 Краткие теоретические сведения

Описание принципиальной схемы управления инвертором (СУИ).

Система управления инвертором предназначена для формирования импульсов управления основными и коммутирующими тиристорами инвертора с частотой, соответствующей напряжению задания и мощностью, достаточной для открывания тиристорov.

СУИ состоит из следующих функциональных узлов:

- задающего генератора;
- пересчетного кольца;
- питания;
- формирования импульсов;
- реверса;
- выходных усилителей.

Задающий генератор (рисунок 5.1) предназначен для преобразования напряжения в пропорциональное ему значение частоты, работает по принципу изменения направления интегрирования, состоит из интегратора на микросхеме  $DA1$ , компаратора на микросхеме  $DA2$ , переключателя направления интегрирования с ключом на транзисторе  $VT1$ .

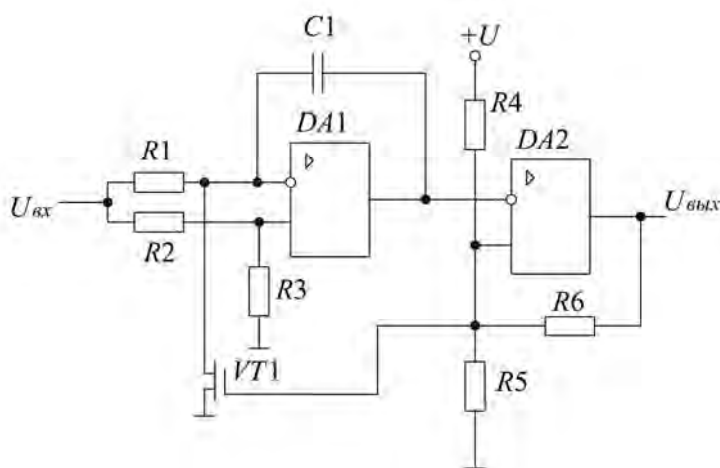


Рисунок 5.1 – Схема задающего генератора частоты

При подаче положительного напряжения на вход  $DA1$  и закрытом транзисторе  $VT1$  формируется нарастающее пилообразное напряжение на выходе интегратора.

В момент равенства этого напряжения опорному напряжению  $U_{on}$ , компаратор на  $DA2$  переключается в положение с нулевым напряжением, которое закрывает транзистор  $VT1$ . Цикл интегрирования повторяется в противоположном направлении до  $-U_{on}$ .

Работа задающего генератора поясняется рисунке 5.2.

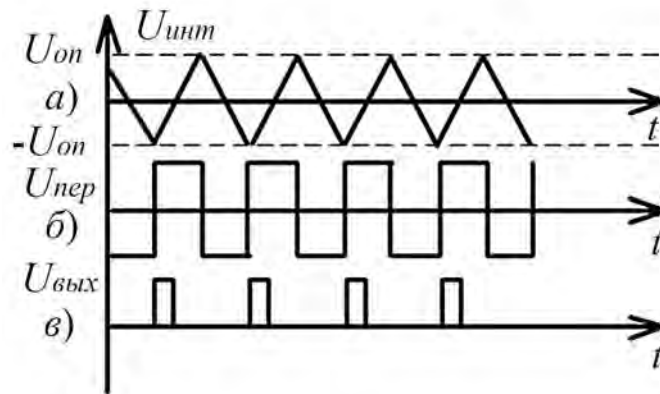


Рисунок 5.2 – Работа задающего генератора

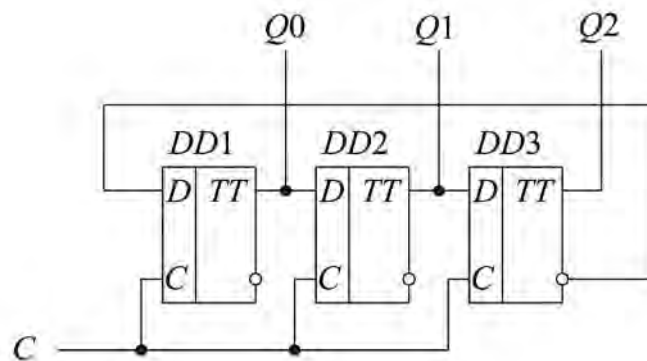


Рисунок 5.3 – Схема кольцевого счетчика

Кольцевой счетчик (рисунок 5.3) предназначен для преобразования последовательности входных импульсов в параллельный код с шестью выходами. Кольцевой счетчик состоит из трех триггеров на микросхемах  $DD1$ ,  $DD2$ ,  $DD3$  и построен по принципу сдвигающего регистра.

Импульсы на выходах триггеров имеют длительность до  $180^\circ$  со сдвигом на  $60^\circ$ . Частота импульсов на выходах триггеров в шесть раз меньше входной. Если принять за исходное состояние положение триггеров  $DD1$ ,  $DD2$ ,  $DD3$  по прямым выходам 100, то с приходом импульсов на счетные входы состояние триггеров будет последовательно меняться 110, 010, 011, 001, 101, 100. Таким образом, в исходное состояние триггеры возвратятся после шестого импульса.

Узел формирователя импульсов предназначен для формирования основных и коммутирующих импульсов. Он состоит из следующих устройств:

- распределителя основных импульсов, на выходе которого получают импульсы длительностью  $60^\circ$  со сдвигом между собой на  $60^\circ$ ;
- формирователя задержки начала коммутирующих импульсов после окончания основных длительностью  $20 \dots 40$  мкс;
- формирователя длительности импульсов  $90 \pm 10$  мкс или  $135 \pm 10$  мкс, необходимой для восстановления запирающих свойств тиристоров;
- формирователя длительности импульсов  $200 \pm 20$  мкс для коммутирующих тиристоров;

- логических схем формирователя импульсов для основных тиристоров длительностью  $160^\circ$ , укороченных по переднему фронту на время восстановления запирающих свойств тиристоров;
- логических схем формирования коммутирующих импульсов;
- формирователя синхронизации реверса, которая осуществляется перед коммутирующими импульсами  $\pm C_k$  после окончания соответствующих основных  $\pm C_0$ ;
- элемента осуществления синхронизации торможения.

Работа логического формирователя импульсов иллюстрируется на рисунке 5.4, где  $+A, +B, +C, -A, -B, -C$  – выходные сигналы триггеров пересчетного кольца;  $+A_0, +B_0, +C_0, -A_0, -B_0, -C_0$  – основные импульсы;  $+A_k, +B_k, +C_k, -A_k, -B_k, -C_k$  – коммутирующие импульсы.

Узел реверса осуществляет изменение порядка следования основных и коммутирующих импульсов фаз А и С в зависимости от сигналов «Вперед» или «Назад».

Выходной усилитель мощности предназначен для усиления импульсов до мощности, достаточной для открывания тиристоров.

Узел питания позволяет получить стабилизированные напряжения – 15 В, +15 В, –6 В. Собран по схеме параметрического стабилизатора напряжения.

### 5.3 Содержание отчета

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

- цель работы;
- описание схемы и принципа работы задающего генератора частоты;
- описание схемы и принципа работы кольцевого счетчика;
- описание алгоритма работы логического формирователя импульсов.

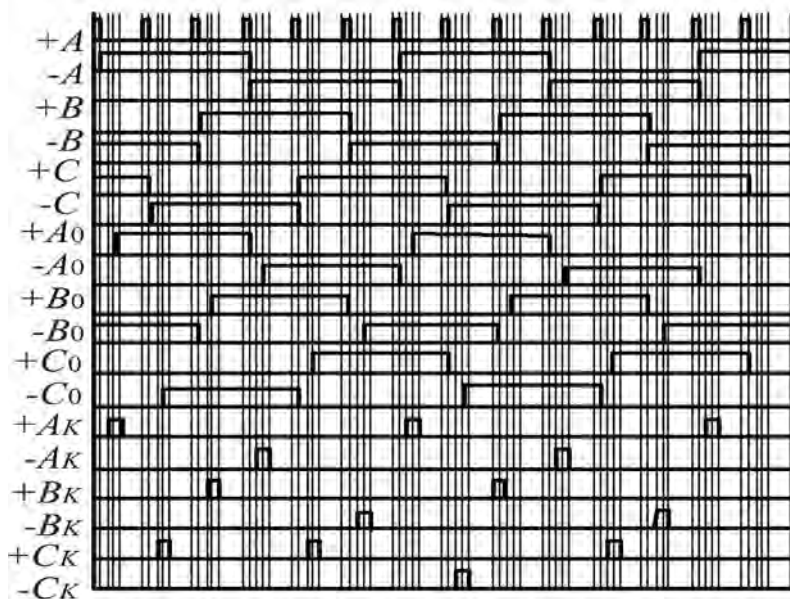


Рисунок 5.4 – Работа логического формирователя импульсов



### ***Контрольные вопросы***

- 1 Поясните принцип работы задающего генератора частоты.
- 2 Поясните принцип работы кольцевого счетчика.
- 3 Поясните алгоритм работы логического формирователя импульсов.

## **6 Лабораторная работа № 6. Исследование автономного инвертора (АИ) на базе IGBT-технологии – силовой блок**

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

### ***6.1 Ход работы***

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

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

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

### ***6.2 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 6.1.

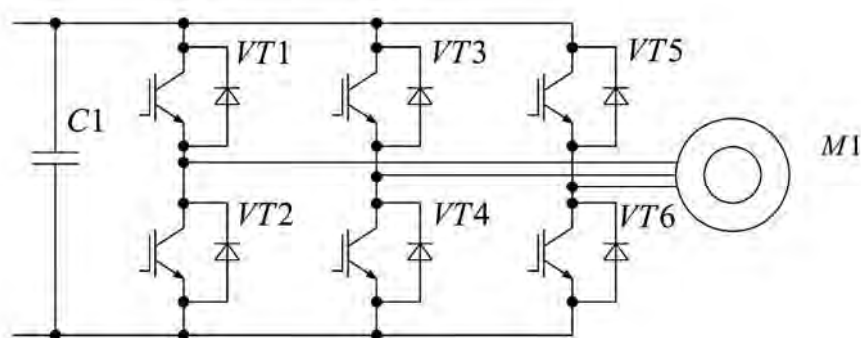


Рисунок 6.1 – Схема инвертора напряжения

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 6.2 показана диаграмма выходного напряжения автономного инвертора с ШИМ модуляцией.

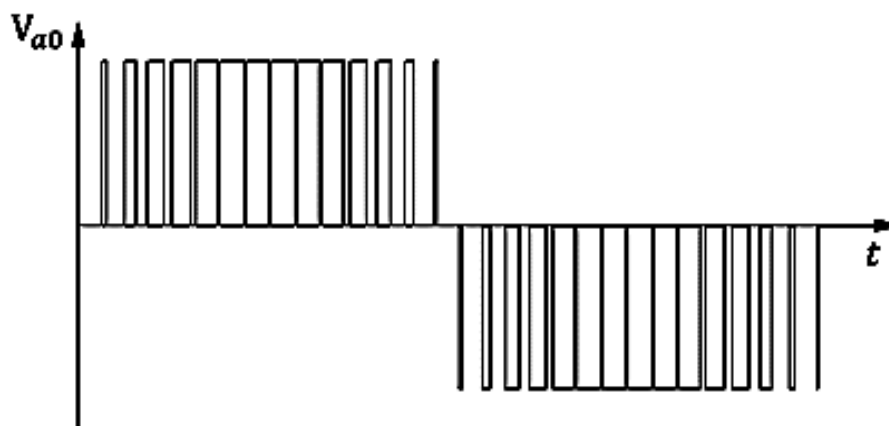


Рисунок 6.2 – Диаграмма выходного напряжения транзисторного АИН-ШИМ

### 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 6.3.

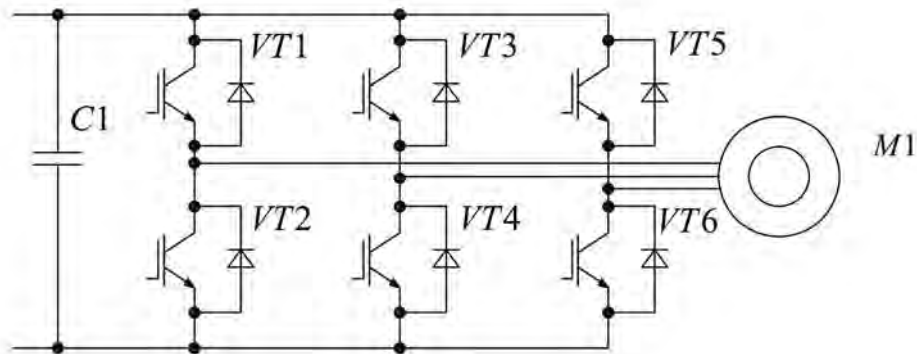


Рисунок 6.3 – Схема инвертора тока

### 6.3 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.

## 7 Лабораторная работа № 7. Исследование АИ на базе IGBT-технологии – блоки управления

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

### 7.1 Ход работы

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

7.1.2 Изучить алгоритмы работы системы управления автономным инвертором.

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

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

7.1.5 Изучить схему и принцип работы блока драйверов силовых транзисторов.

### 7.2 Краткие теоретические сведения

Принцип скалярного управления может использоваться для построения контуров автоматического управления скоростью (рисунок 7.1), в которых отклонение желаемой скорости от фактического измеренного значения скорости поступает в ПИ-регулятор, где вычисляется значение частоты напряжения статора.

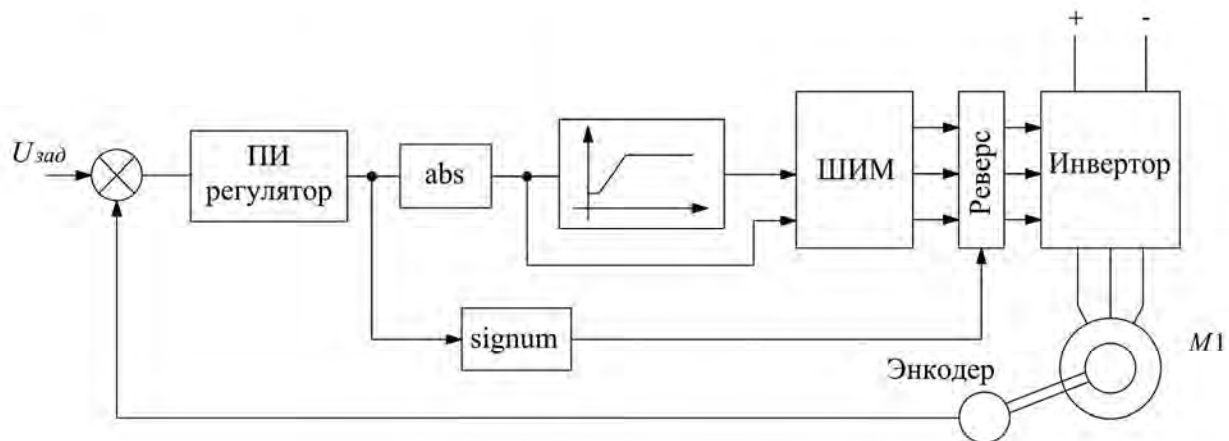


Рисунок 7.1 – Структурная схема системы управления

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 7.1.

Одним из способов решения задачи формирования с помощью инвертора трехфазной синусоидальной системы напряжений со сдвигом по фазе  $120^\circ$  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:

$$\begin{aligned}\theta_1[k] &= \theta_1[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\ \theta_2[k] &= \theta_2[k-1] + \omega_s[k]T_s; \\ \theta_3[k] &= \theta_3[k-1] + \omega_s[k]T_s,\end{aligned}\tag{7.1}$$

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  $2\pi$ , то для поддержания области значений в диапазоне от 0 до  $2\pi$  из результирующего значения вычитается  $2\pi$ . Таблица синусов используется для вычисления трех напряжений, которые необходимо приложить к статору:

$$\begin{aligned}V_a[k] &= V_{sm}(\omega_s[k])\sin(\theta_1[k]); \\ V_b[k] &= V_{sm}(\omega_s[k])\sin(\theta_2[k]); \\ V_c[k] &= V_{sm}(\omega_s[k])\sin(\theta_3[k]),\end{aligned}\tag{7.2}$$

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 7.2 показана функциональная схема системы, реализующей описанный выше алгоритм.

Аппаратная реализация современной системы управления транзисторным инвертором содержит два основных элемента – микроконтроллер и блок драйверов силовых транзисторов. При этом ПИ-регулятор, алгоритм управ-



ления 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 отпирания и запираания IGBT-транзистора.

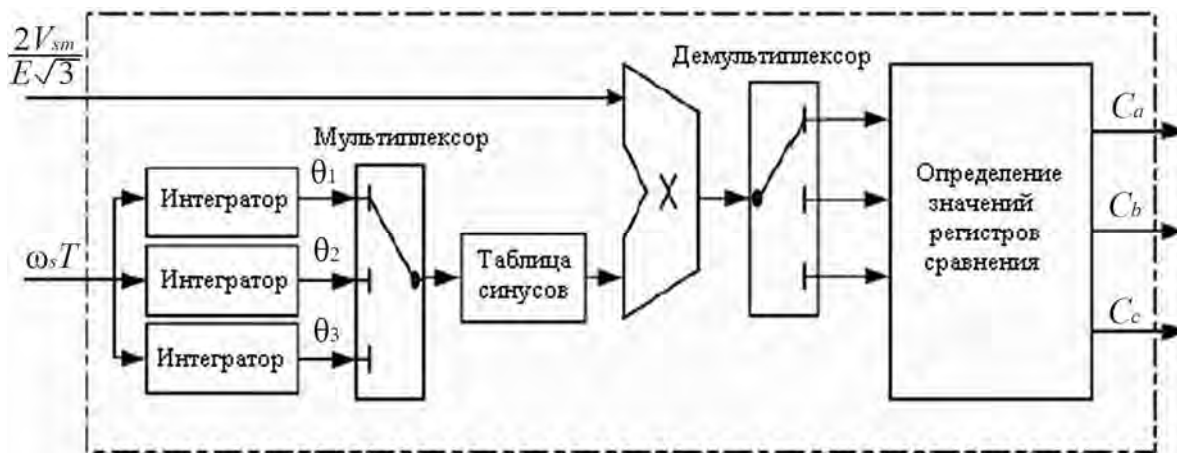


Рисунок 7.2 – Структурная схема ШИМ-управления

Схема принципиальная одного из трех каналов драйвера силовых транзисторов показана на рисунке 7.3.

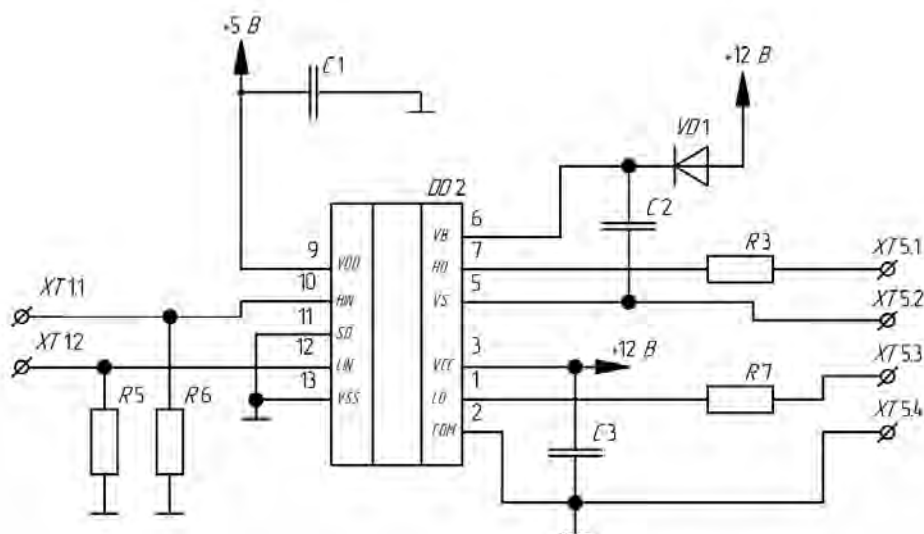


Рисунок 7.3 – Схема принципиальная канала драйвера силовых транзисторов

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 управ-

ления верхним транзистором относительно эмиттера нижнего транзистора, к которому подключена ножка *COM* 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 вольта 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.

### **7.3 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.



## 8 Лабораторная работа № 8. Исследование датчиков частоты вращения

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

### 8.1 Ход работы

8.1.1 Изучить устройство датчиков частоты вращения:

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

8.1.2 Изучить паспортные данные энкодера ВЕ-178А.

8.1.3 Получить осциллограммы выходных сигналов энкодера ВЕ-178А.

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

8.1.5 Сделать выводы о корректности работы энкодера.

### 8.2 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.

$$e = -\frac{d\varphi}{dt}. \quad (8.1)$$

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

$$\varphi(x) = \varphi_0 F(x), \quad (8.2)$$

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:

$$e = -\varphi_0 \frac{F(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (8.3)$$

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  $\omega$ . 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  $\omega$ . Статор состоит из магнитного листового железа и несёт две обмотки:

- 1) возбуждающую обмотку, к которой прикладывается напряжение,
- 2) измерительную обмотку, в которой наводится ЭДС.

ЭДС, наводимая в измерительной обмотке, формирует периодический сигнал, амплитуда которого пропорциональна скорости вращения  $\omega$ .

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:

$$F_{\text{д}} = \frac{n}{60} S, \quad (8.4)$$

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  $\varepsilon$ , площади обкладок или расстояния между обкладками  $h$ .

Для двухобкладочного плоского конденсатора электрическая емкость определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}, \quad (8.5)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$\varepsilon$  – 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  $\omega$ , то

$$C = m \cdot S, \quad (8.6)$$

где  $m = \varepsilon / \delta$ .

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

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{\delta}{\omega \varepsilon C}. \quad (8.7)$$

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. Последова-



тельность 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 8.1).

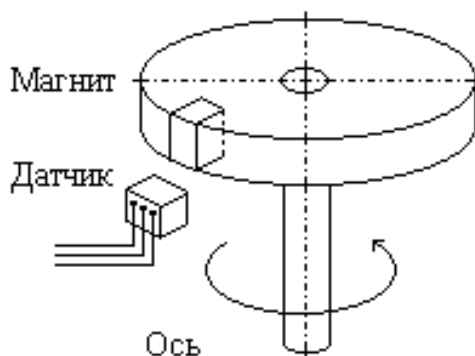


Рисунок 8.1 – Схема реализации магниторезистивного датчика вращения

Изменение сопротивления с помощью схемы, показанной на рисунке 8.2, преобразуется в изменение напряжения  $U_a$ . Зависимость выходного напряжения сигнала от времени показана на рисунке 8.3.

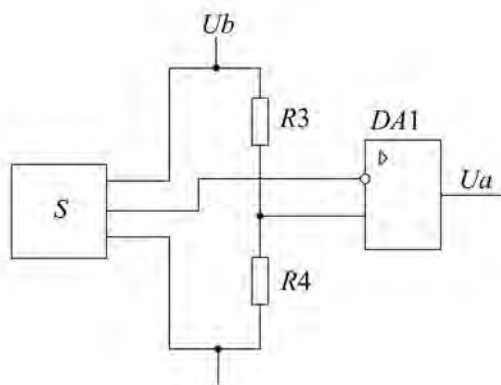


Рисунок 8.2 – Схема изменения сопротивления

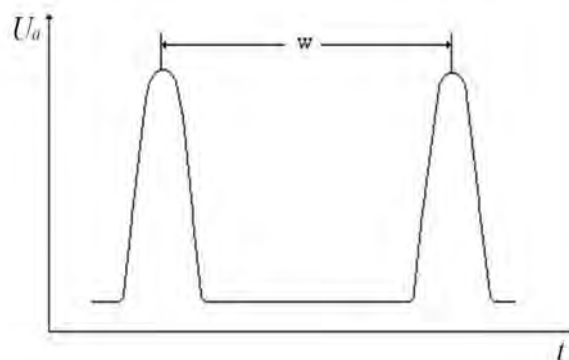


Рисунок 8.3 – Зависимость выходного напряжения сигнала от времени

Достоинства: простота устройства, надёжность, дешевизна.

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

### 8.3 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 ВЕ-178А;
- 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 **Чернышев, А. Ю.** Электропривод переменного тока: учебное пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – 2-е изд. – Томск: Томск. политех. ун-т, 2015. – 210 с.
- 2 **Васильев, Б. Ю.** Электропривод. Энергетика электропривода: учебник / Б. Ю. Васильев. – Москва: СОЛОН-Пр., 2015. – 268 с.
- 3 **Бондарев, М. Б.** Электропривод и электроавтоматика. Лабораторный практикум: учебное пособие / М. Б. Бондарев. – Минск: РИПО, 2016. – 74 с.
- 4 **Симаков, Г. М.** Автоматизированный электропривод в современных технологиях / Г. М. Симаков. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 103 с.

