

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, _____

(должность)

_____/_____/

(подпись и печать)

(И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____/ И.М. Кирпичникова /

« ____ » _____ 2020 г.

«Разработка системы управления преобразователем напряжения
для лабораторного компенсатора реактивной мощности»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР

Руководитель, доцент, к.т.н.,

_____/ К.Е. Горшков/

« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы

студент группы П-282

_____/ А.С. Ленко /

« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролёр, доцент, к.т.н.,

_____/ К.Е. Горшков /

« ____ » _____ 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ / И.М. Кирпичникова /
« ___ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную научную работу магистра

Ленко Алексея Сергеевича
Группа П-282

1. Тема выпускной квалификационной работы «Разработка системы управления преобразователем напряжения для лабораторного компенсатора реактивной мощности» утверждена приказом по университету от « ___ » _____ 2020 г. № _____

2. Срок сдачи студентом законченной работы « ___ » _____ 2020 г.

3. Исходные данные к работе

- 1) Статьи и научно-методическая литература по теме силовой преобразовательной техники и силовой электроники;
- 2) Требования к лабораторному преобразователю напряжения;
- 3) Руководство пользователя к пакету математического моделирования MATLAB/Simulink.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке

- 1) Обзор существующих вариантов реализации устройства и его системы управления;
- 2) Разработка функциональной модели системы управления лабораторным преобразователем напряжения;
- 3) Реализация системы управления в среде MATLAB/Simulink;
- 4) Экспериментальное исследование работы системы управления на виртуальной модели в среде MATLAB/Simulink;

5) Натурные испытания системы управления на реальном преобразователе напряжения.

5. Перечень графического материала

Презентация, выполненная в программе Microsoft PowerPoint.

6. Консультанты, с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Подпись	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
—	—	—	—
—	—	—	—
—	—	—	—

7. Дата выдачи задания

« ____ » _____ 2020 г.

Руководитель работы

(подпись)

Задание принял к исполнению

(подпись студента)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Дата завершения этапа	Отметка руководителя о выполнении
Анализ литературы и публикаций по теме управления силовыми преобразователями напряжения	1 неделя	
Разработка схемы управления лабораторным преобразователем напряжения	2-3 неделя	
Реализация виртуальной модели в среде MATLAB/Simulink	3-4 неделя	
Экспериментальное исследование на виртуальной модели	5 неделя	
Натурные испытания на лабораторном преобразователе напряжения	6 неделя	
Анализ полученных результатов	7 неделя	
Оформление пояснительной записки	8 неделя	
Разработка презентации	9 неделя	

Заведующий кафедрой _____ / И.М. Кирпичникова /

Руководитель работы _____ / К.Е. Горшков /

Студент _____ / А.С. Ленко /

АННОТАЦИЯ

Ленко А.С. – Разработка системы управления преобразователем напряжения для лабораторного компенсатора реактивной мощности. – Челябинск: ЮУрГУ, ЭФ, П-282, 2020 г., стр. 62, илл. 44, табл. 6. Список литературы – 5 наименований.

В выпускной квалификационной работе выполнена разработка системы управления преобразователем напряжения для лабораторного компенсатора реактивной мощности.

В первой части работы приведен обзор научно-технической литературы и публикаций по теме силовой преобразовательной техники, а также обзор существующих технических реализаций систем управления полупроводниковыми преобразователями. Затем описывается виртуальная модель преобразователя, созданная в среде MATLAB/Simulink. Модель максимально приближена по параметрам к универсальному стенду компенсатора реактивной мощности из лаборатории кафедры ЭССиСЭ ЮУрГУ.

Во второй части работы проведен ряд экспериментов сначала на виртуальной модели, а затем на физической установке лабораторного преобразователя напряжения. По результатам испытаний дана оценка работоспособности созданной системы управления преобразователем.

В ходе выполнения работы широко применялись различные программные средства, такие как Microsoft Office, Microsoft Visio, MathCad, MATLAB/Simulink, Arduino IDE.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Ленко</i>				<i>Разработка системы управления преобразователем напряжения для лабораторного компенсатора реактивной мощности</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>	<i>Горшков</i>						5	62
<i>Н. контр.</i>	<i>Горшков</i>					<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Утв.</i>	<i>Кирпичникова</i>					<i>Кафедра ЭССиСЭ</i>		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ.....	8
1.1 Система импульсно фазового управления преобразователями тока	9
1.2 Система управления преобразователями напряжения и широтно-импульсная модуляция	14
2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ.....	18
2.1 Разработка алгоритма управления лабораторным преобразователем напряжения	18
2.1.1 Первый вариант реализации алгоритма со смещением управляющего сигнала	18
2.1.2 Второй вариант реализации алгоритма управления через ШИМ и управляемое смещение сигнала	23
2.2 Создание прототипа системы управления преобразователем напряжения для лабораторного компенсатора реактивной мощности ...	25
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ	32
3.1 Проверочная виртуальная модель в среде MATLAB/Simulink.....	32
3.2 Экспериментальные исследования на моделях	45
3.2.1 Исследование работы преобразователя в полнофазном режиме на виртуальной модели.....	46
3.2.2 Исследование работы преобразователя в неполнофазном режиме на виртуальной модели и на натурном стенде.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	56
ПРИЛОЖЕНИЕ А	57
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ В	60
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	62

ВВЕДЕНИЕ

Технологии в области систем передачи электроэнергии развиваются в направлении повышения их управляемости, динамической устойчивости и надежности. При этом должно обеспечиваться надежное и качественное электроснабжение потребителей. Одним из способов достижения этих целей является применение управляемых линий электропередач (FACTS). Перспективным направлением развития устройств FACTS являются преобразователи напряжения, используемые как компенсаторы реактивной мощности, выпрямители или инверторы на подстанциях постоянного тока [2-4].

Данной тенденции отвечает и выполненная работа, направленная на создание системы управления для лабораторного преобразователя напряжения, который будет использоваться с целью моделирования сложных процессов в линиях постоянного тока или линиях переменного тока с управляемой компенсацией реактивной мощности.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>7</i>

1 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Электроэнергетическая система – это единый технологический комплекс систем генерации и передачи электрической энергии. Управление этим комплексом осуществляют диспетчерские управления и службы, а также интегрированная в систему автоматика, которая отвечает за устойчивость и защиту системы от коротких замыканий в сети. В нормальных режимах это технологическая автоматика, а в аварийных – релейная защита и противоаварийная автоматика. В прошлом веке основным способом повышения эффективности электроэнергетической системы было освоение оборудования большей мощности, и внедрение сетей более высоких напряжений. Эволюция систем управления тормозилась отсутствием достаточно надежных и мощных силовых преобразователей.

Однако во второй половине XX века появились быстродействующие высоконадежные силовые устройства управления режимом на базе новых управляемых силовых полупроводниковых ключей, начала расти наблюдаемость режимов энергосистемы за счет повсеместного внедрения телеизмерений и устройств передачи данных, что в целом, резко увеличило надежность всей энергосистемы [1].

Имея данные о параметрах режима диспетчер или автоматика могут дать сигнал на изменение того или иного параметра энергосистемы. А для того чтобы изменить какой либо из параметров нужно оборудование которое может напрямую воздействовать на силовые цепи. До появления силовых полупроводниковых преобразователей единственными способами изменить параметры или конфигурацию схемы были устройства на электромеханической базе, такие как: РПН, силовые выключатели, разъединители, короткозамыкатели и т.д. Все перечисленные устройства имеют достаточно малую скорость коммутации, и не могут обеспечить плавное регулирование режима.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

Ситуация изменилась с появлением силовых полупроводниковых ключей во второй половине XX века. Устройства со скоростью коммутации от единиц до нескольких десятков микросекунд, способные коммутировать силовые цепи, позволили создавать аппараты способные плавно управлять протекающей по ним мощности. Так же за счет высокой скорости коммутации такие устройства нашли применения в преобразователях частоты, выпрямительных и инверторных подстанциях, компенсаторах реактивной мощности. Про историю эволюции этих приборов речь пойдет далее.

1.1 Система импульсно фазового управления преобразователями тока

Силовых преобразователей в настоящее время великое множество, но в данной работе рассмотрим только схемы, предназначенные для использования в трехфазной сети. Самой распространенной схемой в данный момент является трехфазная мостовая схема рисунке 1.

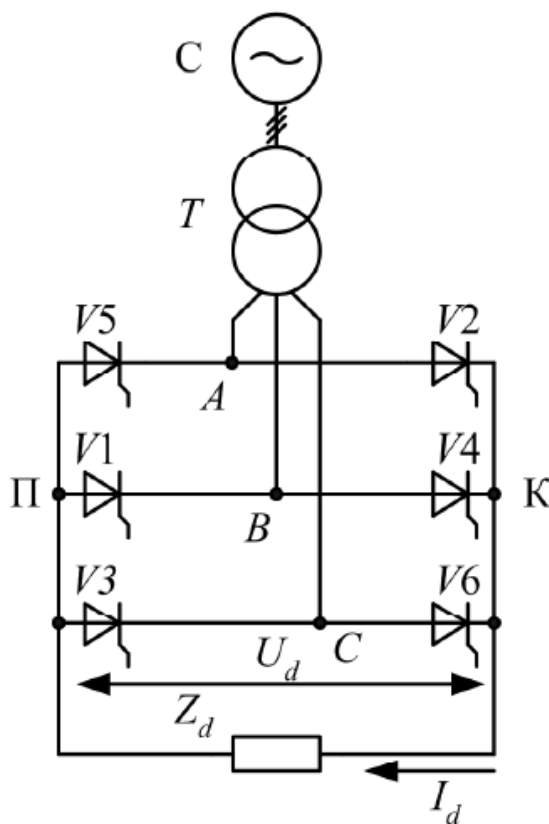


Рисунок 1 – Трехфазная мостовая схема

В данном случае силовыми ключами являются тиристоры, однако на месте них могут быть любой тип силовых ключей, и от того какие именно ключи мы будем использовать зависят свойства схемы, и принцип работы системы управления. В зависимости от свойств источников электроэнергии и схемы подключение входных и выходных цепей преобразователя делятся на:

- преобразователи тока ПТ, связанные с источниками тока или включенные в схемы, в которых постоянная времени изменения тока существенно превышает период частоты напряжения преобразователя.

- преобразователи напряжения ПН, связанные с источниками напряжения или включенные в схемы, в которых постоянная времени изменения напряжения существенно превышает период частоты напряжения преобразователя [1].

Преобразователи напряжения могут выполняться только с использованием полностью управляемых вентилях, преобразователи тока и на полностью управляемых вентилях, и на диодах и на однооперационных тиристорах. Оба типа преобразователей могут работать как в автономном режиме в трехфазной сети, без собственных источников энергии, так и совместно с сетью, имеющей общие источники.

Преобразователи тока обычно выполняются с импульсно-фазовым управлением тиристорами (СИФУ), преобразователи напряжения управляются с помощью широтно импульсной модуляции (ШИМ).

Возможны различные способы управления тиристорами, реализующие различные способы управления в преобразователе: импульсно-фазовое, симметричное или несимметричное, различные способы широтно-импульсной модуляции. В преобразователях тока, распространенных в электроэнергетике, применяется симметричное импульсно-фазовое управление, при котором углы запаздывания включения для всех тиристоров одинаковы. Система управления, создающая импульсы управления при этом получила название «система импульсно фазового управления» – СИФУ.

Система импульсно-фазового управления (СИФУ) – предназначена для формирования токов управления тиристорами с требуемой амплитудой, формой и длительностью в моменты времени, определяемые управляющим воздействием, согласно заданому закону управления.

Для примера, рассмотрим систему импульсно-фазового управления универсального стенда, который располагается в лаборатории кафедры ЭССИСЭ.

СИФУ универсального стенда многоканальная, аналоговая, построена по вертикальному принципу. Параметры системы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики СИФУ универсального стенда лаборатории кафедры ЭССИСЭ

№	Параметр	Значение
1.	Количество каналов	6
2.	Закон регулирования	arccos
3.	Амплитуда импульса на светодиоде оптрона, В	0,9...1,2
4.	Амплитуда импульса в контрольном гнезде, В	2,4...3,5
5.	Длительность короткого импульса, град. эл.	10...15(0,56...0,83)
6.	Длительность длинного импульса, град. эл.	110...120(6,11...6,67)
7.	Межфазная несимметрия, не хуже, град. эл.	5
8.	Ширина диапазона регулирования, град. эл.	120..140
9.	Напряжение управления, В	+12...-12
10.	Напряжеие смещения, В	-6...+6

Далее, на рисунке 2 показана структурная схема системы импульсно-фазового управления установленной в универсальном стенде.

микросхем $DD1:1$ и $DD2$ выделяет фронты импульса. По отрицательному фронту полученного импульса происходит запуск одновибратора, выполненного на микросхеме $DD2$. Длительность импульса, формируемого одновибратором, определяется постоянной времени RC цепи, подключенной к выводам R и C микросхемы. [1]

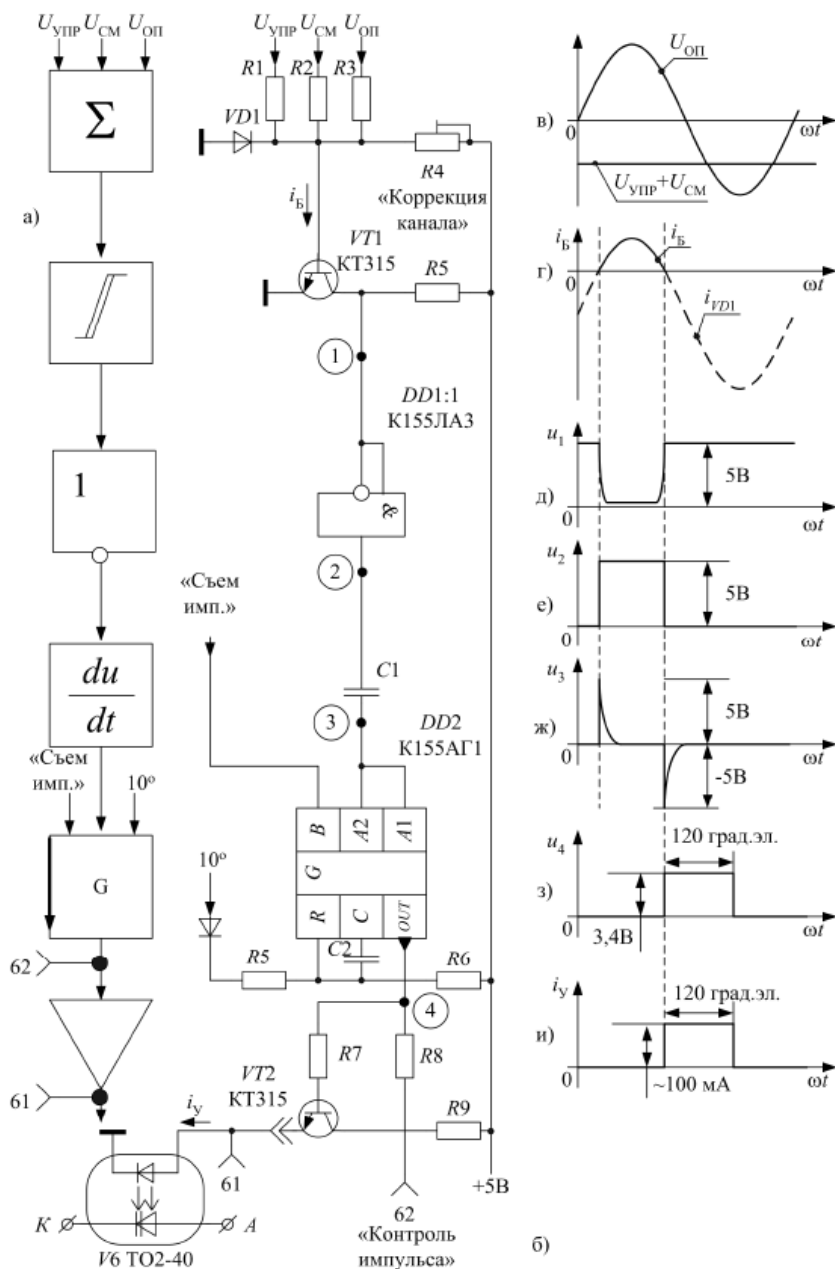


Рисунок 3 – Схема одного канала управления СИФУ

СИФУ универсального стенда реализована на аналоговых элементах, что делает её устройство достаточно сложным. Это объясняется тем что создавалась эта система достаточно давно, когда микропроцессорные

устройства были дороги и сложны в управлении. На данный момент, аналоговые системы управления уходят в прошлое, изза своей сложности, громоздкости и отсутствия достаточной многофункциональности. На смену им приходят микроконтроллеры, которые в данный момент являются более простыми в обращении, и отличаются широким спектром возможностей. Далее речь пойдет про системы управления преобразователями напряжения, которые в последнее время выполняются исключительно на микропроцессорной базе.

1.2 Система управления преобразователями напряжения и широтно-импульсная модуляция

Как было сказано ранее, преобразователям напряжения для управления необходим ШИМ. Он может комбинироваться с СИФУ, что позволяет использовать все возможности схемы, и работать в 4 квадрантах графика мощности. Однако без ШИМа преобразователь напряжения работать не может. Широтно импульсная модуляция может быть реализована на аналоговых схемах, но сейчас это намного проще сделать просто прописав логику и расчетные функции в микроконтроллере.

Так как нам необходимо модулировать синусоиду, периодический сигнал, коэффициент заполнения ШИМ должен меняться с тем же периодом что и исходный сигнал. При этом нужно предусмотреть возможность управления двумя параметрами получаемого сигнала – скважностью (коэффициентом заполнения), и фазой сигнала ψ относительно напряжения в сети. На рисунке 4 показан один из способов формирования ШИМ сигнала с помощью наложения нескольких графиков функций.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

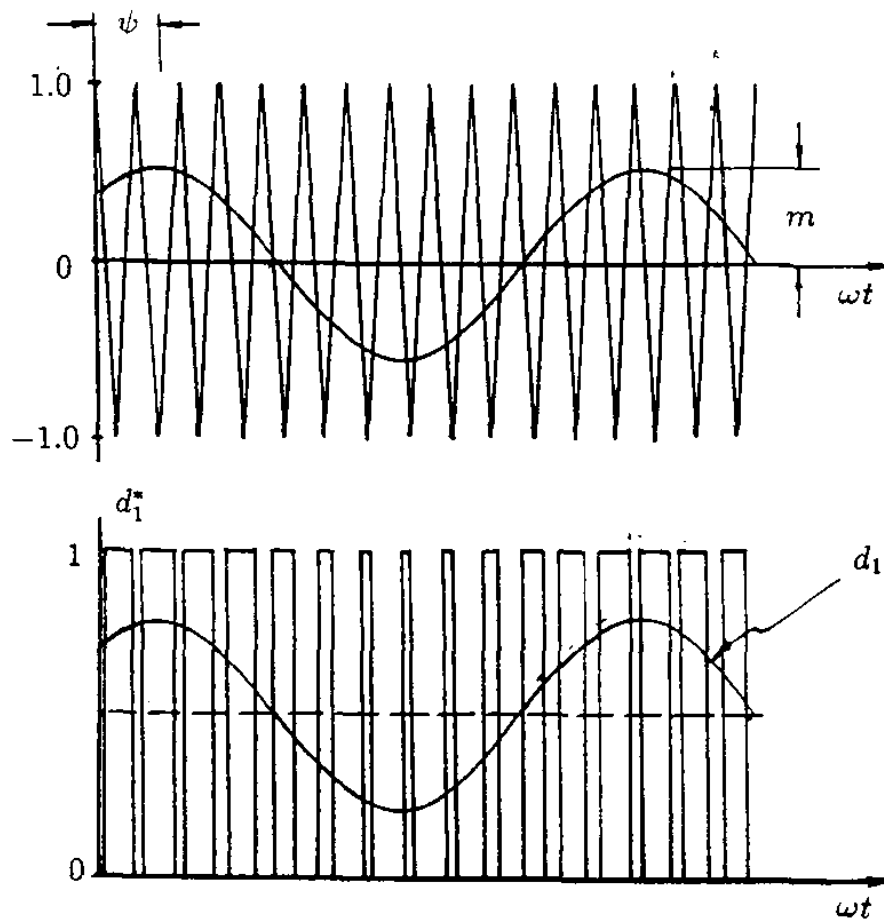


Рисунок 4 – Формирование ШИМ сигнала

С точки зрения математики, функция, дающая пилообразный график выглядит так:

$$f(t) = \frac{8V}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin(\omega t)}{k^2}, \quad (1)$$

где V – амплитуда пилообразного сигнала, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – угловая частота, T – период.

Управляющая синусоида напряжения:

$$f(t) = n \times \sin(\omega t + \varphi_0 + \psi), \quad (2)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – угловая частота, φ_0 – начальная фаза сигнала, ψ – управляемое смещение, n – коэффициент, отвечающий за скважность, и изменяющийся от 0 до 1, где 0 это минимальная скважность, а 1 максимальная соответственно.

Важно понимать, что период пилообразного сигнала много меньше, чем период модулируемой синусоиды, так как частота пилообразного сигнала равна частоте ШИМ, а частота ШИМ должна быть минимум в 10 раз больше частоты модулируемого сигнала.

Для определения момента подачи импульса на открытие накладываются друг на друга два графика – опорная синусоида, и пилообразный сигнал, генерируемый самим микроконтроллером [3,4]. Опорная синусоида может, как генерироваться самим микроконтроллером, так и подводиться через трансформатор напряжения извне и оцифровываться. Более подробно процесс формирования сигнала можно увидеть на рисунке 5.

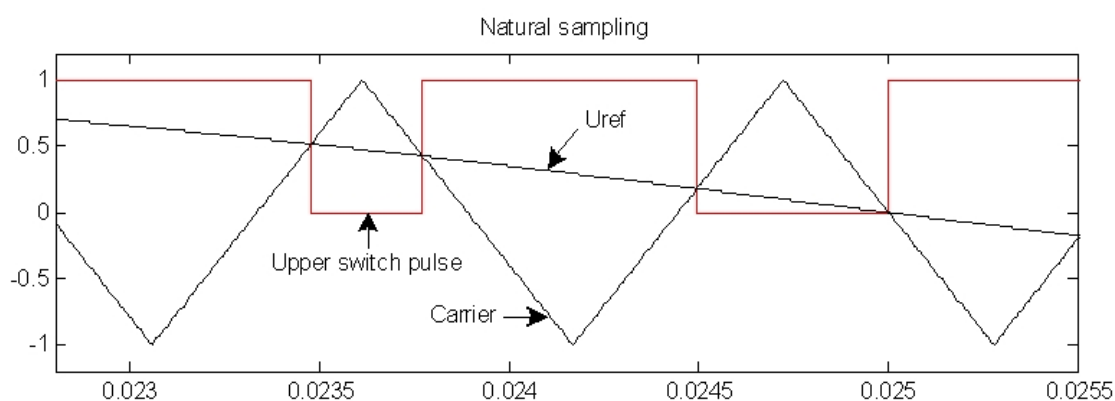


Рисунок 5 – Принцип работы ШИМ генератора

Управляющая синусоида на рисунке обозначена как U_{ref} , пересекая пилообразный график *carrier*, образуются точки, расстояние между которыми и будет длительностью управляющего сигнала, на рисунке он обозначен красным цветом. Таким образом, чем выше мгновенное значение управляющего напряжения, тем больше коэффициент модуляции, соответственно, на данном участке синусоида модулируемого напряжения будет иметь максимальное значение. Управлять фазой сигнала в данном случае предельно просто, нужно лишь сместить управляющую синусоиду вправо или влево на требуемый угол ψ . Управление скважностью осуществляется путем изменения амплитуды

ды управляющей синусоиды, а в формуле определяется изменением множителя синусоиды n [3-5].

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17

2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

2.1 Разработка алгоритма управления лабораторным преобразователем напряжения

Как было описано в предыдущем разделе, алгоритм управления преобразователем напряжения используемый в составе компенсатора реактивной мощности, прежде всего, должен иметь управляемое смещение сигнала на ± 180 эл. град. Это необходимо для того, чтобы преобразователь имел возможность работать во всех 4 квадрантах графика мощности.

Далее в подразделах этого параграфа в хронологическом порядке будут описаны все варианты реализации системы управления.

2.1.1 Первый вариант реализации алгоритма со смещением управляющего сигнала

На начальном этапе главной задачей было реализовать смещение управляющего сигнала на ± 180 эл. град. Для упрощения алгоритма от широтно импульсной модуляции было решено отказаться. Общая схема преобразователя представлена на рисунке 6.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		18

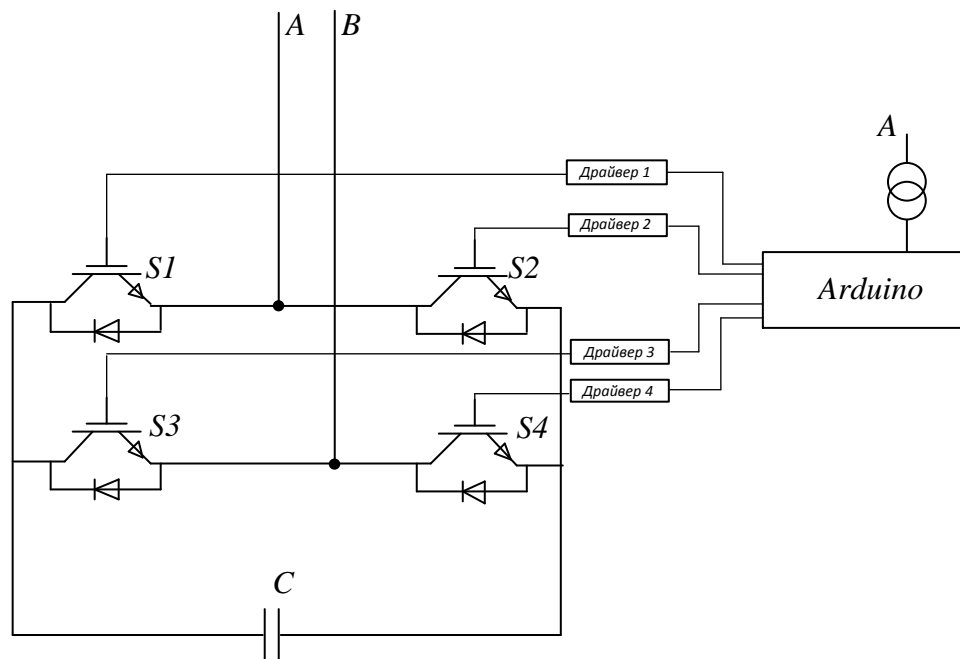


Рисунок 6 – Общая схема преобразователя v1

Для обеспечения синхронизации с сетью было создано программное прерывание, вызываемое при появлении на управляющем контакте напряжения высокого уровня (+5 В, или логическая единица), а все функции программы записаны в блоке прерывания. Так как прерывание вызывается на каждом положительном полупериоде напряжения, расчет управляющих сигналов производится для каждого периода в отдельности, и изменение частоты опорного напряжения не может повлиять на синхронизацию.

При вызове прерывания в первую очередь измеряется напряжение на выводе, присоединенном к подстроечному резистору. Контроллер сравнивает это напряжение с логической единицей (+5 В), и выдает значение от 0 до 1023, где 0 соответствует напряжению 0 В, а 1023 соответствует +5 В, и записывает это значение в переменную *faza*. Далее, для удобства мы переводим значение переменной *faza* из интервала значений 0...1023 в интервал 0...19600, и перезаписываем это значение в переменную. Далее мы делим интервал переменной *faza* на две переменных *val* и *val1* так, чтобы значения переменной *val* изменялись от 0 до 9800, а *val1* от 9800 до 19600. При этом если значение перемен-

ной $faza$ меньше 9800, то $val = faza$, а $val1 = 9800$, и если значение $faza$ больше 9800, то $val = 9800$, а $val1 = faza$.

Если представить управляющее напряжение одного транзистора на одном периоде на графике, оно будет выглядеть как на рисунке 7.

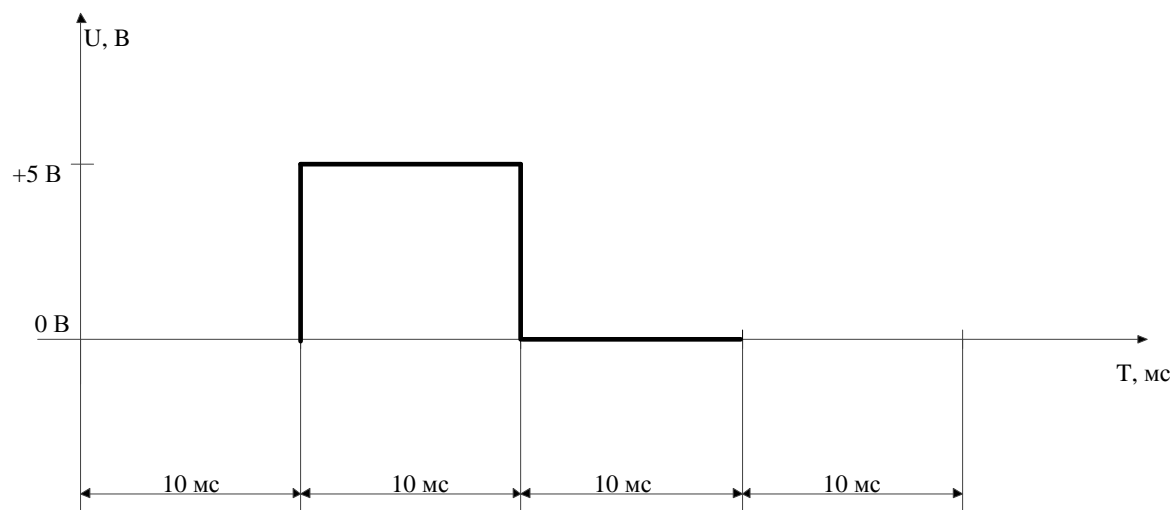


Рисунок 7 – График управляющего сигнала одного транзистора на одном периоде

Так как период напряжения сети $T = 20$ мс, каждый транзистор должен открываться на половину периода, т.е. на 10 мс. При этом нам необходимо обеспечить возможность смещения управляющего сигнала на ± 180 эл. град. Но управлять моментом включения программы мы не можем, так как он привязан к моменту вызова прерывания, и программа должна выполняться за 20 мс, так как через 20 мс прерывание будет вызвано еще раз и может нарушиться синхронизация.

Если представить график управляющего сигнала на протяжении 40 мс, то он будет выглядеть как показано на рисунке 8.

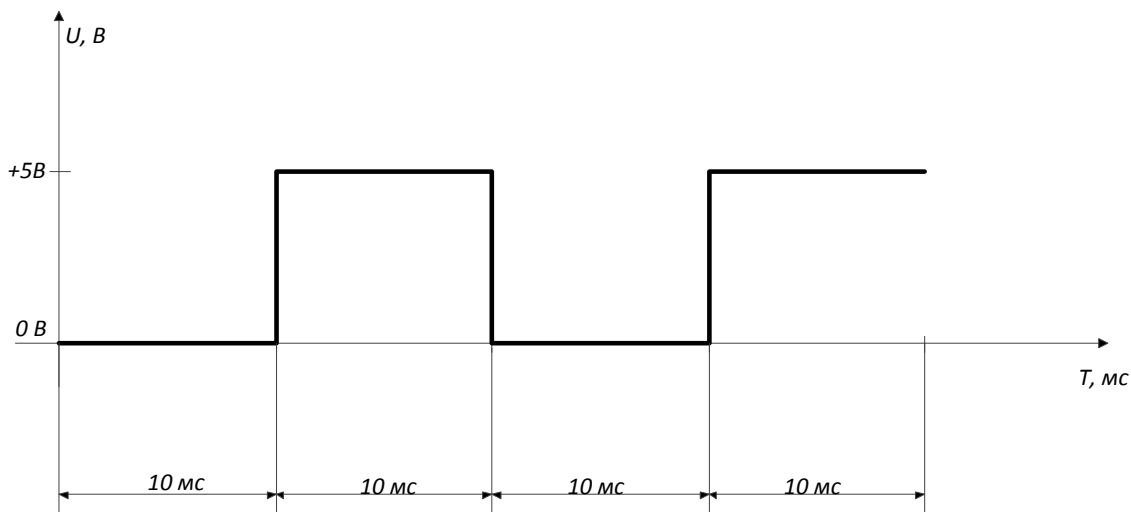


Рисунок 8 – График управляющего сигнала одного транзистора на протяжении 40 мс

При этом, управляющий сигнал соответствующий смещению 0 эл. град. Будет соответствовать центральной части этого графика, т.е. от 10 до 30 мс. Теперь, если взять первую половину этого графика длительностью 20 мс и подать управляющий сигнал такой формы на транзистор, получится, что мы сместили открытие транзистора на -180 эл. град. Проведя аналогичную операцию, взяв вторую половину графика, мы обеспечим регулирование на +180 эл. град.

Для плавного изменения фазы в, рамках опыта, использован подстроечный резистор. Так как изменение напряжения на нем контроллер воспринимает в пределах от 0 до 1023, у нас имеется 1024 ступени регулирования, или регулирование с шагом в 0,35 эл. град., что для проведения опыта более чем достаточно.

Если разделить график управляющего сигнала на одном транзисторе на 4 части, и учесть что транзисторы в схеме включаются попарно, то мы получим четыре линейных участка, где управляющее напряжение одной пары транзисторов равно логической единице, а второй пары равно нулю. Каждый из этих участков в алгоритме описан простейшей конструкцией «*digitalWrite*» что означает «подать логическую единицу», и выделен отдельным условием «*if*». В конце блока условия прописана задержка, которая зависит от положения подстроечного резистора, и изменяется от 0 до 9,8 мс.

Хотя в идеале максимальная длительность сигнала должна быть 10 мс, т.е. половина периода, в рамках опыта такую длительность реализовать невозможно, так как прерывание вызывается каждые 20 мс, и должно соблюдаться условие:

$$T_{\text{пр}} \geq t_{\text{вп}} + t_3$$

Где, $T_{\text{пр}}$ – период срабатывания прерывания, $t_{\text{вп}}$ – время выполнения программы, t_3 – время задержки.

Если правая часть выражения окажется больше левой, то получится так, что когда будет вызвано следующее прерывание, программа предыдущего не будет выполнена до конца. А когда потребуется подача сигнала на вторую пару транзисторов, контроллер будет некоторое время подавать сигнал на первую пару, т.е. нарушится синхронизация.

Таким образом, имея 4 блока, каждый из которых описывает часть графика, изображенного на рис. 7, мы можем выбрать интервал, на котором будет работать система, на графике это выглядит так:

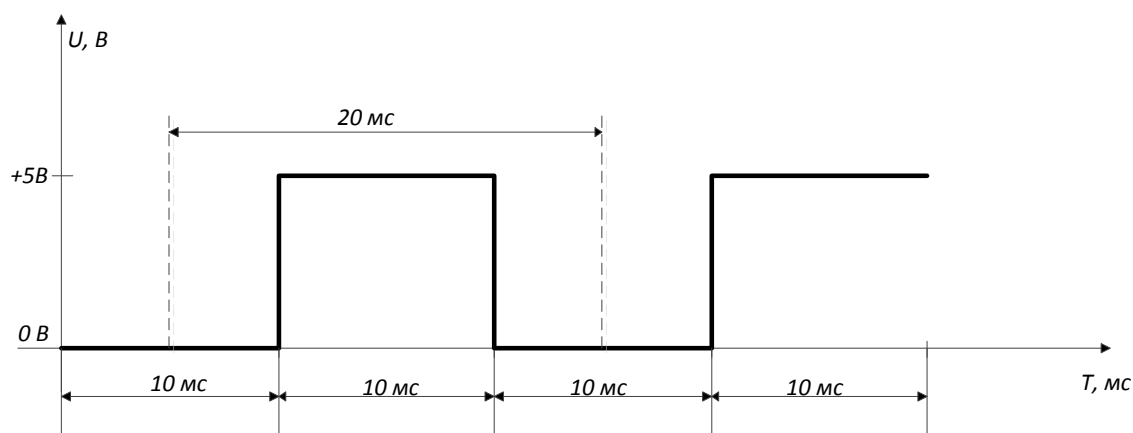


Рисунок 9 – Интервал графика соответствующий углу управления -90 эл. град

Подавая на транзисторы сигнал соответствующий данному интервалу, мы обеспечиваем регулирование на -90 эл. град., также, изменяя положение подстроечного, резистора мы можем плавно смещать интервал вправо или влево.

При использовании данного способа управления выдача реактивной мощности очень мала, и преобразователь не работает, так как должен. Позже было выяснено, что для работы преобразователя необходима именно модуляция синусоиды, чего невозможно достичь использованием простого меандра. Так как, по сути, меандр представляет собой ШИМ сигнал со скважностью равной нулю.

Текст программы на языке Arduino wiring представлен в приложении А. Результаты эксперимента приведены в приложении Б.

2.1.2 Второй вариант реализации алгоритма управления через ШИМ и управляемое смещение сигнала

Во втором варианте исполнения были учтены ошибки предыдущего, и реализован ШИМ сигнал. Так как главным критерием работоспособности устройства была управляемая работа преобразователя в III и IV квадрантах графика мощности, т.е. управляемая выдача и потребление реактивной мощности, управление скважностью ШИМ сигнала реализовано не было. Схема преобразователя аналогична предыдущему опыту, но система управления полностью переработана.

При реализации ШИМ сигнала пришлось учитывать некоторые ограничения схемы. Во первых, конструктивные особенности драйвера управления IGBT, установленного в стенде, не позволяют поднимать частоту переключений больше 500 Гц. То есть в общем, на период напряжения не может быть более 10 импульсов. Во вторых, Arduino очень медленно считает тригонометрические выражения, из-за чего пришлось отказаться от способа формирования ШИМ сигнала с помощью наложения графиков двух функций, описанного выше.

Самым простым способом реализации ШИМ сигнала показалось ручное вписывание длительностей открытых и закрытых состояний в двумерный массив, и, так же как и в прошлом методе, методом смещения начала отсчета по

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		23

двумерному массиву реализовано смещение управляющего сигнала. График сигналов, записанный в двумерный массив, представлен на рисунке 10.

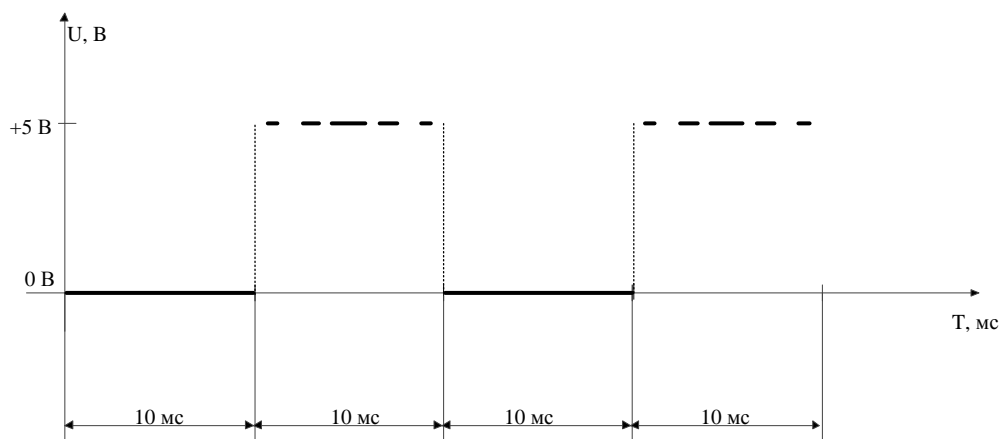


Рисунок 10 – График сигналов

Как и в предыдущей системе управления, изменяя положение потенциометра, мы смещаем рабочую зону по графику, как показано на рисунке 11.

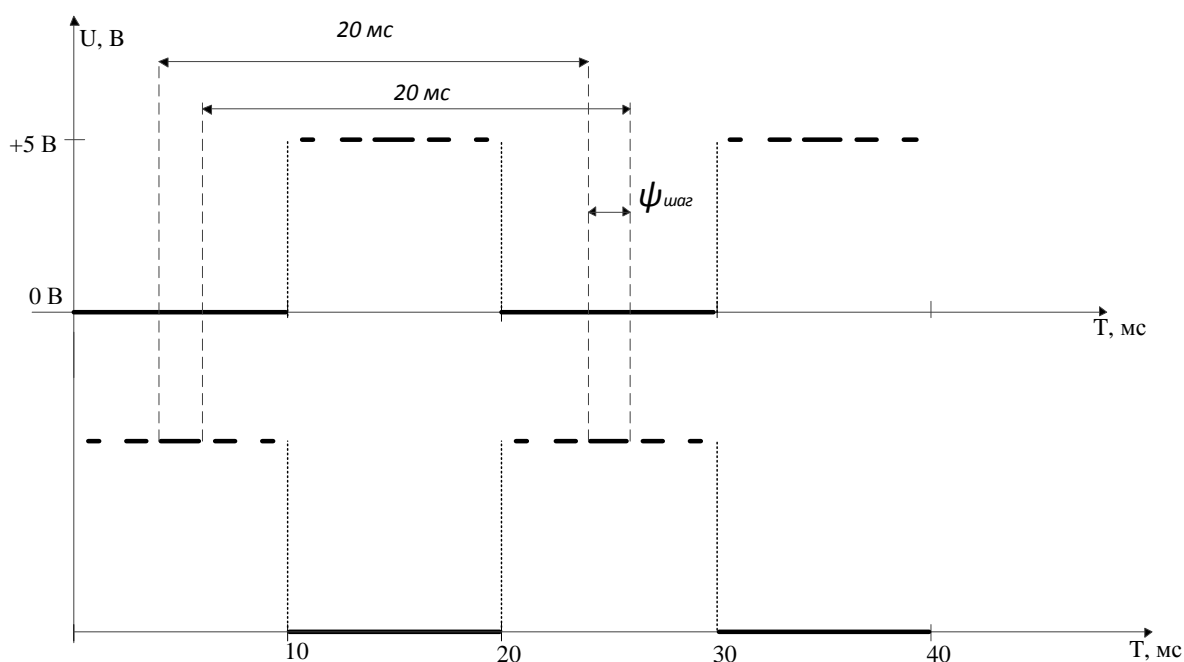


Рисунок 11 – График ШИМ сигнала на 2 плечах

В данном случае, шаг изменения угла управления будет значительно больше, около 40 эл. град. Так как из-за особенности алгоритма, нельзя сде-

лать больше ступеней регулирования, чем импульсов ШИМ за период напряжения. Это обусловлено тем, что мы не можем разделить один ШИМ импульс на несколько частей, а так как $n_{\text{имп}} = 10$, соответственно шаг управления будет:

$$\psi_{\text{шаг}} = \frac{360^\circ}{n_{\text{имп}}} = 36^\circ \quad (3)$$

В данном случае преобразователь показал значительную выдачу реактивной мощности, что говорит о работоспособности схемы даже в неполнофазном режиме.

Код на языке Arduino Wiring представлен в приложении В. Результаты эксперимента представлены в приложении Г.

2.2 Создание прототипа системы управления преобразователем напряжения для лабораторного компенсатора реактивной мощности

Схема собранной испытательной установки представлена на рисунке 12.

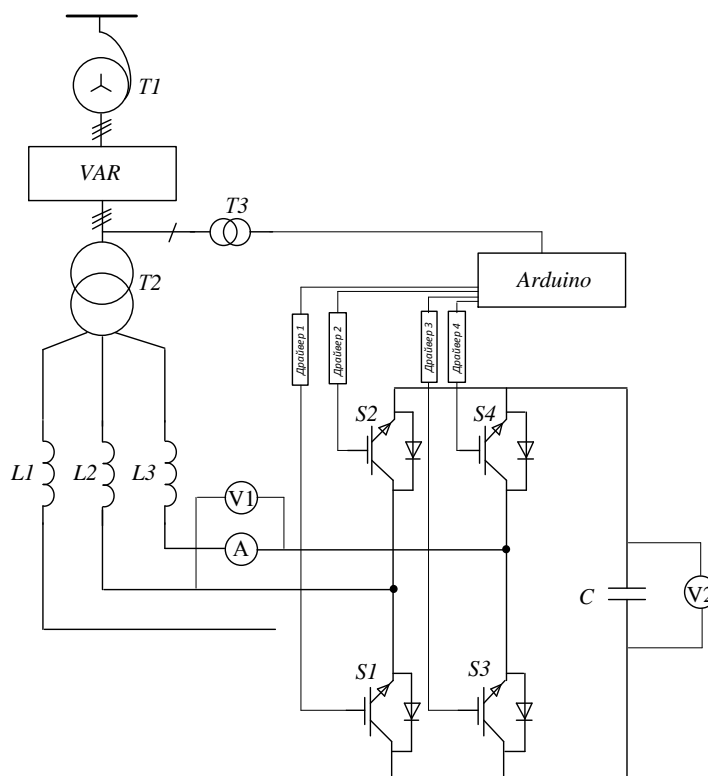


Рисунок 12 – Схема испытательной установки

Автотрансформатор Т1 понижает сетевое напряжение с 380 В до 220 В. Измерительный комплекс обозначенный на схеме как VAR, позволяет измерять ток, напряжение, активную, реактивную и полную мощность. Трансформатор Т2 имеет несколько отпаяк на вторичной обмотке, с значениями напряжения от 3 до 12 В, в данном случае мы используем отпайку 12В. Трансформатор Т3 предназначен для понижения сетевого напряжения до напряжения логики Arduino, а также для гальванической развязки силовых цепей и цепей управления. Индукторы L1, L2, L3 – выполняют роль фильтров высших гармоник. Вольтметр V1 измеряет напряжение на выводах преобразователя, V2 – напряжение конденсаторной батареи, амперметр А – ток преобразователя. Драйвера управления IGBT предназначены для усиления импульсов управления, для ускорения открытия транзисторов. Arduino производит расчет импульсов, их смещения и длительности, и выдает управляющие сигналы.

Так как сама испытательная установка уже полностью собрана, готова к работе и находится в лаборатории кафедры ЭССиСЭ ЮУрГУ, на универсальном стенде, задачей было только создание системы управления, что и отражено в теме работы. В качестве контроллера был выбран Arduino nano, из-за простоты среды разработки и огромного количества литературы и библиотек в открытом доступе. Схема цепей управления представлена на рисунке 13.

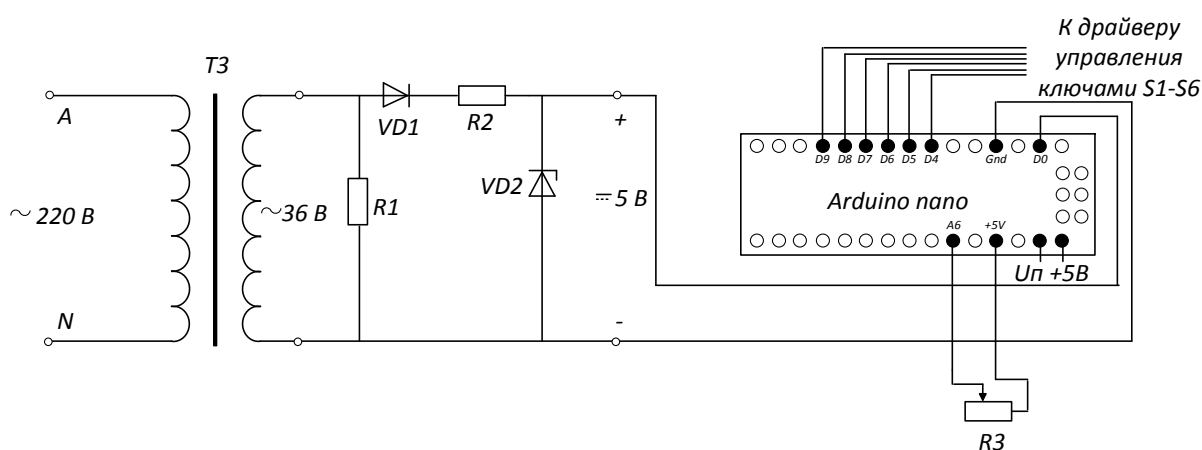


Рисунок 13 – Схема цепей управления

Для того чтобы определить момент включения, нам необходимо знать что происходит в силовой цепи. Однако мы не можем напрямую завести сило-

вые цепи в микроконтроллер, из за высокого напряжения и из соображений безопасности. Для гальванической развязки, а также для понижения напряжения в цепь включается трансформатор ТЗ.

Для определения момента включения нет необходимости видеть всю синусоиду сетевого напряжения. Так как частота сети величина практически постоянная, зная одну ключевую точку на синусоиде, мы фактически знаем, что будет на оставшейся части периода. Таких точек за период напряжения 4, рисунок 14.

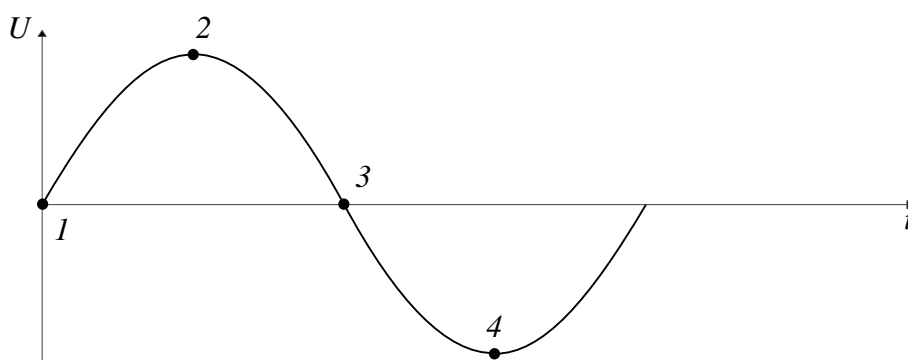


Рисунок 14 – Возможные триггеры прерывания

Каждую из этих точек можно использовать как триггер для прерывания, то есть как начало цикла управления длиной 1 период напряжения. В нашем случае используется точка 1, и вся система построена вокруг этого. Диод VD1 отсекает отрицательную полуволну напряжения (рис 15а). Стабилитрон VD2 ограничивает напряжение на выходе до + 5В (рис 15б).

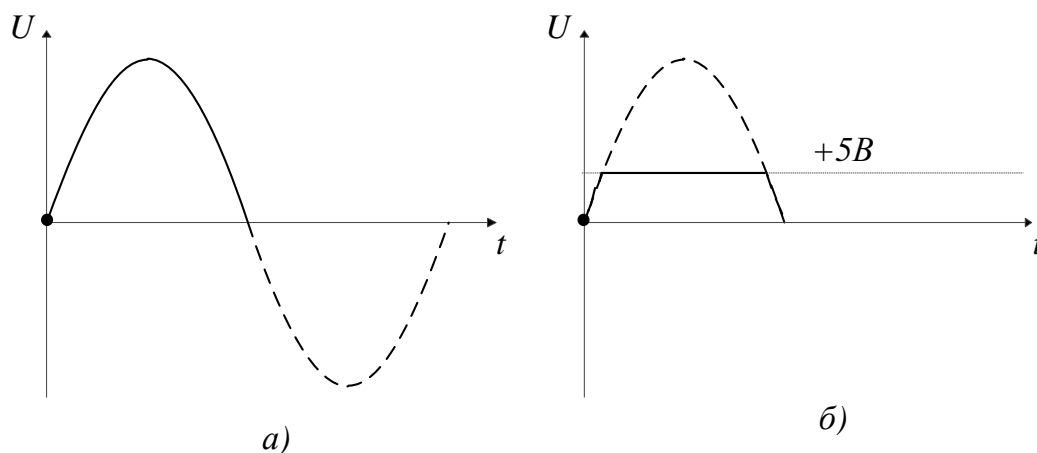


Рисунок 15 – Преобразования напряжения управляющей синусоиды

Резистор R1 имеет большое значение и предназначен для стекания заряда, резистор R2 ограничивает ток по цепям управления.

Таким образом, на вход микроконтроллера подается почти прямоугольный импульс, амплитудой +5В, что является логической единицей, и приходит этот сигнал в момент перехода управляющей синусоиды через ноль. Этот сигнал вызывает прерывание, которое запускает цикл расчета управляющего сигнала. Далее, происходит съём сигнала с подстроечного резистора R3, положение которого определяет смещение управляющего сигнала, после чего определяется номер элемента в массиве, с которого начнется отсчет.

Более подробно алгоритм описан в блок-схеме на рисунке 16.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		28

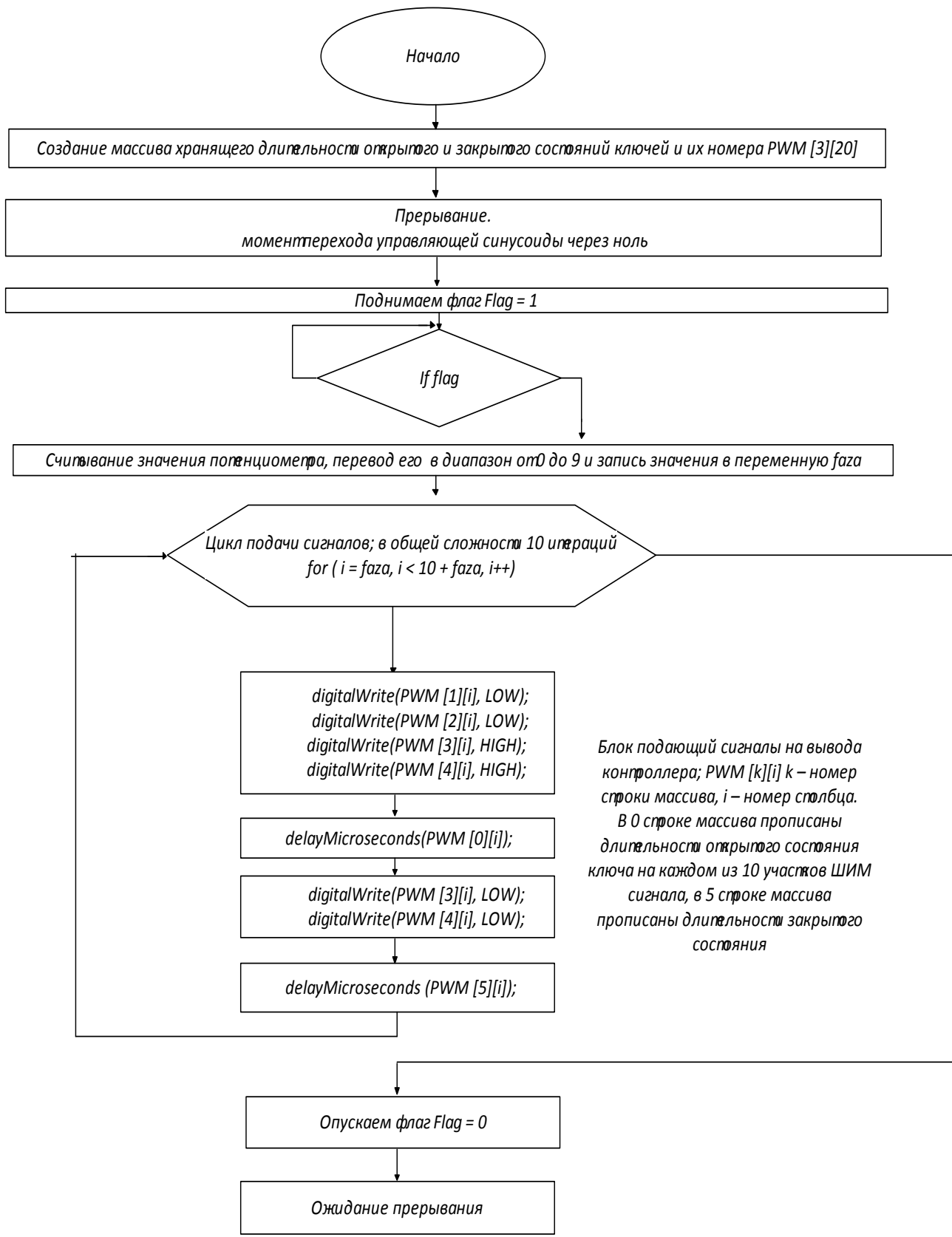
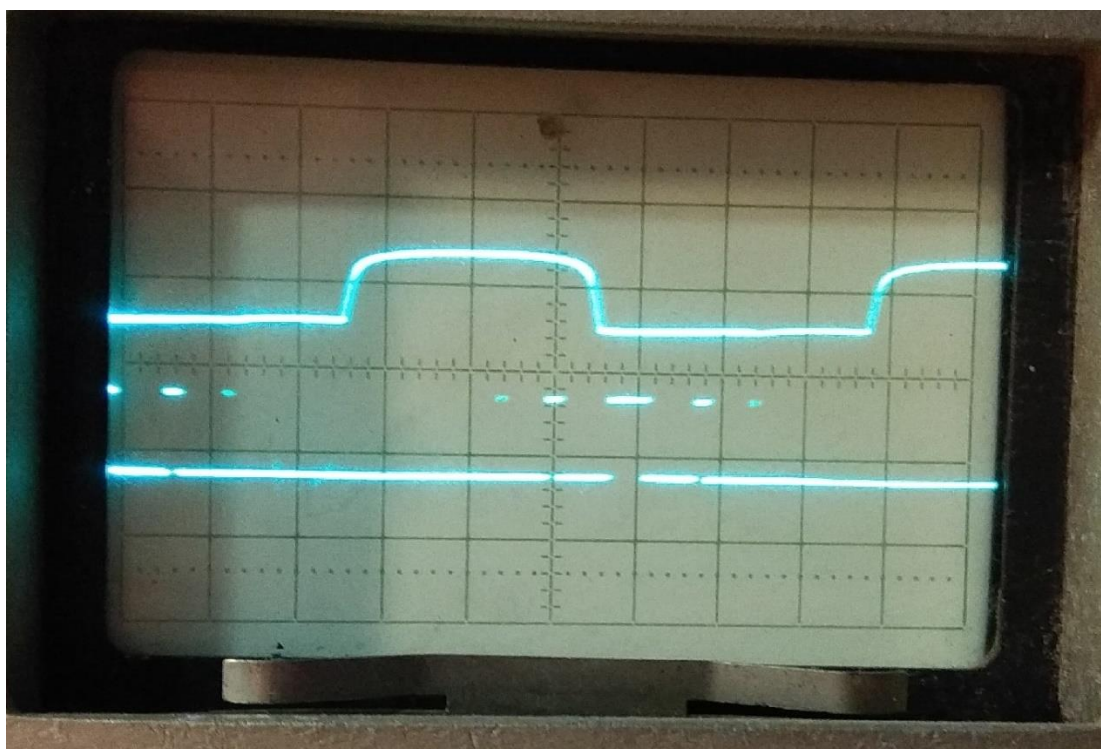
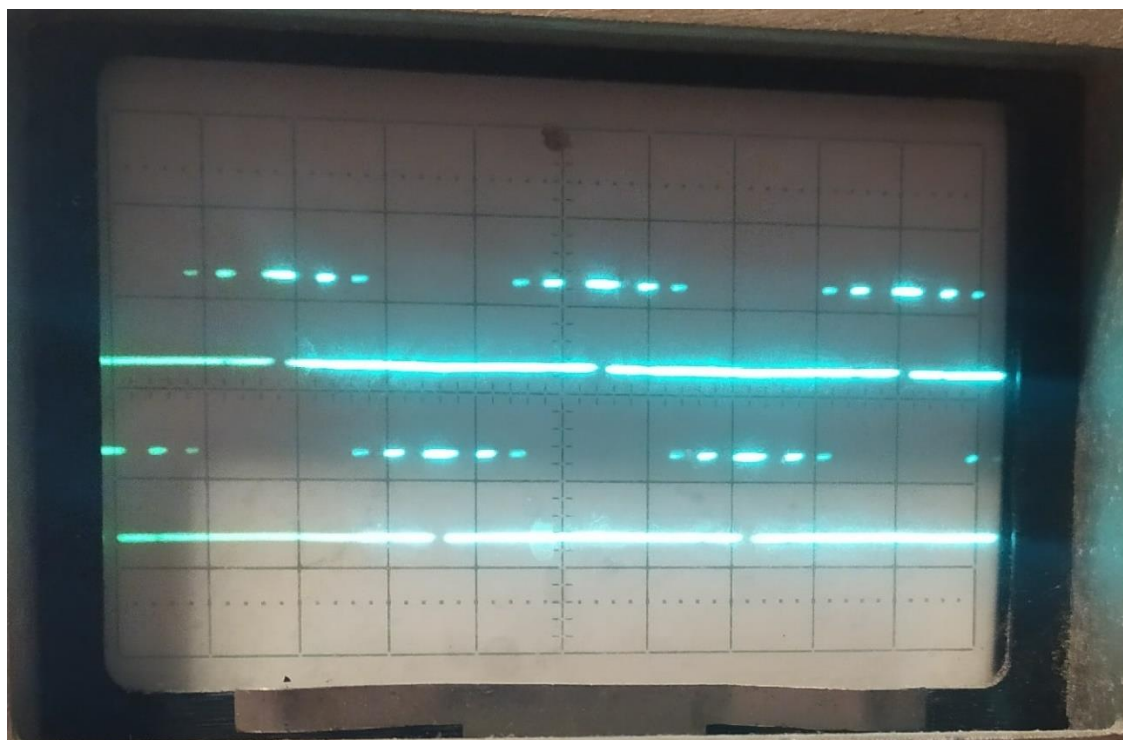


Рисунок 16. Блок схема алгоритма управления

На рисунке 17 приведены осциллограммы управляющего сигнала, полученные на опытной установке.



а)



б)

Рисунок 17 – Осциллограммы управляющего сигнала (а – триггер прерывания; б – два управляющих сигнала, смещенные на 180 эл. град.)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР

Лист

30

Верхний сигнал на рисунке 17а – это триггер прерывания, сигнал который идет с понижающего трансформатора ТЗ. Нижний это смещенный управляющий ШИМ сигнал. На рисунке 17б два управляющих сигнала смещенные на 180 эл. град., идущие на противоположные пары транзисторов.

Осциллограф имеет только два канала, так что все 4 управляющих импульса одновременно мы увидеть не можем, однако по этим двум осциллограммам уже вполне понятно, что триггер прерывания работает, так как в противном случае управляющий сигнал «уплывал» бы в одну из сторон, из-за нарушения синхронизации. Видно, что смещение сигнала работает и регулируется, иначе управляющий сигнал был бы в той же фазе что и триггер прерывания, или противоположен ему. Так же видно, что сигналы противоположных пар транзисторов находятся в противофазе, и пересечения сигналов (когда два транзистора в одном плече одновременно открыты) отсутствуют.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		31

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

3.1 Проверочная виртуальная модель в среде MATLAB/Simulink

Готовой модели для исследования необходимого нам режима работы преобразователя в MATLAB/Simulink не оказалось, по этому, была взята и доработана наиболее близкая по смыслу – power_bridges.slx. Она изображена на рисунке 18.

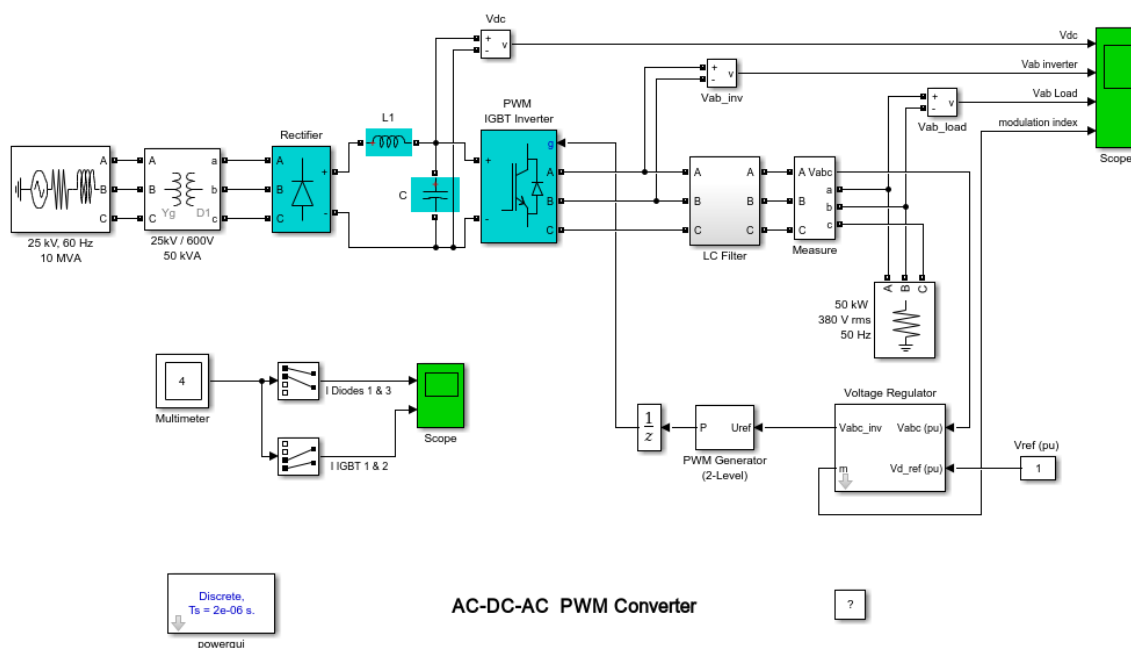


Рисунок 18 – Исходная модель преобразователя в среде MATLAB/Simulink

Исходная модель представляет собой модель вставки постоянного тока с неуправляемым выпрямителем rectifier, фильтром гармоник L1, стабилизирующим конденсатором C, и выпрямителем в виде преобразователя напряжения с синхронизированной системой управления. За преобразователем напряжения виден модуль фильтра LC Filter, измерительный модуль measurements и эквивалентная нагрузка. Система управления включает в себя регулятор напряжения voltage regulator и генератор ШИМ сигналов PWM generator. Для наших

хронная, так как система управляющих напряжений создается отдельным блоком, добавлена возможность смещения управляющего сигнала по фазе.

Рассмотрим составные элементы модели и их параметры.

1. Модуль системы питания

Модуль системы питания показан на рисунке 20 и имеет следующие настраиваемые параметры: режим нейтрали, линейное напряжение, угол фазового сдвига (несимметрия), частота, мощность, среднеквадратичное напряжение, отношение внутреннего реактивного и внутреннего активного сопротивления источника.

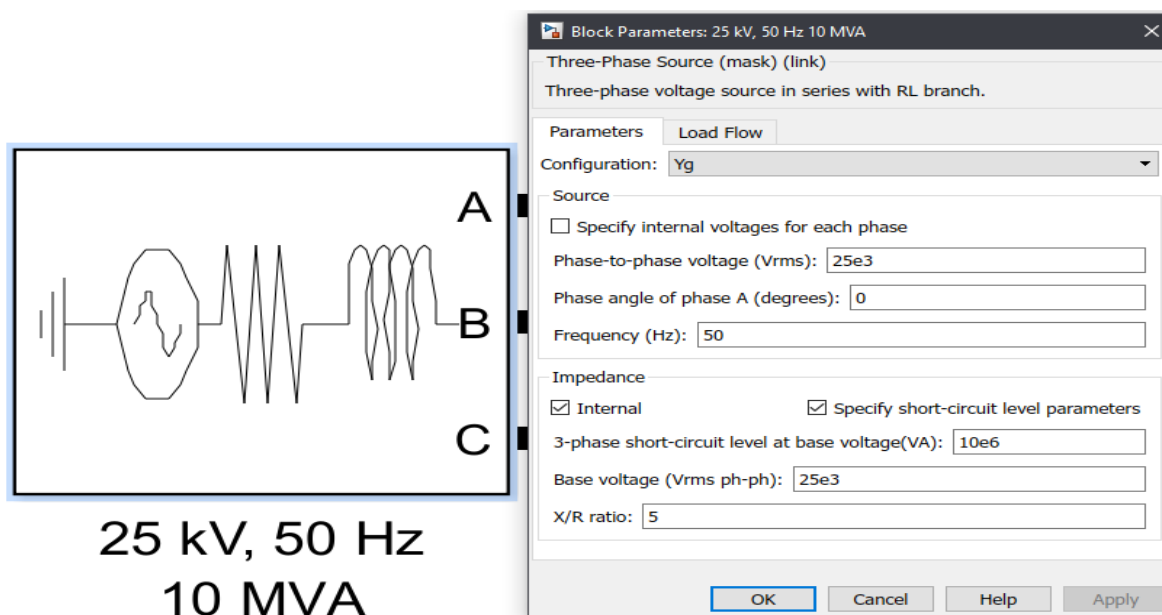


Рисунок 20 – Модуль системы питания

2. Модуль трансформатора

Модуль трансформатора выполняет роль реального трансформатора в схеме и имеет следующие настраиваемые параметры: группа соединения обмоток, режим нейтрали, номинальная частота и мощность, напряжения, активные и индуктивные сопротивления обмоток, потери холостого хода и короткого замыкания (рисунок 21).

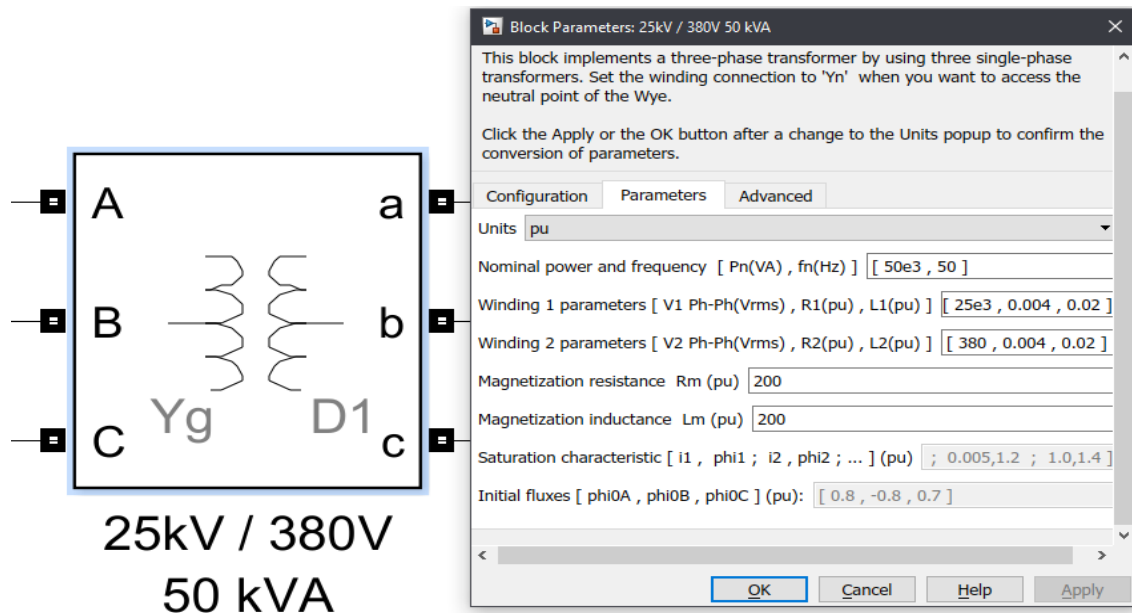


Рисунок 21 – Модуль трансформатора

3. Модуль LC-фильтра

Сглаживает пульсации тока и напряжения. Имеет настраиваемые параметры: индуктивность и емкость. Модуль показан на рисунке 22.

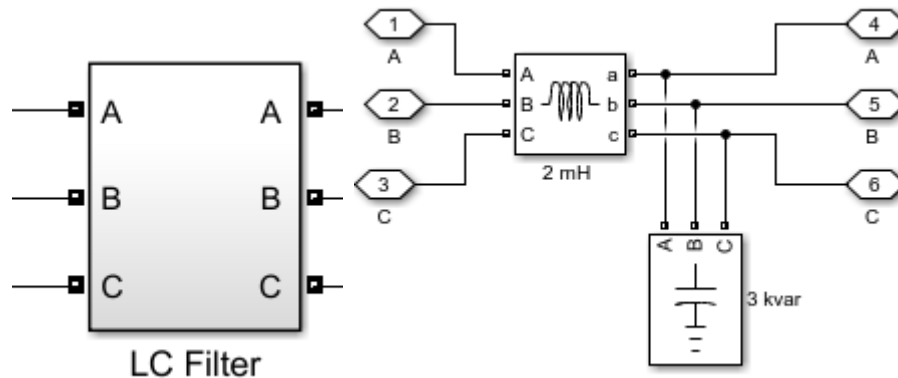


Рисунок 22 – LC-фильтр

4. Модуль нагрузки

Имеет настраиваемые параметры конфигурация (звезда-треугольник), номинальное напряжение, номинальная частота, активная и реактивная мощность. Модуль приведен на рисунке 23.

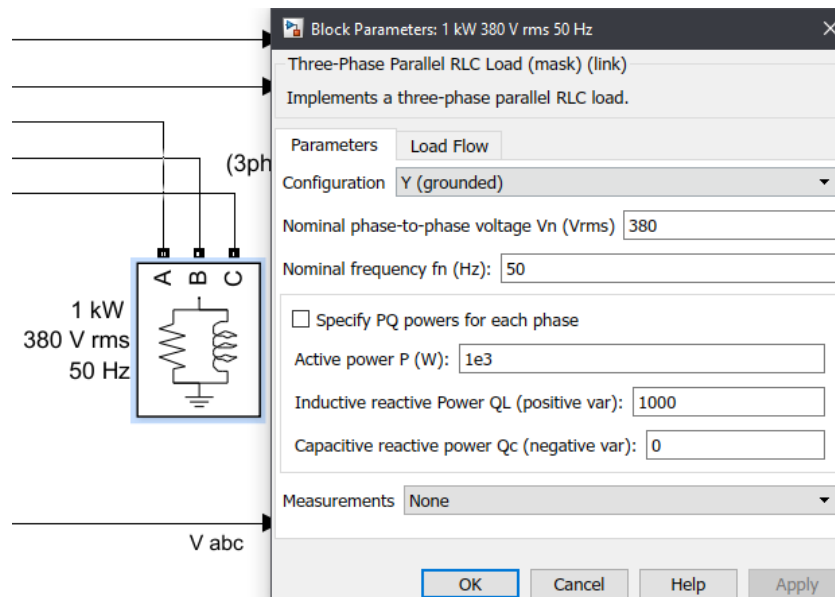


Рисунок 23 – Модуль нагрузки

5. Модуль IGBT

Имеет настраиваемые параметры: сопротивление в открытом состоянии, сопротивление снаббера, емкость снаббера (рисунок 24).

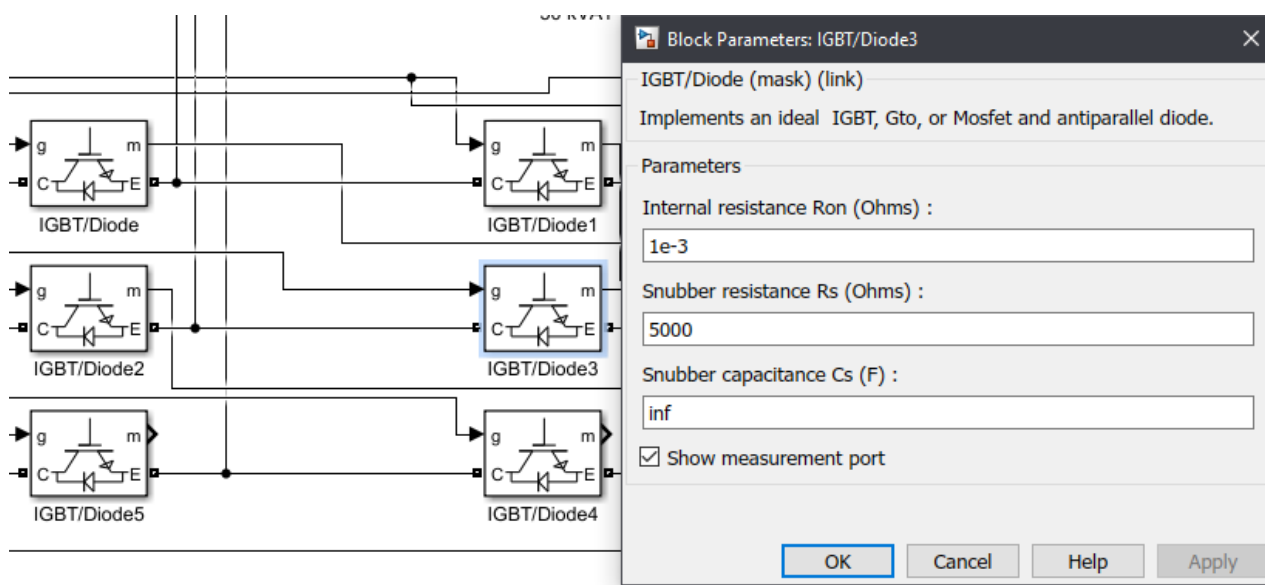


Рисунок 24 – Модуль IGBT

6. Генератор ШИМ-импульсов

Генератор ШИМ импульсов на вход получает трехфазную систему векторов, и, используя принцип наложения графиков, описанный в подразделе 1.2,

создает 6 управляющих сигналов (по два из каждой синусоиды, для ключей одного плеча сигналы в противофазе). Имеет следующие настраиваемые параметры. Частота ШИМ (частота пилообразной функции), начальная фаза, максимальное и минимальное значение (амплитуда пилообразной функции). От соотношения минимального и максимального значений, и амплитуды управляющей синусоиды зависит коэффициент заполнения (скважность) ШИМ сигнала. Параметры модуля приведены на рисунке 25.

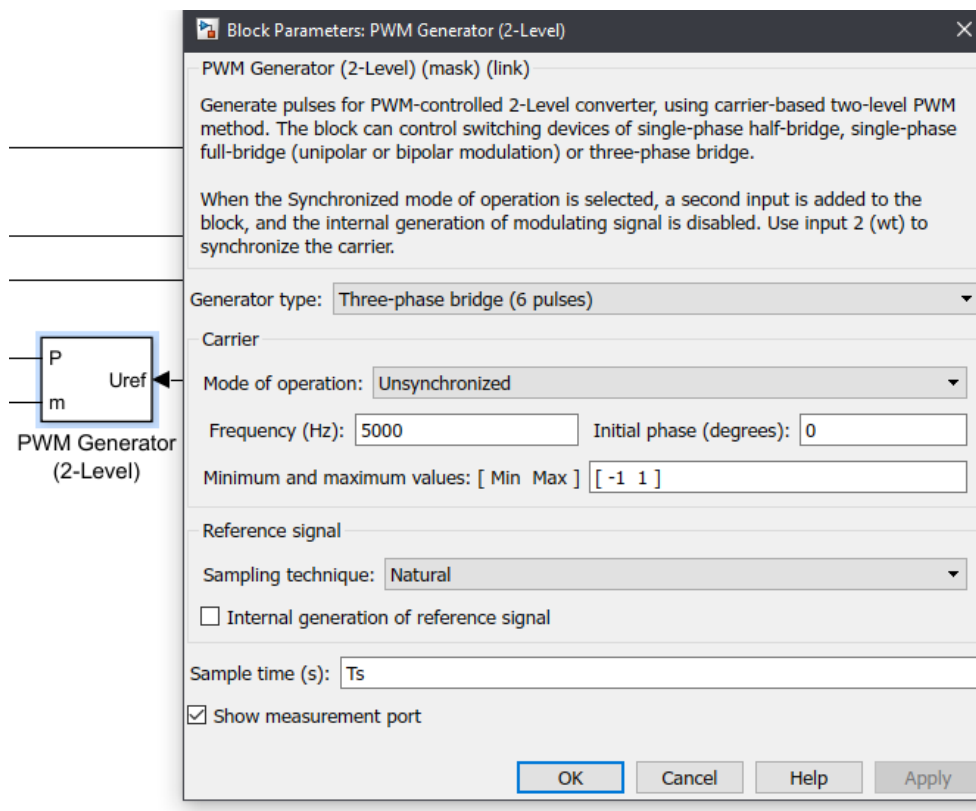


Рисунок 25 – Генератор ШИМ-импульсов

7. Генератор управляющей синусоиды.

Этот блок создает 3 управляющих синусоидальных сигнала, которые подаются в генератор ШИМ сигналов (рисунок 26). Имеет следующие настраиваемые параметры: амплитуда (важно соотношение амплитуды управляющей синусоиды и пилообразного сигнала в генераторе ШИМ), смещение (начальная фаза), частота, фазы смещение фаз 2 синусоид относительно опорной.

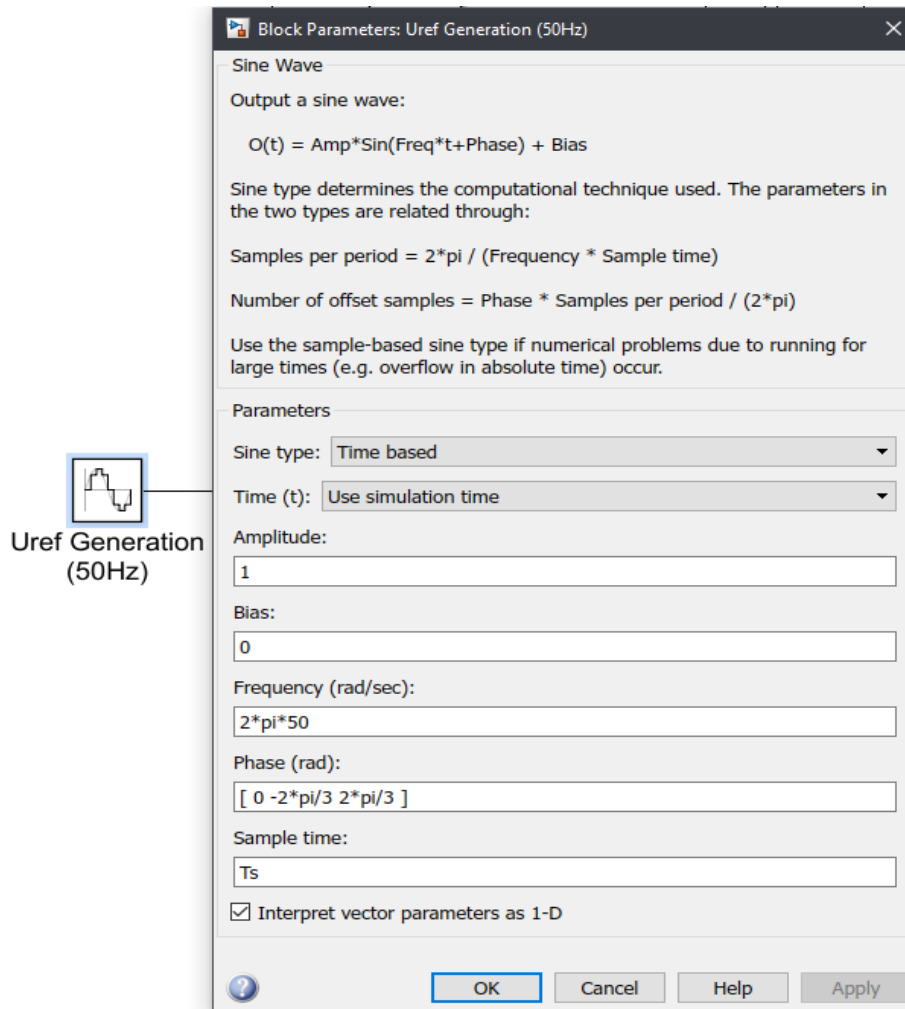


Рисунок 26 – Генератор синусоидального сигнала

8. Селектор

На вход данного блока приходит массив из 6 управляющих сигналов, блок выбирает, и пропускает через себя 1, номер которого указан в графе Index vector. Изображение блока показано на рисунке 27.

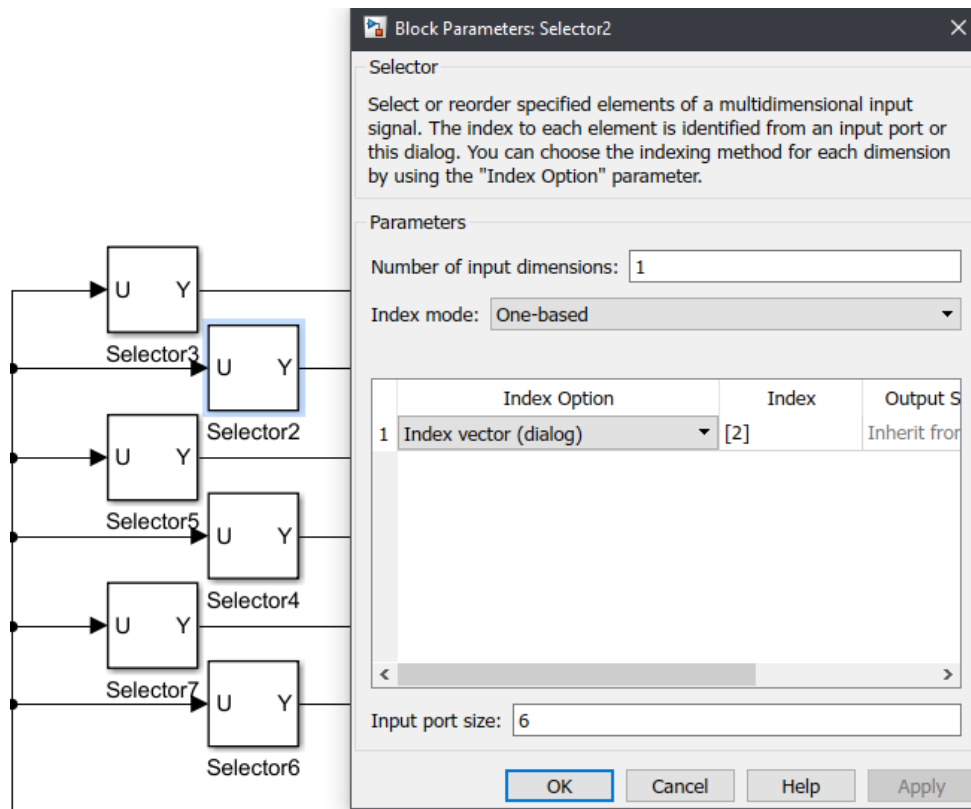


Рисунок 27 – Селектор

9. Константа

Математический блок, использующийся для введения в управляющие органы некоторых значений (рисунок 28). Это могут быть значение времени задержки, время (угол) смещения сигнала, множитель сигнала и т.д.

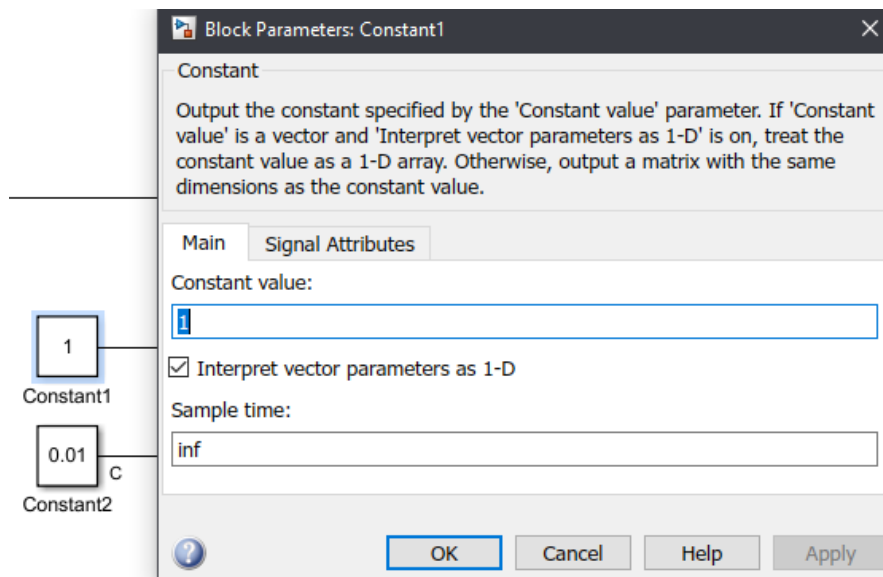


Рисунок 28 – Константа

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР

Лист

39

10. Измеритель напряжения

Измерительный блок, показанный на рисунке 29. Выполняет измерение мгновенного значения напряжения. Может использоваться как для постоянного, так и переменного напряжения.

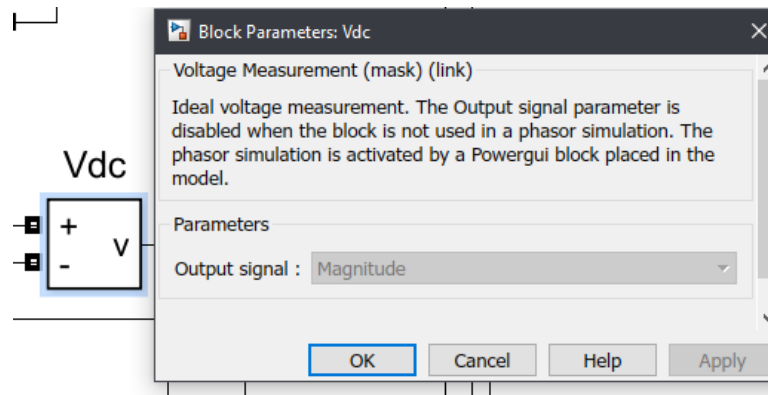


Рисунок 29 – Измеритель напряжения

11. Измеритель тока

Измерительный блок, показанный на рисунке 30. Выполняет измерение мгновенного значения тока проходящего через него. Может использоваться как для переменного, так и для постоянного тока.

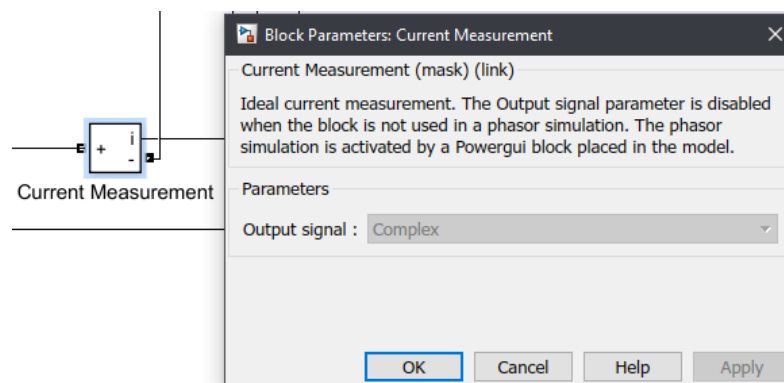


Рисунок 30 – Измеритель тока

12. Трехфазный блок измерений

Включается в трехфазную цепь последовательно, и выполняет измерения токов и напряжений фаз. На выходе получают два массива значений, массив токов и массив напряжений. Показан на рисунке 31.

мощности СТАТКОМ, реактор для фильтрации высших гармоник L, связующий трансформатор T2, фильтр высших гармоник Ф и эквивалентная нагрузка. Параметры схемы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры собранной схемы

Элемент схемы	Параметр	Значение
Энергосистема С	Линейное напряжение $U_{л}$, кВ	25
	Частота f , Гц	50
	Мощность S , МВА	10
Трансформатор Т1	Номинальная мощность S , кВА	50
	Частота f , Гц	50
	Напряжение первичной обмотки V_1 , кВ	25
	Напряжение вторичной обмотки V_2 , кВ	0,38
	Сопrotивление первичной обмотки R_1, L_1 , Ом	0,004; 0,02
	Сопrotивление вторичной обмотки R_2, L_2 , Ом	0,004; 0,02
Трансформатор Т2	Номинальная мощность S , ВА	500
	Частота f , Гц	50
	Напряжение первичной обмотки V_1 , В	12
	Напряжение вторичной обмотки V_2 , В	380
	Сопrotивление первичной обмотки R_1, L_1 , Ом	1,0; 0,02
	Сопrotивление вторичной обмотки R_2, L_2 , Ом	0,4; 0,02
Реактор L,	Индуктивность L , Гн	0,001
Фильтр гармоник	Индуктивность L , Гн	0,002
	Емкость C , мкФ	60
Эквивалентная нагрузка	Активная мощность P , Вт	1000
	Реактивная мощность Q , Вар	1000
Конденсатор в звене постоянного тока ПН	Емкость C , мкФ	1000

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР

Лист

44

3.2 Экспериментальные исследования на моделях

Условные обозначения используемые в таблицах экспериментальных значений: ψ – угол смещения управляющего сигнала, $P_{пр}$ – активная мощность преобразователя, $Q_{пр}$ – реактивная мощность преобразователя, $P_{н}$ – потребляемая активная мощность нагрузки, $Q_{н}$ – потребляемая реактивная мощность нагрузки, $U_{н}$ фазное напряжение на нагрузке U_{dc} – напряжение в звене постоянного тока, I_{dc} – ток в звене постоянного тока. Эксперимент на виртуальной модели и в первом и во втором случаях проводился при настройках системы управления, приведенной в таблице 3.

Таблица 3 – Настройки системы управления виртуальной модели

Коэффициент заполнения ШИМ	1
Частота ШИМ $f_{ШИМ}$, Гц	500

Далее в параграфе рассмотрены результаты экспериментов на виртуальной модели и лабораторном образце. На виртуальной модели проведено два эксперимента в полнофазном и неполнофазном режимах. Лабораторный образец изначально изготовлен для использования в неполнофазном режиме. Далее проведено сравнение результатов виртуальной модели и лабораторного образца.

3.2.1 Исследование работы преобразователя в полнофазном режиме на виртуальной модели

Полученные в ходе эксперимента данные сведены в таблицу 4. По полученным данным построены зависимости на рисунках 36–38.

Таблица 4 – Данные эксперимента на виртуальной модели

Ψ , эл.град	$P_{пр}$, Вт	$Q_{пр}$, Вар	$U_{пр}$, В	$P_{н}$, Вт	$Q_{н}$, Вар	U_{dc} , В	I_{dc} , А
0	-1,66	-151,3	5,9	1020	1020	9,11	4,5
18	-1,66	-71,5	6,73	1020	1020	15,93	1,86
36	-1,87	37,55	6,9	1021	1021	21,19	0,95
54	-3,78	134,1	6,4	1021	1021	24,37	3,67
72	-5,83	181,5	5,27	1021	1021	25,17	6,03
90	-6,87	161,4	3,63	1021	1021	23,5	7,81
108	-6,41	81,7	1,62	1021	1021	14,54	8,81
126	-4,59	-27,8	0,55	1020	1020	13,66	9,96
144	-2,12	-124,1	2,65	1020	1020	6,44	8,23
162	-0,58	-167	4,15	1020	1020	0,27	6,55
180	-0,45	-167,6	4,18	1020	1020	0,09	3,88
198	-0,38	-167,8	4,19	1020	1020	0,02	1,75
216	-0,35	-167,8	4,19	1020	1020	0,01	0,9
234	-0,33	-167,9	4,19	1020	1020	0,01	0,9
252	-0,33	-167,9	4,19	1020	1020	0,01	1,03
270	-0,33	-167,9	4,19	1020	1020	0,01	0,973
288	-0,35	-167,9	4,19	1020	1020	0,01	1,00
306	-0,39	-167,9	4,19	1020	1020	0,03	2,38
324	-0,48	-168,0	4,21	1020	1020	0,13	4,715
342	-0,65	-171,3	4,49	1020	1020	1,415	6,691
360	-1,65	-151,0	5,90	1020	1020	9,11	4,498

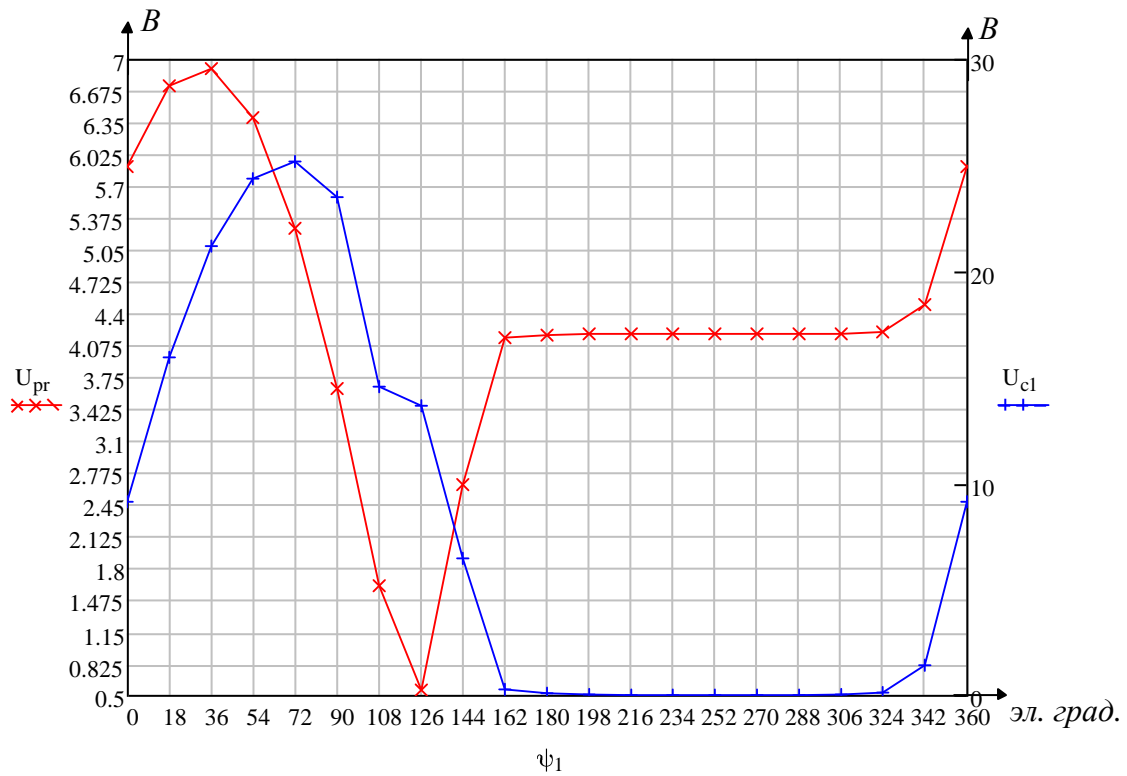


Рисунок 36 – Зависимость напряжения преобразователя и напряжения конденсатора от угла управления

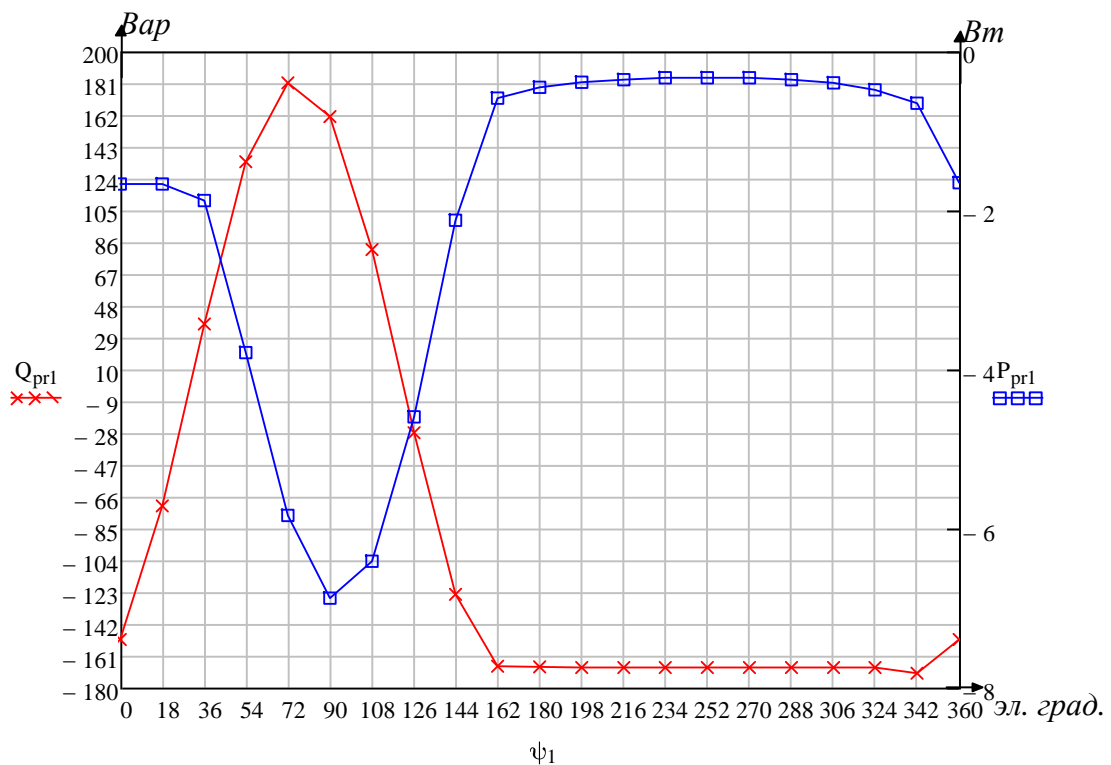


Рисунок 37 – Зависимость активной и реактивной мощности преобразователя от угла управления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР

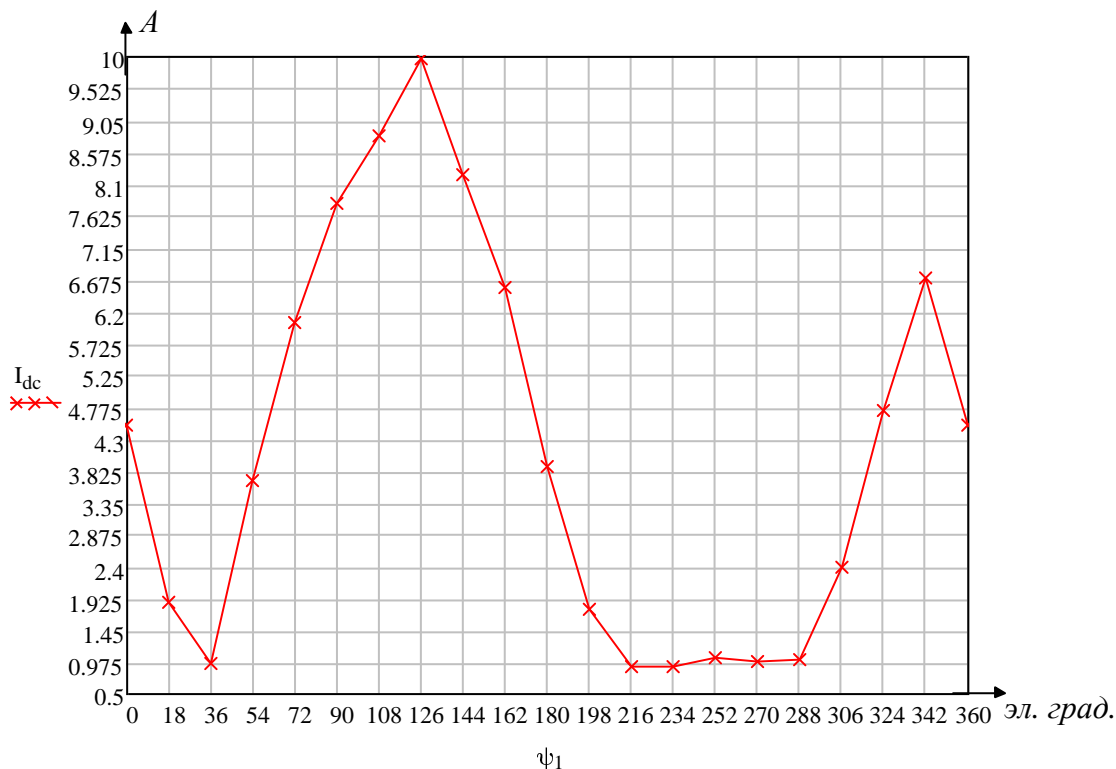


Рисунок 38 – Зависимость тока в звене постоянного тока от угла управления

Из данных полученных на экспериментальной модели хорошо видны 2 режима работы преобразователя напряжения, режим выдачи и режим потребления реактивной мощности. Это режимы видны на рисунках 36 и 37, в диапазоне углов управления от 342 (-18) до 162 эл. градусов. Прямой участок от 162 до 342 градусов обусловлен тем, что в звене постоянного тока у преобразователя нет источника энергии. Так как I и II квадранты графика мощности подразумевают выдачу активной мощности, а в нашем случае преобразователю неоткуда взять эту мощность, на этом участке диапазона управления преобразователь не оказывает влияния на сеть. Как видно из рисунка 38, на участке от 162 до 342 градусов наблюдается снижение тока в звене постоянного тока практически до нуля.

3.2.2 Исследование работы преобразователя в неполнофазном режиме на виртуальной модели и на натурном стенде

В таблице 5 приведены результаты экспериментов, полученные на виртуальной модели. По этим данным построены зависимости на рисунках 39–41.

Таблица 5 – Экспериментальные данные виртуальной модели в неполнофазном режиме

Ψ , Эл. град.	U_{AB} , В	I, А	$Q_{пр}$, Вар	$P_{пр}$, Вт	U_c , В	$Q_{нагр}$, Вар	U_A , В	U_B , В
0	11,99	0,15	-1,52	-1,93	16,37	1021	6,92	6,92
18	11,99	0,24	2,92	-2,92	16,14	1021	6,94	6,90
36	11,94	1,69	26,54	-11,66	14,93	1021	7,18	6,61
54	11,34	5,25	73,23	-40,55	16,21	1021	7,60,	5,51
72	9,98	8,44	105,5	-62,42	17,5	1021	7,51	4,16
90	8,39	10,22	122,2	-65,37	18,62	1021	7,09	2,98
108	6,21	11,59	131,0	-55,4	18,83	1021	6,28	1,95
126	3,66	12,25	102,4	-34,8	17,79	1021	5,11	2,13
144	1,51	12,04	-10,9	-20,15	15,53	1021	3,72	3,57
162	2,71	11,08	-98,3	-35,03	12,26	1021	2,38	4,68
180	4,92	9,47	-136,5	-51,06	8,43	1021	1,72	5,75
198	6,507	7,70	-134,1	-57,91	4,73	1021	2,02	6,4
216	7,27	6,54	-131	-58,88	2,24	1021	2,38	6,68
234	7,52	6,98	-130,5	-59,08	2,99	1021	2,52	6,77
252	8,087	7,91	-131	-62,42	6,74	1021	2,92	6,93
270	9,11	8,01	-127,4	-69,11	10,98	1021	3,74	7,17
288	10,22	7,12	-105,7	-70,7	14,26	1021	4,79	7,29
306	11,21	4,99	-63,15	-57,05	15,3	1021	5,85	7,27
324	11,85	2,02	-22,13	-26,4	15,26	1021	6,59	7,11
342	11,98	0,29	-2,80	-3,96	16,11	1021	6,89	6,94
360	11,99	0,15	-1,52	-1,93	16,37	1021	6,92	6,92

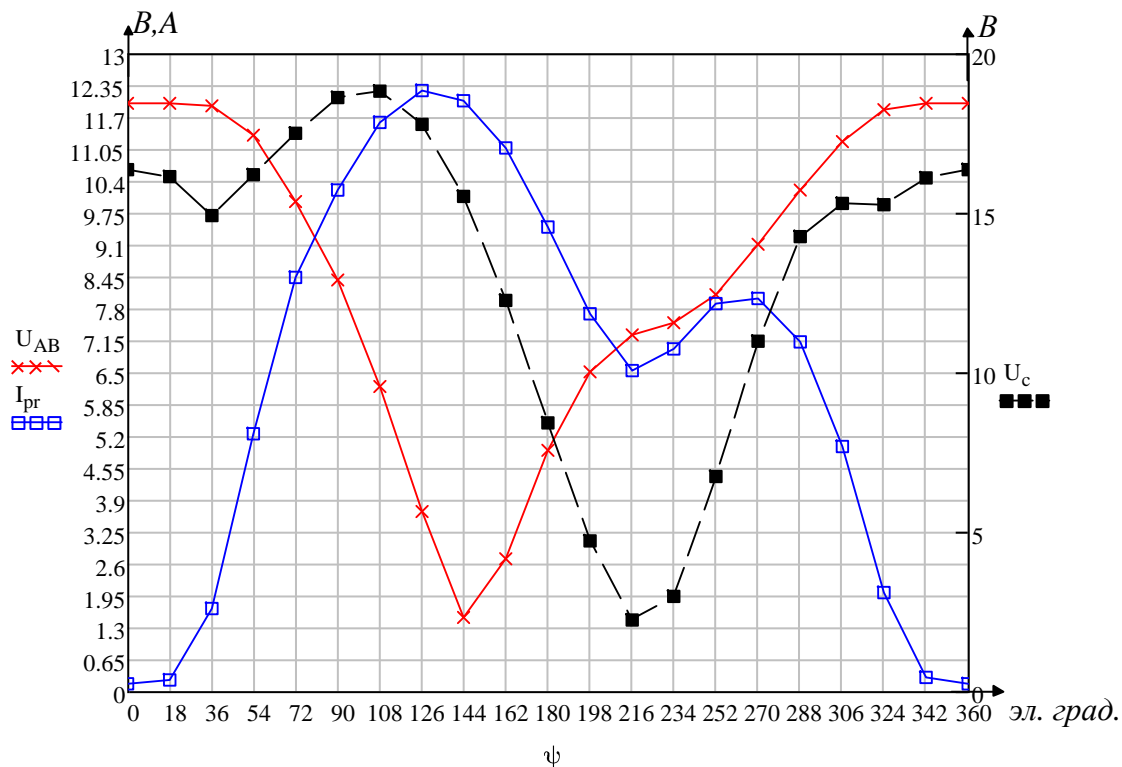


Рисунок 39 – Зависимость межфазного напряжения, напряжения и тока в звене постоянного тока от угла управления в виртуальной модели

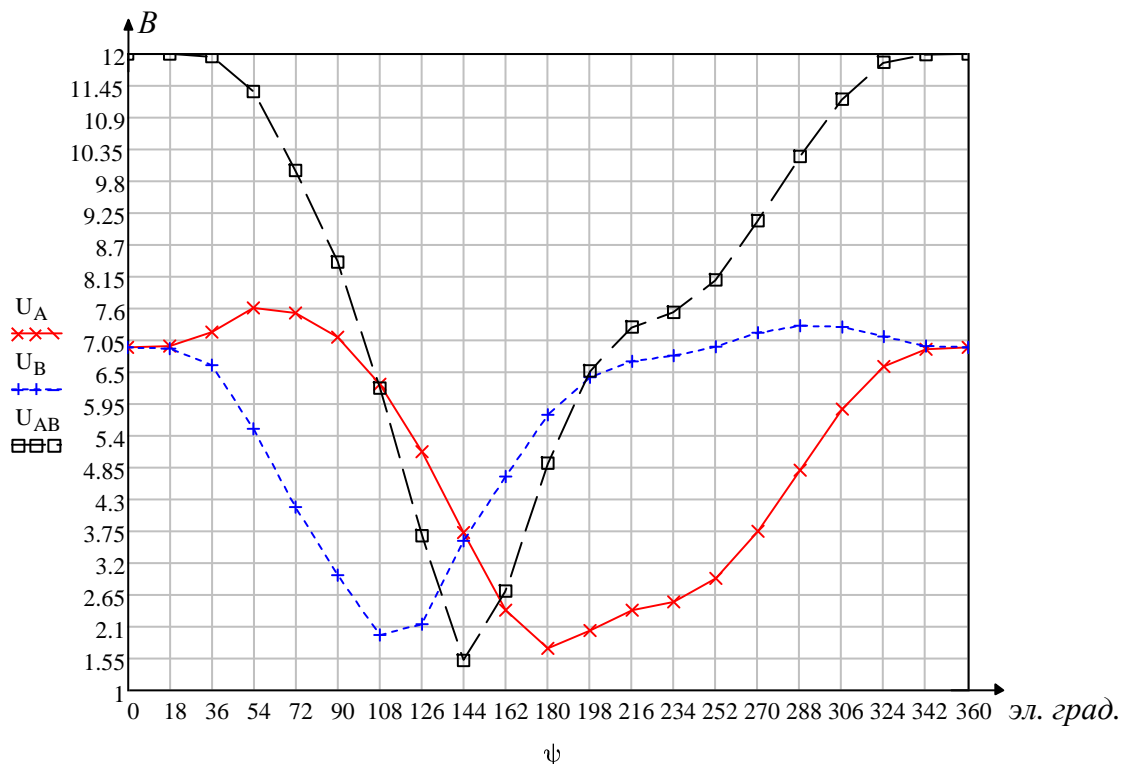


Рисунок 40 – Зависимость фазных напряжений от угла управления в виртуальной модели

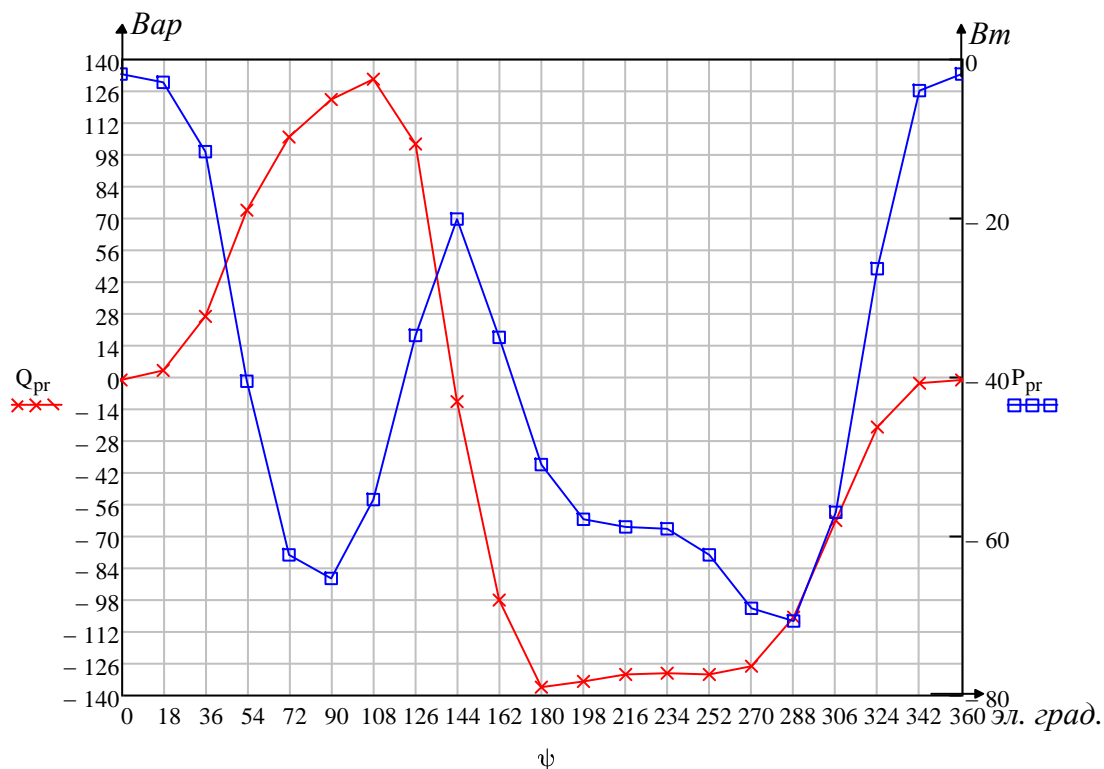


Рисунок 41 – Зависимость активной и реактивной мощности от угла управления в виртуальной модели

Неполнофазный режим работы преобразователя не является нормальным, так как образуется значительная несимметрия в трехфазной системе. Яркий пример несимметрии показан на рисунке 40. Практически на всем диапазоне регулирования имеется большое различие напряжений фазы А и фазы В. Поэтому данный режим рассматривается исключительно с точки зрения проверки правильности выбранного пути разработки лабораторного компенсатора реактивной мощности, так как возможность испытать трехфазный прототип на стенде в данный момент отсутствует. Также у лабораторного стенда и виртуальной модели имеются значительные расхождения в параметрах, из-за чего ориентироваться на абсолютные значения величин нет смысла. По этому главным критерием работоспособности системы является наличие двух режимов работы – режима выдачи и режима потребления реактивной мощности. На рисунке 41, в диапазоне углов управления от 0 до 180 градусов, хорошо видна регулировка реактивной мощности, сначала в сторону выдачи, потом в сторо-

ну потребления, что можно считать успешным регулированием реактивной мощности.

Далее были выполнены эксперименты на натурном стенде. Результаты этих экспериментов сведены в таблицу 6. Графические зависимости показаны на рисунках 42–44.

Таблица 6 – Экспериментальные данные с лабораторного преобразователя напряжения в неполнофазном режиме

ψ	U_{AB}	I	U_c	Q_A	Q_B	S_{Σ}
0	11,8	0,0	15,5	186	116	480
36	12,22	0,1	15,5	187	117	483
72	12,69	0,2	14,5	189	120	487
108	13,85	1,2	14	191	126	496
144	15,76	2,3	17	193	133	505
180	26,3	5,1	39	184	147	508
216	28,47	4,9	43,5	156	116	448
252	18,74	1,8	22,5	172	110	460
288	18,60	1,7	22	175	111	465
324	13,87	0,4	15,5	184	115	477
360	11,8	0,0	15,5	186	116	480

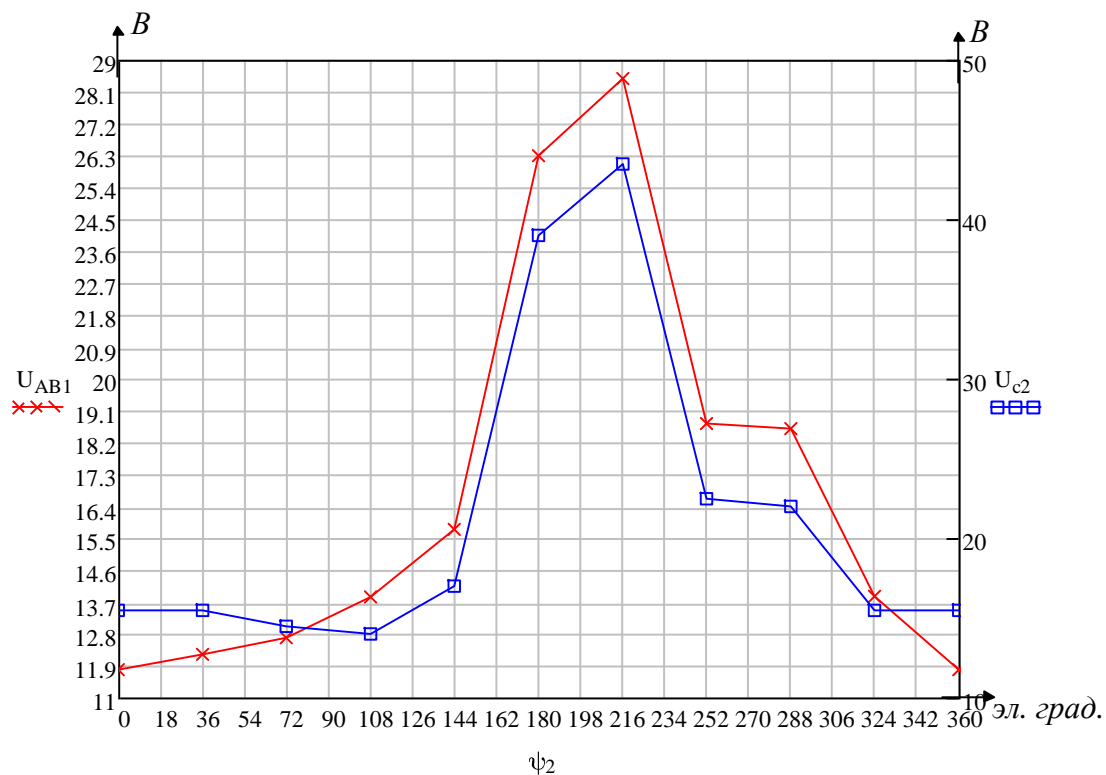


Рисунок 42 – Зависимость межфазного напряжения и напряжения в звене постоянного тока от угла управления в лабораторном прототипе

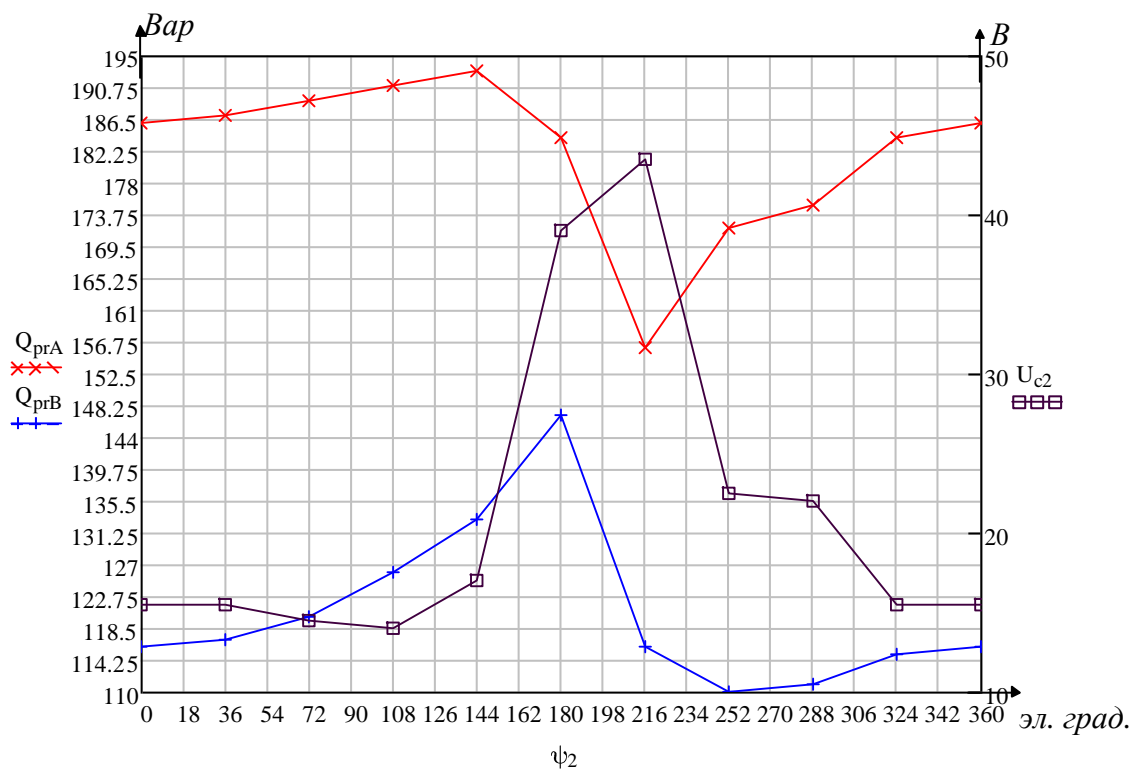


Рисунок 43 – Зависимость реактивных мощностей фаз и напряжения в звене постоянного тока от угла управления в лабораторном прототипе

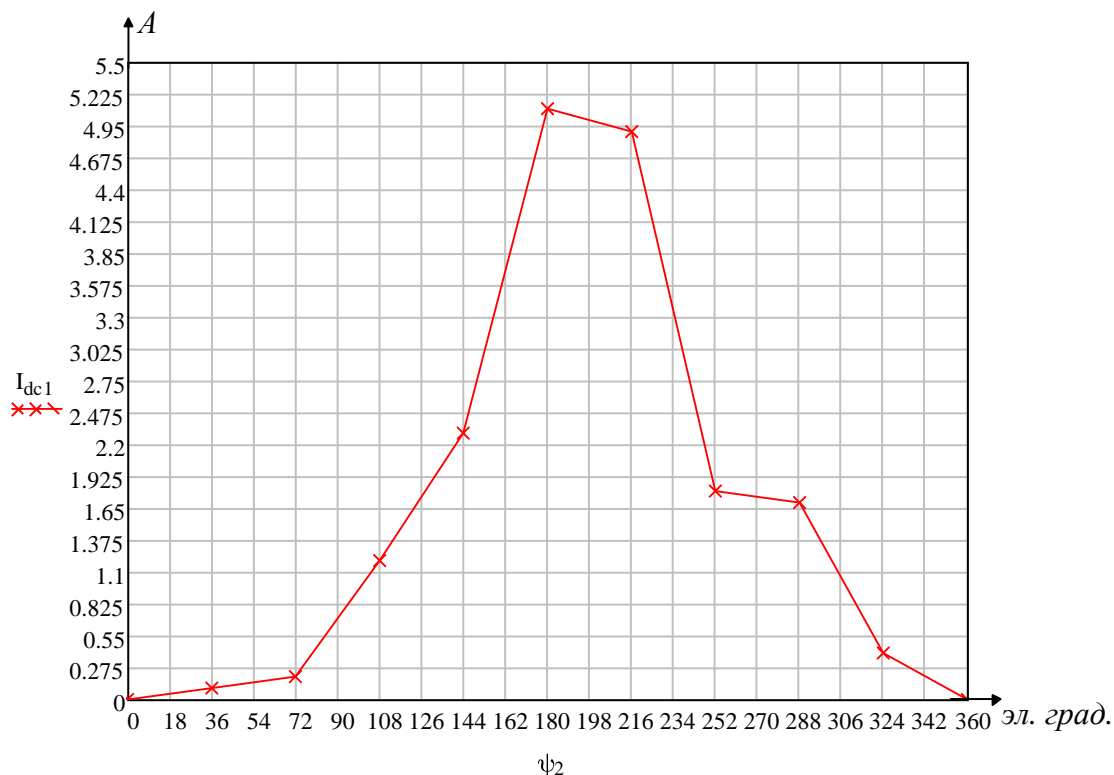


Рисунок 44 – Зависимость тока в звене постоянного тока от угла управления в лабораторном прототипе

Как уже было сказано выше, неполнофазный режим работы преобразователя не является нормальным, по этому, стоит ориентироваться только на возможность работы преобразователя в таких условиях. Косвенным признаком выдачи реактивной мощности является повышение напряжения на выводах преобразователя. На рисунке 42, в диапазоне углов от 144 до 252 градусов наблюдается значительное повышение напряжение на выводах преобразователя, что говорит от выдаваемой реактивной мощности. Так же стоит отметить, что система управления лабораторным прототипом в данной версии не синхронизирована напряжением по фазе, по этому, истинная точка отсчета, в которой управляющий сигнал совпадает по фазе с напряжением сети, находится не в нуле, показанном в таблице, и на рисунках.

В целом, регулирование реактивной мощности лабораторным прототипом осуществляется, даже в неполнофазном режиме, что говорит о том, что схема работает в том виде, в котором она собрана на универсальном стенде лаборатории кафедры ЭССиСЭ ЮУрГУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной выпускной квалификационной работы была разработана система управления лабораторным преобразователем напряжения, предложены алгоритмы управления ключами и выполнена их программная реализация на виртуальной модели в среде MATLAB/Simulink, а затем и в микроконтроллере управления на натурном стенде.

С помощью виртуальной модели проведена проверка алгоритмов системы управления, которая продемонстрировала их правильность. Дальнейшая реализация алгоритмов уже в железе и результаты натурных испытаний показали работоспособность преобразователя напряжения в полнофазном и неполнофазном режимах работы в качестве компенсатора реактивной мощности, и подтвердили его способность выполнять необходимые функции на уровне напряжения, используемом в лаборатории кафедры ЭССиСЭ ЮУрГУ.

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		55

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Системы электроэнергетики с элементами силовой электроники. Элементы силовой электроники для управления режимами электроэнергетических систем. Часть 1. Преобразователи тока: учебное пособие / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин, под ред. М.Е. Гольдштейна. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 117 с.
2. Analysis and assessment of STATCOM-based damping stabilizers for power system stability enhancement M.A. Abido / Electric Power Systems Research 73 (2005) 177–185 с.
3. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillations Nadarajah Mithulananthan, Member, IEEE, Claudio A. Canizares, Senior Member, IEEE, John Reeve, Fellow, IEEE, and Graham J. Rogers, Fellow, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 18, NO. 2, MAY 2003
4. Analysis of an ac-to-dc Voltage Source Converter Using PWM with Phase and Amplitude Control, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 21, NO. 2, March/April 1991.
5. Control system for a PWM-based STATCOM P. Garcia-Gonzalez and A. Garcia-Cerrada (Member IEEE) E.T.S. de Ingenieria (ICAI) Universidad Pontificia Comillas de Madrid c/ Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid, Spain

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		56


```
digitalWrite(6, HIGH);
delayMicroseconds(faza2);
}
if (faza3 > 0){
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(8, HIGH);
delayMicroseconds(faza3);
}
if (faza4 > 0){
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(6, HIGH);
delayMicroseconds( faza4);
} }
```

					П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты эксперимента с преобразователем напряжения первой версии

α_0	I_ϕ	U_C	P_Σ	Q_Σ	S_Σ	U_{AB}
-180,0	8,1	1,0	95	441	467	2,0
-158,4	8,1	1,0	94	444	468	2,0
-144,0	8,1	1,0	93	445	470	2,0
-129,6	8,1	1,0	93	444	468	2,0
-115,2	8,0	1,0	93	441	465	2,0
-100,8	8,0	1,0	93	442	465	2,0
-86,4	8,0	1,0	93	446	469	2,0
-72,0	7,9	1,0	94	443	467	2,0
-57,6	7,8	1,0	93	442	465	2,0
-43,2	7,0	2,0	92	433	457	2,5
-28,8	4,8	5,0	72	414	436	4,5
-14,4	2,0	9,0	53	387	411	9,5
0	0,8	12,0	48	364	390	12,5
14,4	1,3	13,5	51	350	376	14,0
28,8	2,3	14,0	61	341	367	14,0
43,2	3,7	15,0	76	335	362	14,0
57,6	5,5	15,5	97	334	365	14,0
72,0	7,0	15,0	117	340	377	13,5
86,4	8,1	14,0	133	356	395	12,5
100,8	8,5	11,5	137	372	410	11,0
115,2	9,0	9,0	136	394	431	9,5
129,6	9,3	7,0	131	412	445	7,5
144,0	9,4	5,0	121	427	456	5,5
158,4	9,2	3,0	107	438	463	3,0
180	8,8	1,0	96	440	464	2,5

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР

Лист

59

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Код программы v2 на языке Arduino Wiring

```
int8_t i;
volatile boolean flag; // переменная запускающая цикл из после прерывания
int faza; // переменная хранящая данные с подстроечного резистора
boolean flag2; // переменная для индикации завершения цикла
int16_t PWM [6][20] = {
  {32, 408, 1364, 408, 32, 32, 408, 1364, 408, 32, 32, 408, 1364, 408, 32, 32, 408, 1364, 408, 32},
  {6, 6, 6, 6, 6, 3, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 6, 6, 3, 3, 3, 3, 3},
  {4, 4, 4, 4, 4, 8, 8, 8, 8, 8, 4, 4, 4, 4, 4, 8, 8, 8, 8, 8},
  {3, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 6, 6, 3, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 6, 6},
  {8, 8, 8, 8, 8, 4, 4, 4, 4, 4, 8, 8, 8, 8, 8, 4, 4, 4, 4, 4},
  {1768, 1960, 1960, 1768, 4, 1768, 1960, 1960, 1768, 4, 1768, 1960, 1960, 1768, 4, 1768, 1960, 1960, 1768, 4, 1768, 1960, 1960, 1768, 4}, // массив хранящий задержки и длительности ШИМ сигналов, а так же номера пинов на которые подается этот сигнал
};

void setup() {
  pinMode (3, OUTPUT); //пины управляющие транзисторами пары транзисторов 4-8 и 3-6
  pinMode (6, OUTPUT);
  pinMode (4, OUTPUT);
  pinMode (8, OUTPUT);

  pinMode (A6, INPUT); // пин подстроечного резистора
  pinMode (2, INPUT_PULLUP); // пин прерывания
  attachInterrupt (0, blink2, RISING);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  faza = analogRead(6);
  faza = map(faza, 0, 1023, 0, 9);
  faza = constrain(faza, 0, 9);
  while (flag){
    Serial.println(flag);
    for (i = faza; i < 10 + faza; i++){
      digitalWrite(PWM [1][i], LOW);
      digitalWrite(PWM [2][i], LOW);
      digitalWrite(PWM [3][i], HIGH);
      digitalWrite(PWM [4][i], HIGH);
    }
  }
}
```

```
    delayMicroseconds(PWM [0][i]);
    digitalWrite(PWM [3][i], LOW);
    digitalWrite(PWM [4][i], LOW);
    delayMicroseconds (PWM [5][i]);
}

    flag = 0; }
}
void blink2(){
    flag = 1;

}
```

					<i>П-282.13.04.02.2020.227 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>61</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты эксперимента с системой управления v2

ψ	U_{AB}	I	U_c	Q_A	Q_B	Z_{Σ}
-180	26,3	5,1	39	184	147	508
-144	28,47	4,9	43,5	156	116	448
-108	18,74	1,8	22,5	172	110	460
-72	18,60	1,7	22	175	111	465
-36	13,87	0,4	15,5	184	115	477
0	11,8	0,0	15,5	186	116	480
36	12,22	0,1	15,5	187	117	483
72	12,69	0,2	14,5	189	120	487
108	13,85	1,2	14	191	126	496
144	15,76	2,3	17	193	133	505