

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Южно-Уральский государственный университет»**  
**(национальный исследовательский университет)**  
**Политехнический институт**  
**Факультет Энергетический**  
**Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»**

**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Рецензент, должность

\_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_ / И.М. Кирпичникова /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

\_\_\_\_\_ Экспериментальное исследование регулятора напряжения на базе \_\_\_\_\_

**СТАТКОМ**

(наименование темы работы)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**ЮУрГУ – 13.03.02. 2018. 126 ВКР**

(код направления, год, номер студенческого билета)

**Консультант, должность**

\_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**Руководитель, ст. преподаватель**

\_\_\_\_\_ / А.В. Прокудин /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**Консультант, должность**

\_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**Автор**

**студент группы П-478**

\_\_\_\_\_ / А.С. Ленко /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**Консультант, должность**

\_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**Нормоконтролер, должность**

\_\_\_\_\_ / А.В. Прокудин /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(национальный исследовательский университет)

Институт Политехнический  
Факультет Энергетический  
Кафедра Электрические станции, сети и системы электроснабжения  
Направление Электроэнергетика и электротехника

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_/И.М. Кирпичникова/  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

**ЗАДАНИЕ**  
на выпускную квалификационную работу студента  
Ленко Алексея Сергеевича

\_\_\_\_\_  
(Ф. И.О. полностью)

Группа П-478

1. Тема выпускной квалификационной работы

Экспериментальное исследование регулятора напряжения на базе СТАТКОМ

утверждена приказом по университету от \_\_\_\_\_ 20 г. № \_\_\_\_\_

2. Срок сдачи студентом законченной работы \_\_\_\_\_ 1.06.2018 г.

3. Исходные данные к работе

1) элементная база регулятора - транзисторы IGBT,;

2) максимальная частота переключения – 500 Гц;

3) мощность силового трансформатора 10/0,4 кВ – 160 кВА;

4) схема стенда СЭСПП





## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Анализ сущ. тех. решений	01.03.2018	
Анализ применимости СТАТКОМ	10.03.2018	
Разработка системы управления СТАТКОМ	15.04.2018	
Экспериментальные исследования	15.05.2018	
Оформление РПЗ	01.06.2018	

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ /И.М. Кирпичникова/

Руководитель работы \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Студент \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

## АННОТАЦИЯ

Ленко А.С. Экспериментальное исследование регулятора напряжения на базе СТАТКОМ. - Челябинск: ЮУрГУ, П-478; 53 с., 19 ил., 2 табл., библиогр. список - 8 наим., 1 прил.

Пояснительная записка содержит экспериментальные данные, полученные в ходе опытов в рамках исследования возможности применения регулятора напряжения на базе СТАТКОМ.

В данной работе рассматриваются способы регулирования напряжения в сетях 0,4 кВ, а также возможность применения для этих целей реактивного компенсатора на базе СТАТКОМ.

					<i>13.03.02.2018.126.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Ленко А.С.			<b>Экспериментальное исследование регулятора напряжения СТАТКОМ</b>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		Прокудин А.В.					2	34
<i>Н. Контр.</i>		Прокудин А.В.				<b>ЮУрГУ Кафедра ЭССиСЭ</b>		
<i>Утверд.</i>								

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ .....	5
1.1 Средства и способы регулирования напряжения в сетях 0,4 кВ .....	5
1.3 Варианты реализации схемы СТАТКОМ.....	11
1.4 Оценка возможности применения СТАТКОМ в сети 0,4 кВ .....	17
2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТКОМ .....	20
2.1 Описание экспериментальной установки.....	20
2.2 Описание алгоритма управления .....	21
2.3 Регулировочные характеристики СТАТКОМ.....	27
3 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	36

ПРИЛОЖЕНИЕ: Презентация

									Лист
									3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2018.126.00 ПЗ

## 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 технологии управляемых линий электропередач (FACTS). При реализации таких систем в распределительных сетях применяется управляемое статическое устройство выполненное на базе преобразователя напряжения (ПН) – СТАТКОМ.

В рамках данной работы исследуется возможность применения управляемого реактивного компенсатора в сети низкого напряжения, для обеспечения компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения. На сегодняшний день, в сетях низкого напряжения, компенсация реактивной мощности осуществляется редко, а регулирование напряжения производится в основном с помощью РПН, установленных на питающих трансформаторах.

В первой части подробно рассмотрены устройства регулирования напряжения, использующиеся на данный момент, их преимущества и недостатки. Во второй части приведены данные экспериментального исследования, которые описывают возможность применения СТАТКОМа в сетях низкого напряжения.

									Лист
									4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.126.00 ПЗ				



# 1 РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

## 1.1 Средства и способы регулирования напряжения в сетях 0,4 кВ

Для стабильной устойчивой работы сети, регулирование напряжения необходимо обеспечивать на всех ступенях передачи. Рассмотрим возможности регулирования в распределительных сетях низкого напряжения.

Основным способом регулирования напряжения, на всех уровнях сети, является трансформатор, а точнее регулирование под нагрузкой (РПН) или переключение без возбуждения (ПБВ). Оба аппарата являются неотделимой частью трансформаторов, и находятся на питающих подстанциях. Так же регулировать напряжение можно с помощью синхронных двигателей, установленных на производстве. Если предприятие располагает собственной электростанцией, установленной близко к производственным процессам, то регулирование можно обеспечивать с помощью генераторов этой электростанции. В цехах, нагрузка которых имеет значительную реактивную составляющую, к примеру, индуктивные печи для плавки алюминия, могут устанавливаться конденсаторные батареи, компенсирующие потребляемую реактивную мощность. Если необходимо обеспечить многоступенчатое регулирование, дополнительно к батарее может быть установлен СТК (TCR).

Регулирование напряжения в трансформаторе осуществляется на высшей стороне, обычно, на  $\pm 10\%$  от номинального. Физически данный процесс представляет собой ступенчатое изменение коэффициента трансформации путем изменения количества витков в обмотке высшего напряжения. Данную операцию можно производить под нагрузкой (РПН) и с полностью обесточенным и отключенным трансформатором (ПБВ), и в зависимости от этого появляются некоторые конструктивные особенности каждого из двух приборов.

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2018.126.00 ПЗ

В РПН переключение между ответвлениями обмотки без разрыва цепи тока, возможно благодаря применению системы двух параллельных переключающих контактов присоединенных к токоограничивающему реактору, средняя точка которого включена в обмотку трансформатора. Реактор представляет собой трехфазную катушку со стальным сердечником. Он устанавливается внутри бака трансформатора на нижних или верхних консолях ярма. Необходимость наличия реактора определяется тем фактом, что при переключении между витками обмотки высшего напряжения между ними присутствует разность потенциалов, и хотя она сравнительно невелика, ток, который возникает при переключениях, может достигать опасных для оборудования значений. На рисунке 1 представлена принципиальная схема переключателя РПН.[8]

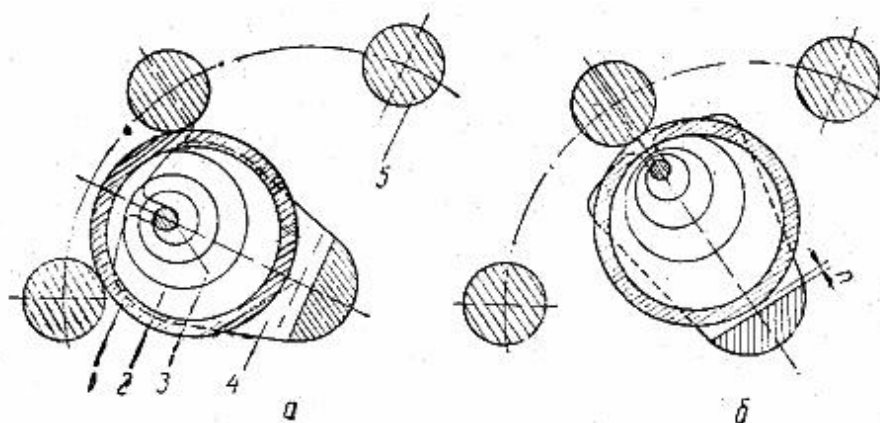


Рисунок 1 – Принципиальная схема переключателя РПН

а - рабочее положение, б - промежуточное положение, 1 - контактное кольцо, 2 - спиральная ленточная пружина, 3 - ось пружины, 4 - коленчатый вал, 5 - контактный стержень

Рассмотрим принцип работы РПН на примере одного переключения. Вначале размыкается контактор К2, рис. 2(а), после, обесточенный переключатель П2 перемещается вниз на отпайку А7. Затем снова замыкается контактор К2 и образуется замкнутый контур между отпайками А6 и А7. По нему протекает уравнивающий ток, для ограничения которого и служит

реактор Р. Далее контактор К1 размыкается и переключатель П1 переводится на отпайку А7, после чего процесс переключения завершается замыканием контактора К1. Реальная схема соединений представлена на рисунке 2(б).

Три сдвоенных переключателя П1-П6 (по паре на каждую фазу), помещаются внутри бака трансформатора. Так как контакторы К1-К6 при каждом переключении должны разрывать дугу уравнительного тока, они помещаются в отдельном баке с маслом, закрепленном на стенке трансформатора.[8]

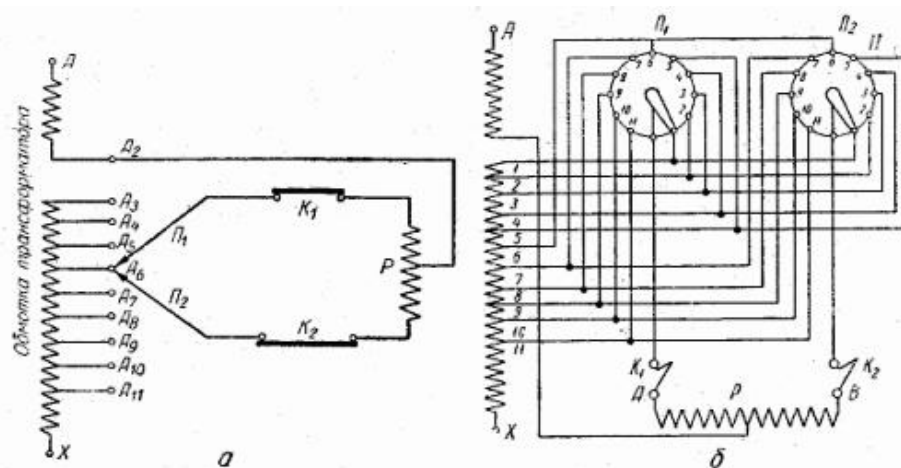


Рисунок 2 – Схема и работа встроенного регулирования под нагрузкой (РПН): а - принципиальная схема, б - схема соединений, П1, П2 - переключатели, К1, К2 - контакторы, Р - реакторы, А - А11 – отпайки обмоток.

ПБВ является упрощенной и значительно удешевленной версией РПН, устанавливается практически на всех трансформаторах, и применяется как основной способ регулирования напряжения, в случае если установка РПН нецелесообразна. ПБВ конструктивно отличается от РПН отсутствием реактора, контакторов, и меньшим количеством отпаяк. Это объясняется тем, что для регулирования напряжения с помощью ПБВ необходимо полностью обесточить трансформатор и снять с него напряжение. Само собой, такой способ неприменим для частого регулирования, и используется в основном

для сезонных переключений, или в тех случаях, когда полное отключение трансформатора не нарушает технологических процессов.

Синхронная машина, работающая в любом режиме, может быть источником реактивной мощности. Регулирование этой мощности осуществляется с помощью изменения тока возбуждения. Так, для синхронного двигателя, характерна выдача реактивной мощности при перевозбуждении, и её потребление при недовозбуждении. Однако у данного способа регулирования есть несколько минусов. Во первых, при переменной нагрузке, выдаваемая реактивная мощность будет изменяться, так как она напрямую зависит от нагрузки на валу. Причем при увеличении нагрузки выдаваемая мощность уменьшается, а при уменьшении нагрузки, увеличивается, это приводит к дополнительным скачкам напряжения. Во вторых, при увеличении выдаваемой мощности изменяется полная мощность двигателя, что требует дополнительных капитальных вложений. В третьих, синхронный двигатель значительно дороже и сложнее в обслуживании, чем асинхронный, вследствие чего таких машин обычно не много.

Для синхронного генератора режим выдачи реактивной мощности является обыкновенным, по этому, на электростанциях, и вблизи них, установка компенсирующих устройств, нецелесообразна. Регулирование реактивной мощности в данном случае осуществляется точно так же, как и у синхронных двигателей, с помощью тока возбуждения.

В производстве, где нагрузки имеют индуктивный характер, часто устанавливаются конденсаторные батареи. Сами по себе они являются статическими компенсаторами без возможности регулирования. Однако, часто устанавливают несколько батарей, подключенных к сети параллельно, с помощью выключателей. Такой способ установки позволяет управлять количеством подключенных батарей, которые включают при вводе некоторого оборудования в работу, и отключают, когда мощный потребитель реактивной мощности выводится из работы. Главным недостатком данного

										Лист
										8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.126.00 ПЗ					

способа является необходимость установки мощных коммутационных аппаратов, что значительно удорожает схему. Однако данный способ очень прост.

В случае, когда необходимо многоступенчатое регулирование реактивной мощности, и соответственно напряжения, дополнительно может быть установлен СТК. СТК представляет собой управляемый тиристорами реактор, позволяющий плавно регулировать потребляемую мощной индуктивностью реактивную мощность. А вкуче с конденсаторной батареей при нулевом потреблении реактивной энергии тиристорно реакторной группой, выйти в режим выдачи реактивной мощности.

Конденсаторные батареи, малоприменимы для регулирования напряжения, так как для обеспечения достаточно большого количества ступеней регулирования требуются серьезные капитальные затраты на коммутационную аппаратуру. СТК как способ регулирования применяется, однако не всегда целесообразен, так как имеет высокую стоимость. Остальные варианты регулирования, имеют один серьезный недостаток – для их обеспечения необходимо оборудование, имеющее подвижные части, а, как известно, механические устройства значительно уступают в надежности и быстродействии электрическим. Исходя из этого в рамках данной работы, рассмотрен еще один способ регулирования, который ранее применялся только на напряжениях 6-10 кВ и выше – статический синхронный компенсатор на базе преобразователя напряжения СТАТКОМ.

## 1.2 Что такое СТАТКОМ

В 1990-х годах усовершенствование технологии полупроводниковых систем привело к появлению полностью запираемых полупроводниковых ключей, шкала параметров которых охватывала напряжения от 2500 до 6000 В и отключаемые токи от 1500 до 4000 А. Эти разработки позволили

										Лист
										9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.126.00 ПЗ					

использовать преимущества быстродействующих, полностью запираемых тиристоров и транзисторов в силовой электронике, и привело к появлению нового класса преобразователей — преобразователей напряжения[1].

Преобразователи напряжения – полупроводниковые преобразователи, звено постоянного тока которых отображается источником напряжения на интервале повторяемости процессов коммутации вентилях (источник постоянного напряжения или батарея конденсаторов большой емкости)[].

Устройство включается в сеть параллельно, и осуществляет управляемую компенсацию реактивной мощности. Это позволяет увеличить коэффициент мощности, путем балансирования активной мощности потребляемой из сети. В сетях низкого напряжения, особенно сетях с большим количеством двигательной нагрузки (асинхронные двигатели), реактивная мощность может составлять значительную часть от полной мощности. Перетоки реактивной мощности создают дополнительные потери, а так же понижают коэффициент мощности, что в свою очередь снижает КПД передачи, вследствие этого, перетоки реактивной мощности стараются минимизировать. Так как управление осуществляется значительно быстрее, чем протекают переходные процессы в системе, устройство так же повышает устойчивость системы путем сохранения требуемого напряжения в узлах системы.

СТАТКОМ представляет собой статический компенсатор реактивной мощности, выполненный на полностью управляемых полупроводниковых ключах, IGBT или MOSFET транзисторах, IGCT или GTO тиристорах.

Принцип работы СТАТКОМ идентичен принципу преобразователей предыдущего поколения, например СТК, однако имеет ряд преимуществ. Ключевым преимуществом СТАТКОМа является обратимость преобразователей напряжения. Это значит, что преобразователь напряжения может работать на нагрузку с противо-ЭДС, что позволяет обеспечить диапазон фазового смещения напряжения инвертора относительно

напряжения сети в диапазоне  $\pm 180$  эл. град. Это позволяет СТАТКОМу работать не только в режиме выдачи реактивной мощности, но и в режиме её потребления. В то время как СТК может лишь регулировать потребляемую тиристорно-реакторными группами реактивную мощность. Еще одно важное преимущество СТАТКОМа над СТК, это тот факт, что в СТК обмен электромагнитной энергией осуществляется между сетью и реактивными элементами, что требует равенства мощности элементов и выдаваемой реактивной мощности. В преобразователе напряжения обмен реактивной мощностью осуществляется между фазами, что позволяет значительно снизить установленную мощность конденсаторной батареи и реакторов. Таким образом, мощность реакторов составляет 15-20%, а мощность конденсаторной батареи около 10% мощности компенсатора.[1]

### 1.3 Варианты реализации схемы СТАТКОМ

#### **ПАО ФСК ЕЭС[7]**

В электроэнергетике России используется трехуровневая схема преобразователя (Рис. 1). Три уровня напряжения (ноль, половина и полное) позволяет задать двухступенчатую основу синусоиды (рис. 2) что позволяет снизить мощность фильтров.

В первом отечественном СТАТКОМ, созданном ОАО «НТЦ электроэнергетики» совместно с ООО «НПЦ Энерком-Сервис», применена система управления, релейной защиты и автоматики собственной разработки. Отличием отечественного СТАТКОМ от зарубежных аналогов является то, что в нем использованы только транзисторные вентили. Такой подход обеспечивает возможность более гибкого управления и еще более эффективного снижения потерь.

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2018.126.00 ПЗ

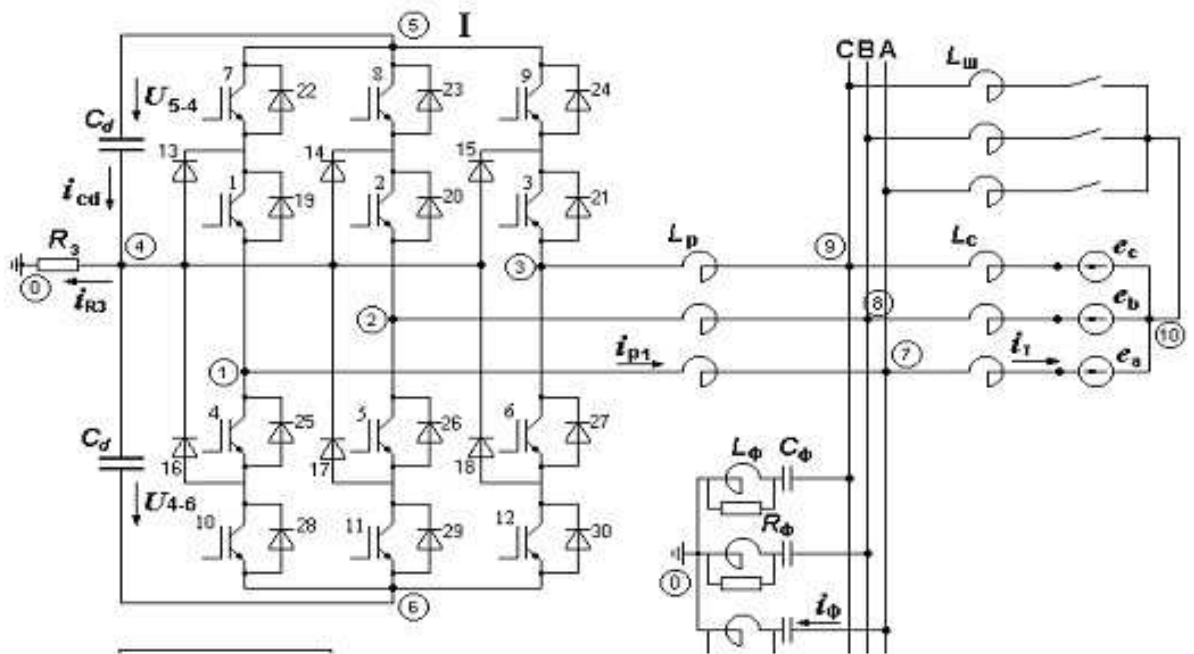


Рисунок 3 – Схема трехуровневого СТАТКОМ

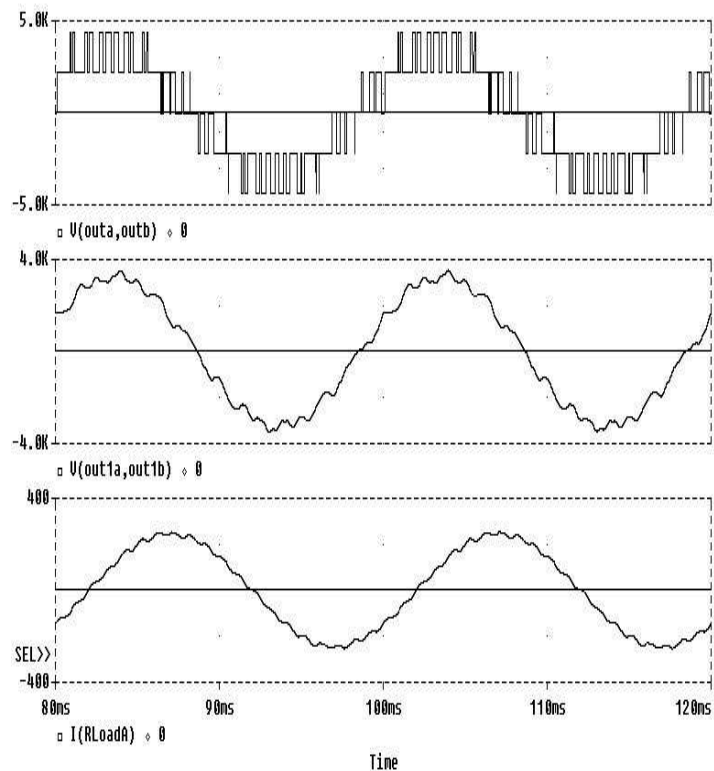


Рисунок 4 – Временные диаграммы работы инвертора



В 2011 году ОАО «ФСК ЕЭС» ввело в эксплуатацию статический компенсатор реактивной мощности на подстанции 400 кВ Выборгская, реализованный по приведенной выше схеме, для повышения надежности транзита электроэнергии между Россией и Финляндией.

### АО «Нидек АСИ ВЭИ» [3]

Компания *Nidex* производит два типа компенсаторов типа СТАТКОМ. Одноуровневые типа D-СТАТКОМ с подключением к шинам 6-10 кВ через понижающий трансформатор, и многоуровневые бестрансформаторные СТАТКОМы подключаемые непосредственно к шинам 6-35 кВ.

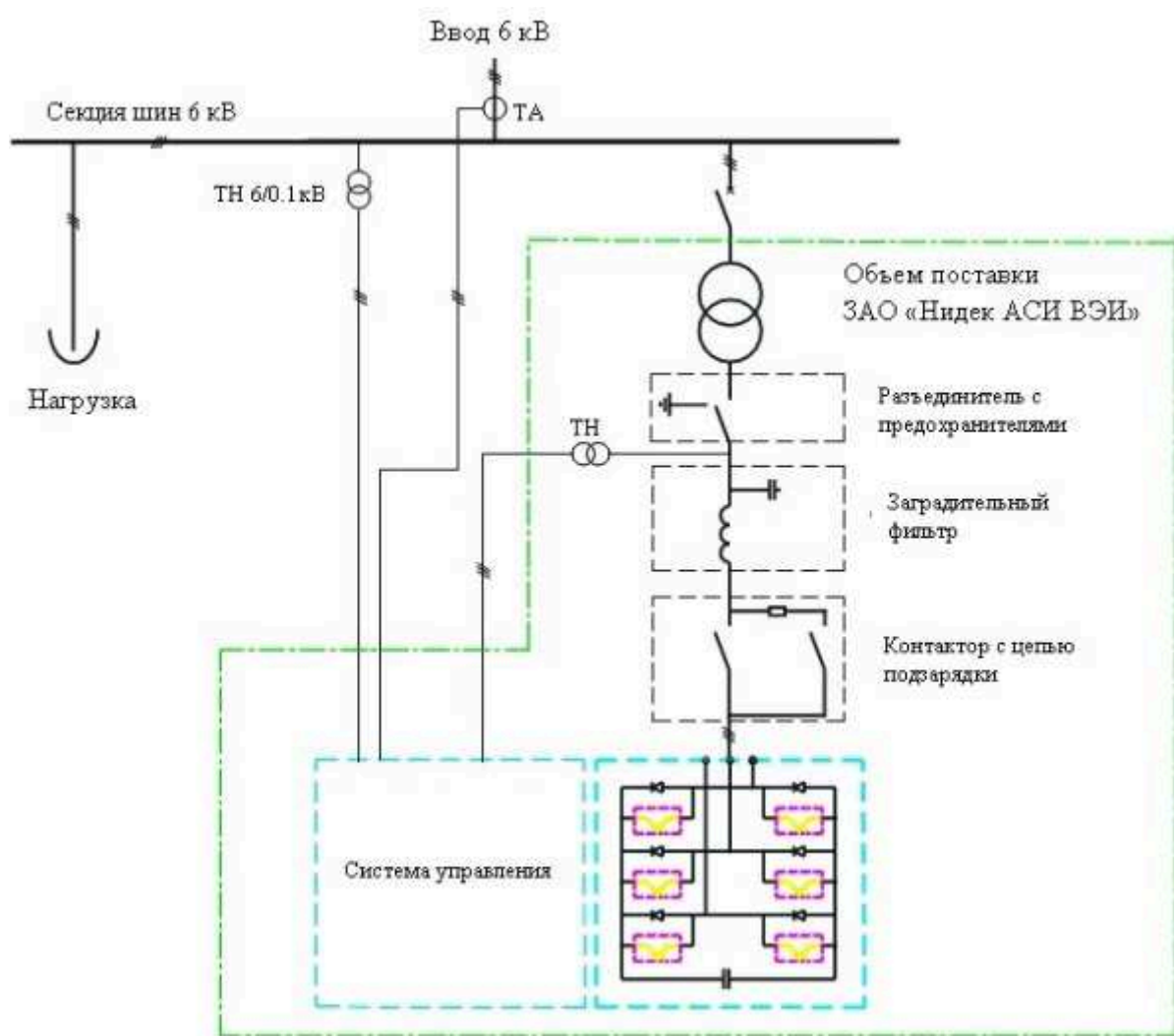


Рисунок 5 – Однолинейная схема СТАТКОМ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.126.00 ПЗ

Лист

13

## Описание D-STATCOM

Устройства с одноуровневой схемой используются в распределительных сетях промышленных предприятий и энергосистем для решения локальных задач улучшения качества электроэнергии, симметрирования нагрузки и компенсации реактивной мощности. Пример однолинейной схемы D-СТАТКОМа представлен на рисунке 3.

Схема включает в себя трехфазный инвертор напряжения с номинальным напряжением 550-600В, понижающий трансформатор сетевой фильтр и коммутационную аппаратуру.

## Многоуровневый СТАТКОМ [3]

В случае прямого (бестрансформаторного) подключения к сетям среднего напряжения используется преобразователь на основе H-мостов. Важнейшим достоинством данной конструкции является её модульность, что позволяет легко переходить к разным классам напряжений, а так же обеспечивает простоту обслуживания.

Многоуровневые СТАТКОМы применяются для снижения вредного воздействия на сеть мощных быстропеременных нагрузок, и повышения динамической устойчивости в сетях высокого напряжения.

На рисунке 4 показана фаза 7-ми уровневой преобразователя на базе H-моста и форма его выходного напряжения в режиме генерации реактивной мощности. Для каскадного многоуровневого инвертора полное выходное напряжение является суммой выходных напряжений отдельных модулей H-мостов. Каждое отдельное выходное напряжение

										Лист
										14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.126.00 ПЗ



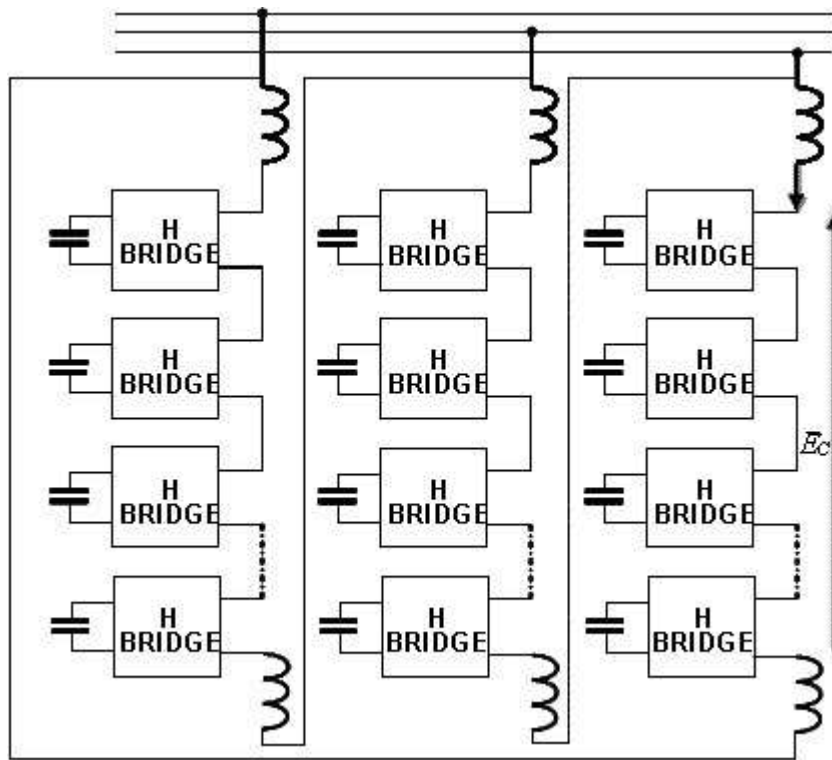
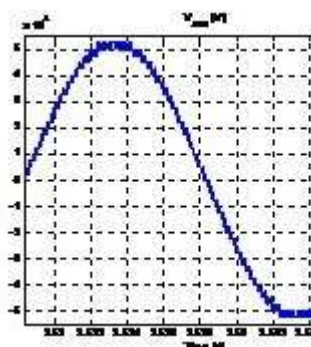
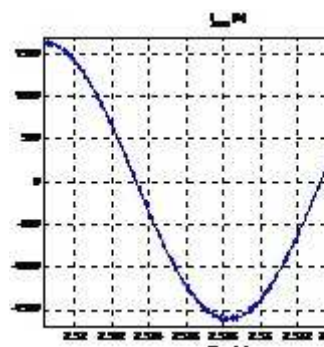


Рисунок 7. Топология СТАТКОМа



а)



б)

Рисунок 8. Осциллограммы а)напряжения б)тока преобразователя

Функциональные испытания пилотного образца, включающего два СТАТКОМа на напряжения 35 кВ и номинальную мощность  $\pm 100$  Мвар дали следующие результаты:

а) Быстродействие в режиме малого сигнала. Время отклика (задержки) на ступенчатое изменение уставки не превышает 4мс.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.126.00 ПЗ

Лист

16

б) Резервирование силовой части. Полное восстановление работы СТАТКОМа происходит через 0,26 с после пробоя любого моста.

в) Высшие гармоники. Суммарный уровень высших гармоник до 50 порядка в выходном токе составил около 1,2 %.

г) Потери. Суммарные потери не превысили 2,1 МВт или 1,05% от полной реактивной мощности уставки.

#### 1.4 Оценка возможности применения СТАТКОМ в сети 0,4 кВ

Под сетями 0,4 кВ подразумеваются сети бытового сектора, а так же цеховые сети, и сети собственных нужд на электростанциях. Так как на электростанциях необходимости в компенсации реактивной мощности нет, потому, что синхронные генераторы, которые могут её выдавать, находятся совсем рядом, рассмотрим цеховую сеть.

Представим цеховую сеть, подключенную к линии 35кВ через трансформатор ТМ-160/35.

Таблица 1. Каталожные данные трансформатора

$S_{\text{НОМ}}, \text{МВА}$	$U_{\text{НОМ.ВН}}, \text{кВ}$	$U_{\text{НОМ.НН}}, \text{кВ}$	$I_{\text{XX}}, \%$	$u_{\text{КЗ}}, \%$	$\Delta P_{\text{К}}, \text{кВт}$	$\Delta P_{\text{XX}}, \text{кВт}$
0,16	35	0,4	2,4	6,5	2,6	0,7

Предположим, что в нормальном режиме трансформатор работает с нагрузкой равной 70% от  $S_{\text{НОМ}}$ :

$$S_{\text{ТР}} = 0,7 \times S_{\text{НОМ.ТР}} = 0,7 \times 0,16 = 0,112 \text{ МВА}$$

Тогда номинальный ток на стороне 0,4 кВ:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{тр}}}{U_{\text{НОМ.НН}}} = \frac{0,112}{0,4} = 0,28 \text{ кА}$$

Исходя из того факта что установленная мощность конденсаторной батареи СТАТКОМа составляет 10% от мощности компенсатора, рассчитаем, какой диапазон изменения напряжения сможет обеспечить преобразователь с конденсаторной батареей 15 квар.

Принципиальная схема представлена на рисунке 9.

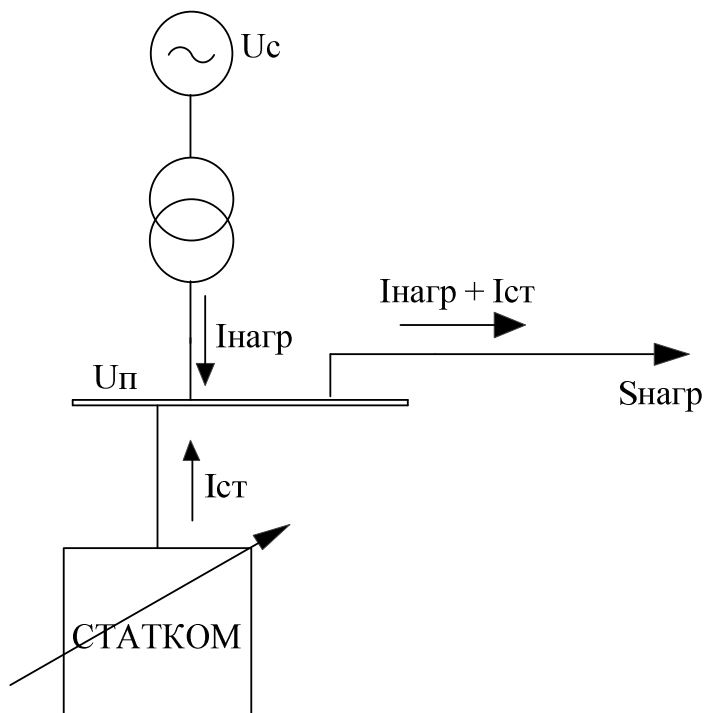


Рисунок 9 – Принципиальная схема

Так как сопротивление сети 35кВ намного меньше, чем сопротивление трансформатора, представим сеть источником бесконечной мощности. Для удобства расчетов приведем схему к напряжению 0,4 кВ.

Найдем эквивалентное сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению 0,4кВ:

$$X_{\text{T}} = \frac{u_{\text{кз}}}{100\%} \times \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ.тр}}} = \frac{6,5}{100} \times \frac{0,4^2}{0,16} = 0,065 \text{ Ом}$$

Напряжение на шинах 0,4 кВ будет отличаться от напряжения системы на величину падения напряжения на сопротивлении  $X_T$ , падение напряжения зависит от тока нагрузки, проходящего через него.

Рассчитаем, насколько СТАТКОМ сможет снизить это падение напряжения:

$$\Delta u_{-} = \frac{Q_{ст} \times X_T}{U_c^2} = \frac{0,15 \times 0,065}{0,4^2} = 0,061$$

Исходя из данного расчета, следует что с помощью СТАТКОМа с батареей 15 квар, мы можем регулировать напряжение на шинах 0,4 кВ на  $\pm 24$  В, что вполне достаточно для сглаживания скачков напряжения из-за запуска мощных электродвигателей, используемых в промышленности.

									Лист
									19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.126.00 ПЗ				

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТКОМ

### 2.1 Описание экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 10.

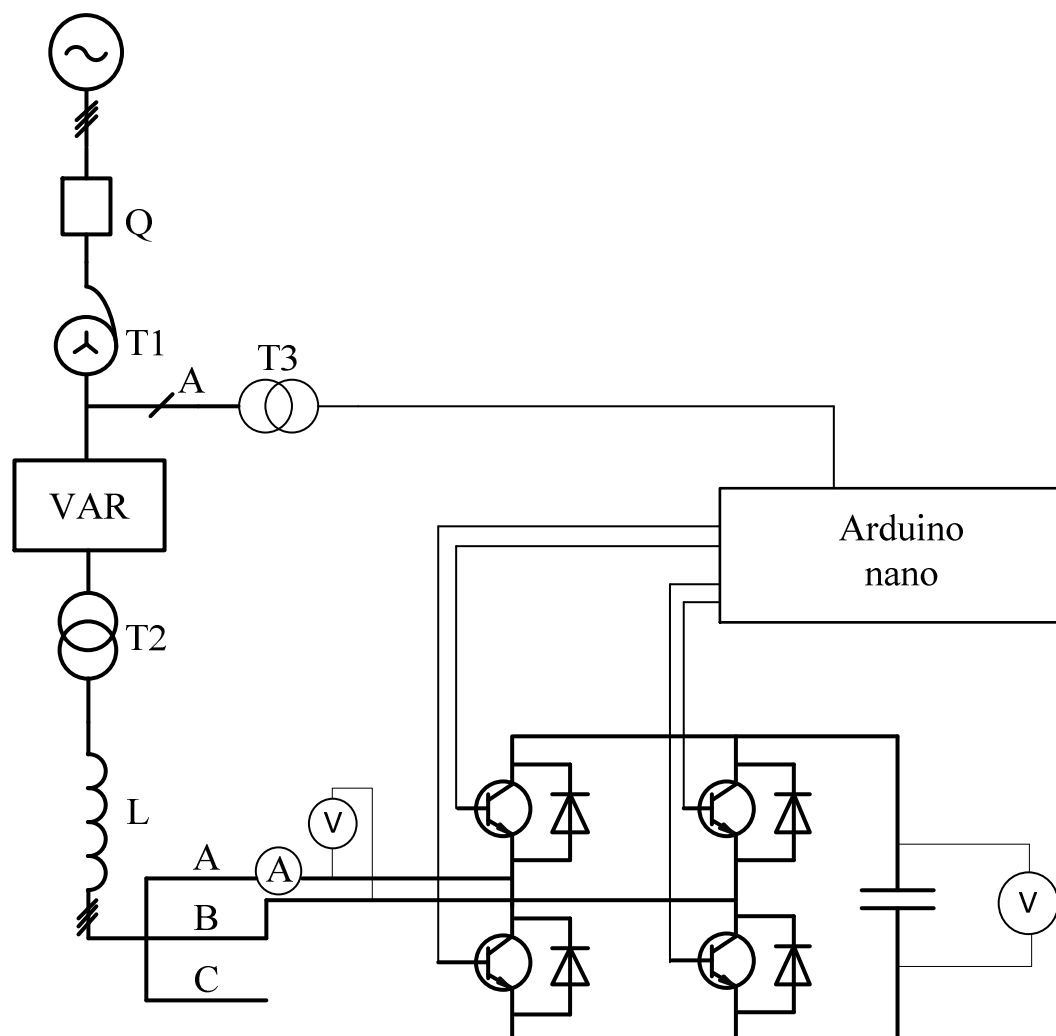


Рисунок 10 – Схема экспериментальной установки

Генератором обозначены шины системы, через выключатель Q система подключена к первому понижающему трансформатору T1, который понижает напряжение сети 0,4 кВ до 0,23 кВ, а также к трансформатору синхронизации T3, с которого напряжение 5В поступает на управляющий вход микроконтроллера «*Arduino nano*». К первому понижающему трансформатору



подключен VAR-метр, который позволяет контролировать проходящую активную, реактивную и полную мощности. Далее идет второй понижающий трансформатор Т2, понижающий напряжение с 128В до 6В, это сделано для снижения токов через преобразователь для облегчения его режима работы. Далее следует реактор, который также выполняет функцию снижения токов, и является фильтром высших гармоник. После фазы А и В подключаются к выводам преобразователя через амперметр, контролирующей фазный ток. Микроконтроллер, кроме управляющего контакта имеет еще 4 выхода, которые подключаются к управляющим контактам транзисторов. Так же в схеме имеются два вольтметра, снимающие фазное напряжение, а так же напряжение на конденсаторной батарее.

## 2.2 Описание алгоритма управления

Суть задачи, которую мы ставим перед микроконтроллером, заключается в следующем: микроконтроллер должен выдавать сигналы управления для каждого из четырех транзисторов с частотой равной частоте сети. А так же нужно обеспечить возможность смещения по фазе этих сигналов относительно сети на  $\pm 180$  эл. град. Дополнительно, нужно обеспечить синхронную с сетью выдачу сигналов. Учитывая, что частота сети со временем может изменяться, необходимо реализовать проверку синхронизации.

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

									Лист
									21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.126.00 ПЗ				

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 переменной *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 так:

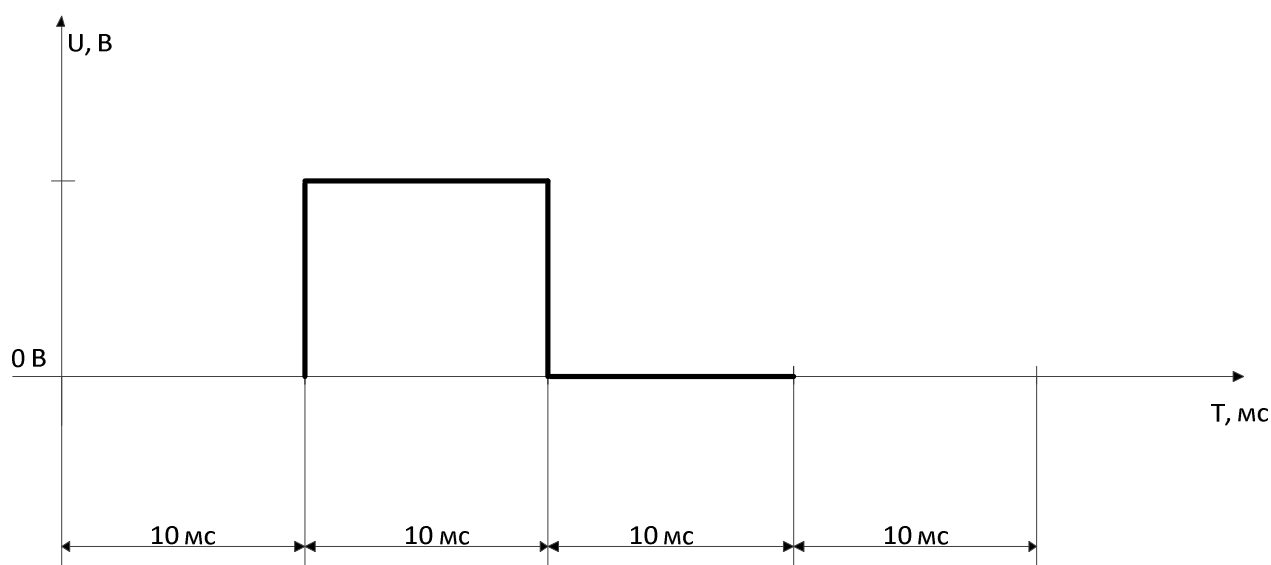


Рисунок 11 – График управляющего сигнала одного транзистора на одном периоде

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  $\pm 180$  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 так:

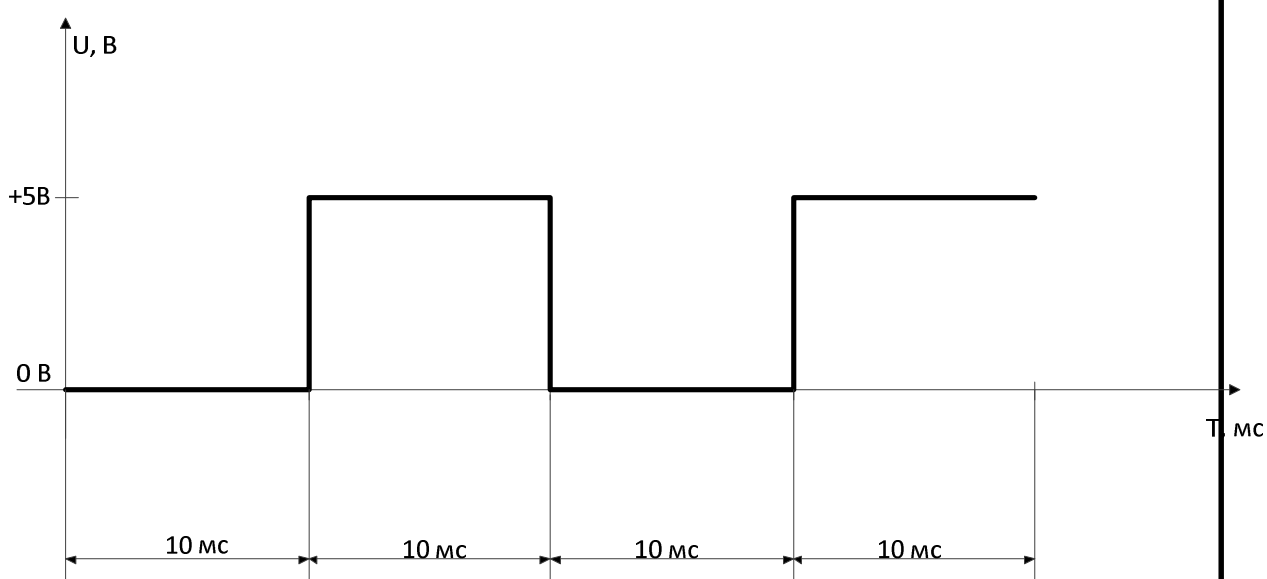


Рисунок 12 – График управляющего сигнала одного транзистора на протяжении 40 мс

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. 8, мы можем выбрать интервал, на котором будет работать система, на графике это выглядит так:

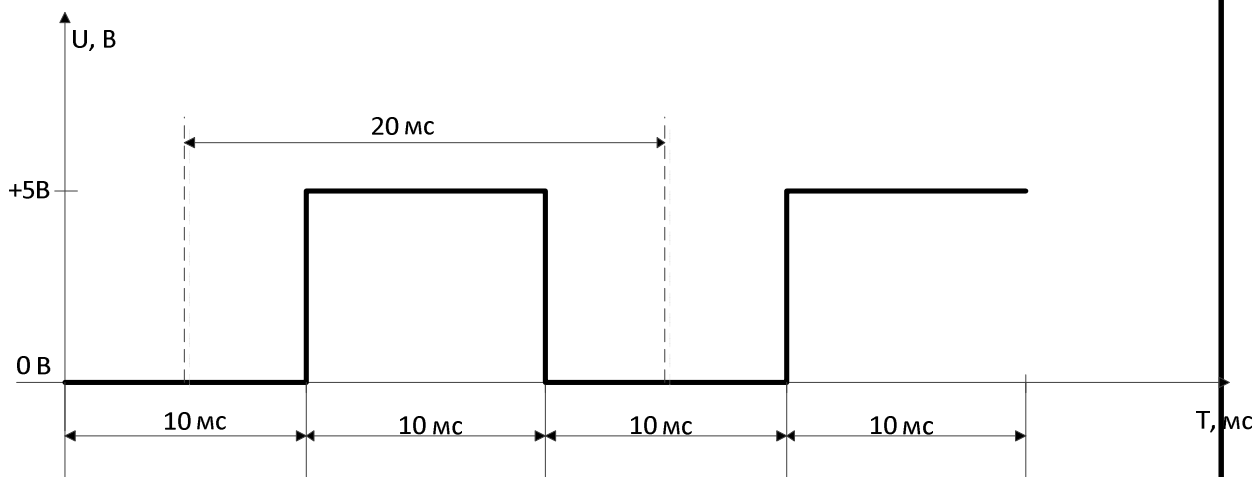


Рисунок 13 – Интервал графика соответствующий углу управления -90 эл. град

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.

Алгоритм управления написан на языке Arduino IDE, текст программы представлен ниже.

```

volatile long faza1;
volatile long faza2;
volatile long faza3;
volatile long faza4;
volatile int faza;
volatile int val;
volatile int val1;
void setup() {
pinMode (3,OUTPUT);
pinMode (4,OUTPUT);
pinMode (6,OUTPUT);
pinMode (8,OUTPUT);

```

```

pinMode (2, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(0, blink2, RISING);
faza1 = 0;
faza2 = 9800;
faza3 = 9800;
faza4 = 0;
Serial.begin(9600);
}
void loop() { }
void blink2(){
  faza = analogRead(6);
  faza = map(faza, 0, 1023, 0, 19600);
  val = constrain(faza, 0, 9800);
  val1 = constrain(faza, 9800, 19600);
  faza1 = 9800 - val;
  faza2 = 19600 - val1;
  faza3 = 0 + val;
  faza4 = -9800 + val1;
  if (faza1 > 0){
    digitalWrite(4, LOW);
    digitalWrite(6, LOW);
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(8, HIGH);
    delayMicroseconds(faza1);
  }
  if (faza2 > 0){
    digitalWrite(3, LOW);

```

```

digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(4, HIGH);
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);
} }

```

### 2.3 Регулировочные характеристики СТАТКОМ

Экспериментальные данные были получены для 25 точек с шагом ~ 14 эл. град. Ёмкость конденсаторной батареи использованной в эксперименте С=2500 мкФ. И приведены в таблице 2.

										Лист
										27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.126.00 ПЗ					

Таблица 2 – Экспериментальные данные

$\alpha_0$	$I_\phi$	$U_C$	$P_\Sigma$	$Q_\Sigma$	$S_\Sigma$	$U_{AB}$
-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

По данным полученным в экспериментах построены зависимости, которыми мы будем оперировать далее.



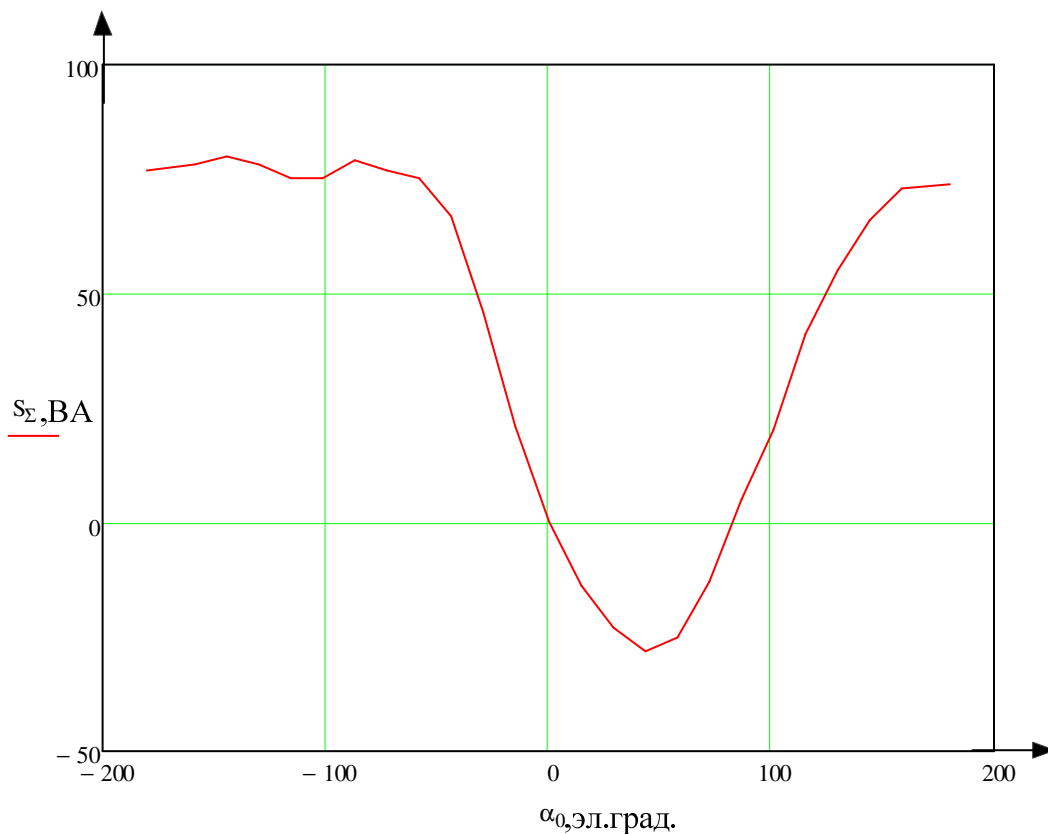


Рисунок 14 – Зависимость полной мощности от угла управления

Как видно на рисунке 14 преобразователь действительно оказывает влияние на протекающую мощность. Тот факт, что при угле управления 0 эл. град., протекающая мощность не равна нулю, объясняется наличием потерь холостого хода трансформатора. На графике видны изменения полной мощности как в режиме потребления реактивной мощности, так и в режиме её выдачи.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.126.00 ПЗ

Лист

29

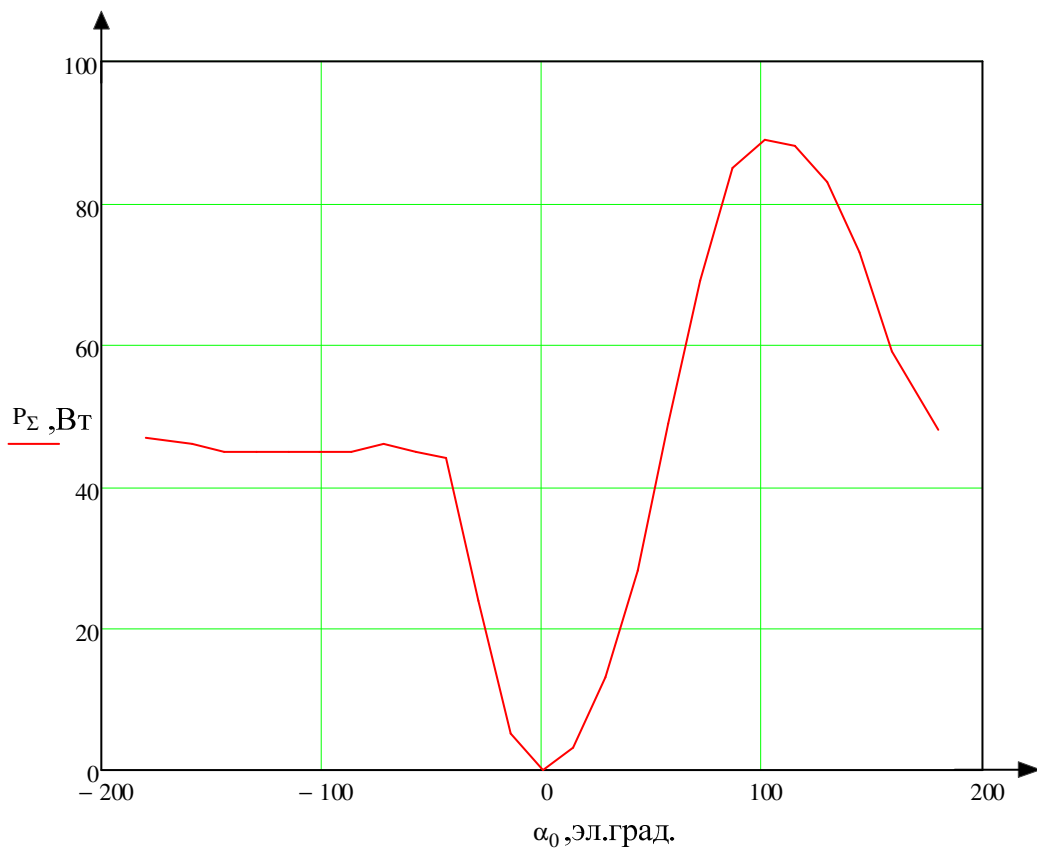


Рисунок 15 – Зависимость активной мощности от угла управления

Практически прямой, участок графика, показанного на рисунке 15, свидетельствует о том, что при данном угле управления ток через конденсаторную батарею не изменяется, вследствие того что батарея ушла в режим максимального потребления.

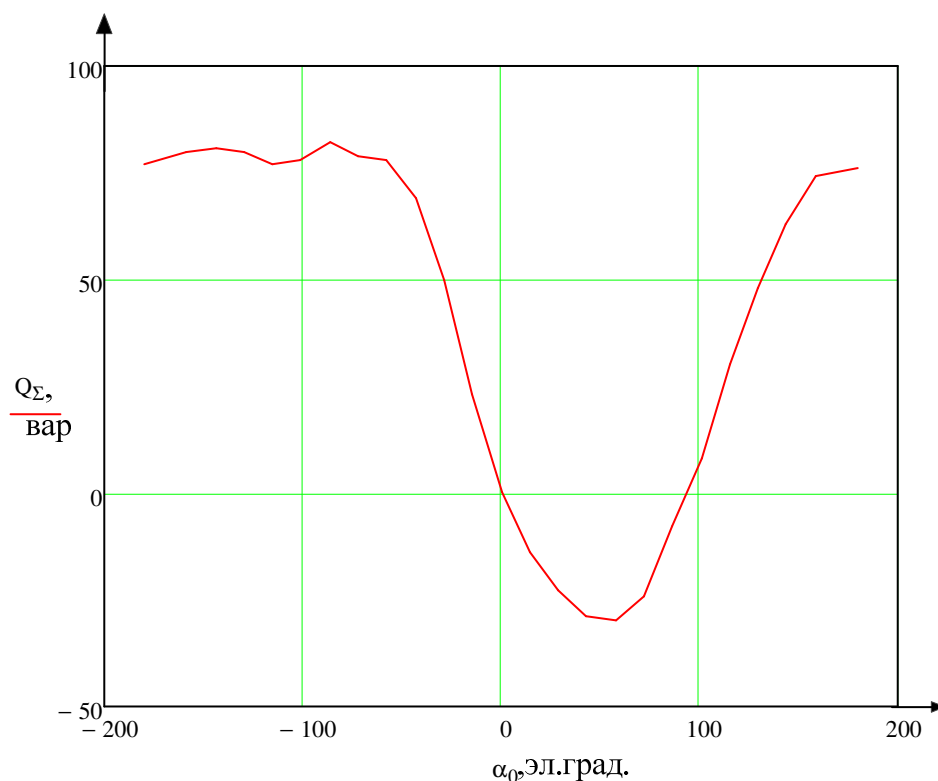


Рисунок 16 – Зависимость реактивной мощности от угла управления

Рисунок 16 показывает, что преобразователь, как и заявлено ранее, может работать как в режиме потребления, так и в режиме выдачи реактивной мощности. Режиму потребления соответствует часть графика с отрицательными углами управления, а режиму выдачи соответственно правая. Уход преобразователя в режим потребления реактивной мощности при углах управления больше 100 эл. град., обусловлен тем, что транзисторы при этих углах открываются практически в противофазе с фазным напряжением, и из-за этого батарее не хватает времени для накопления энергии.

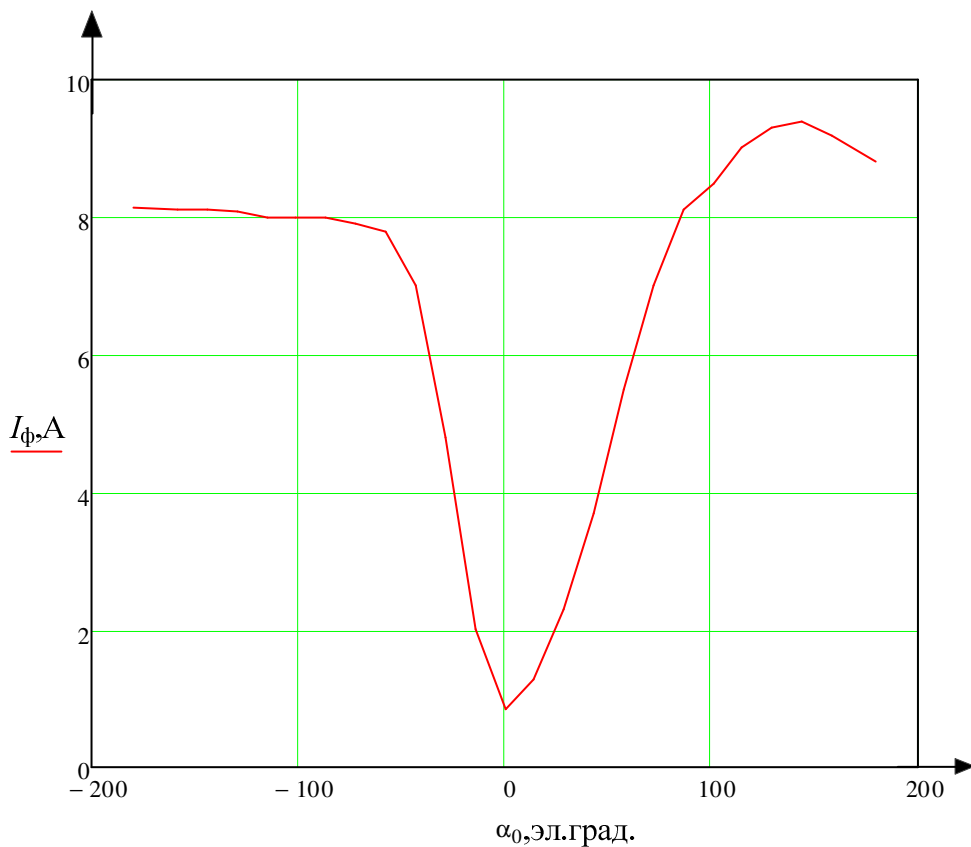


Рисунок 17 – Зависимость фазного тока от угла управления

На рисунке 17, хорошо виден почти прямой участок, на котором при увеличении угла управления ток практически не изменяется, характерный для режима работы конденсаторной батареи близкого к короткому замыканию.

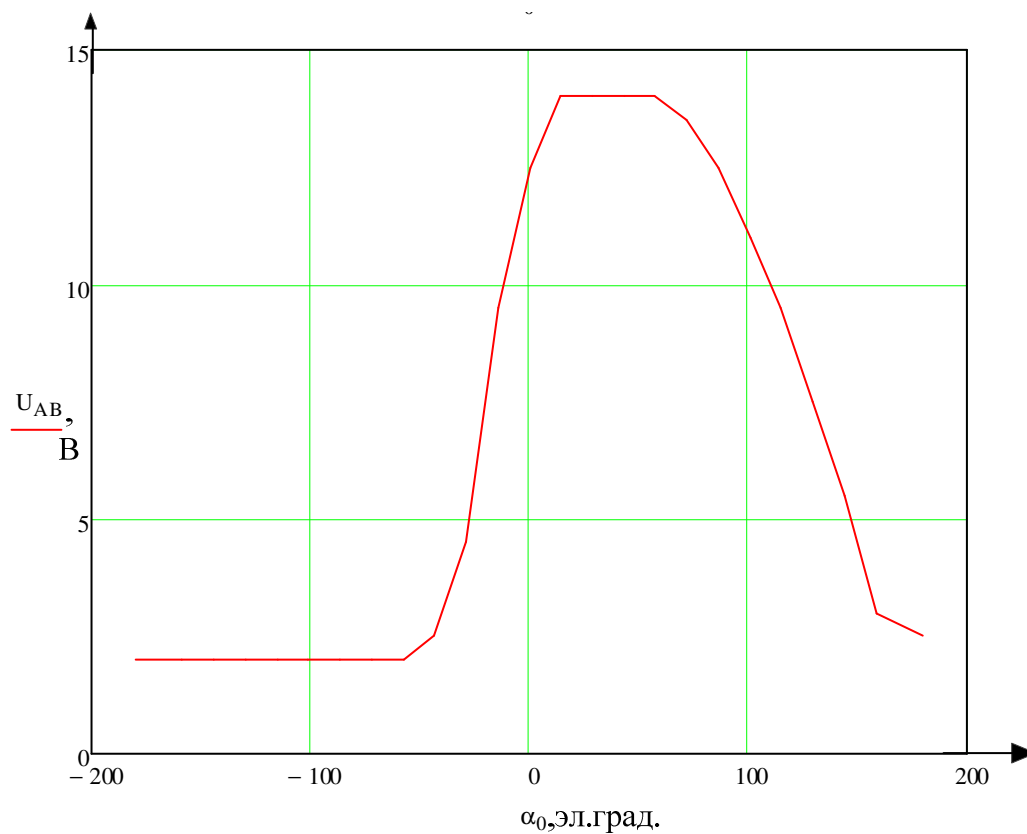


Рисунок 18 – Зависимость междуфазного напряжения от угла управления

Графики, изображенные на рисунках 18 и 19, имеют идентичную форму, так как фазное напряжение и напряжение на конденсаторной батарее различаются лишь на падение напряжения на внутреннем сопротивлении преобразователя.

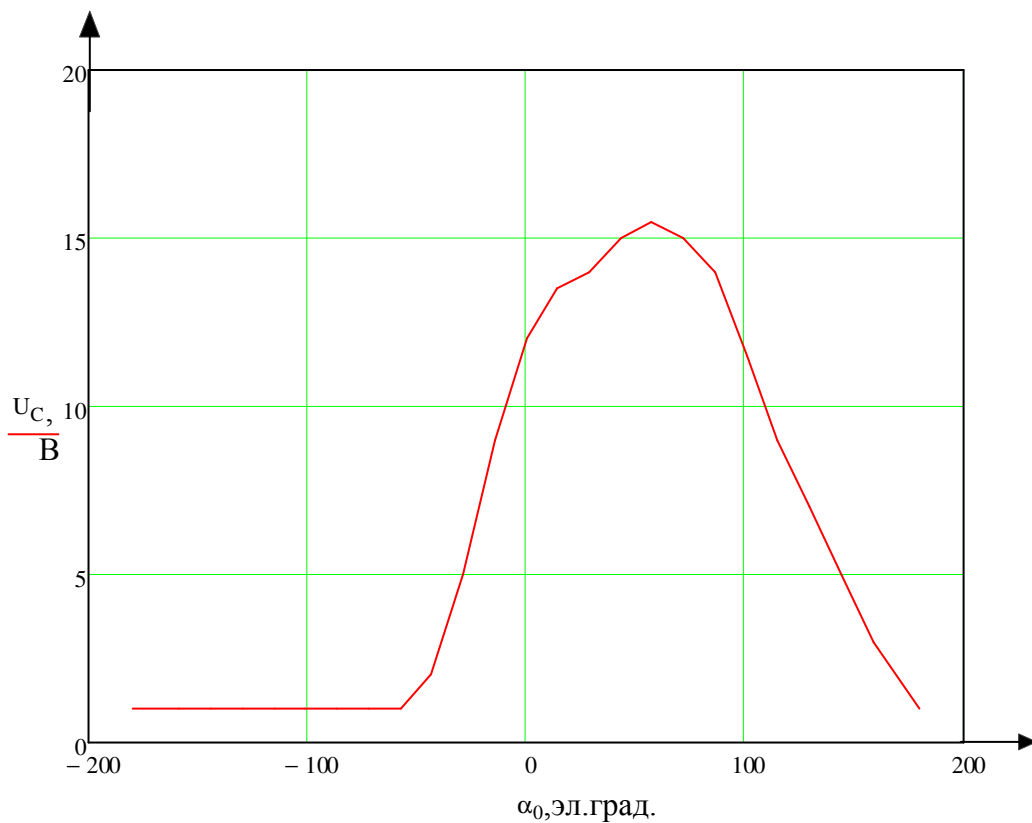


Рисунок 19 – Зависимость напряжения на конденсаторе от угла управления

На графике, представленном на рисунке 19 хорошо видны два режима работы преобразователя, режим потребления при котором конденсаторная батарея потребляет реактивную энергию из сети, снижая её напряжение, и режим выдачи, при котором напряжение на батарее выше, чем напряжение питающей сети, вследствие чего преобразователь повышает напряжение сети.

### 3 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исходя из проведенных экспериментов, мы выяснили, что схема преобразователя напряжения вполне применима для регулируемой компенсации реактивной мощности. Хотя испытания и были проведены на низком напряжении, можно с уверенностью сказать, что при наличии элементной базы рассчитанной на напряжение 0,4 кВ, можно построить аналогичную схему, и она выполнит предъявленные к ней требования в полном объеме.

Использование микропроцессорной базы для управления преобразователем позволяет осуществлять высокоточное и быстродействующее регулирование.

Устройства, построенные по данной схеме, могут найти широкое применение в цеховых сетях, с быстропеременной нагрузкой, вроде конвейерных лент, приводимых в движение с помощью электроприводов с частотным управлением. Или электродуговых сварочных аппаратов. Данные электрические аппараты большую часть своего рабочего времени проводят в режиме переходных процессов, влияние которых может быть сглажено, с помощью быстродействующего регулирования. Так как нынешние микропроцессоры за доли секунд способны просчитывать огромные массивы данных, может быть обеспечено регулирование на интервале периода напряжения, что на порядки быстрее, чем способы регулирования прошлых поколений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог исследованию, касающемуся развития технологии электропередачи, и улучшения её качества, сделан вывод, что технологии управляемых линий электропередач (FACTS), в частности статический компенсатор на базе преобразователя напряжения СТАТКОМ, может найти применение на всех уровнях энергосистемы. Применение приборов данного класса, значительно улучшает показатели качества электроэнергии, а также улучшает показатели надежности электропередачи, путем отказа от ненадежных механических устройств переключения (РПН) в пользу статических аппаратов.

										Лист
										36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.126.00 ПЗ



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочкин В.И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / Кочкин В.И. Нечаев О.П — Москва: изд-во НЦ ЭНАС 2002г — 248 с.
2. Ситников В.Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе гибких электропередач (FACTS): автореферат дисс. доктора технических наук / Ситников В.Ф. —Иваново.: 2009 г. — 34с.
3. СТАТКОМ (статический компенсатор) от компании Нидек АСИ ВЭИ —<http://nidec-asi-vei.ru/produktsiya/statkomi-dlya-nuzhd-promishlennosti-i-energetiki/>
4. Устройство компенсации реактивной мощности типа D-STATCOM для распределительных сетей 6-10 кВ — <https://sibac.info/studconf/tech/xxxvi/43439>
5. Зачем нам СТАТКОМ — <http://www.energyland.info/analitic-show-129974>
6. Компенсация реактивной мощности с помощью СТАТКОМ — <https://nauchforum.ru/conf/tech/x/28838>
7. [http://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent\\_network/new\\_types\\_of\\_power\\_equipment\\_of\\_substations\\_and\\_overhead\\_power\\_lines/static\\_compensator\\_statcom/](http://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/static_compensator_statcom/)
8. <http://electricalschool.info/main/visokovoltny/1446-skhema-i-princip-raboty-rpn.html>