



Институт - Энергетический  
 Направление подготовки - Электроэнергетика и электротехника  
 Кафедра - Электропривода и электрооборудования

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Источник бесперебойного питания для защиты локальных вычислительных сетей

УДК 621.311.6:004.05

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Сороколатов Станислав Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Данил Юрьевич	Кандидат технических наук, доцент		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	Кандидат технических наук, доцент		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой ЭПЭО	Дементьев Юрий Николаевич	Кандидат технических наук, доцент		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	<i>Развивать и совершенствовать свой интеллектуальный, общекультурный уровень; добиваться нравственного, физического совершенствования своей личности, способным к обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.</i>
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.</i>
P3	<i>Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.</i>
P4	<i>Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.</i>
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.</i>
P6	<i>Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.</i>
P7	<i>Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.</i>
P8	<i>Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.</i>
P9	<i>Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.</i>
P10	<i>Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.</i>
P11	<i>Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.</i>
P12	<i>Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.</i>



Институт - Энергетический  
 Направление подготовки- Электроэнергетика и электротехника  
 Кафедра Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ Ю.Н. Дементьев  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Сороколатов Станислав Владимирович

Тема работы:

Источник бесперебойного питания для защиты локальных вычислительных сетей	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	20.02.2017 №1109/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Источник бесперебойного питания для защиты локальных вычислительных сетей.                  Номинальная мощность – 10 кВА;                  Номинальное входное напряжения – 220 В;                  Диапазон входного напряжения – +/- 15% от номинального значения;                  Частота питающей сети – 50 Гц;                  Входной коэффициент мощности – 0,99;                  Номинальное выходное напряжение – 220 В;                  Отклонение выходного напряжения – +/- 3% при 100% изменении нагрузки;                  Частота выходного напряжения – 50 Гц;                  Время резервирования:– 10 мин.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ознакомление с существующими типами источников бесперебойного питания ответственных потребителей;</li> <li>2. Разработка функциональной схемы ИБП;</li> <li>3. Расчет и выбор силовой части ИБП;</li> <li>4. Разработка и исследование имитационной модели ИБП в среде Matlab Simulink.</li> </ol>
--	--

<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
--	--

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Кузьмина Наталия Геннадьевна
«Социальная ответственность»	Дашковский Анатолий Григорьевич

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Введение, обзор основных типов источников бесперебойного питания, обзор силовых преобразователей энергии, заключение.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	09.09.2015 г.
--	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Данил Юрьевич	Кандидат технических наук, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Сороколатов Станислав Владимирович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
5ГМ5Б		Сороколатов Станислав Владимирович	
<b>Институт</b>	<b>ЭНИН</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭПЭО</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Энергосберегающие режимы электрических источников питания, комплексов и систем

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость затрат научного исследования (НИ)</i>	<i>Итоговая стоимость затрат на НИ составит 399 193 рубля.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30 %</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>1.Планирование работ и их временных оценок.</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>2.Смета затрат на проектирование.</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>3.Сравнительный анализ полученных результатов.</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Сороколатов Станислав Владимирович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Сороколатов Станислав Владимирович

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Энергосберегающие режимы электрических источников питания, комплексов и систем

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования )	Источник бесперебойного питания для защиты предприятий с непрерывным технологическим процессом.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	- ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» - ФЗ «О специальной оценке условий труда»

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	Выявленные вредные факторы: - Освещенность помещения для аккумуляторных батарей (АБ); - Микроклимат помещения АБ; - Вентиляция помещения АБ.
2. Анализ выявленных опасных факторов среды	Выявленные вредные факторы: - Электробезопасность..
3. Охрана окружающей среды:	Утилизация АБ должна осуществляться в специализированные пункты приема отходов.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях:	- Пожар в помещении.
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. Социальные гарантии для работника.

### Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--	--

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Сороколатов Станислав Владимирович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 141 с., 72 рис., 18 табл., 11 источников, 15 прил.

Ключевые слова: Источник бесперебойного питания (ИБП), ответственный потребитель, инвертор, фильтр, напряжение, выпрямитель, аккумуляторная батарея, зарядное устройство.

Объектом исследования является Источник бесперебойного питания для защиты локальных вычислительных сетей.

Цель работы – Разработать, спроектировать ИБП; рассчитать элементы силовой части ИБП; разработать имитационную модель в среде Matlab; исследовать работу модели на нагрузки разного типа; выполнить анализ высших гармоник.

В процессе исследования проводились эксперименты с имитационной моделью при набросе на активно-индуктивной и выпрямительной нагрузок, выполнялся анализ Фурье выходного тока

В результате исследования было установлено, что применение трехуровневого инвертора позволяет существенно снизить величину высших гармоник, в сравнении с однофазным мостовым инвертором. Также стоит отметить, что применение отдельного зарядного устройства для АБ, позволяет увеличить срок их эксплуатации.

Область применения: используется для питания ответственных потребителей

Экономическая эффективность/значимость работы увеличение срока эксплуатации локальной вычислительной сети, за счет увеличения качества предоставляемого напряжения

В будущем планируется замена применяемого инвертора на 7-миуровневый инвертор, проведение анализа высших гармоник, сравнение результатов моделирования с результатами, полученными в настоящей работе и оценка экономической эффективности.

## Содержание

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	11
1 Источники бесперебойного питания для ответственных потребителей переменного тока.....	13
1.1 Основные типы ИБП .....	15
ИБП Off-line (Stand-By) типа .....	16
1.1.1 ИБП Line-interactive типа .....	17
1.1.2 Системы типа On-line .....	18
1.1.3 Структурные схемы ИБП On-Line типа .....	20
1.2 Безтрансформаторные ИБП .....	20
1.2.1 Трансформаторные источники бесперебойного питания .....	21
1.2.2 Структурная схема разрабатываемого источника бесперебойного питания .....	26
1.3 Расчет и выбор элементов силовой части ИБП .....	27
2.1 Расчет параметров входной сети и нагрузки .....	27
2.2 Выбор аккумуляторных батарей .....	27
2.3 Расчет инвертора напряжения .....	30
2.4 Расчет фильтра на выходе инвертора напряжения .....	32
2.5 Расчет импульсного преобразователя постоянного напряжения №1 .....	34
2.6 Расчет неуправляемого выпрямителя №1 .....	38
2.7 Расчет сглаживающего фильтра на выходе выпрямителя .....	39
2.8 Расчет фильтра на входе инвертора .....	40
2.9 Расчет импульсного преобразователя постоянного напряжения №2 .....	42
2.10 Расчет неуправляемого выпрямителя № 2 .....	45
2.11 Расчет сглаживающего фильтра на выходе выпрямителя .....	46
2.12 Составление электрической принципиальной схемы с описанием работы ее элементов .....	47
3 Исследование имитационной модели ИБП .....	52
3.1 Описание имитационной модели .....	52
3.2 Гармонический анализ выходного тока при различных видах нагрузки .....	58
3.2.1 Работа ИБП в режиме питания от сети.....	60
3.2.2 Работа ИБП в аварийном режиме .....	65
3.2.3 Исследование принципа работы однофазного 3-уровневого инвертора .....	70
3.2.4 Сравнительный анализ трехуровневого и однофазного мостового инвертора .....	72



4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	77
4.1	Перечень работ и оценка времени их выполнения.....	77
4.2	Смета затрат на проект.....	80
4.2.1	Материальные затраты.....	80
4.2.2	Амортизация компьютерной техники.....	80
4.2.3	Затраты на заработную плату.....	81
4.2.4	Затраты на социальные нужды (отчисления).....	82
4.2.5	Прочие затраты.....	83
4.2.6	Накладные расходы.....	83
4.3	Определение ресурсной и экономической эффективности проекта.....	84
	 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	104
	Список использованных источников .....	106
	ПРИЛОЖЕНИЯ .....	108
	ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	109
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	112
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	113
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	114
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е .....	115
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж .....	116
	ПРИЛОЖЕНИЕ К .....	117
	ПРИЛОЖЕНИЕ Л .....	118
	ПРИЛОЖЕНИЕ М .....	119
	ПРИЛОЖЕНИЕ Н .....	120
	ПРИЛОЖЕНИЕ П .....	121
	ПРИЛОЖЕНИЕ Р .....	122
	ПРИЛОЖЕНИЕ С .....	123
	ПРИЛОЖЕНИЕ Т .....	124

## **ВВЕДЕНИЕ**

При эксплуатации электрических сетей могут возникнуть некоторые проблемы, такие как: длительное отключение питания потребителей при авариях, кратковременные импульсы при включении дополнительных потребителей, снижение и повышение напряжения сети при изменении величины подключенной к ней нагрузки. Всё вышеперечисленное может привести к негативным последствиям: выходу из строя оборудования, потере данных (сервера, компьютера и т.д.), нарушению технологического процесса на производстве, что приводит к экономическим потерям. Самые опасные последствия – отключение медицинского оборудования (даже кратковременное), систем пожаротушения и вентиляции, т. к. это может привести к получению персоналом травм или более серьезным последствиям, таких как летальный исход.

Современная жизнь диктует тенденцию увеличения потребности в высокоскоростных центрах обработки данных, системах телекоммуникационной связи в реальном масштабе времени, применении систем с непрерывным автоматическим технологическим процессом. Рост потребности в таком оборудовании, вместе с обеспечением большого количества разнообразных возможностей, выдвигает повышенные требования к источникам электропитания.

Нельзя забывать о том, что ни одна система не может работать идеально, и пользователю электрической сети приходится смириться с некоторыми отклонениями характеристик сети от номинальных значений.

В России требования к качеству электрической энергии стандартизованы. ГОСТ 33 73-2014 [1] дает определения показателям качества электроэнергии, а ГОСТ 32144-2013 [2] устанавливает значения этих показателей. Этим стандартом установлены значения показателей в точках подключения потребителей электроэнергии.

Для обеспечения качественной электроэнергией однофазных и трехфазных нагрузок необходимо применять источники бесперебойного питания (ИБП). На сегодняшний день существует несколько распространённых типов ИБП: Off-line типа, line-interactive типа, с двойным преобразованием, феррорезонансного типа, с дельта-преобразованием.

Целью данной магистерской диссертации является разработка и исследование источника бесперебойного питания для защиты локальных вычислительных сетей.

В ходе выполнения работы необходимо выбрать тип источника бесперебойного питания, спроектировать принципиальную электрическую схему, разработать систему управления, которая будет обеспечивать выходные параметры напряжения соответствующие требованиям технического задания. А также произвести расчет и выбрать элементы силовой части и произвести моделирование функционирования данной схемы.

## **1 Источники бесперебойного питания для ответственных потребителей переменного тока**

Ответственный потребитель – потребитель, при нарушении электропитания которого могут возникнуть следующие проблемы:

- аварийные ситуации, которые могут повлечь за собой экологические бедствия, экономические убытки и т. д.;
- опасность для жизни людей (вплоть до смертельных случаев);
- расстройство сложных технологических процессов.

Основными критериями нормальной работы разнообразного оборудования или потребителей, которые задействованы в различных технологических процессах, являются: бесперебойность и высокое качество питающего напряжения [1].

В данной работе в качестве потребителя, согласно техническому заданию, выступает локальная вычислительная сеть.

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) – это способ совместного подключения нескольких компьютеров к общему каналу передачи данных, благодаря которому обеспечивается совместное использование ресурсов, таких, как базы данных, оборудование, программы [3].

С помощью локальной сети удаленные рабочие станции объединяются в единую систему, имеющую следующие преимущества:

- 1) разделение ресурсов – позволяет совместно использовать ресурсы, например, периферийные устройства (принтеры, сканеры), всеми станциями, входящими в сеть;
- 2) разделение данных – позволяет совместно использовать информацию, находящуюся на жестких дисках рабочих станций и сервера;
- 3) разделение программных средств – обеспечивает совместное использование программ, установленных на рабочих станциях и сервере;

4) разделение ресурсов процессора – возможность использования вычислительных мощностей для обработки данных другими системами, входящими в сеть.

Широкие возможности компьютеров по обработке информации делают их в принципе пригодными для разнообразного использования.

В состав ЛВС входит следующее оборудование:

- рабочие станции – персональные компьютеры;
- файловый сервер – выделенный сервер, оптимизированный для выполнения файловых операций ввода-вывода и предназначенный для хранения файлов любого типа. Он, как правило, обладает большим объемом дискового пространства. Наличие в сети файлового сервера позволяет повысить скорость обмена данными, повысить надежность хранения информации;
- коммутатор – устройство, предназначенное для соединения нескольких узлов компьютерной сети в пределах одного или нескольких сегментов сети);
- маршрутизатор – устройство для соединения сетей, использующих различные архитектуры и протоколы;
- Wi-Fi роутер;
- сетевой кабель (витая пара).

Проблема сохранности информации для любых пользователей имеет первоочередное значение. И одной из главных опасностей потери данных является электроснабжение. Российские электросети далеки от идеала, и поэтому в 50 – 70% случаев причиной сбоев в работе электронных приборов является некачественное электроснабжение.

Типичные проблемы:

- полное отключение сети электропитания (исчезновение напряжения);
- провалы напряжения – падение напряжения более чем на 10%;
- перенапряжение (повышение напряжения электросети продолжительностью не менее 0,008 с);
- импульсный бросок напряжения (мгновенное повышение напряжения);
- электромагнитная помеха;

- радиочастотная помеха (разновидность электромагнитной помехи, частный случай).

В первую очередь, как правило, страдает файловый сервер. Одна некорректная сессия записи данных может разрушить всю файловую систему. Но серверы – не единственный объект информационной системы, нуждающийся в защите. Критичными являются зачастую еще и коммутаторы, маршрутизаторы, рабочие станции и периферийные устройства. Даже если надежность их работы является не определяющей для жизнедеятельности организации, неожиданные неполадки могут вызвать эффект «домино», что неизбежно приведет к выходу из строя всей компьютерной сети.

На сегодняшний день в организациях защита компьютеров, защита серверов и защита всей ЛВС в целом является необходимостью.

Для защиты оборудования и решения всех вышеуказанных проблем необходимо выбрать соответствующий источник бесперебойного питания (ИБП). Для выбора необходимо произвести краткий обзор и классификацию схем.

### 1.1 Основные типы ИБП

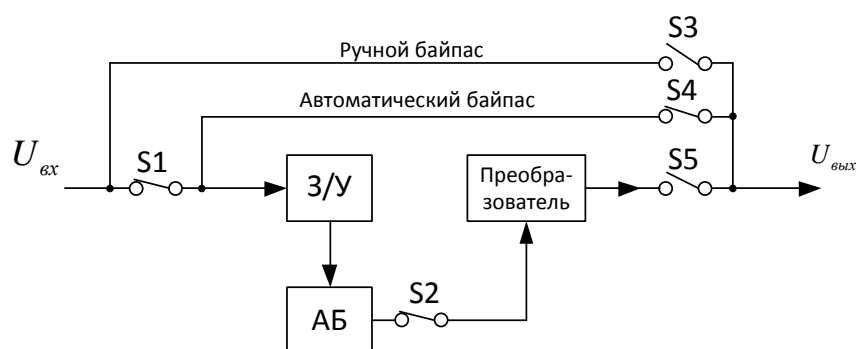
На сегодняшний день устойчивым спросом пользуются источники бесперебойного питания трёх типов: резервные (OFFLINE), линейно-интерактивные (LINE-INTERACTIVE), с двойным преобразованием энергии (ONLINE). Классификация основных типов ИБП приведена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Основные типы ИБП

### 1.1.1 ИБП Off-line (Stand-By) типа

К простым и относительно дешевым относятся резервные ИБП, отображенные на рисунке 2. В англоязычной литературе данный тип ИБП называется Standby, или «off-line». При любых неполадках в электросети они переходят на питание от батарей. Такой тип источников обладает относительно большим временем переключения. Во время переключения (занимает от 4 до 12 миллисекунд для разных моделей ИБП) на выходе ИБП пропадает напряжение. В результате этого происходит небольшой разрыв в напряжении, что неприемлемо для ЛВС. В таблице 1.1 приведены достоинства и недостатки данного типа ИБП.



Условные обозначения

(З/У-зарядное устройство, АБ-аккумуляторная батарея, S1-S5 коммутационные ключи, преобразователь-инвертор)

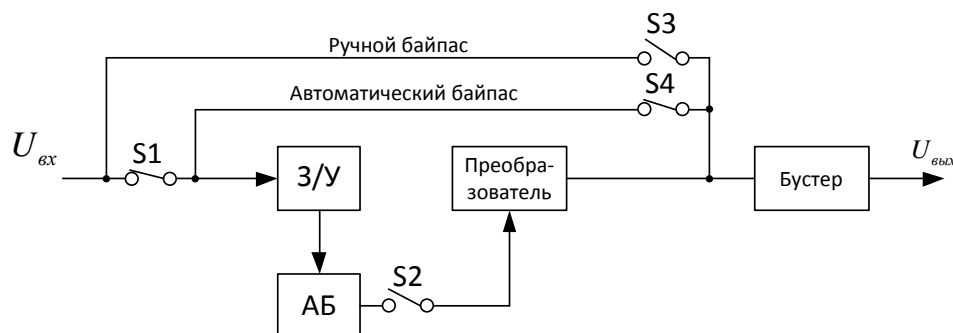
Рисунок 1.2 – Структура ИБП резервного типа в общем виде

Таблица 1.1 – Достоинства и недостатки ИБП резервного типа

Достоинства		Недостатки	
1	КПД около 99 %	1	Относительно долгое время переключения (порядка 4...12 мс) на питание от батарей
2	Имеют минимальное тепловыделение	2	Отсутствие возможности корректировать напряжение и частоту
3	Невысокая стоимость	3	Несинусоидальная форма выходного напряжения (квази-синусоида, аппроксимированная синусоида)

## 1.1.2 ИБП Line-interactive типа

Схема источника бесперебойного питания ИБП Line-interactive типа показана на рисунке 1.3. Этот модификационный вариант ИБП резервного типа получается путем добавления дополнительных цепей для стабилизации напряжения (трансформаторы, бустеры и т.п.). У них инвертор постоянно соединен с выходом и работает параллельно со стабилизатором входного напряжения, построенном на основе автотрансформатора. Именно благодаря этому переключение на питание от батареи не происходит при наличии даже значительных колебаний входного напряжения. Инвертор обеспечивает так называемую «подстройку» выходного напряжения и подзарядку АБ, включаясь на полную мощность только при исчезновении входного напряжения. Переключение на работу от батареи и обратно сопровождается разрывом электропитания. В таблице 1.2 приведены достоинства и недостатки ИБП типа line-interactive.



Условные обозначения

(З/У-зарядное устройство, АБ-аккумуляторная батарея, S1-S5 коммутационные ключи, преобразователь-инвертор)

Рисунок 1.3 – Схема ИБП типа line-interactive в общем виде

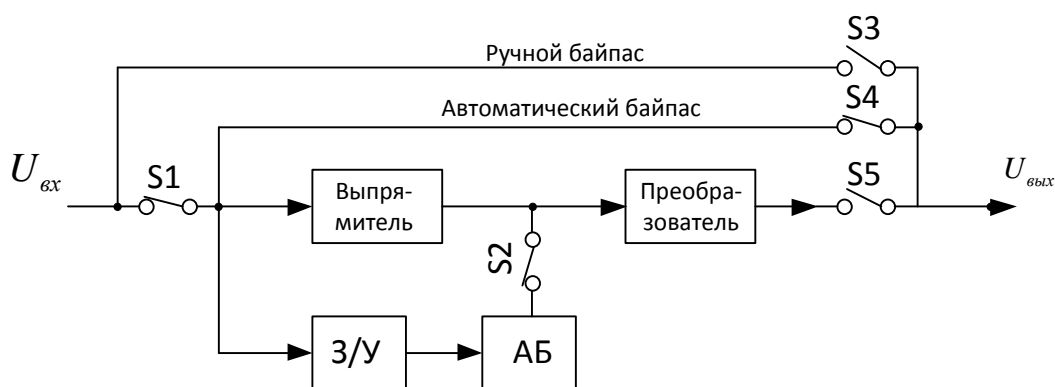
Таблица 1.2 – достоинства и недостатки ИБП линейно-интерактивного типа

Достоинства		Недостатки	
1	Имеется возможность регулирования напряжения.	1	Низкое значение КПД (по сравнению с системой типа Off-line).
2	Гальваническая развязка.	2	Относительно долгое время переключения (порядка 4..12 мс) на питание от батарей.



### 1.1.3 Системы типа On-line

ИБП типа On-line функционирует так, что поступающее на вход ИБП переменное сетевое напряжение преобразуется посредством выпрямителя в постоянное, а затем с помощью инвертора обратно в переменное напряжение. Аккумуляторная батарея при этом постоянно включена между выпрямителем и инвертором. Схема данного ИБП приведена на рисунке 1.4. On-Line схема обеспечивает идеальное выходное напряжение при абсолютно любых неполадках в электросети. Характеризуется «нулевым» временем переключения из нормального режима в автономный и обратно, без переходных процессов в выходном напряжении. В таблице 1.3 приведены достоинства и недостатки ИБП On-line типа.



Условные обозначения  
(З/У-зарядное устройство, АБ-аккумуляторная батарея,  
S1-S5 коммутационные ключи, преобразователь-инвертор)

Рисунок 1.4 – ИБП on-line типа в общем виде

Таблица 1.3 – достоинства и недостатки ИБП on-line типа

Достоинства		Недостатки	
1	Отсутствие времени переключения на питание от батарей.	1	Низкий КПД (около 80—94 %).
2	Возможность корректировки напряжения и частоты.	2	Большое тепловыделение.
3	Синусоидальная форма выходного напряжения.	3	Высокая стоимость.

Анализ рассмотренных трех основных видов ИБП показывает, что для защиты ЛВС и решения всех вышеуказанных проблем наиболее целесообразно использование ИБП с двойным преобразованием энергии (On-line). Данный тип ИБП характеризуется отсутствием промежутка времени между пропаданием внешнего напряжения и началом питания от аккумуляторных батарей, имеет защиту от искажений формы кривой напряжения и микросекундных импульсов, плавную стабилизацию напряжения с высокой точностью, возможность работы в сетях с нестабильной частотой. Именно данный тип ИБП выбираем для дальнейших расчётов.

При функционировании ИБП выделяются следующие режимы:

- сетевой режим;
- автономный режим;
- режим байпас.

*Сетевой режим* – режим, при котором для питания нагрузки используется дважды преобразованная энергия сети.

При данном режиме происходят:

1. фильтрация сетевых помех (импульсных и высокочастотных);
2. преобразование переменного напряжения сети в постоянное с помощью выпрямителя;
3. преобразование с помощью инвертора постоянного напряжения в переменное со стабильными параметрами;
4. постоянный заряд аккумуляторных батарей с помощью зарядного устройства.

*Автономный режим* – режим, при котором для питания нагрузки используется энергия АБ. При исчезновении питающего напряжения или при отклонении параметров сети за предельно допустимые значения, ИБП мгновенно переходит в автономный режим. При возобновлении напряжения или восстановлении оптимальных параметров сети, ИБП автоматически переходит в сетевой режим.

*Режим Байпас* – это режим питания нагрузки сетевым напряжением в обход основной схемы системы бесперебойного питания. Например, в обход ИБП, стабилизатора или дизель-генератора. Часто байпасом называют саму обходную защитную линию (цепь) и её сопутствующую коммутационную аппаратуру. Переход устройства в режим байпас может выполняться автоматически или вручную. ИБП со схемой On-Line автоматически переходят в режим байпас при перегрузке выходных цепей или при возникновении внутренних неисправностей. Таким образом, нагрузка защищается не только от сбоев в питающей электросети, но и от неполадок в самом ИБП. Возможность ручного перевода устройства в режим байпас предусмотрена на случай проведения его технического обслуживания без отключения нагрузки.

В режиме байпас, питание нагрузки осуществляется непосредственно от сети и не имеет никаких защит от некачественного напряжения.

## **1.2 Структурные схемы ИБП On-Line типа**

Все источники бесперебойного питания On-Line типа разделяют на два вида:

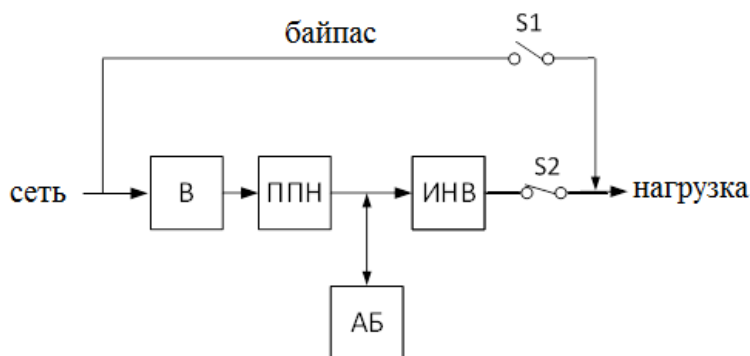
- безтрансформаторные;
- трансформаторные.

Данное разделение основано как на особенности построения схемы ИБП, так и из-за применения трансформаторов [3].

### **1.2.1 Безтрансформаторные ИБП**

При построении ИБП без трансформатора, необходимо учитывать, что инвертор должен обеспечивать более высокое напряжение. А это значит, что в цепи постоянного тока необходимо устанавливать устройства повышающие напряжение – ППН. На рисунке 1.5 приведена блок – схема ИБП On-line типа без трансформатора.

ППН обеспечивает возможность регулирования постоянного напряжения. Таким образом, возможно применение неуправляемых выпрямителей. Но данный тип выпрямителя не обладает возможностью регулирования входного напряжения, а значит, не возможно осуществить плавный старт ИБП.



Условные обозначения  
 (В-выпрямитель, ППН-преобразователь постоянного напряжения,  
 ИНВ – инвертор, S1-S2 коммутационные ключи)

Рисунок 1.5 – Блок – схема ИБП On-line типа без трансформатора

Отсутствие трансформатора в приведенной схеме способствует снижению габаритных размеров и общей массы устройства. Трансформатор имеет довольно большие габариты и занимает большой объем в корпусе устройства. Коэффициент мощности безтрансформаторного ИБП достигает значений 0,95-0,99, а значение коэффициента полезного действия (КПД) достигает 93-93,5%.

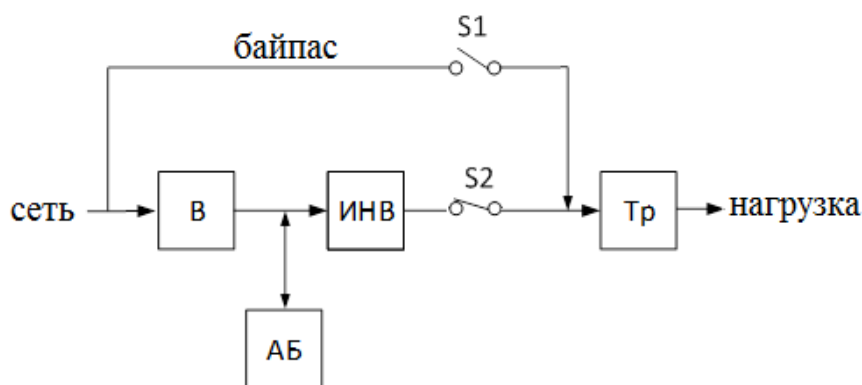
### 1.2.2 Трансформаторные источники бесперебойного питания

Для обеспечения оптимальной зарядки аккумуляторных батарей необходимо снизить пульсации заряжающего напряжения, для этого на выходе выпрямителя в однофазных источниках бесперебойного питания устанавливают фильтр. Так как выходной трансформатор предназначен для повышения напряжения, то инвертор, в данном случае, может работать при пониженном напряжении, которое поступает на его вход. Сам трансформатор и

конденсаторы, находящиеся на выходе инвертора напряжения, служат в роли пассивного фильтра.

Применения трансформатора в данном типе ИБП, увеличивает габаритные размеры и массу устройства в целом. Из-за большого объема усложняется обслуживание и доступ к составным частям ИБП. При использовании стандартных шести импульсных выпрямителей, трансформаторные источники бесперебойного питания порождают во входных цепях высокий уровень гармоник. Высокий уровень гармоник, порядка 28%, при применении пассивных фильтров, существенно снижается. На рисунке 1.6 приведена блок-схема ИБП On-line типа с трансформатором. Пассивные фильтры существенно повышают коэффициент мощности от 0,8 до 0,89-0,97.

В данном типе ИБП выпрямитель совмещен с зарядным устройством АБ, что позволяет обеспечивать необходимый зарядный ток для неё.



Условные обозначения  
(В-выпрямитель, АБ-аккумуляторная батарея,  
ИНВ – инвертор, Тр – трансформатор, S1-S2 коммутационные ключи)

Рисунок 1.6 – Блок-схема ИБП On-line типа с трансформатором

Применение трансформатора в данном типе ИБП снижает его общий КПД, но при определенном алгоритме управления инвертора, таком как, пространственно-векторная модуляция, КПД данного типа может достигать 92-93%. Использование трансформатора в данном типе ИБП обеспечивает отсутствие постоянной составляющей в выходном напряжении, а также наличие трансформатора обеспечивает гальваническую развязку, что является большими преимуществами.

Проанализировав преимущества и недостатки двух вариантов построения ИБП On-Line типа, выбираем ИБП без трансформатора. Основными преимуществами ИБП без трансформатора являются меньшие габаритные размеры и масса, упрощенная конструкция.

Среди производителей ИБП с двойным преобразованием энергии получили распространение следующий ряд номинальных мощностей [4]:

- однофазные ИБП малой мощности: 1; 1,5; 3 кВА;
- однофазные ИБП средней мощности: 6, 10, 15, 20 кВА;
- ИБП с трехфазным входом и однофазным выходом средней мощности: 10, 15, 20, 30 кВА;
- трехфазные ИБП средней мощности: 10, 15, 20, 30 кВА;
- трехфазные ИБП большой мощности: более 30 кВА.

Согласно техническому заданию ( $S=10$  кВА), проектируем ИБП средней мощности с трехфазным входом и однофазным выходом.

Рассмотрим структурные и функциональные схемы ИБП средней мощности, которые наиболее распространены в настоящее время.

Условные обозначения, используемые на структурных схемах:

ККМ – корректор коэффициента мощности;

ККМ–В – корректор коэффициента мощности – выпрямитель;

ВФ – входной фильтр;

В, ВПР – выпрямитель;

ИНВ – инвертор;

ЗУ – зарядное устройство;

ВИП – вторичный источник питания;

АБ – аккумуляторная батарея;

БК – блок коммутации;

ДЗУ – дополнительная плата зарядного устройства.

На рисунке 1.7 показана структурная схема ИБП с двойным преобразованием в общем виде.

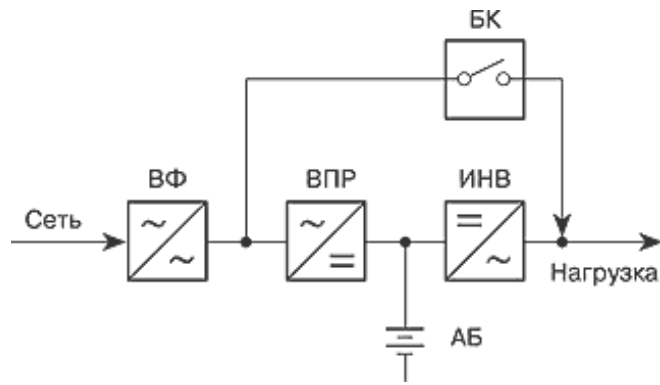


Рисунок 1.71 – Структурная схема ИБП с двойным преобразованием в общем виде

На рисунке 1.8 показана структурная схема ИБП малой мощности.

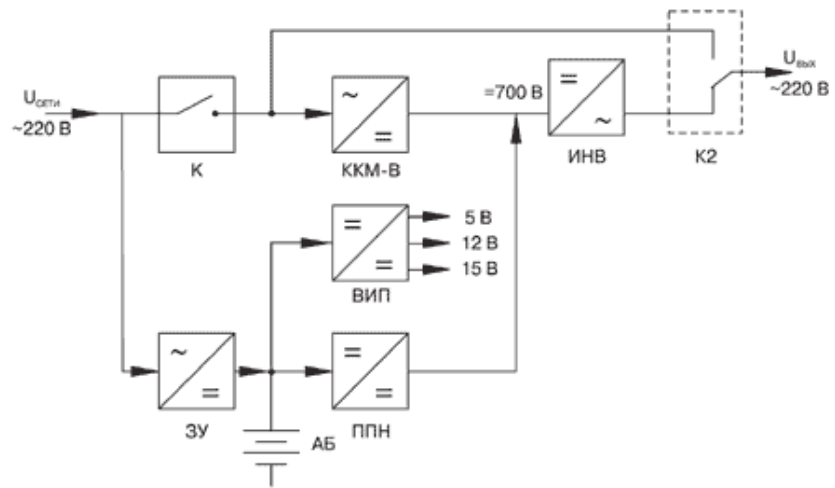


Рисунок 1.8 – Структурная схема ИБП малой мощности

На рисунке 1.9 показана Структура ИБП с двойным преобразованием и корректором коэффициента мощности для ИБП средней мощности.

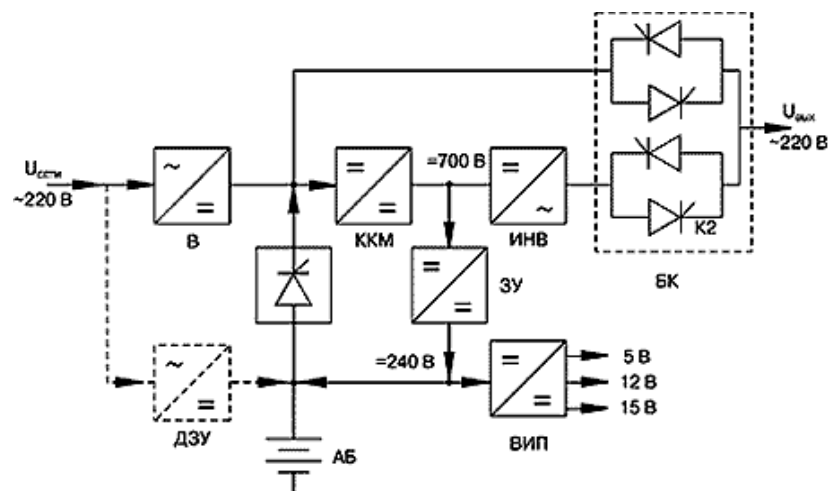


Рисунок 1.9 – Структура ИБП с двойным преобразованием

и корректором коэффициента мощности для ИБП средней мощности

Структурная схема силовой цепи ИБП средней мощности отличается от ИБП малой мощности применением двухтактной схемы ККМ, статическим блоком коммутации, выполненным на тиристорах, и цепью подключения АБ с помощью тиристора. Принципиальной особенностью структуры ИБП средней мощности является то, что повышение напряжения аккумуляторной батареи (АБ) для питания инвертора осуществляется с помощью ККМ, исключая использование дополнительного преобразователя постоянного напряжения (ППН), по сравнению со структурой ИБП малой мощности. Этот метод позволяет повысить общий коэффициент полезного действия (К.П.Д.) ИБП.

На рисунке 1.10 показана структурная схема ИБП с двойным преобразователем средней мощности.

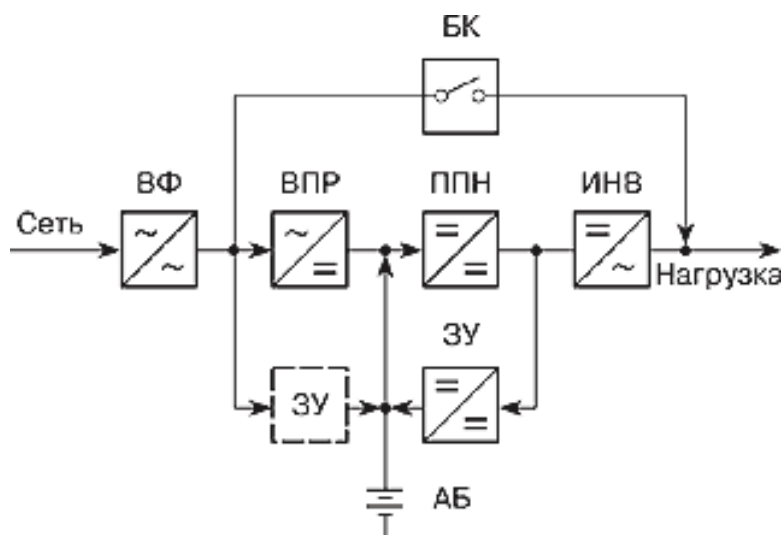


Рисунок 1.10 – Структурная схема ИБП с двойным преобразователем средней мощности

Последняя схема используется как для однофазных, так и для трехфазных ИБП мощностью 6 – 30 кВА. Здесь ППН выполняет как функцию ККМ, так и функцию стабилизатора напряжения питания инвертора. Вход ЗУ может питаться как сетевым напряжением, так и стабильным постоянным напряжением с выхода ППН [5].



## 2 Структурная схема разрабатываемого источника бесперебойного питания

Используемый ИБП будет выполнен по технологии On-line типа с режимом ручного Ву-pass. Структурная схема разрабатываемого ИБП приведена на рисунке 1.11.

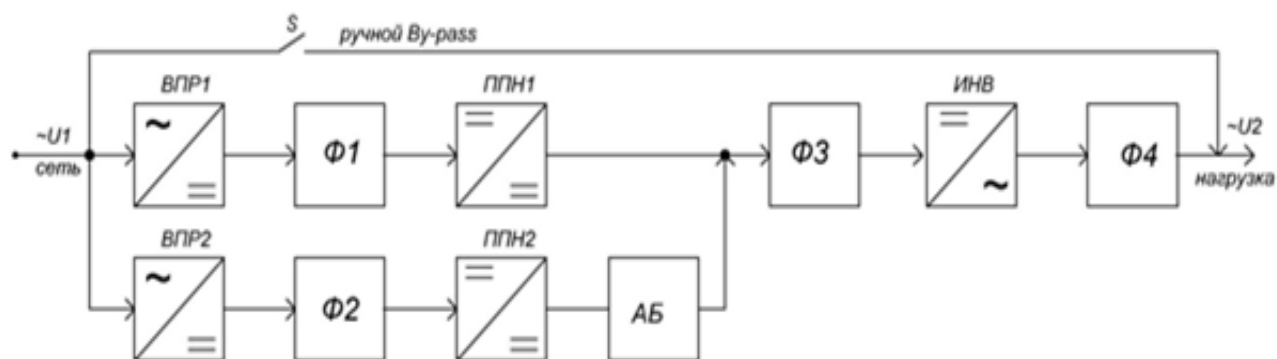


Рисунок 1.5 – Структурная схема рассматриваемого ИБП

В сетевом режиме работы, питание нагрузки будет осуществляться по цепи «СЕТЬ-ВПР1-Ф1-ППН1-Ф3-ИНВ-Ф4-НАГРУЗКА». Параллельно будет происходить зарядка АБ и, в дальнейшем, батарея будет находиться в режиме ожидания. В данной схеме будет применен трехуровневый инвертор, так как он обеспечивает синусоиду выходного напряжения, максимально приближенную к идеальной.

В случае потери питающего напряжения, инвертор начинает работать в аварийном режиме. Основная цепь питания при этом обесточивается. Автоматически, без разрыва питающей синусоиды, происходит переключение на аварийное питание от аккумуляторной батареи, находящейся в режиме ожидания. Цепь питания будет выглядеть так: «АБ-Ф3-ИНВ-Ф4-НАГРУЗКА». За счет особенностей используемого инвертора, подключение батарей происходит последовательно-параллельно по отношению друг к другу.

Предложенный способ подключения позволяет в каждый полупериод питать отдельный мост инвертора.

## 2 Расчет и выбор элементов силовой части ИБП

### 2.1 Расчет параметров входной сети и нагрузки

Номинальное напряжение питающей сети равно:

$$U_{c \text{ ном}} = 220 \text{ В.}$$

Согласно техническому заданию напряжение питающей сети  $U_{c \text{ макс}}$  и  $U_{c \text{ мин}}$  определяем по формуле:

$$U_{c \text{ макс}} = U_{c \text{ ном}} + 0,15 \cdot U_{c \text{ ном}} = 220 + 33 = 253 \text{ В,} \quad (1)$$

$$U_{c \text{ мин}} = U_{c \text{ ном}} - 0,15 \cdot U_{c \text{ ном}} = 220 - 33 = 187 \text{ В.} \quad (2)$$

Номинальное, максимальное и минимальное напряжение нагрузки:

$$U_{\text{ном}} = 220 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ном макс}} = U_{\text{ном}} + 0,03 \cdot U_{\text{ном}} = 220 + 6,6 = 226,6 \text{ В,} \quad (3)$$

$$U_{\text{ном мин}} = U_{\text{ном}} - 0,03 \cdot U_{\text{ном}} = 220 - 6,6 = 213,4 \text{ В.} \quad (4)$$

Максимальный и минимальный ток нагрузки равны:

$$I_{\text{ном макс}} = \frac{P_{\text{макс}}}{U_{\text{ном мин}}} = \frac{S \cdot \cos_{\text{макс}} \varphi}{U_{\text{ном мин}}} = \frac{10000 \cdot 0,99}{213,4} = 46,4 \text{ А;} \quad (5)$$

$$I_{\text{ном мин}} = \frac{P_{\text{макс}}}{U_{\text{ном макс}}} = \frac{S \cdot \cos_{\text{макс}} \varphi}{U_{\text{ном макс}}} = \frac{10000 \cdot 0,99}{226,6} = 43,7 \text{ А.} \quad (6)$$

### 2.2 Выбор аккумуляторных батарей

Напряжение заряда моноблочной батареи, состоящей из 6 секций, составляет 14В, напряжение разряда 11В. Оптимальным током заряда аккумуляторных батарей считается ток, соответствующий 10% от номинальной емкости АБ. Нормальный заряд длится порядка 10 часов. Для ускорения процесса зарядки можно увеличить ток заряда до 20% от номинальной емкости АБ. Током большим 10% от емкости заряжать не следует, для избегания перегревов и потери активной массы пластин.

При последовательном соединении батарей одинаковой емкости общая емкость батарейного блока не меняется. Если требуется увеличить суммарную емкость или получить больший ток разряда, применяется параллельное соединение, при котором напряжение батареи не увеличивается.

В ИБП on-line типа аккумуляторные батареи постоянно подзаряжаются от сети без перезарядки. Уменьшение зарядного тока происходит после того, когда напряжение на выводах батареи перестает повышаться. Это говорит о том, что батарея автоматически регулирует процесс заряда и не создает дополнительных требований к устройству зарядного устройства.

Амплитуду первой гармоники напряжения на нагрузке определяем по формуле:

$$U_{m \text{ ном}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ном макс}} = \sqrt{2} \cdot 226,6 = 320,46 \text{ В.} \quad (7)$$

Для дальнейшего расчета максимальный коэффициент модуляции инвертора  $M_{\text{макс}}$  примем равным 0,95, а потери напряжения в силовых ключах  $\Delta U_{\text{ключ}}$  равными 2,5 В.

Падение напряжения на входном реакторе определяем по формуле:

$$\Delta U_L = 0,01 \cdot U_{\text{с ном}} = 0,01 \cdot 220 = 2,2 \text{ В.} \quad (8)$$

Определяем напряжение входа инвертора, которое соответствует напряжению разряда аккумуляторных батарей по формуле:

$$U_{d \text{ макс}} = U_{\text{бр}} = \frac{U_{m \text{ ном}} + 2 \cdot \Delta U_{\text{ключ}} + \Delta U_L}{M_{\text{макс}}} = \frac{320,46 + 2 \cdot 2,5 + 2,2}{0,95} = 344,91 \text{ В.} \quad (9)$$

Необходимое число батарей определяем по формуле:

$$N = \frac{U_{\text{бр}}}{11} = \frac{344,91}{11} = 31,36 \approx 32 \text{ шт.} \quad (10)$$

Определяем максимальную мощность на нагрузке по формуле:

$$P_{\text{н макс}} = S \cdot \cos_{\text{макс}} \varphi = 10000 \cdot 0,8 = 8000 \text{ Вт,} \quad (11)$$

где  $S$  – номинальная мощность ИБП;

$\varphi$  – коэффициент мощности для локальной вычислительной сети, представляющей собой компьютерное оборудование (рабочие станции, маршрутизаторы, коммутаторы, роутеры, сервер) примем равным 0,8 [6].

КПД инвертора  $\mu_{\text{инв}}$  примем равным 0,95.

Мощность разряда батареи определяем по формуле:

$$P_{\text{бр макс}} = \frac{P_{\text{н макс}}}{\mu_{\text{инв}}} = \frac{8000}{0,95} = 8421 \text{ Вт.} \quad (12)$$

Максимальный ток разряда батареи определяем по формуле:

$$I_{\text{бр макс}} = \frac{P_{\text{бр макс}}}{N \cdot U_{\text{разр}}} = \frac{8421}{32 \cdot 11} = 24,42 \text{ А.} \quad (13)$$

Определяем ёмкость батареи по формуле:

$$I_{\text{бр макс}} \cdot t_{\text{авт раб}} = 24,42 \cdot 0,167 = 4,07 \text{ Ач,} \quad (14)$$

где  $t_{\text{авт раб}}$  равно  $10/60=0,167$ .

Таким образом, для обеспечения автономной работы ИБП в течение 10 минут необходимо выбрать аккумуляторную батарею, которая выдаст расчетный ток разряда равный 24,42 А.

Выбираем аккумуляторную батарею Sonnenshein A412/20, которая способна в течение 10 минут выдавать ток разряда равный 25 А [7]. Технические характеристики, и габаритные параметры выбранной аккумуляторной батареи приведены в приложении А.

В таблице 2.1 приведены значения тока разряда выбранной батареи в зависимости от времени.

Таблица 2.1 – Разряд выбранной батареи при постоянном токе при 20°C

$V_{\text{pc}}$	5мин	10 мин	15 мин
1,85	33	25	22
1,80	36	27	23
1,75	45	34	27

Находим уточненное количество батарей по формуле:

$$N = \frac{U_{\text{бр}}}{11,1} = \frac{344,91}{11,1} = 31,07 \approx 32 \text{ шт.} \quad (15)$$

а ток заряда батареи определяем по формуле:

$$I_{\text{бзар}} = \frac{Q_{10}}{10} = \frac{20}{10} = 2 \text{ А.} \quad (16)$$

Мощность зарядного устройства на выходе вычисляем по формуле:

$$P_{з\text{у}} = I_{\text{бз\text{ар}}} \cdot N \cdot U_{\text{бз\text{ар}}} = 2 \cdot 32 \cdot 14 = 896 \text{ Вт.} \quad (17)$$

### 2.3 Расчет инвертора напряжения

В ИБП, для формирования выходного напряжения, используется инвертор. Чтобы выходное напряжение имело высокое качество, инвертор должен иметь качественную сборку и электрическую схему. При разработке ИБП, для формирования напряжения, используется три уровня напряжения: напряжение на одном конденсаторе, нулевой уровень и напряжение на двух последовательно соединенных конденсаторах. Из-за деления напряжения, рассматриваемый инвертор называется трехуровневым. Схема такого инвертора приведена на рисунке 2.1.

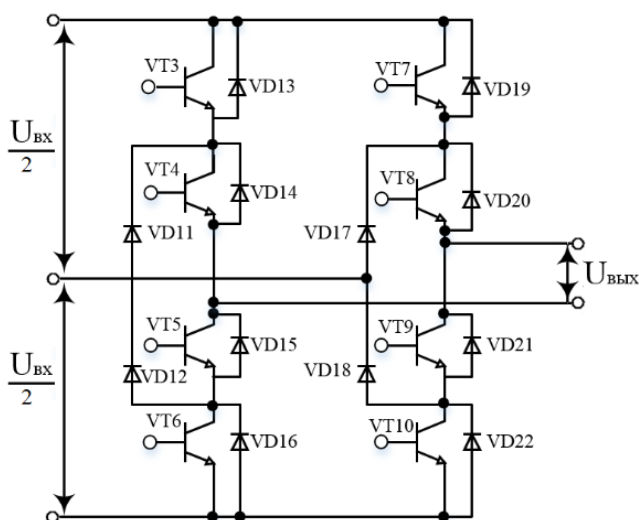


Рисунок 2.1 – Инвертор постоянного напряжения

Трехуровневый инвертор имеет ряд преимуществ, которые были учтены при выборе схемы построения инвертора:

- при работе инвертора, в режиме синусоидальной ШИМ, обеспечиваются наименьшие искажения тока и напряжения нагрузки;

- имеется возможность использовать сравнительно низковольтные элементы в схеме (конденсаторы, транзисторные сборки), при повышенном напряжении как на входе, так и на выходе инвертора;

- при работе инвертора, в режиме синусоидальной ШИМ, в полупроводниковых элементах, минимальные динамические потери.

Расчет инвертора напряжения сводится к выбору IGBT со встроенными обратными диодами. Элементы выбираются по максимальному току коллектора с учетом крест-фактора и напряжению на коллекторе. Коэффициент запаса примем равным 1,5 [4].

Во время работы инвертора к закрытому транзистору прикладывается напряжение звена постоянного тока, исключая напряжение перехода коллектор-эмиттер открытого транзистора. Значение падения напряжения на открытом IGBT принимается равным  $U_{к-энас} = 1.7..2.8(V)$

Крест-фактор нагрузки (Crest Factor) – показатель, характеризующий ИБП способностью обеспечивать питанием нелинейную нагрузку, потребляющую нелинейный импульсный ток. Определяется как отношение амплитуды импульсного тока в нелинейной нагрузке к амплитуде тока гармонической формы при эквивалентной потребленной мощности. Для нагрузки локальной вычислительной сети, крест-фактор (CF) принимают равным 3 [10].

Обратное напряжение на транзисторе определяем по формуле:

$$U_{к-э макс} = U_{бр} - U_{к-э нас} = U_{d макс} - U_{к-э нас} = 344,91 - 2,5 = 342,41 \text{ В.} \quad (18)$$

Максимальный коллекторный ток с учетом крест-фактора равен:

$$I_{к макс} = \sqrt{2} \cdot I_{ном макс} \cdot CF = \sqrt{2} \cdot 46,39 \cdot 3 = 196,82 \text{ А;} \quad (19)$$

Выбираем IGBT модуль CM200DY-12H Mitsubishi Electric Semiconductor. Принимаем 4 полумоста [9]. Дополнительные данные по выбранным модулям представлены в приложении Б.

Протекание тока через диоды нулевой точки подразумевает его загруженность только половиной нагрузки тока транзистора. Но в случае

выхода из строя одного из транзисторов, вся нагрузка будет приходиться на диод. В связи с этим выбираем диод с запасом по току и напряжению.

## 2.4 Расчет фильтра на выходе инвертора напряжения

Расчет фильтра на выходе инвертора напряжения производим по методу наложения.

На рисунке 2.2 показана схема рассчитываемого фильтра на входе инвертора постоянного напряжения.

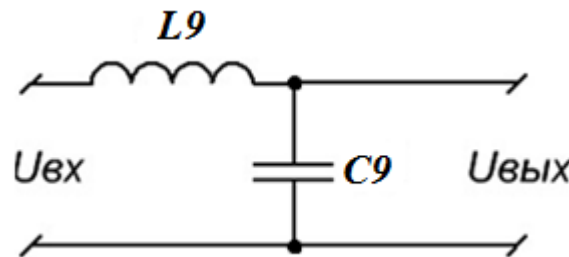


Рисунок 2.2 – Схема рассчитываемого фильтра на входе инвертора постоянного напряжения

Приведем ниже схемы замещения инвертора при использовании метода наложения для расчета Г-образного фильтра, учитывая, что  $U_{(1)}$  – источник первой полезной гармоники;  $U_{(n)}$  – источник остальных гармоник.

На рисунке 2.3 показаны схемы замещения инвертора при использовании метода наложения.

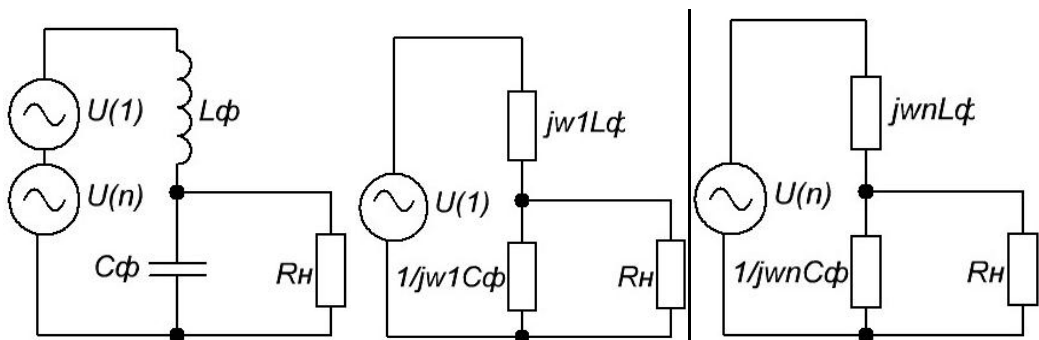


Рисунок 2.3 – Схемы замещения инвертора при использовании метода наложения

На рисунке 2.4 приведена векторная диаграмма токов и напряжений.

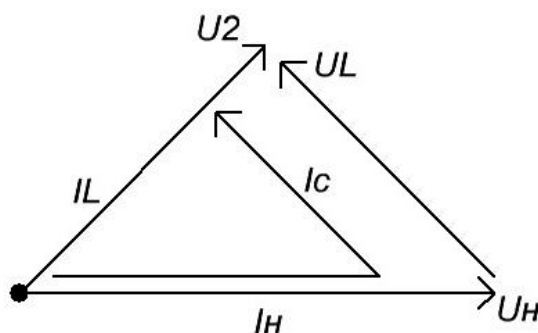


Рисунок 2.4– Векторная диаграмма токов и напряжений

Выходной фильтр инвертора служит для выделения первой гармоники выходного напряжения и ослабления высших гармоник.

Для расчета индуктивности падение напряжения на ней примем равным  $U_{L(1)} = 2,3$  В,  $I_{L(1)}$  – первая гармоника тока нагрузки.

Реактивное сопротивление индуктивности определяем по формуле:

$$X_{L(1)} = \frac{U_{L(1)}}{I_{L(1)}} = \frac{2,3}{46,39} = 0,05 \text{ Ом.} \quad (20)$$

Индуктивность фильтра определяем по формуле:

$$L_{\phi} = \frac{X_{L(1)}}{\omega} = \frac{0,05}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,193 \text{ мГн.} \quad (21)$$

Через емкость будет протекать ток равный 20 % от тока нагрузки:

$$I_{H \text{ ном}} = \frac{S}{U_{H \text{ ном}}} = \frac{10000}{220} = 45,46 \text{ А;} \quad (22)$$

$$I_C = 0,2 \cdot I_{H \text{ ном}} = 0,2 \cdot 45,46 = 9,09 \text{ А.} \quad (23)$$

Ток через индуктивность, исходя из векторной диаграммы, представленной на рисунке 3.4, будет равен:

$$I_{L \phi} = \sqrt{I_C^2 + I_{H \text{ ном}}^2} = \sqrt{9,09^2 + 45,46^2} = 46,36 \text{ А.} \quad (24)$$

Индуктивное сопротивление фильтра определяем по формулам:

$$X_{L \phi} = \frac{U_{L(1)}}{I_{L \phi}} = \frac{2,3}{46,36} = 0,05 \text{ Ом;} \quad (25)$$

$$L_{\phi} = \frac{X_{L \phi}}{\omega} = \frac{0,05}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 158 \text{ Ом.} \quad (26)$$

Потери в реакторе определяем по формулам:

$$\Delta P_L = 0,01 \cdot P_{\text{макс}} = 0,01 \cdot 8000 = 80 \text{ Вт;} \quad (27)$$



$$R_L = \frac{\Delta P_L}{I_{H \text{ ном}}^2} = \frac{80}{45,46^2} = \frac{80}{2066} = 0,039 \text{ Ом.} \quad (28)$$

Обойдем получившиеся контура и запишем расчетные уравнения:

$$I_{C\phi} = \frac{U_{(n)}(j\omega)}{X_{L\phi} + \frac{X_{C\phi} \cdot R_H}{X_{C\phi} + R_H}}; \quad (29)$$

$$I_{C\phi} = \frac{U_{(n)}(j\omega) - U_H(j\omega)}{X_{L\phi}} = \frac{U_{(n)}(j\omega) - k_{\Gamma} U_{(n)}(j\omega)}{X_{L\phi}} = \frac{U_{(n)}(j\omega)(1 - k_{\Gamma})}{X_{L\phi}}. \quad (30)$$

Приравниваем выражения и выражаем  $X_{C\phi}$ :

$$X_{C\phi} = \frac{X_{L\phi} \cdot k_{\Gamma} \cdot R_H}{(1 - k_{\Gamma}) \cdot R_H - X_{L\phi} \cdot k_{\Gamma}} \quad (31)$$

Определяем номинальное сопротивление нагрузки:

$$R_H = \frac{U_{H \text{ ном}}}{I_{H \text{ ном}}} = \frac{220}{45,46} = 4,84 \text{ Ом.} \quad (32)$$

Определяем  $X_{L\phi}$  на реальной частоте коммутаций принятой 25 кГц, что соответствует частоте коммутаций IGBT модулей по формуле:

$$X_{L\phi} = \omega_k \cdot L_{\phi} = 2 \cdot \pi \cdot 25000 \cdot 158 \cdot 10^{-6} = 24,81 \text{ Ом;} \quad (33)$$

$$X_{C\phi} = \frac{X_{L\phi} \cdot R_H \cdot 0,03}{(1 - 0,03) \cdot R_H - X_{L\phi} \cdot 0,03} = \frac{24,81 \cdot 4,84 \cdot 0,03}{(1 - 0,03) \cdot 4,84 - 24,81 \cdot 0,03} = 0,92 \text{ (Ом);} \quad (33)$$

$$C_{\phi} = \frac{1}{\omega_k \cdot X_{C\phi}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 25000 \cdot 0,92} = 7 \text{ мкФ.} \quad (34)$$

Используя справочные данные, выбираем высокочастотный конденсатор К78-36 [10]. Технические характеристики приведены в приложении В.

## 2.5 Расчет импульсного преобразователя постоянного напряжения №1

Импульсный преобразователь постоянного напряжения №1 на схеме выполняет функцию стабилизации напряжения питания инвертора. На рисунке 2.5 показана схема рассчитываемого преобразователя напряжения.

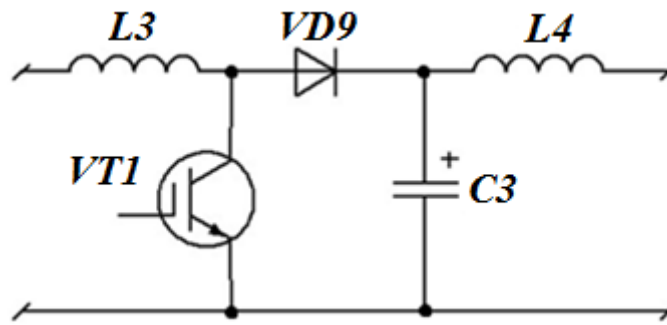


Рисунок 2.5 – Схема рассчитываемого преобразователя напряжения

Элемент  $L3$  накапливает энергию для компенсации напряжения на емкости  $C3$ , в случае, если  $C3$  зарядился не до напряжения сети.

Повышающий преобразователь работает в режиме непрерывных токов, т.к. в этом режиме пульсаций напряжения на выходе преобразователя меньше, чем в режиме прерывистых токов.

Определяем максимальное и минимальное напряжение на входе импульсного преобразователя с учетом потерь в выпрямителе по формулам:

$$U_{d \max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \max} - \Delta U_{\text{пп}} = 0,9 \cdot 253 - 2 = 226 \text{ В} \quad (35)$$

$$U_{d \min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \min} - \Delta U_{\text{пп}} = 0,9 \cdot 187 - 2 = 166 \text{ В.} \quad (36)$$

Определяем коэффициент передачи (преобразования) по формулам:

$$k_{\text{пер max}} = \frac{U_{\text{бзар max}}}{U_{d \min}} = \frac{14 \cdot 32}{166} = \frac{448}{133} = 2,69; \quad (37)$$

$$k_{\text{пер min}} = \frac{U_{\text{браз min}}}{U_{d \max}} = \frac{344,91}{226} = 1,53. \quad (38)$$

Рассчитаем относительную длительность открытого состояния транзистора по формулам:

$$\gamma_{\max} = 1 - \frac{U_{d \min}}{U_{\text{бзар max}}} = 1 - \frac{166}{448} = 0,63; \quad (39)$$

$$\gamma_{\min} = 1 - \frac{U_{d \max}}{U_{\text{бз min}}} = 1 - \frac{226}{344,91} = 0,37. \quad (40)$$

Принимаем КПД преобразователя равным 0,95, частоту коммутации силового ключа равной 25 кГц, а коэффициент пульсаций равным 0,2.

Ток на входе импульсного преобразователя необходимо рассчитывать, обеспечивая необходимую мощность инвертора.

Мощность на входе инвертора определяем по формуле:

$$P_{d \text{ инв}} = P_{\text{вых ип}} = \frac{P_{\text{н max}}}{\mu_{\text{инв}}} = \frac{8000}{0,95} = 8421 \text{ Вт.} \quad (41)$$

Мощность на входе импульсного преобразователя равна:

$$P_{\text{вх ип}} = \frac{P_{\text{вых ип}}}{\mu_{\text{ип}}} = \frac{8421}{0,95} = 8864 \text{ Вт.} \quad (42)$$

Максимальный ток на входе импульсного преобразователя определяем по формуле:

$$I_{\text{вх ип max}} = \frac{P_{\text{вх ип}}}{U_{d \text{ min}}} = \frac{8864}{166} = 53,28 \text{ А.} \quad (43)$$

Интервал времени, соответствующий открытому состоянию транзистора, определяем по формуле:

$$L_3 \frac{dI_{L3}}{dt} = U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}. \quad (44)$$

Ток будет изменяться от минимума до максимума в течении времени  $t$  по следующему закону:

$$I_{L3}(t) = \frac{U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_3} t + I_{L3 \text{ max}}. \quad (45)$$

Ток в реакторе увеличивается и уменьшается в зависимости от состояния ключа, изменяясь от начального значения до максимального:

$$I_{L3 \text{ max}} = I_{L3}(\gamma T) = \frac{U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_3} \gamma T + I_{L3 \text{ min}}. \quad (46)$$

Запишем выражения с учетом принятой величины пульсаций:

$$I_{L3 \text{ min}} = 0,8 \cdot I_{L3 \text{ ср}}; \quad (47)$$

$$I_{L3 \text{ max}} = 1,2 \cdot I_{L3 \text{ ср}}. \quad (48)$$

Получаем следующие выражения:

$$1,2 \cdot I_{L3 \text{ ср}} = \frac{U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_3} \gamma T + 0,8 \cdot I_{L3 \text{ ср}}; \quad (49)$$

$$\frac{U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_3} = \frac{1,2 \cdot I_{L3 \text{ ср}} - 0,8 \cdot I_{L3 \text{ ср}}}{\gamma T}; \quad (50)$$

$$L_3 = \frac{(U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}) \cdot \gamma T}{0,4 \cdot I_{L3 \text{ ср}}}. \quad (51)$$

Для расчета индуктивности примем вариант самого тяжелого режима:

$\gamma, U_{d \text{ вып}}, I_{L3 \text{ ср}}, L_3$  – принимаем максимально возможные значения.

$$L_3 \max = \frac{(U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}) \cdot \gamma_{\max} T}{0,4 \cdot I_{L3 \text{ ср max}}} = \frac{(166-2) \cdot 0,63}{0,4 \cdot 25000 \cdot 53,28} = 0,31 \text{ мкГн}; \quad (52)$$

$$I_{L3 \text{ ср max}} = I_{\text{вх ип max}} = 53,28 \text{ А}. \quad (53)$$

Определяем ток, протекающий через диод VD9:

$$I_{VD9 \text{ ср}} = I_{L3 \text{ ср max}} \cdot (1 - \gamma_{\min}) = 53,28 \cdot (1 - 0,37) = 34,88 \text{ А}; \quad (54)$$

Определяем напряжение диода VD9:

$$U_{VD9 \text{ max}} = U_{\text{бз max}} = 448 \text{ В}; \quad (55)$$

Определяем ток, протекающий через транзистор VT1:

$$I_{VT1 \text{ max}} = I_{L3 \text{ ср max}} \cdot (1 + k_{\text{п}}) = 53,28 \cdot (1 + 0,2) = 63,94 \text{ А}; \quad (56)$$

Определяем напряжение транзистора VT1 по формуле:

$$U_{VT1 \text{ max}} = U_{\text{бз max}} + U_{VD9 \text{ пр}} = 448 + 1 = 449 \text{ В}; \quad (57)$$

Выбираем IGBT транзистор HG TG20N60A4 компании «Fairchild Semiconductor» с параметрами  $U_{\text{к-э макс}} = 600 \text{ В}$ ,  $I_{\text{к макс}} = 70 \text{ А}$ ,  $f_{\text{ком}} = 30 \text{ кГц}$ .  
Дополнительная информация приведена в приложении Г и [10].

Выбираем быстродействующий диод VS-40EPF06PBF компании «Vishay». Технические параметры и дополнительная информация приведена в приложении Д и [10].

Расчет конденсатора.

Пульсационную составляющую тока определяем по формуле:

$$\Delta I_{\text{сз}} = I_{VT1 \text{ max}} - I_{VD9 \text{ ср}} = 63,94 - 34,88 = 29,06 \text{ А}. \quad (58)$$

Напряжение в режиме заряда определяем по формулам:

$$U_{\text{сз}} = U_{\text{бз max}} = 448 \text{ В}; \quad (59)$$

$$\Delta U_{\text{сз}} = k_{\text{п}} \cdot U_{\text{сз}} = 0,02 \cdot 448 = 8,96 \text{ В}; \quad (60)$$

$$C_3 = \frac{\Delta I_{\text{сз}} \cdot \gamma_{\max}}{\Delta U_{\text{сз}} \cdot f_{\text{ком}}} = \frac{29,06 \cdot 0,63}{8,96 \cdot 30000} = 67,97 \text{ мкФ}; \quad (61)$$

Выбираем конденсатор ЕСАР (К50-35) [10]. Параметры выбранного конденсатора:  $C_{\text{ном}} = 100 \text{ мкФ}$ ,  $U_{\text{ном}} = 450 \text{ В}$ . Подробные характеристики приведены в приложении Е.

$$\Delta U_{\text{сз}} = \frac{\Delta I_{\text{сз}}}{C_3 \cdot 2\pi f_{\text{ком}}} = \frac{29,06}{67,97 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 30000} = 2,27 \text{ В}; \quad (62)$$

Ток через реактор определяем по формуле:

$$I_{L4} = I_{б3} + I_{браз max} = 2 + 24,42 = 26,42 \text{ А.} \quad (63)$$

Примем  $k_{\Pi}$  тока реактора = 0,05.

$$\Delta I_{L4} = k_{\Pi} \cdot I_{L4} = 0,05 \cdot 26,42 = 1,32 \text{ А;} \quad (64)$$

$$\Delta U_{L4} = \Delta U_{c3} = 2,27 \text{ В;} \quad (65)$$

$$X_{L4} = \frac{\Delta U_{L4}}{\Delta I_{L4}} = \frac{2,26}{1,32} = 1,72 \text{ Ом;} \quad (66)$$

$$L_4 = \frac{X_{L4}}{2\pi f_{КОМ}} = \frac{1,72}{2 \cdot 3,14 \cdot 30000} = 9,11 \text{ мкГн;} \quad (67)$$

$$\Delta P_{L4} = 0,005 P_2 = 0,005 \cdot 8000 = 40 \text{ Вт;} \quad (68)$$

$$R_{L4} = \frac{\Delta P_{L4}}{I_{L4}^2} = \frac{40}{26,42^2} = \frac{40}{697,78} = 0,06 \text{ Ом.} \quad (69)$$

## 2.6 Расчет неуправляемого выпрямителя №1

Согласно техническому заданию, номинальное входное напряжение составляет 220 В переменного тока. На рисунке 2.6 показана схема рассчитываемого неуправляемого выпрямителя.

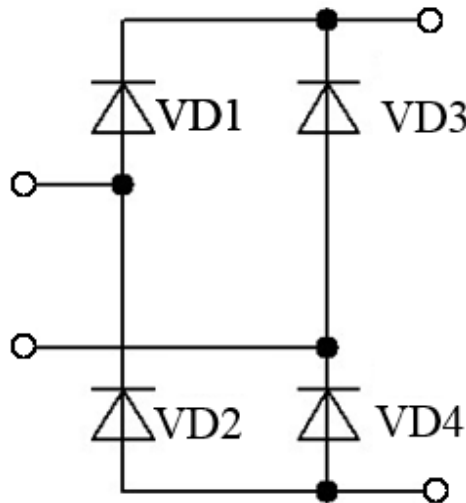


Рисунок 2.6 – Схема рассчитываемого неуправляемого выпрямителя

Максимальное и минимальное выпрямленное напряжение определим по формулам:

$$U_{d max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{c max} - \Delta U_B = 0,9 \cdot 253 - 2 = 226 \text{ В;} \quad (70)$$

$$U_{d min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{c min} - \Delta U_B = 0,9 \cdot 187 - 2 = 166 \text{ В;} \quad (71)$$

Максимальный ток через диод определяем по формулам:

$$I_{d \max} = I_{L1} = I_{L2} = \frac{P_{\text{вх ип}}}{U_{d \min}} = \frac{8864}{166} = 53,28 \text{ А}; \quad (72)$$

$$I_{d \text{ ср}} = \frac{I_{d \max}}{2} = \frac{53,28}{2} = 26,64 \text{ А}. \quad (73)$$

Максимальное обратное напряжение на диодах определяем по формуле:

$$U_{VD \max} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{d \max} = \sqrt{2} \cdot U_{c \max} = 1,41 \cdot 253 = 357,8 \text{ В}. \quad (74)$$

Выбираем быстродействующий диод FFH60UP40S фирмы «Fairchild Semiconductor» [10]. Подробные технические характеристики выбранного диода представлены в приложении Ж.

## 2.7 Расчет сглаживающего фильтра на выходе выпрямителя

Индуктивность фильтра выбирается из заданного числа пульсаций в номинальном режиме. При уменьшении тока нагрузки переходим в режим прерывистых токов, в котором относительные пульсации тока достигают больших значений. На рисунке 2.7 приведена схема рассчитываемого фильтра.

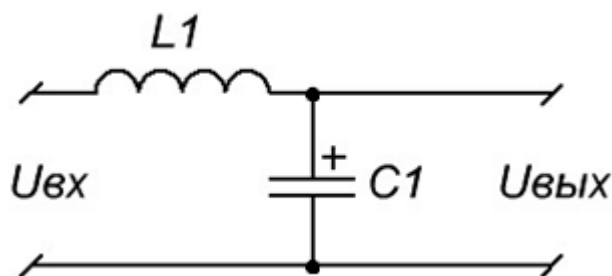


Рисунок 2.7 – Схема рассчитываемого фильтра

Задаем коэффициент пульсации  $k_{\text{п}}$  равным 0,2 и определяем пульсацию тока выпрямителя по формуле:

$$I_{d(1)} = k_{\text{п}} \cdot I_{d \max} = 0,2 \cdot 53,28 = 10,66 \text{ А}. \quad (75)$$

Для нахождения индуктивности определяем:

$$U_{d m(1)} = U_{d \max} \cdot \frac{2}{m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + m^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha} = 226 \cdot \frac{2}{2^2 - 1} \cdot \sqrt{1} = 150,52 \text{ В}; \quad (76)$$

$$X_{d(1)} = \frac{U_{d m(1)}}{I_{d(1)}} = \frac{150,52}{10,66} = 14,12 \text{ Ом}. \quad (77)$$

Определяем индуктивность дросселя по формуле:

$$L_d = \frac{X_{d(1)}}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{14,12}{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 22 \text{ мГн.} \quad (78)$$

Определяем потери:

$$\Delta P_{Ld} = 0,01 \cdot P_H = 0,01 \cdot 8000 = 80 \text{ Вт.} \quad (79)$$

Определяем сопротивление реактора:

$$R_{Ld} = \frac{\Delta P_{Ld}}{I_d^2} = \frac{80}{53,28^2} = \frac{80}{2839} = 0,028 \text{ Ом.} \quad (80)$$

Задаем  $k_{nc} = 0,02$  для напряжения на конденсаторе:

$$U_{c(1)} = k_{nc} \cdot U_{d \max} = 0,02 \cdot 226 = 4,52 \text{ В;} \quad (81)$$

$$X_c = \frac{U_{c(1)}}{I_{d(1)}} = \frac{4,52}{10,66} = 0,42 \text{ Ом.} \quad (82)$$

Определяем емкость конденсатора по формуле:

$$C = \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,42} = 3,756 \text{ мФ} = 3756 \text{ мкФ.} \quad (83)$$

Выбираем конденсатор ECAP (K50-35) B43456A9478M000 компании «Epcos» [10]. Параметры:  $C_{\text{НОМ}} = 4700 \text{ мкФ}$ ,  $U_{\text{НОМ}} = 400 \text{ В}$ .

Характеристики конденсатора приведены в приложении К.

## 2.8 Расчет фильтра на входе инвертора

Расчет фильтра на входе инвертора начинаем с определения пульсации тока для двухполупериодного выпрямителя по формуле:

$$I_{m(100 \text{ Гц})} = \frac{2}{3} \cdot I_{br \max} = 0,67 \cdot 24,42 = 16,28 \text{ А.} \quad (84)$$

Амплитуда пульсации напряжения для частоты 100 Гц.

Принимаем, что пульсации напряжения на входе инвертора равны 5%.

Тогда

$$U_{cm(100 \text{ Гц})} = 0,05 \cdot U_{\text{ВХ ИНВ}} = 0,05 \cdot 448 = 22,4 \text{ В.} \quad (85)$$

Емкостное сопротивление фильтра определяем по формуле:

$$X_{c(100 \text{ Гц})} = \frac{U_{cm(100 \text{ Гц})}}{I_{m(100 \text{ Гц})}} = \frac{22,4}{16,28} = 1,38 \text{ Ом.} \quad (86)$$

На рисунке 2.8 приведена схема рассчитываемого Г-образного LC-фильтра.

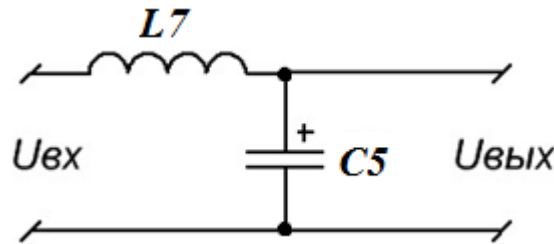


Рисунок 2.8 – Схема рассчитываемого Г-образного LC-фильтра

Выбираем конденсатор ЕСАР В43458-А9158-М компании «Epcos». Параметры:  $C_{ном} = 1500$  мкФ,  $U_{ном} = 400$  В [10]. Дополнительные параметры указаны в приложении Л.

Задаем пульсации тока на входе инвертора равными 5%.

Определяем переменную составляющую тока через индуктивность:

$$I_{L(100 \text{ Гц})} = 0,05 \cdot I_{бр max} = 0,05 \cdot 24,42 = 1,21 \text{ А.} \quad (87)$$

Реактивное сопротивление индуктивности определяем по формуле:

$$X_{L(100 \text{ Гц})} = \frac{U_{Lm(100\text{Гц})}}{I_{Lm(100\text{Гц})}} = \frac{22,4}{1,21} = 18,35 \text{ Ом.} \quad (88)$$

Определяем значение индуктивности по формуле:

$$L_{L(100 \text{ Гц})} = \frac{X_{L(100 \text{ Гц})}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{18,35}{2 \cdot 3,14 \cdot 100} = 29 \text{ мГн.} \quad (89)$$

Активное сопротивление индуктивности равно:

$$R_L = \frac{\Delta P}{I_{бр max}^2} = \frac{0,01 \cdot P_{браз}}{I_{бр max}^2} = \frac{0,01 \cdot 8864}{24,42^2} = \frac{88,64}{596,12} = 0,15 \text{ Ом.} \quad (90)$$

Для формирования выходного напряжения в рассматриваемом источнике бесперебойного питания используется трехуровневый инвертор, который имеет 3 уровня напряжения. Данный инвертор предполагает наличие средней точки, поэтому при построении входного фильтра для него необходимо это учесть. Входной фильтр будет состоять из двух Г-образных LC фильтров, входящих в каждое плечо инвертора. Подробный расчет первого плеча представлен выше, второе плечо фильтра будет идентично первому. Схема второго плеча фильтра представлена на рисунке 2.9.



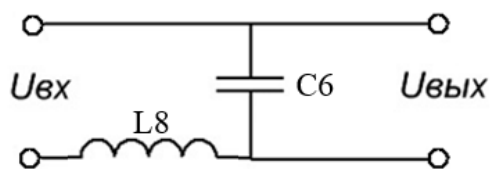


Рисунок 2.9 – Схема второго плеча Г-образного LC-фильтра на входе инвертора

## 2.9 Расчет импульсного преобразователя постоянного напряжения №2

Импульсный преобразователь постоянного напряжения №2 на схеме, приведенной на рисунке 2.10, выполняет функцию стабилизации напряжения питания АБ.

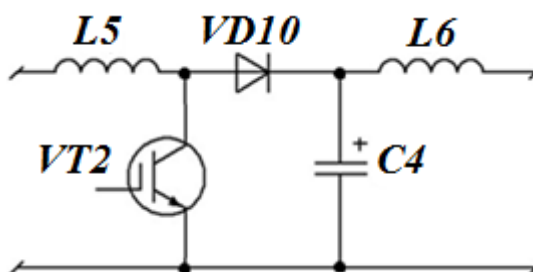


Рисунок 2.10 – Схема рассчитываемого преобразователя напряжения

Определяем максимальное и минимальное напряжение на входе импульсного преобразователя с учетом потерь в выпрямителе по формулам:

$$U_{d \max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \max} - \Delta U_{\text{пп}} = 0,9 \cdot 253 - 2 = 226 \text{ В}; \quad (91)$$

$$U_{d \min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{c \min} - \Delta U_{\text{пп}} = 0,9 \cdot 187 - 2 = 166 \text{ В}. \quad (92)$$

Определяем коэффициент передачи (преобразования) по формулам:

$$k_{\text{пер max}} = \frac{U_{\text{бзар max}}}{U_{d \min}} = \frac{448}{166} = 2,69; \quad (93)$$

$$k_{\text{пер min}} = \frac{U_{\text{браз min}}}{U_{d \max}} = \frac{344,91}{226} = 1,53. \quad (94)$$

Рассчитываем относительную длительность открытого состояния транзистора:

$$\gamma_{\text{max}} = 1 - \frac{U_{d \min}}{U_{\text{бзар max}}} = 1 - \frac{166}{448} = 0,63; \quad (95)$$

$$\gamma_{min} = 1 - \frac{U_{d\ max}}{U_{бз\ min}} = 1 - \frac{226}{344,91} = 0,37. \quad (96)$$

Задаем КПД преобразователя равным 0,95, частоту коммутации силового ключа равной 25 кГц, а коэффициент пульсаций равным 0,2.

Ток на входе импульсного преобразователя напряжения необходимо рассчитывать, обеспечивая мощность аккумуляторной батареи.

Мощность на выходе импульсного преобразователя определяем по формуле:

$$P_{\text{вых ип}} = P_{б\ зар} = I_{б\ зар} \cdot U_{бзар\ max} = 2 \cdot 448 = 896 \text{ Вт}. \quad (97)$$

Мощность на входе импульсного преобразователя определяем по формуле:

$$P_{\text{вх ип}} = \frac{P_{\text{вых ип}}}{\mu_{ип}} = \frac{896}{0,95} = 943,16 \text{ Вт}. \quad (98)$$

Максимальный ток на входе импульсного преобразователя определяем по формуле:

$$I_{\text{вх ип}\ max} = \frac{P_{\text{вх ип}}}{U_{d\ min}} = \frac{943,16}{166} = 5,67 \text{ А}. \quad (99)$$

Рассмотрим интервал времени, соответствующий открытому состоянию транзистора:

$$L_5 \frac{dI_{L5}}{dt} = U_{d\ \text{вып}} - \Delta U_{\text{пп}}. \quad (100)$$

Ток будет изменяться от минимума до максимума по следующему закону в течение времени  $t$ :

$$I_{L5}(t) = \frac{U_{d\ \text{вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_5} t + I_{L5\ max}. \quad (101)$$

Ток в реакторе увеличивается и уменьшается в зависимости от состояния ключа, изменяясь от начального значения до максимального:

$$I_{L5\ max} = I_{L5}(\gamma T) = \frac{U_{d\ \text{вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_5} \gamma T + I_{L5\ min}. \quad (102)$$

Запишем выражения с учетом принятой величины пульсаций:

$$I_{L5\ min} = 0,8 \cdot I_{L5\ ср}; \quad (103)$$

$$I_{L5\ max} = 1,2 \cdot I_{L5\ ср}. \quad (104)$$

Получаем следующие выражения:

$$1,2 \cdot I_{L5 \text{ ср}} = \frac{U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_5} \gamma T + 0,8 \cdot I_{L5 \text{ ср}}; \quad (105)$$

$$\frac{U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}}{L_5} = \frac{1,2 \cdot I_{L5 \text{ ср}} - 0,8 \cdot I_{L5 \text{ ср}}}{\gamma T}; \quad (106)$$

$$L_5 = \frac{(U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}) \cdot \gamma T}{0,4 \cdot I_{L5 \text{ ср}}}. \quad (107)$$

Для расчета индуктивности примем вариант самого тяжелого режима.

$\gamma, U_{d \text{ вып}}, I_{L5 \text{ ср}}, L_5$  – принимают максимально возможные значения.

$$L_{5 \text{ max}} = \frac{(U_{d \text{ вып}} - \Delta U_{\text{пп}}) \cdot \gamma_{\text{max}} T}{0,4 \cdot f \cdot I_{L5 \text{ ср max}}} = \frac{(166 - 2) \cdot 0,63}{0,4 \cdot 25000 \cdot 5,67} = 1823 \text{ мкГн}; \quad (108)$$

$$I_{L5 \text{ ср max}} = I_{\text{вх ип max}} = 5,67 \text{ А}; \quad (109)$$

Определяем ток, протекающий через диод VD10:

$$I_{VD10 \text{ ср}} = I_{L5 \text{ ср max}} \cdot (1 - \gamma_{\text{min}}) = 3,55 \cdot (1 - 0,3) = 2,49 \text{ (А)}; \quad (110)$$

Определяем напряжение диода VD10:

$$U_{VD10 \text{ max}} = U_{\text{бз max}} = 448 \text{ В}. \quad (111)$$

Определяем ток, протекающий через транзистор VT2:

$$I_{VT2 \text{ max}} = I_{L5 \text{ ср max}} \cdot (1 + k_{\text{п}}) = 5,67 \cdot (1 + 0,2) = 6,8 \text{ А}. \quad (112)$$

Определяем напряжение транзистора VT6:

$$U_{VT2 \text{ max}} = U_{\text{бз max}} + U_{VD10 \text{ пр}} = 448 + 1 = 449 \text{ В}. \quad (113)$$

Выбираем транзистор IGBT IRGB4607DPBF компании «International Rectifier» с параметрами  $U_{\text{к-э макс}} = 600 \text{ В}$ ,  $I_{\text{к макс}} = 7 \text{ А}$ ,  $f_{\text{ком}} = 30 \text{ кГц}$  [10]. Технические характеристики данного элемента приведены в Приложении М.

Выбираем ультрабыстрый диод HFA04TB60 [10]. С параметрами  $I_{\text{макс}} = 4 \text{ А}$ ,  $U_{\text{имп обр}} = 600 \text{ В}$ . Технические характеристики данного элемента указаны в Приложении Н.

Далее выполним расчет конденсатора.

Пульсационную составляющую тока определяем по формуле:

$$\Delta I_{C4} = I_{VT6 \text{ max}} - I_{VD10 \text{ ср}} = 6,8 - 3,71 = 3,09 \text{ А}. \quad (114)$$

Напряжение в режиме заряда определяем по формулам:

$$U_{C4} = U_{\text{бз max}} = 448 \text{ В}; \quad (115)$$

$$\Delta U_{C4} = k_{\Pi} \cdot U_{C4} = 0,02 \cdot 448 = 8,96 \text{ В}; \quad (116)$$

$$C_4 = \frac{\Delta I_{C4} \cdot \gamma_{max}}{\Delta U_{C4} \cdot f_{КОМ}} = \frac{3,09 \cdot 0,63}{8,96 \cdot 30000} = 7,2 \text{ мкФ}; \quad (117)$$

Выбираем конденсатор ЕСАР ТКР100М2WJ20 Параметры:  $C_{НОМ} = 10 \text{ мкФ}$ ,  $U_{НОМ} = 450 \text{ В}$  [10]. Технические характеристики данного элемента указаны в Приложении П.

$$\Delta U_{C4} = \frac{\Delta I_{C4}}{C_4 \cdot 2\pi f_{КОМ}} = \frac{3,09}{7,2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 30000} = 2,27 \text{ В}. \quad (118)$$

Ток через реактор определяем по формуле:

$$I_{L6} = I_{63} + I_{образ\ max} = 2 + 24,42 = 26,42 \text{ А}. \quad (119)$$

Примем  $k_{\Pi}$  тока реактора = 0,05.

$$I_{L6} = k_{\Pi} \cdot I_{L6} = 0,05 \cdot 26,42 = 1,32 \text{ А}; \quad (120)$$

$$\Delta U_{L6} = \Delta U_{C4} = 2,27 \text{ В}; \quad (121)$$

$$X_{L6} = \frac{\Delta U_{L6}}{I_{L6}} = \frac{2,27}{1,32} = 1,72 \text{ Ом}; \quad (122)$$

$$L_6 = \frac{X_{L6}}{2\pi f_{КОМ}} = \frac{1,72}{2 \cdot 3,14 \cdot 30000} = 9,1 \text{ мкГн}; \quad (123)$$

$$\Delta P_{L6} = 0,005 P_2 = 0,005 \cdot 8000 = 40 \text{ Вт}; \quad (124)$$

$$R_{L6} = \frac{\Delta P_{L6}}{I_{L6}^2} = \frac{40}{26,42^2} = 0,06 \text{ Ом}. \quad (125)$$

## 2.10 Расчет неуправляемого выпрямителя № 2

На рисунке 2.11 приведена схема рассчитываемого неуправляемого выпрямителя.

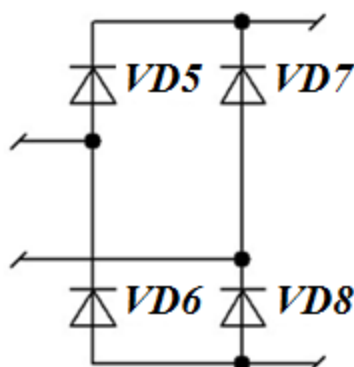


Рисунок 2.11 – Схема рассчитываемого неуправляемого выпрямителя

Максимальное и минимальное выпрямленное напряжение рассчитывается по формулам:

$$U_{d \max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{c \max} - \Delta U_B = 0,9 \cdot 253 - 2 = 226 \text{ В}; \quad (126)$$

$$U_{d \min} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{c \min} - \Delta U_B = 0,9 \cdot 187 - 2 = 166 \text{ В}. \quad (127)$$

Максимальный ток через диод определяем по формулам:

$$I_{d \max} = I_{L1} = I_{L2} = \frac{P_{\text{вх ип}}}{U_{d \min}} = \frac{943,16}{166} = 5,67 \text{ А}; \quad (128)$$

$$I_{d \text{ ср}} = \frac{I_{d \max}}{2} = \frac{5,67}{2} = 2,84 \text{ А}. \quad (129)$$

Максимальное обратное напряжение на диодах определяем по формуле:

$$U_{VD \max} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{d \max} = \sqrt{2} \cdot U_{c \max} = 1,41 \cdot 253 = 357,8 \text{ В}. \quad (130)$$

Выбираем диод VS-10ETF06PBF фирмы «Vishay» с параметрами [10]. Детальные технические характеристики выбранного диода представлены в Приложении Р.

## 2.11 Расчет сглаживающего фильтра на выходе выпрямителя №2

Индуктивность фильтра выбирается из заданного числа пульсаций в номинальном режиме. При уменьшении тока нагрузки переходим в режим прерывистых токов, в котором относительный пульсации тока достигают больших значений.

На рисунке 2.12 приведена схема рассчитываемого фильтра.

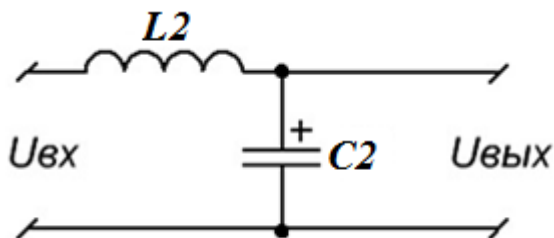


Рисунок 2.12 – Схема рассчитываемого фильтра

Задаем коэффициент пульсации  $k_{\text{п}} = 0,2$ , определяем пульсацию тока выпрямителя по формуле:

$$I_{d(1)} = k_{\text{п}} \cdot I_{d \max} = 0,2 \cdot 5,67 = 1,13 \text{ А}. \quad (131)$$

Для нахождения индуктивности найдем:

$$U_{d\ m(1)} = U_{d\ max} \cdot \frac{2}{m^2-1} \cdot \sqrt{1 + m^2 \cdot tg^2 \alpha} = 226 \cdot \frac{2}{2^2-1} \cdot \sqrt{1} = 150,52 \text{ В}; \quad (132)$$

$$X_{d(1)} = \frac{U_{d\ m(1)}}{I_{d(1)}} = \frac{150,52}{1,13} = 132,75 \text{ Ом}. \quad (133)$$

Находим индуктивность дросселя по формуле:

$$L_{д} = \frac{X_{d(1)}}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{132,75}{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 220 \text{ мГн}. \quad (134)$$

Находим потери:

$$\Delta P_{Ld} = 0,01 \cdot P_{н} = 0,01 \cdot 8000 = 80 \text{ Вт}. \quad (135)$$

Определяем сопротивление реактора по формуле:

$$R_{Ld} = \frac{\Delta P_{Ld}}{I_d^2} = \frac{80}{1,13^2} = \frac{80}{1,29} = 2,49 \text{ Ом}. \quad (136)$$

Задаем  $k_{п} = 0,02$  для напряжения на конденсаторе:

$$U_{c(1)} = k_{пс} \cdot U_{d\ max} = 0,02 \cdot 226 = 4,52 \text{ В}; \quad (137)$$

$$X_c = \frac{U_{c(1)}}{I_{d(1)}} = \frac{4,52}{1,13} = 3,98 \text{ Ом}. \quad (138)$$

Находим емкость конденсатора по формуле:

$$C = \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3,98} = 399,6 \text{ мкФ}. \quad (139)$$

Выбираем конденсатор серии ЕСАР [10]. Параметры:  $C_{ном} = 470 \text{ мкФ}$ ,  $U_{ном} = 450 \text{ В}$ . Детальные технические характеристики выбранного конденсатора представлены в Приложении С.

## 2.12 Составление электрической принципиальной схемы с описанием работы ее элементов

Согласно структурной схеме, представленной на рисунке 1.5, составляем электрическую принципиальную схему ИБП. Она приведена на рисунке 2.13.

Диоды VD1-4 формируют схему выпрямительного моста и служат для выпрямления переменного напряжения  $UI$  сети в постоянное напряжение.

Г-образный фильтр, построенный на элементах  $L1$  и  $C1$ , предназначен для сглаживания выходного напряжения и тока выпрямителя.

Управляя работой транзистора  $VT1$ , получаем на выходе повышающего преобразователя стабильный уровень постоянного напряжения. Схема ППН №1 задана элементами:  $VT1$ ,  $L3$ ,  $C3$ ,  $L4$  и  $VD9$ . Подавая различный уровень относительной длительности импульсов на базу IGBT транзистора, можно получать различный уровень выходного напряжения преобразователя. В том случае, если накопительный конденсатор  $C3$  заряжается не до уровня напряжения питающей сети, разницу напряжений компенсирует заряд энергии, накопленный индуктивностью  $L3$ . При перезарядке конденсатора  $C3$ , происходит накопление энергии катушкой  $L4$ , что и обуславливает свойство ППН выдавать повышенный уровень напряжения.

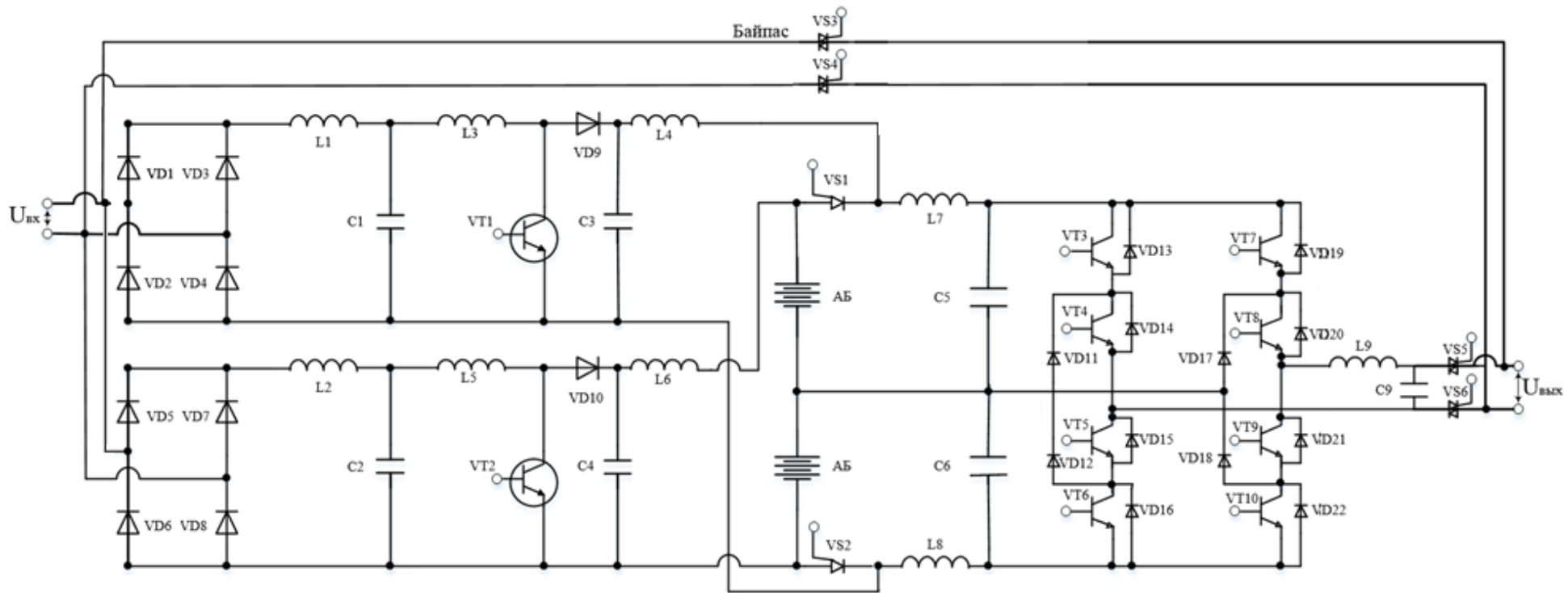


Рисунок 2.13 – Электрическая принципиальная схема источника бесперебойного питания



Этот уровень зависит от сопротивления нагрузки и от относительной длительности импульсов на базе транзистора. Диод  $VD9$  выполняет защитную функцию, предотвращая приложение высокого уровня напряжения выхода ППН к транзистору  $VT1$ . Использование ППН в данной цепи питания нагрузки обусловлено тем, что при изменении уровня входного напряжения и выходного тока уровень выходного напряжения преобразователя остается стабильным. Здесь ППН выполняет функцию питания инвертора постоянного напряжения.

Г-образный фильтр, состоящий из двух плеч и построенный на элементах  $L7$ ,  $C5$  и  $L8$ ,  $C6$  сглаживает выходное напряжение и ток преобразователя.

Преобразования постоянного напряжения в переменное напряжение осуществляется посредством трехуровневого инвертора, построенного на IGBT  $VT3-VT10$  и обратных диодов  $VD13-VD22$ . При помощи котроллера, который управляет частотой переключений транзисторов, происходит периодическое изменение полярности напряжения питания нагрузки и уровня выходного напряжения. На выходе получаем стабильный уровень переменного напряжения.

Г-образный фильтр, построенный на элементах  $L9$  и  $C9$ , осуществляет сглаживание выходного напряжения и тока инвертора постоянного напряжения.

Работа мостового выпрямителя переменного напряжения, построенного на диодах  $VD5$ ,  $VD5$ ,  $VD7$ ,  $VD8$ , Г-образного фильтра на элементах  $L2$  и  $C2$ , ППН №2 на элементах  $VT2$ ,  $L5$ ,  $C4$ ,  $L6$ ,  $VD10$ , аналогична приведенной выше работе соответствующих им элементов. С тем отличием, что ППН №2 выполняет функцию заряда АБ. В аварийном режиме, при потере сетевого напряжения, АБ разряжается на инвертор постоянного напряжения через фильтр, который состоит из двух плеч  $L7$ ,  $C5$  и  $L8$ ,  $C6$ .

Быстродействующие тиристоры  $VS1-VS2$  разделяют работу ИБП для двух режимов: работы от сети и работы в аварийном режиме. В случае работы ИБП от сети, тиристоры находятся в закрытом состоянии, и ЗУ постоянно

поддерживает заряд АБ на номинальном уровне. При исчезновении сетевого напряжения, тиристоры  $VS1-VS2$  мгновенно открываются, и инвертор напряжения осуществляет питание от АБ. Разрыва синусоиды выходного напряжения не происходит.

Симисторы  $VS3-VS4$  и  $VS5-VS6$  выполняют роль силовых ключей режима байпас (обеспечивают переключение питания нагрузки непосредственно от сети). В данном случае питание нагрузки не обеспечивается качественным напряжением. Данный режим используется при аварийных ситуациях и выходе из строя каких-либо функциональных блоков ИБП (в качестве резерва).

### **3 Исследование имитационной модели ИБП**

По электрической принципиальной схеме ИБП (рисунок 2.12), была создана имитационная модель (рисунок 3.1). Модель выполнена в моделирующей среде Matlab и рассматривает два режима работы: сетевой и аварийный.

#### **3.1 Описание имитационной модели**

Блок AC Voltage Source является источником сетевого переменного напряжения. В качестве неуправляемых выпрямителей, выпрямитель №1 и выпрямитель №2, воспользуемся двумя блоками Universal bridge соответственно. В окне параметров блока выбираем однофазную мостовую схему выпрямления.

После выпрямителей, и в сетевом режиме, и для зарядного устройства, установлены Г-образные LC фильтры. Для их построения воспользуемся элементом Load, в окне параметров которого выбирается индуктивность или емкость, параметры которых рассчитаны ранее (75-83 и 131-139).

Преобразователи постоянного напряжения реализованы блоками Subsystem IPPT1 и Subsystem IPPT2, структура которых представлена на рисунке 3.2. Каждый элемент в схеме настраиваем согласно рассчитанным выше параметрам (35-69 и 91-125).

Управление импульсными преобразователями постоянного напряжения осуществляется с помощью блоков Control IPPT1 и Control IPPT2, представленными на рисунке 3.3. Работа предложенного блока управления основана на статической ошибке, которая определяется сравнением заданного напряжения и напряжением на выходе ППН№1 и ППН№2. Для формирования сигнала, пропорционального задаваемому сигналу  $i\text{-sin}$ , используется PID Controller 1. PID Controller 2 необходим для формирования сигналов, которые поступают на базу IGBT, входящего в состав импульсного преобразователя постоянного напряжения.

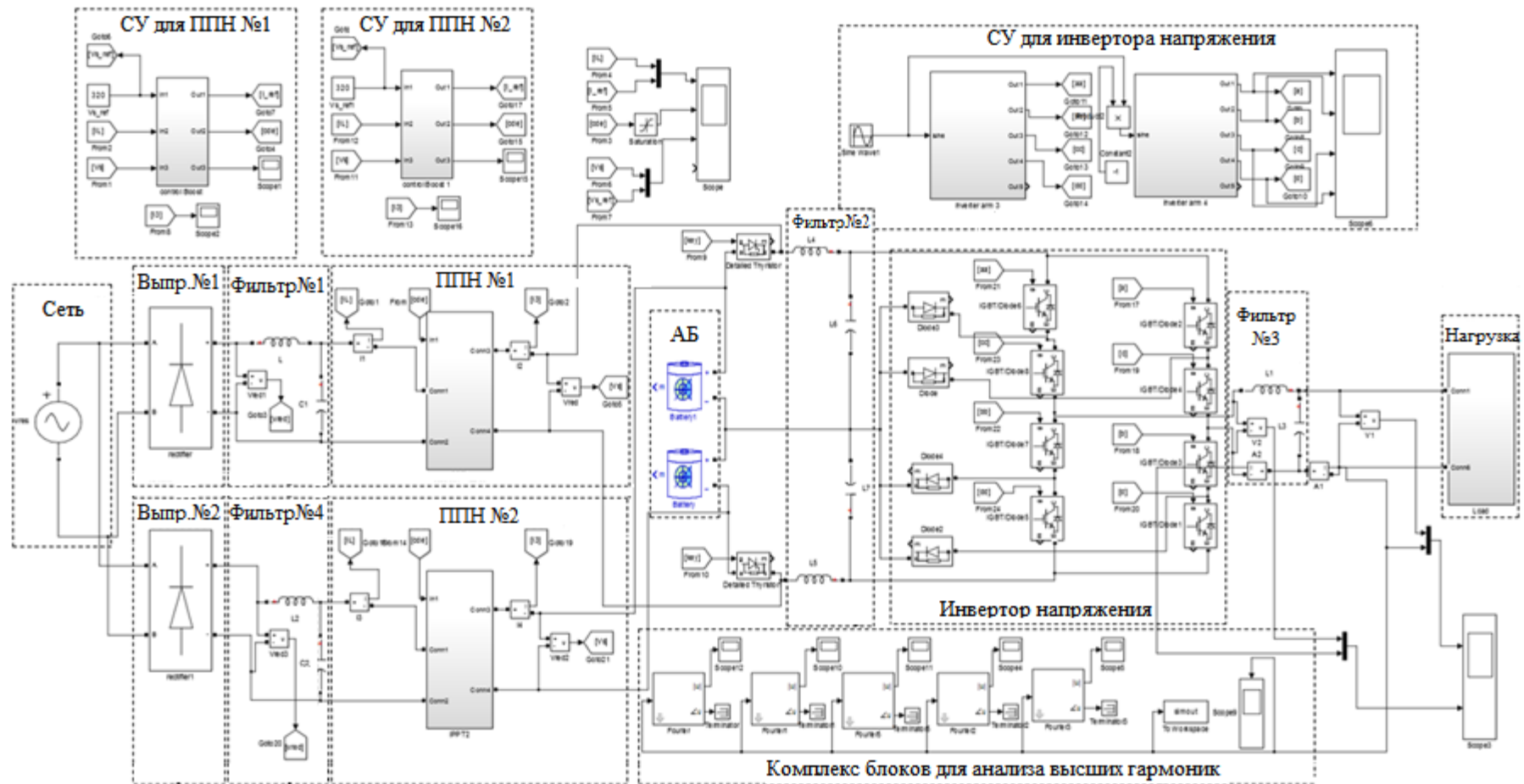
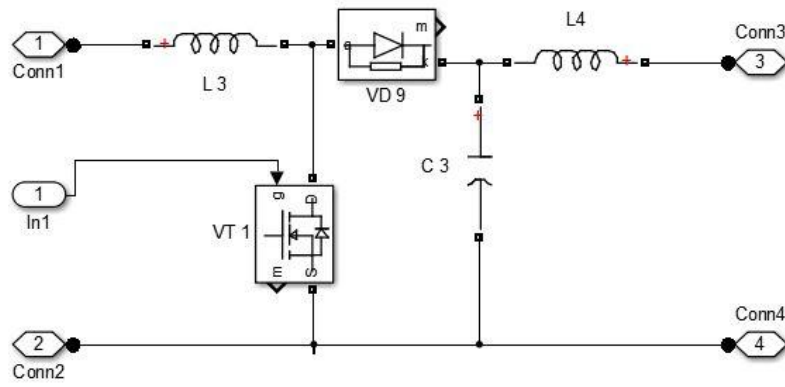
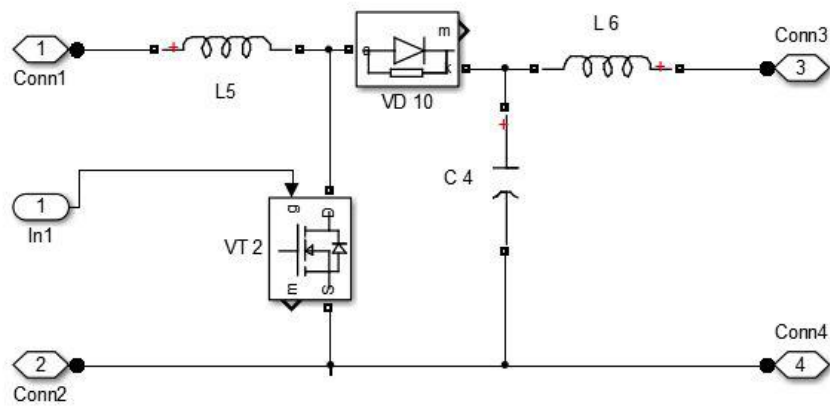


Рисунок 3.1 – Имитационная модель ИБП в среде Matlab Simulink



а) ППН№1



б) ППН№2.

Рисунок 3.2 – Внутренняя структура подсистем ППН:

а) ППН№1; б) ППН№2

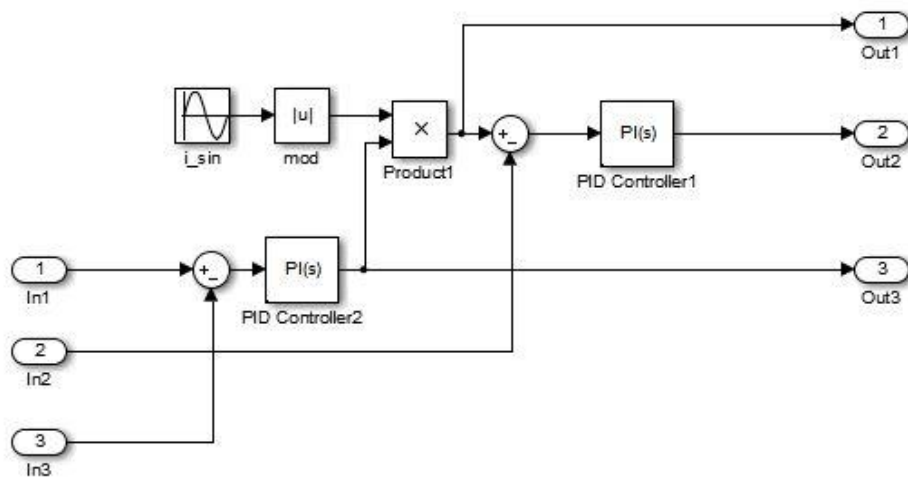


Рисунок 3.3 – Внутренняя структура подсистем СУ для ППН 1/2

На входе инвертора установлен Г-образный фильтр, реализованный на элементах Load. Он состоит из двух плечей, для обеспечения средней точки инвертора. Настройка элементов выполняется по параметрам элементов рассчитанных выше (84 - 90).

Далее размещен трехуровневый инвертор напряжения, показанный на рисунке 3.4. Он состоит из четырех диодов и восьми транзисторов, обладающих встроенными обратными диодами. Их параметры настраиваем согласно рассчитанных ранее значений (18 - 19).

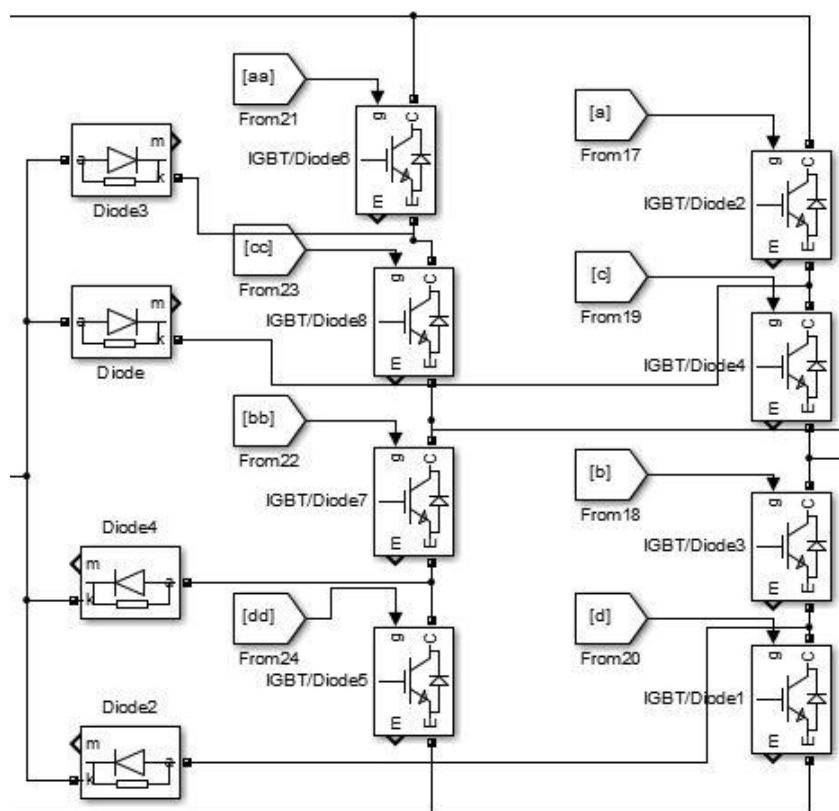


Рисунок 3.4 – Модель трёхуровневого инвертора со средней точкой

При помощи системы управления, реализованной двумя подсистемами subsystem inverter arm 1 и subsystem inverter arm 2, в инверторе напряжения происходит преобразование постоянного напряжения в переменное. Внутренняя структура подсистем subsystem inverter arm приведена на рисунке 3.5. Второй блок аналогичен первому. Данные блоки необходимы для осуществления широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в каждом плече инвертора напряжения.

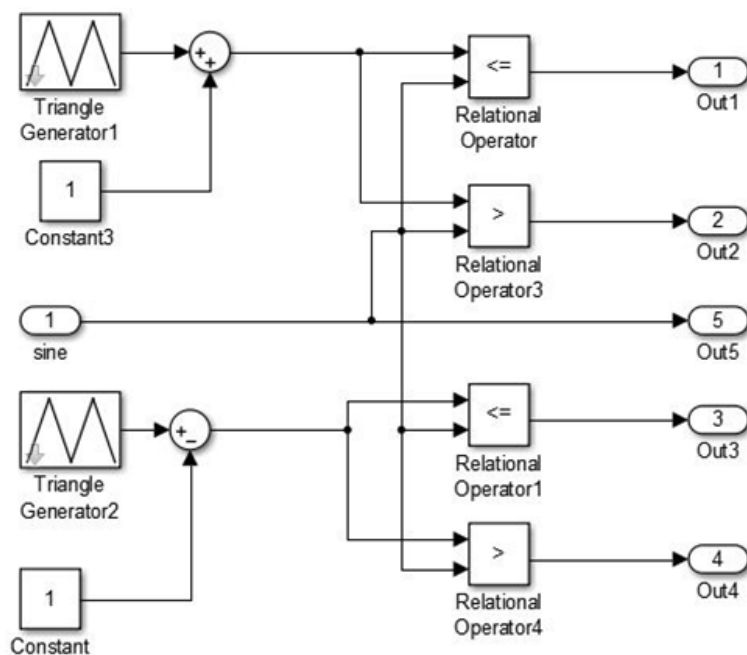


Рисунок 3.5 Внутренняя структура подсистем subsystem inverter arm

Для реализации управляющих сигналов в каждом плече инвертора, использованы блоки синусоида и треугольный сигнал. Для формирования каждой полуволны синусоиды используется пилообразный сигнал с определенной полярностью. После прохождения блоков сравнения, создается 4 выходных сигнала, которые и обеспечивают работу одного плеча инвертора. Второе плечо работает по тому же принципу, но используемая в нем синусоида сдвинута по фазе на  $180^\circ$ .

После инвертора установлен Г-образный фильтр. Реализация и настройка его элементов аналогична вышеприведенным фильтрам (20 – 34).

В качестве изменяющейся нагрузки применяется подсистема Subsystem Load, представленная на рисунке 3.6.

Моделирование работы источника бесперебойного питания осуществляется для двух режимов: сетевой и аварийный. Согласно техническому заданию применяем следующую нагрузку:

- 1) неизменная активно-индуктивная нагрузка 10 кВА;
- 2) подключаемая активно-индуктивная нагрузка, 2 кВА;
- 3) подключаемая выпрямительная нагрузка, 2 кВА.

Коммутационные устройства, реализованные с помощью блоков Breaker, обеспечивают включения и отключения нагрузки. Они обеспечивают коммутацию в заданное время, тем самым выполняя наброс нагрузки.

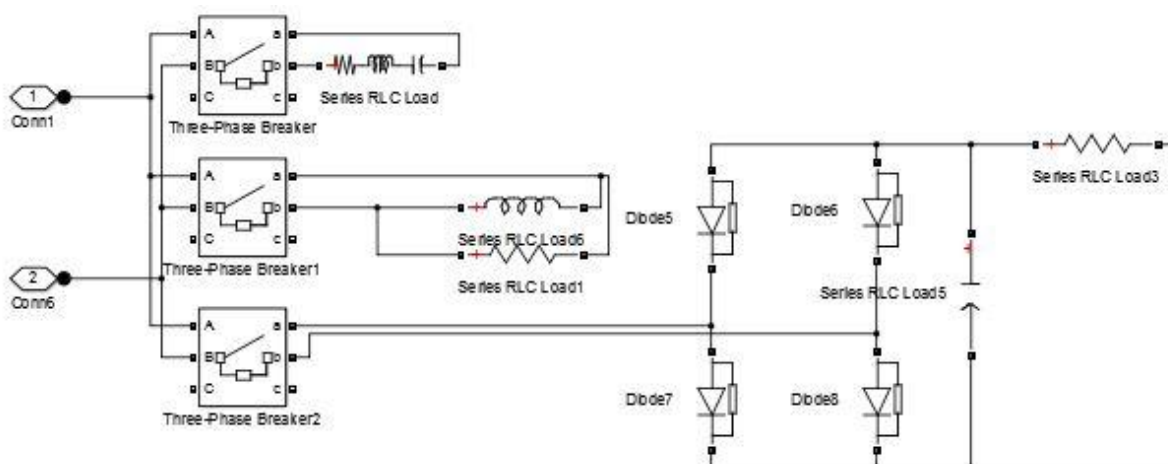


Рисунок 3.6 - Блок Subsystem load

Описание работы модели ИБП в сетевом режиме: когда ИБП работает в сетевом режиме, питание поступает от источника переменного напряжения с амплитудным значением напряжения 310 В. Зарядное устройство, в состав которого входит: выпрямитель №2, фильтр №4, ППН №2, выполняет заряд АБ, которые находятся в отключенном состоянии, с помощью тиристоров, от цепи питания нагрузки.

Питание нагрузки выполняется через неуправляемый выпрямитель №1, фильтр №1 и ППН №1, который обеспечивает регулирование напряжения на участке постоянного тока. Выпрямленное напряжение поступает на входной фильтр №2 инвертора, сглаживается и поступает на трехуровневый инвертор, после чего происходит формирование переменного напряжения. Через выходной фильтр №3 напряжение снова сглаживается и поступает непосредственно к нагрузке.

Описание работы модели ИБП в аварийном режиме: имитация аварийного режима обеспечивается отключением питающего напряжения, принимая напряжения источника переменного напряжения 0 В. При этом ЗУ обесточивается, и питание нагрузки осуществляется от АБ, которые



включаются в цепь питания нагрузки мгновенным открытием тиристоров. Диод VD10, который входит в состав ППН №2, разрывает контур, обеспечивая предотвращение разряда батареи и утечки тока в сеть.

### **3.2 Гармонический анализ выходного тока при различных видах нагрузки**

Питание электроустановок категории ответственных потребителей от электрической сети, которая может обеспечивать работу от двадцати и более персональных компьютеров, сопровождается содержанием в токе значительного количества высших гармоник по сравнению с промышленной сетью с частотой 50 Гц.

На сегодняшний день в промышленности выделяют виды оборудования, которое способно ощутимо генерировать высшие гармоники в электрическую сеть:

- персональные компьютеры и компьютерные сети;
- электросварочные комплексы;
- статические преобразователи энергии (тиристорные регуляторы напряжения, выпрямители, импульсные источники питания и т.д.)
- электродуговые и индукционные печи;
- электродвигатели переменного тока, с возможностью регулирования напряжения;
- множество электроосветительных приборов, построенных на газоразрядных лампах и электронных балластах;
- устройства для плавного пуска двигателя и т.д.

При подключении в сеть персональных компьютеров в таком количестве, что их суммарная мощность оказывается сопоставимой с мощностью электрической сети, происходит искажение синусоиды электрической сети. Связано это с перегрузкой питающей сети нелинейными нагрузками, что приводит к отклонениям и сбоям от нормальной работы особо

чувствительного оборудования, к которым относится локальная вычислительная сеть.

Признаком того, что сеть перегружена большим количеством нелинейных нагрузок, является наличие в ней третьей гармоники, которая оказывает самые интенсивные влияния на нагрузку [11].

Наличие большого числа нелинейных потребителей в сети способствует генерации высших гармонических составляющих, а это, в свою очередь, приводит к негативным последствиям для нагрузки:

- на частотах высших гармоник имеется вероятность возникновения резонансных явлений, что зачастую приводит к выходу из строя, как отдельных элементов, так и целых сборок системы;

- возникновение помех в линиях связи;

- в системах электропитания с заземленной нейтралью, третья гармоника и гармоники кратные 3, требуют увеличения сечения нулевых проводников. Это объясняется увеличением значения токов в нулевом проводнике, в отличие от фазных, что приводит к перегреву с дальнейшим разрушением изоляции;

- высшие гармоники сопровождаются дополнительными потерями в трансформаторах, влекущими за собой его перегрев, и, как следствие, приводят к выходу из строя;

- наличие гармоник приводит к перегреву и выходу из строя электродвигателей, конденсаторов, балластных люминесцентных светильников;

- происходит старение изоляции, что существенно сокращает срок эксплуатации кабельных линий;

- высокочастотные помехи приводят к сбоям в работе систем управления и нестабильной работе чувствительного электронного оборудования.

В разработанной имитационной модели ИБП, приведенной на рисунке 3.1, для исследования гармонического состава выходного тока в моделирующей среде Matlab используется блок Powergui.

Для моделирования нагрузки используется подсистема Load, представленная на рисунке 3.6. Согласно техническому заданию  $S=10$  кВА, ИБП постоянно нагружен 80% нагрузкой, через 0.2 секунды происходит наброс остальных 20% нагрузки  $S=2$  кВА.

Для гармонического анализа, после окончания процесса моделирования работы ИБП с заданным промежутком времени, используется модуль FFT Analysis, который входит в состав блока Powergui. Далее осуществляется настройка в окне Powergui FFT Tools (преобразование в ряд Фурье). Частоту основной гармоники равняется 50 Гц. Выбирается количество периодов и вид сигнала. Сверху, в окне Signal to analyze, отображается входной сигнал с заданным промежутком времени. Начиная с времени 0.2 секунды, продолжительностью в один период колебания, отображается гармонический состав тока.

### **3.2.1 Работа ИБП в режиме питания от сети**

При моделировании работы ИБП питания от сети, используется блок AC Voltage Source, внутреннее сопротивление которого стремится к бесконечности. Поэтому при увеличении нагрузки обеспечивается стабильное напряжение сети.

В реальной же сети будет наблюдаться просадка напряжения, которая обусловлена внутренним сопротивлением источника. Вследствие этого результаты моделирования и реальной работы ИБП могут значительно отличаться.

Исследование работы модели ИБП на активно-индуктивную нагрузку: в процессе моделирования работы источника бесперебойного питания через 0.2 секунды происходит коммутация ключей и добавляется активно-индуктивная нагрузка, которая составляет 20% от номинальной мощности равной 10 кВА. Полученные осциллограммы напряжения и тока представлены на рисунках 3.7 и 3.8.

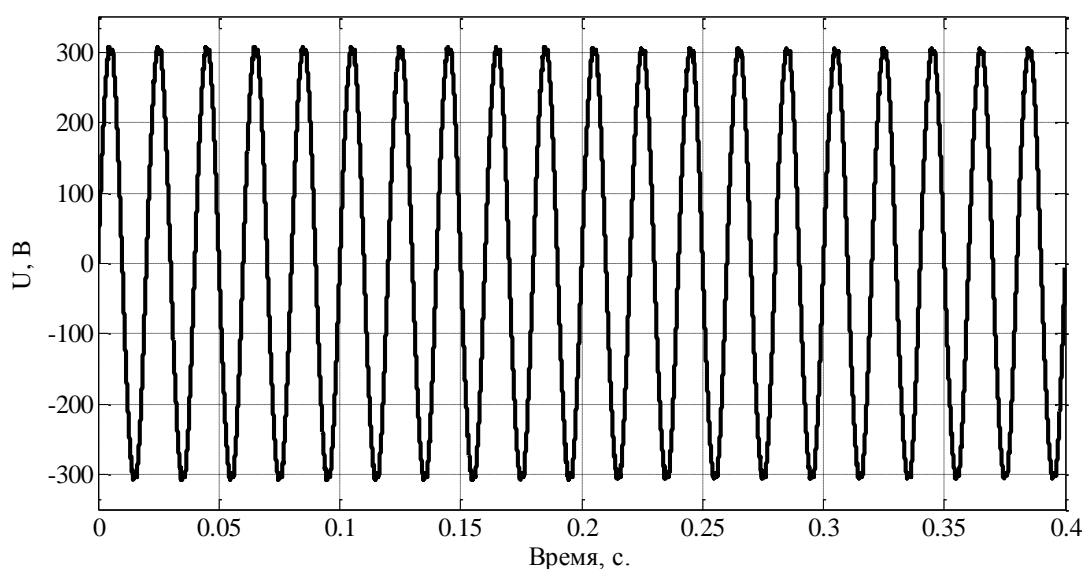


Рисунок 3.7 – Осциллограмма напряжения при добавлении активно-индуктивной нагрузки

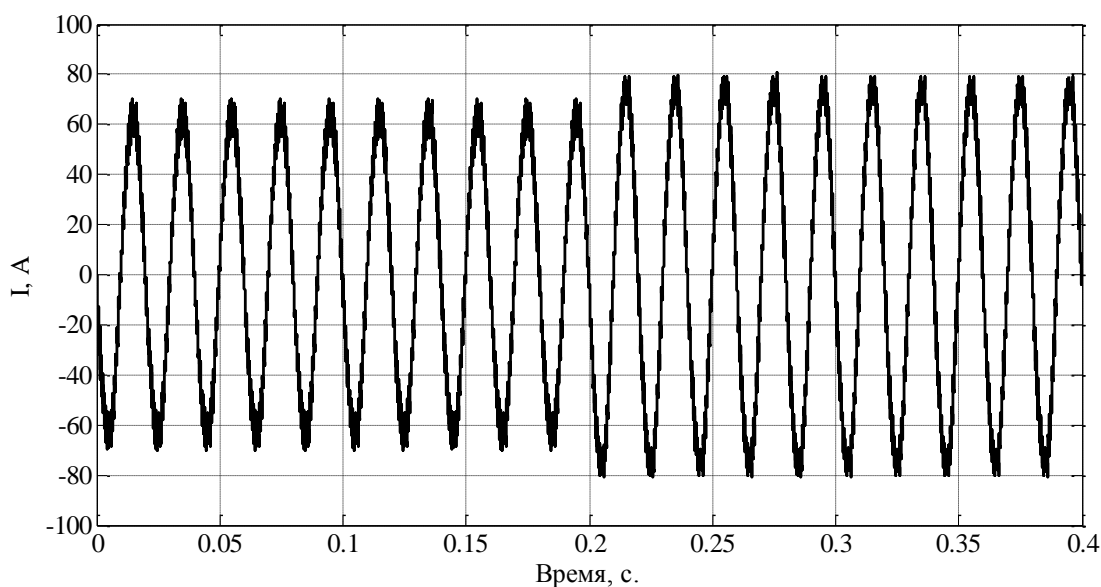


Рисунок 3.8 – Осциллограмма тока при добавлении активно-индуктивной нагрузки

Анализ высших гармоник: на рисунке 3.9, полученном при помощи функции FFT Analysis, представлен гармонический состав выходного тока при активно-индуктивной нагрузке.

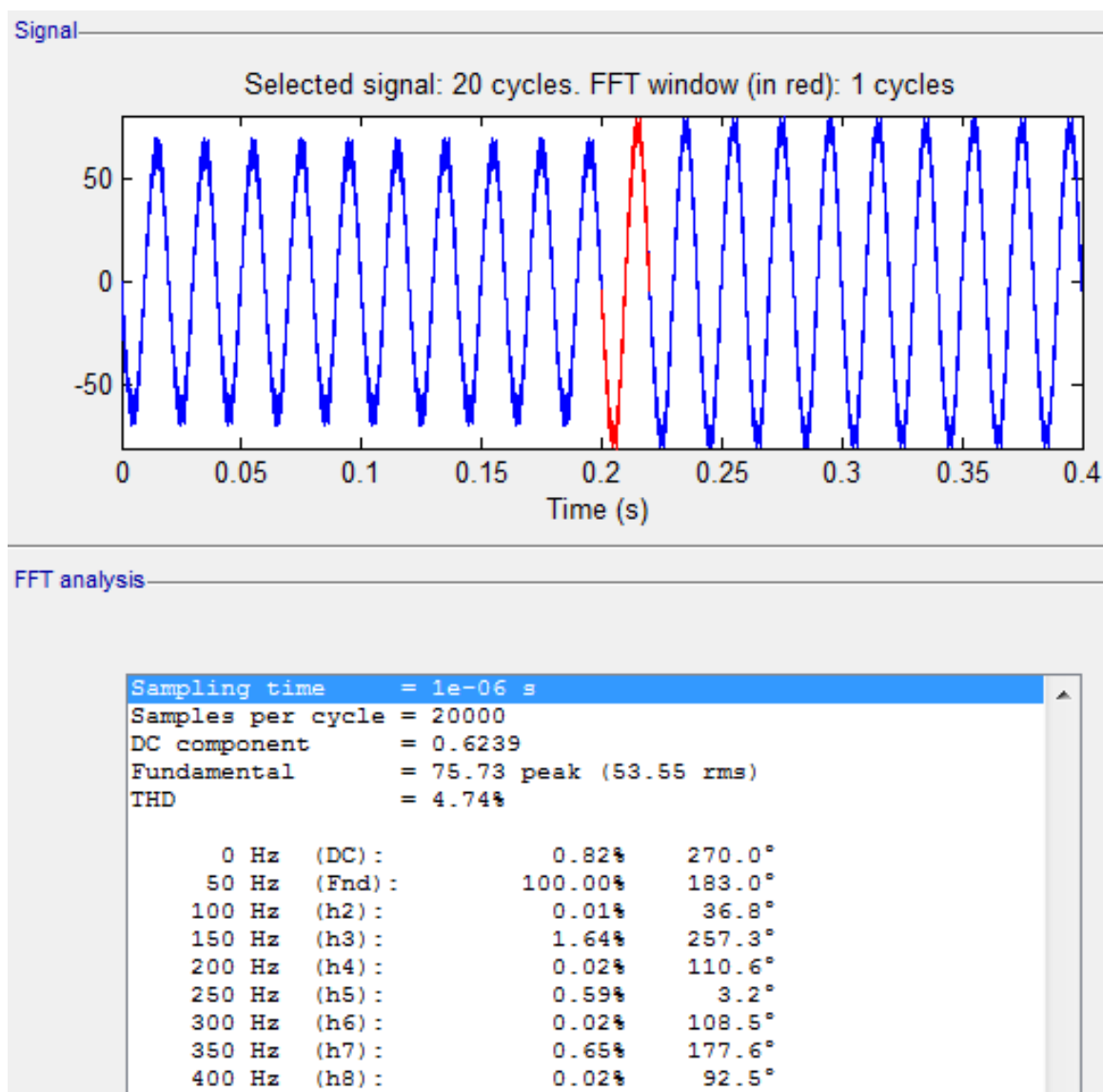


Рисунок 3.9 – Гармонический состав выходного тока при активно-индуктивной нагрузке

Синусоида тока исследовалась для одного периода колебания - после наброса нагрузки в момент времени 0.2 секунды.

Проанализировав результат разложения тока в ряд Фурье, представленный на рисунке 3.9, делаем вывод, что параметры входных и выходных фильтров подобраны верно, а значения высших гармоник не превышают допустимых значений.

Исследование работы модели ИБП на выпрямительную нагрузку: на рисунках 3.10 и 3.11 представлены полученные в результате моделирования осциллограммы напряжения и тока, при добавлении выпрямительной нагрузки. При подключении дополнительной нагрузки напряжение остается практически неизменным, а ток заметно возрастает. При данном виде нагрузки искажения синусоиды тока принимают большие значения, по сравнению с предыдущим типом нагрузки.

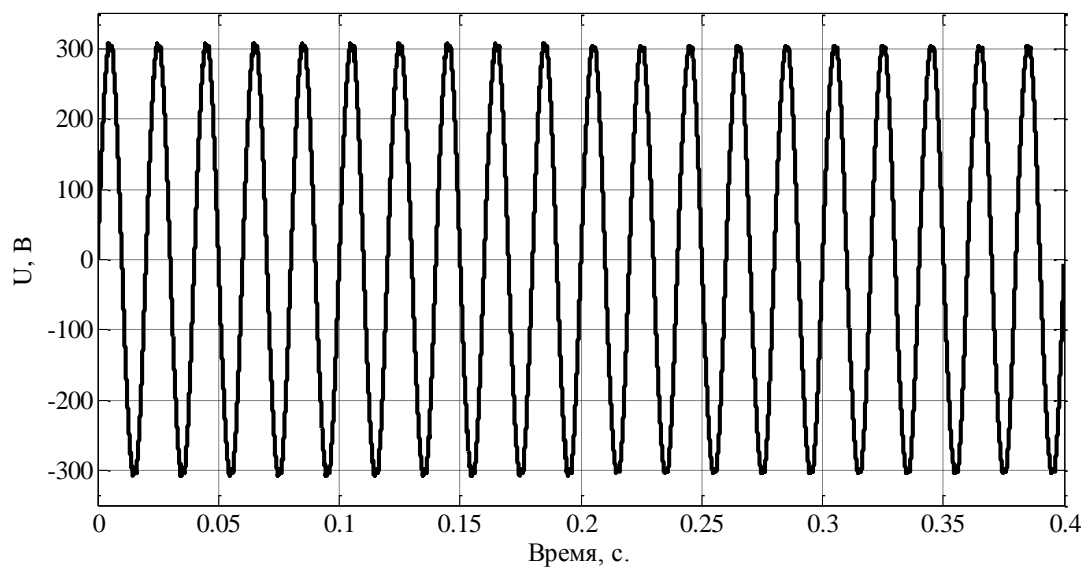


Рисунок 3.10 – Осциллограмма напряжения при добавлении выпрямительной нагрузки

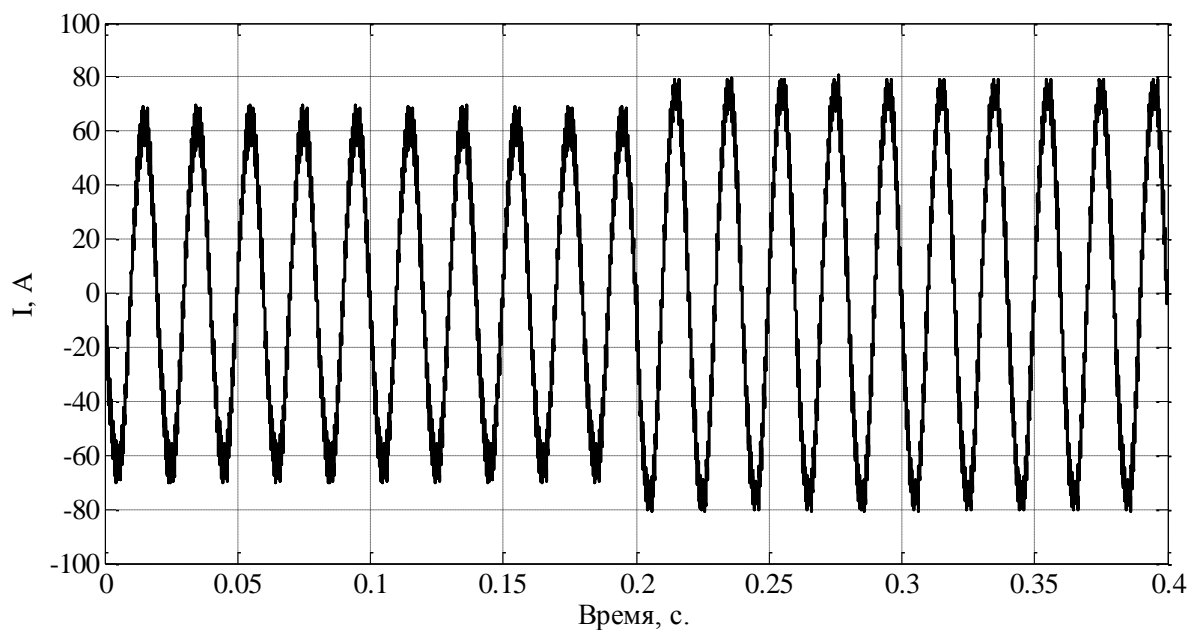


Рисунок 3.11 – Осциллограмма тока при добавлении выпрямительной нагрузки

Анализ высших гармоник: на рисунке 3.12, полученном при помощи функции FFT Analysis, представлен гармонический состав выходного тока при выпрямительной нагрузке.

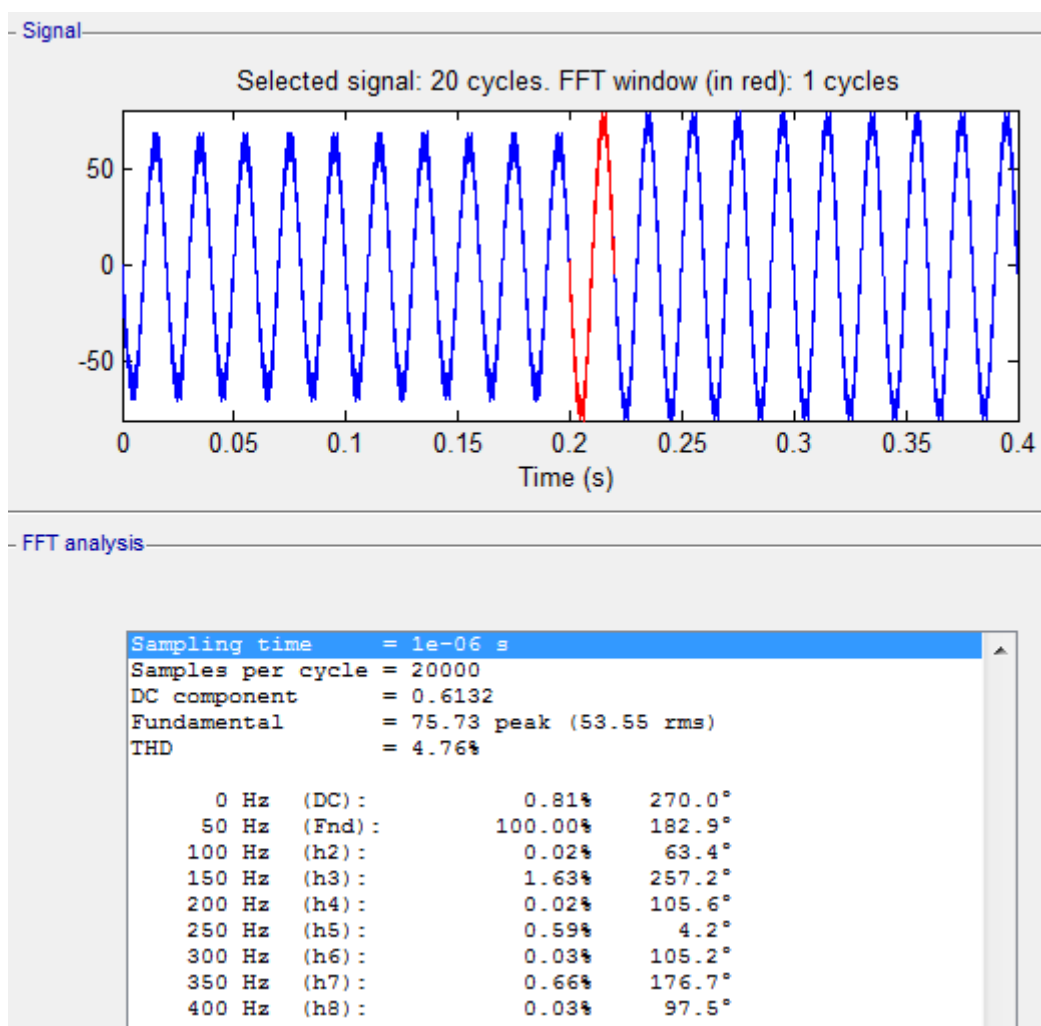


Рисунок 3.12 – Гармонический состав выходного тока при выпрямительной нагрузке

Синусоида тока исследовалась для одного периода колебания - после наброса нагрузки в момент времени 0.2 секунды.

Проанализировав результат разложения тока в ряд Фурье, представленный на рисунке 3.12, можно сделать вывод о том, что параметры входных и выходных фильтров подобраны верно, а значения высших гармоник не превышают допустимых значений. Искажения тока при выпрямительной типе нагрузки выше, чем при активно-индуктивной.

### 3.2.2 Работа ИБП в аварийном режиме

Моделирование аварийного режима работы ИБП обеспечивается выставлением значения напряжения 0 В. в блоке AC Source.

Аналогично предыдущей главе, нагрузка применяется активно - индуктивная и выпрямительная (построенная с помощью однофазного выпрямителя). ИБП постоянно нагружен 80 % нагрузкой, согласно техническому заданию  $S = 10$  кВА. Через 0.2 секунды происходит добавление 20% нагрузки  $S = 2$  кВА.

Исследование работы модели ИБП на активно-индуктивную нагрузку: на рисунках 3.13 и 3.14 представлены полученные в результате моделирования осциллограммы напряжения и тока.

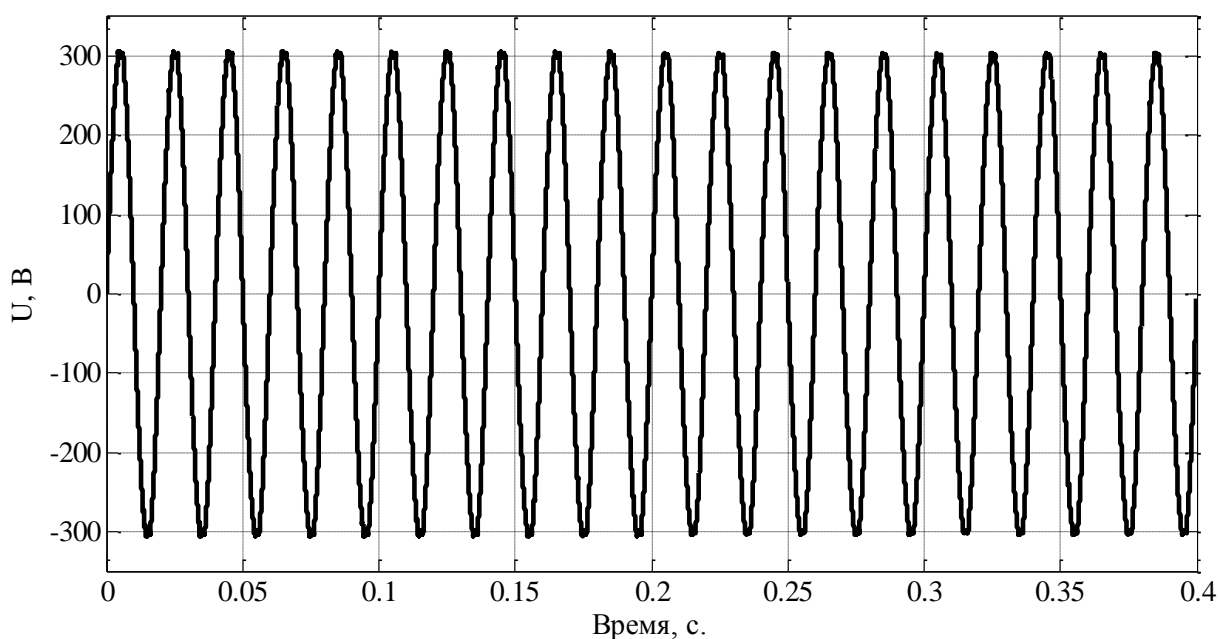


Рисунок 3.13 – Осциллограмма напряжения при добавлении активно - индуктивной нагрузки



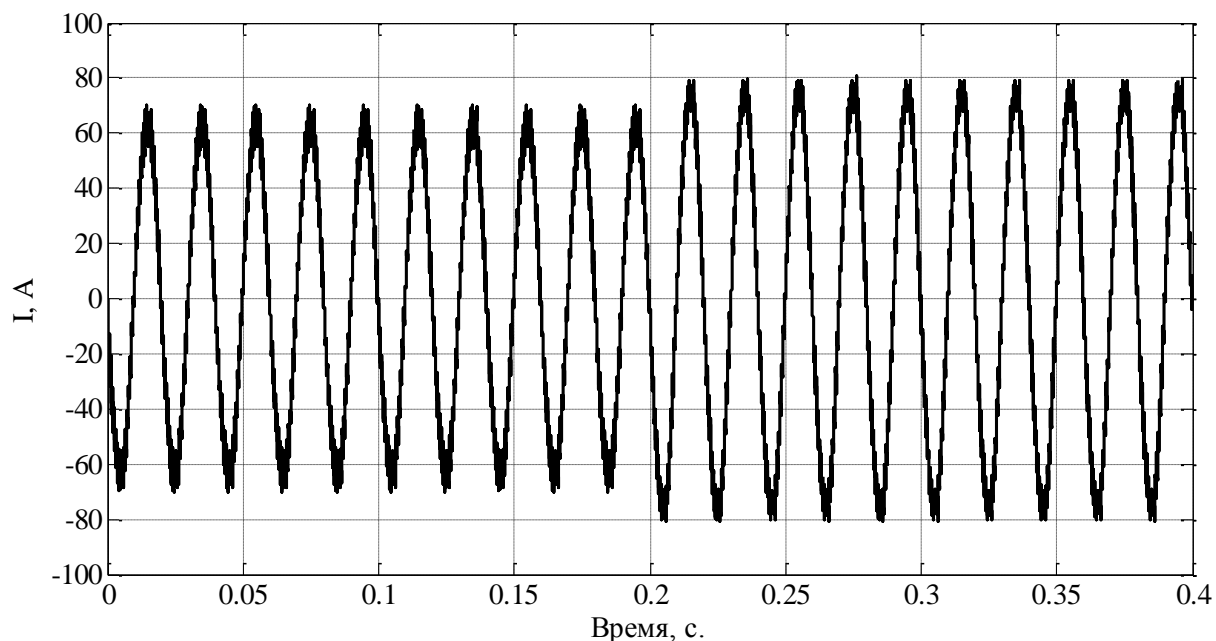


Рисунок 3.14 – Осциллограмма тока при добавлении активно-индуктивной нагрузки

По представленным осциллограммам видно следующее: напряжения, при коммутации дополнительной нагрузки, остается неизменным; ток заметно возрастает. Полученные результаты моделирования работы ИБП в аварийном режиме идентичны режиму работы от сети.

Анализ высших гармоник: на рисунке 3.15, полученном при помощи функции FFT Analysis, представлен гармонический состав выходного тока при активно - индуктивной нагрузке.

Синусоида тока исследовалась для одного периода колебания - после наброса нагрузки в момент времени 0.2 секунды. Проанализировав результат разложения тока в ряд Фурье, представленный на рисунке 3.15, делаем вывод, что параметры входных и выходных фильтров подобраны верно, а значения высших гармоник не превышают допустимых значений.

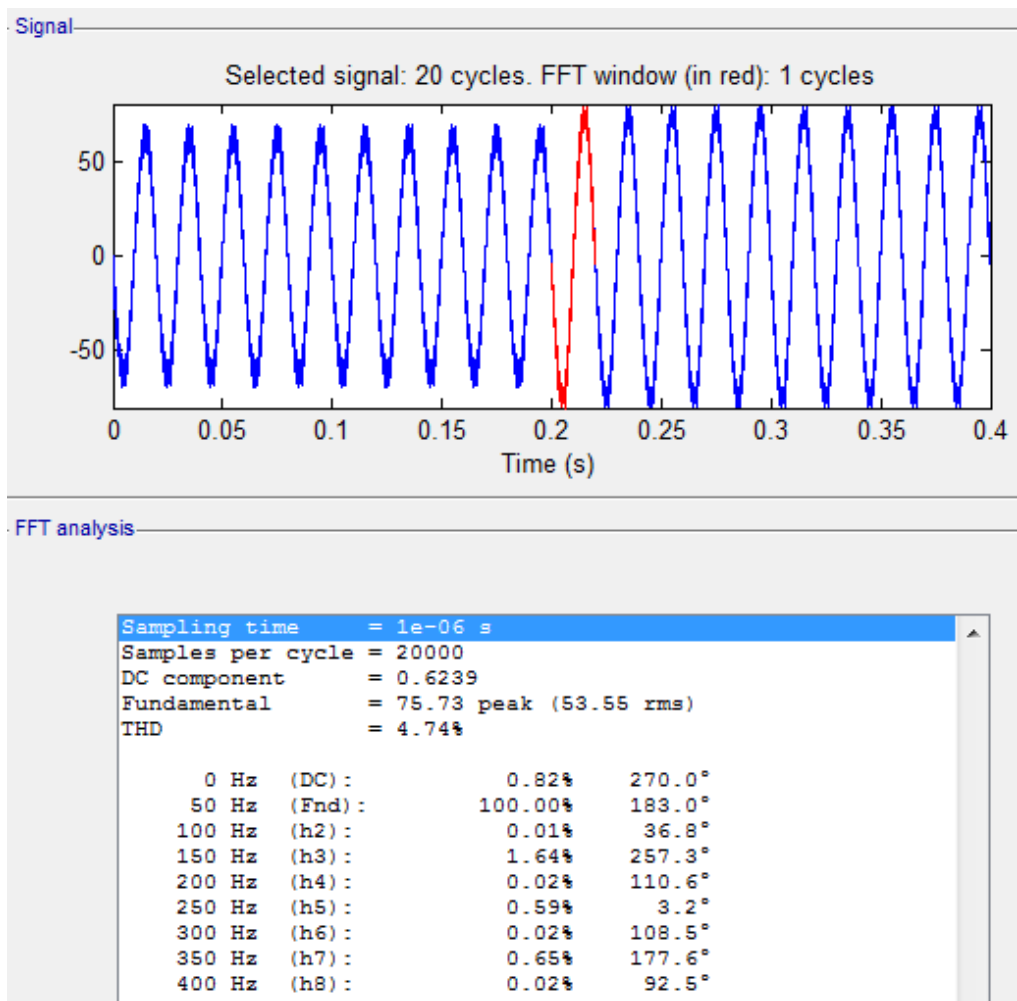


Рисунок 3.15 – Гармонический состав выходного тока при активно - индуктивной нагрузке

Исследование работы модели ИБП на выпрямительную нагрузку: на рисунках 3.16 и 3.17 представлены осциллограммы напряжения и тока.

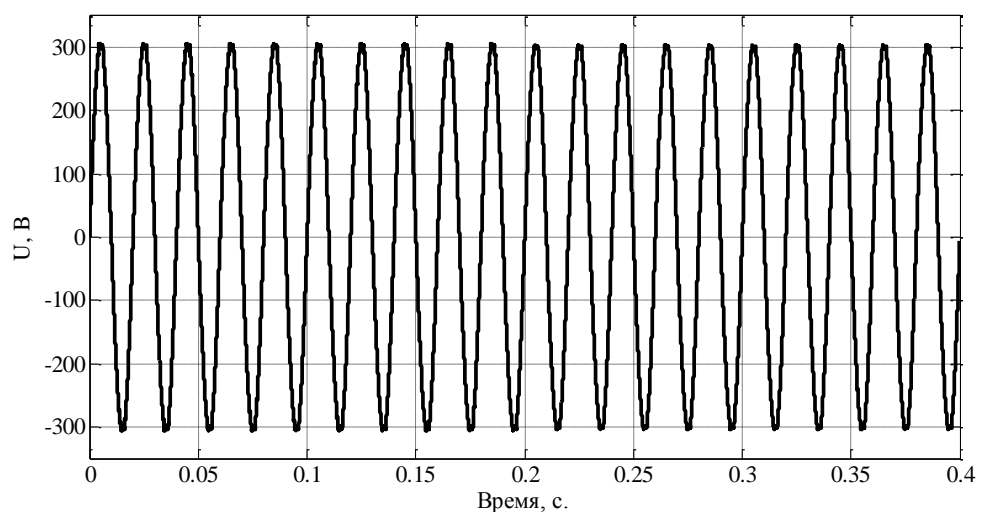


Рисунок 3.16 – Осциллограмма напряжения при добавлении

### выпрямительной нагрузки

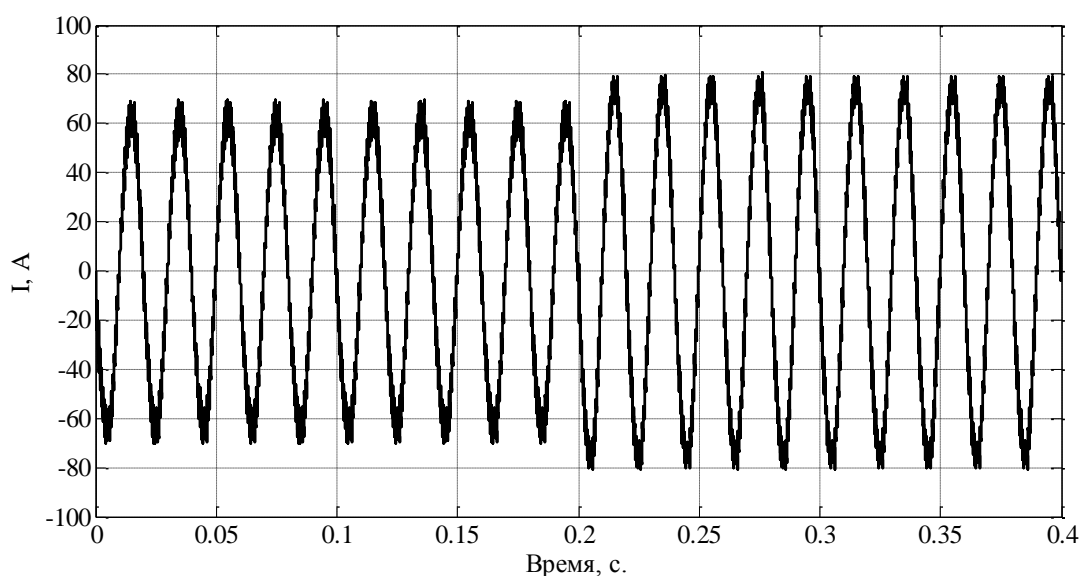


Рисунок 3.17 – Осциллограмма тока при добавлении выпрямительной нагрузки

В момент коммутации дополнительной нагрузки, напряжение остается практически неизменным, а ток заметно возрастает. При работе на данный вид нагрузки, искажение синусоиды тока принимают большие значения, в сравнении с предыдущим типом нагрузки.

Полученные результаты моделирования в аварийном режиме практически полностью совпадают с результатами, полученными в процессе моделирования режима питания от сети.

Анализ высших гармоник: на рисунке 3.18, полученном при помощи функции FFT Analysis, представлен гармонический состав выходного тока при выпрямительной нагрузке.

Синусоида тока исследовалась для одного периода колебания - после наброса нагрузки в момент времени 0.2 секунды.

Проанализировав результат разложения тока в ряд Фурье, представленный на рисунке 3.18, делаем вывод, что параметры входных и выходных фильтров подобраны верно, а значения высших гармоник не превышают допустимых значений.

Проанализировав полученные в результате моделирования осциллограммы работы ИБП, можно сделать следующие выводы - при исчезновении питающего напряжения, аккумуляторные батареи обеспечивают ответственного потребителя необходимым качественным напряжением.

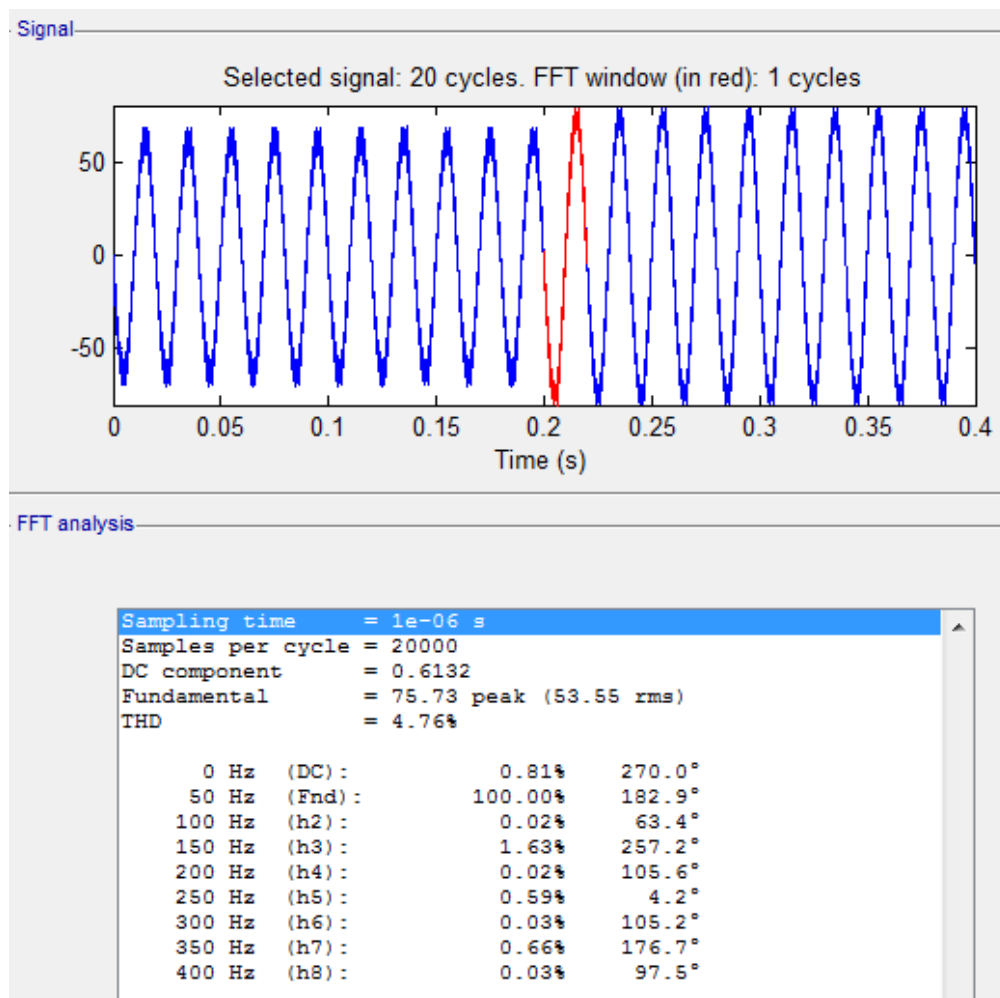


Рисунок 3.18 – Гармонический состав выходного тока при добавлении выпрямительной нагрузке

Сравнив результаты, которые получены разложением выходного тока в ряд Фурье, при помощи блока FFT Analysis, видно следующее: что как в сетевом, так и в аварийном режиме, высшие гармоники распределяются практически идентично. Значения 3, 5 и 7 гармоник практически не отличаются в обоих экспериментах. Уровень каждой из 3, 5, 7 гармоник составляет менее 3 %. Такое уменьшение величин высших гармоник стало возможным благодаря использованию трехуровневого инвертора. Чтобы более качественно оценить

работу трехуровневого инвертора данного типа, нужен сравнительный анализ с однофазным мостовым инвертором.

### 3.2.3 Исследование принципа работы однофазного 3-уровневого инвертора

Чтобы сформировать выходное напряжение на 3-уровневом инверторе (рисунок 3.4) используется система управления (рисунок 3.5). Она создает управляющие сигналы, поступающие на базу IGBT, и дальше происходит поочередное открытие и закрытие IGBT. По этому принципу и осуществляется формирование синусоидального напряжения. Для ШИМ, частота коммутации силовых ключей была принята  $f = 25 \text{ кГц}$ . Осциллограммы управляющих сигналов, поступающих на базу транзисторов, согласно схеме инвертора (рисунок 2.10), изображены на рисунке 3.19.

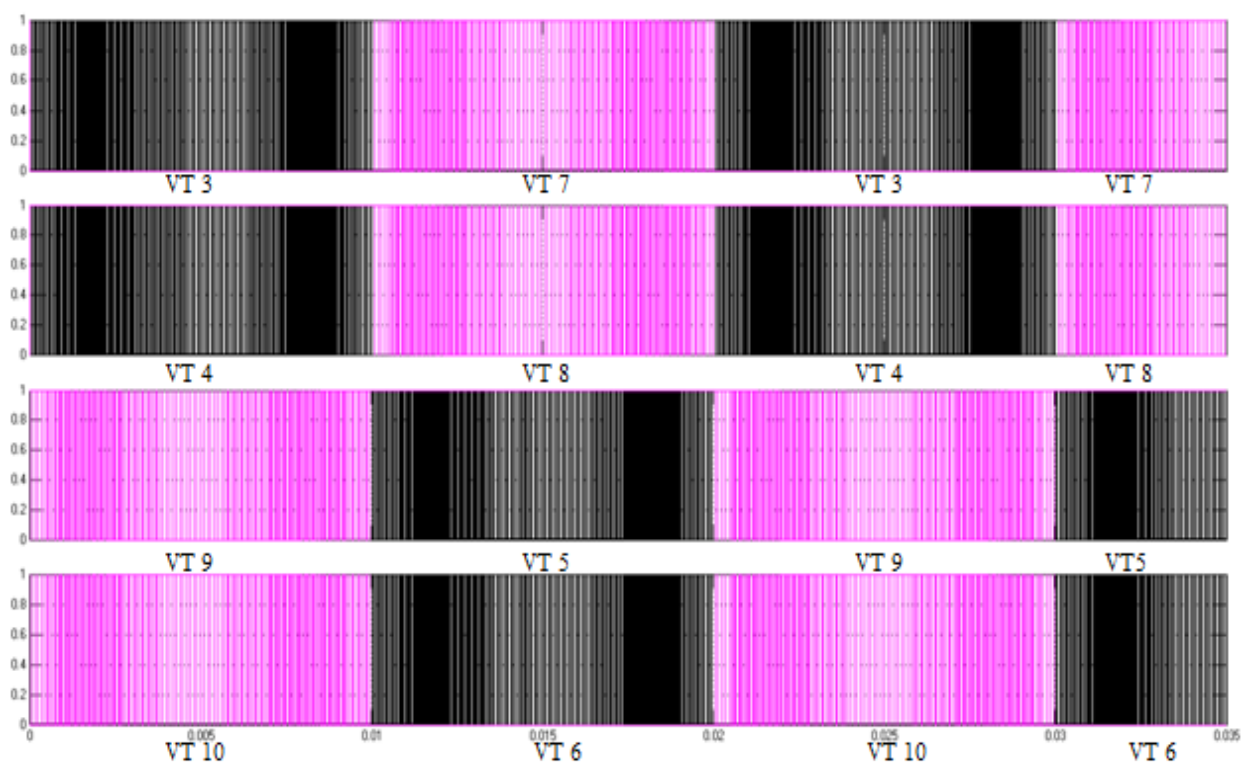
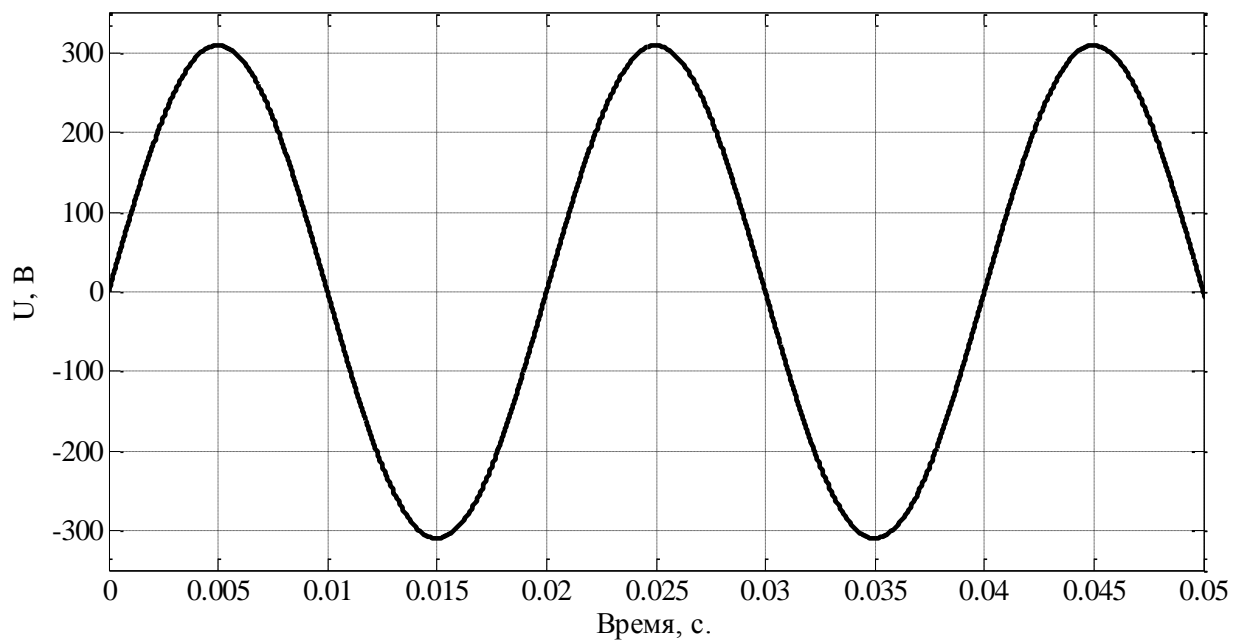


Рисунок 3.19 – Управляющие сигналы, поступающие на базу IGBT

Выходная синусоида несколько отличается от идеальной из-за наличия потерь, возникающих в сглаживающих фильтрах, полупроводниковых

элементах. Осциллограмма сравнения выходного напряжения ИБП с идеальной синусоидой напряжения представлена на рисунке 3.20.

а)



б)

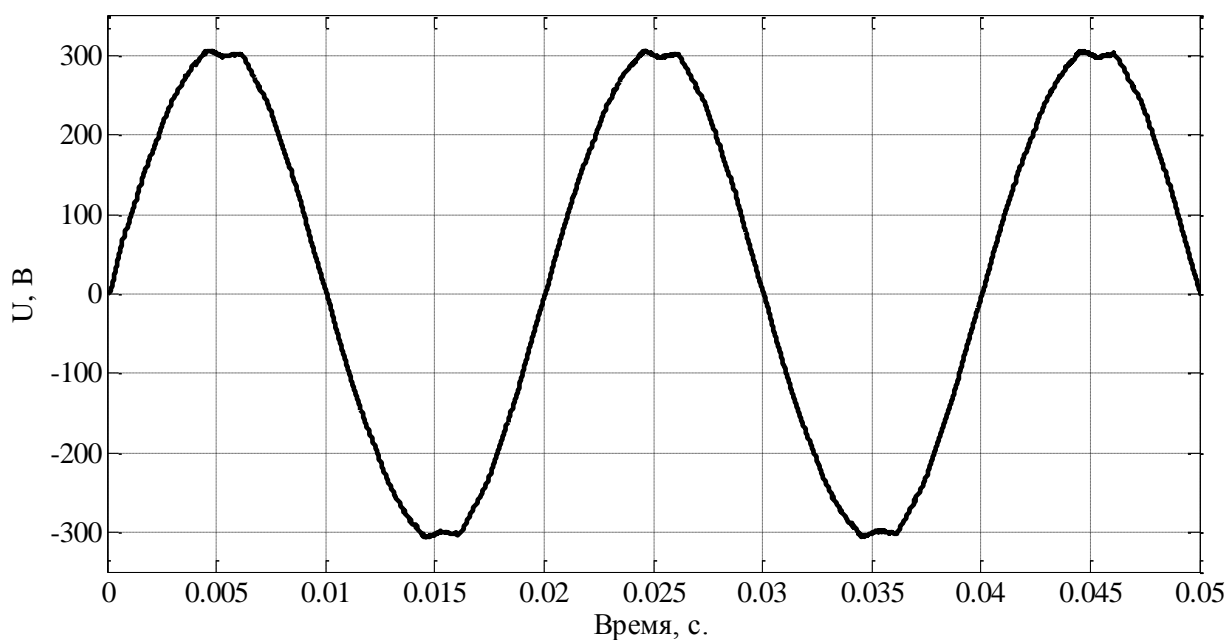


Рисунок 3.20 – Осциллограммы выходного напряжения ИБП (б) и идеальной синусоиды напряжения (а)

Максимальное отклонение выходного напряжения, при использовании трехуровневого инвертора, составляет около  $\pm 5$  В, что соответствует примерно  $\pm 2\%$  от номинального значения напряжения. Согласно техническому заданию, отклонение выходного напряжения на нагрузке не должно выходить за пределы  $\pm 3\%$ . Таким образом, используя трехуровневый инвертор напряжения, потребитель обеспечивается питающим напряжением необходимого качества.

### 3.2.4 Сравнительный анализ трехуровневого и однофазного мостового инвертора

Чтобы сравнить работу ИБП с трехуровневым инвертором и однофазным мостовым инвертором, отображенными на рисунке 3.21, промоделируем работу ИБП на те же нагрузки, рассматриваемые выше.

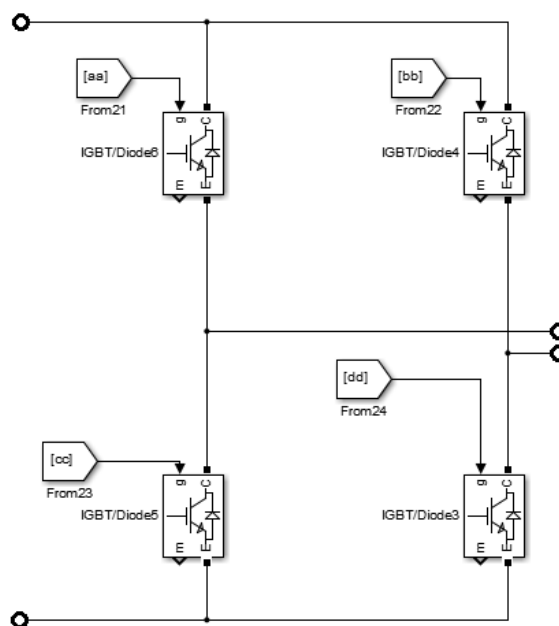
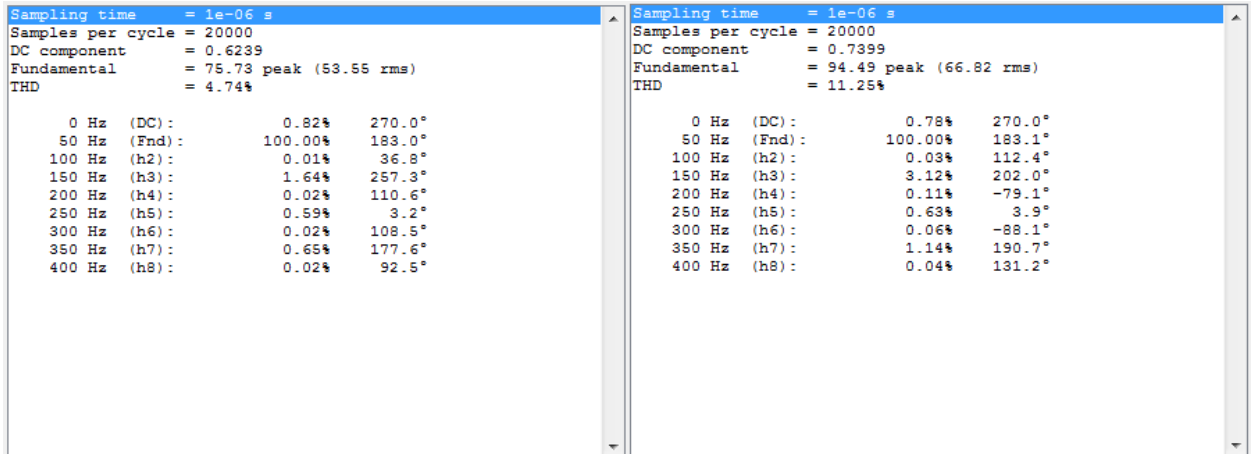


Рисунок 3.21 – Модель однофазного мостового инвертора в MATLAB Simulink

Для качественного сравнения работы трехуровневого инвертора со средней точкой с однофазным инвертором, на рисунках 3.22 и 3.23 приведены результаты гармонического анализа выходного тока.



а) трехуровневый инвертор

б) однофазный мостовой инвертор

Рисунок 3.22 – Гармонический состав выходного тока при добавлении активно - индуктивной нагрузки

а) трехуровневый инвертор

б) однофазный мостовой

инвертор

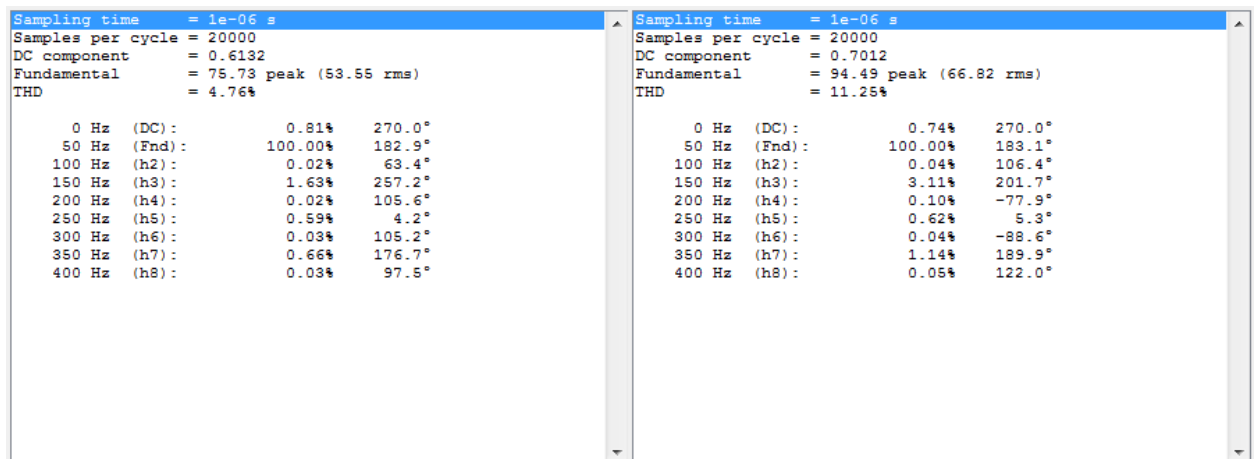


Рисунок 3.23 – Гармонический состав выходного тока при добавлении выпрямительной нагрузки

По рисункам 3.22 и 3.23 можем сделать вывод, что при использовании трехуровневого инвертора уровень высших гармоник ниже, чем при однофазном мостовом инверторе.



При работе выпрямитель и инвертор в совокупности с нагрузкой представляют собой систему с изменяемыми параметрами. Это обусловлено тем, что цикл его работы состоит из двух этапов. На одном из этапов открыты диоды выпрямителя и производится заряд его выходного конденсатора через силовой фильтр инвертора. На другом этапе диоды выпрямителя закрыты, и инвертор на этом интервале находится в режиме холостого хода. Таким образом, в течение цикла своей работы, инвертор должен обеспечивать импульсное потребление тока нагрузкой для быстрого заряда выходного конденсатора выпрямителя при заданном качестве выходного напряжения. При этом через фильтр инвертора также протекает импульсный, несинусоидальный ток. А форма выходного напряжения инвертора при работе на выпрямитель на интервалах проводимости диодов представляет собой начальные участки колебательных переходных процессов.

Для наглядного отображения работы трехуровневого и однофазного мостового инверторов, по полученным результатам гармонических составляющих выходного тока, приведенным на рисунках 3.22 и 3.23, построим диаграммы, которые отобразим на рисунках 3.24 и 3.25.

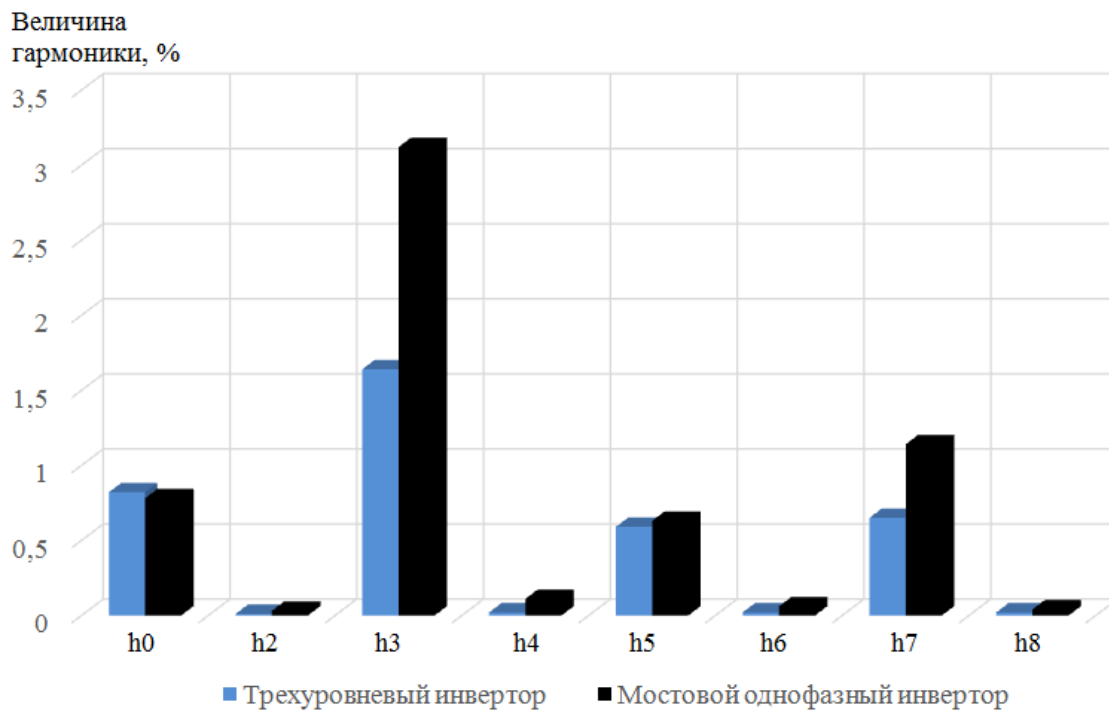


Рисунок 3.24 – Диаграмма величин гармоник при активно - индуктивной нагрузке

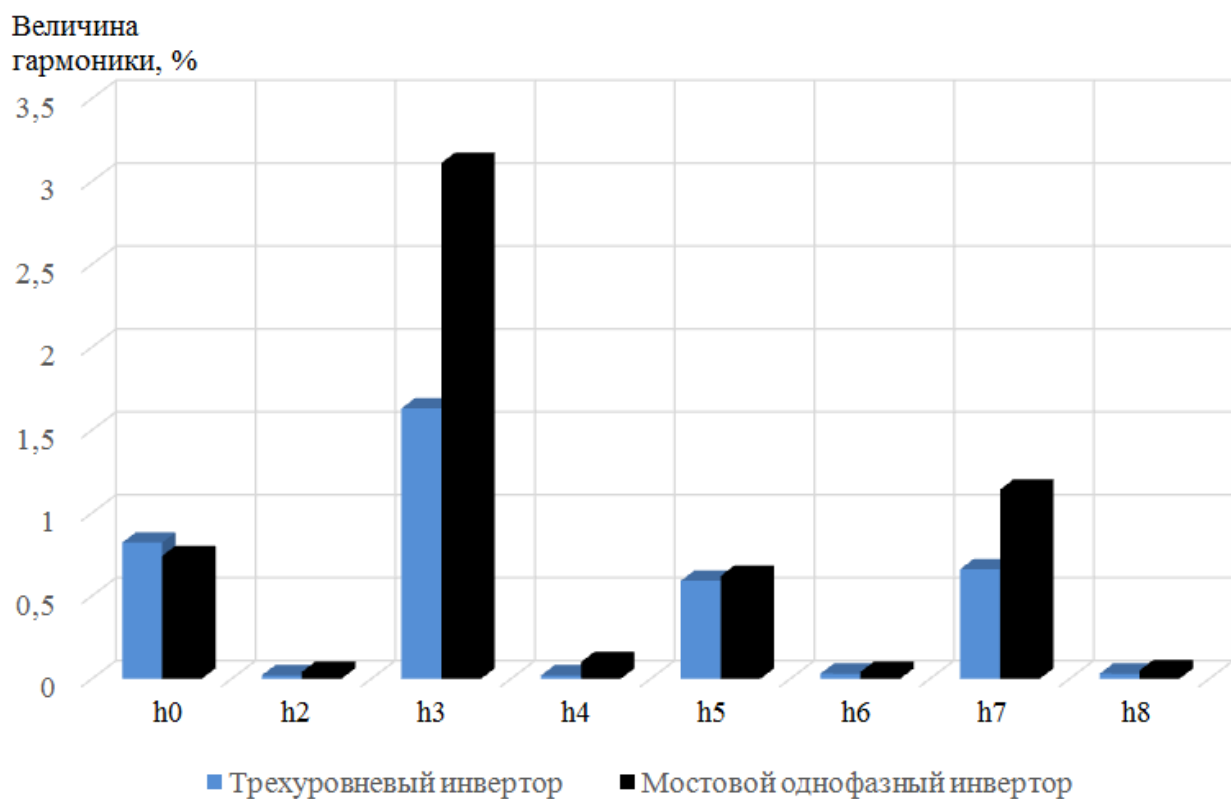


Рисунок 3.25 – Диаграмма величин гармоник при выпрямительной нагрузке

Сравнивая диаграммы, представленные на рисунках 3.24 и 3.25, видим, что трехуровневый инвертор, в отличие от однофазного мостового, позволяет заметно снизить значения высших гармоник. Наиболее явно это наблюдается на гармониках под номерами 3, 5 и 7. Снижение величин данных гармоник особенно важно, потому что именно они оказывают наиболее сильное негативное влияние на работу оборудования, подключаемого к ИБП. Применение трехуровневого инвертора, в отличие от однофазного мостового, позволяет получить синусоиду напряжения на выходе, которая по форме более приближена к идеальной, даже при наличии реактивной нагрузки, что в свою очередь благоприятно сказывается на нагрузке.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

При эксплуатации электрических сетей могут возникнуть некоторые проблемы, такие как: длительное отключение питания потребителей при авариях, кратковременные импульсы при включении дополнительных потребителей, снижение и повышение напряжения сети при изменении величины подключенной к ней нагрузки. Всё вышеперечисленное приводит к негативным последствиям: выходу из строя оборудования, потере данных (сервера, компьютера и т.д.), нарушению технологического процесса на производстве, что приводит к экономическим потерям.

Для обеспечения качественной электроэнергией всевозможных нагрузок необходимо применять источники бесперебойного питания.

Целью данной магистерской диссертации является разработка и исследование источника бесперебойного питания для защиты локальных вычислительных сетей.

### **4.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения**

Перечень работ составлен в рамках проведения научного исследования. Выполнено распределение обязанностей по видам выполняемых работ между исполнителями: научный руководитель 15 разряда (НР), инженер 9 разряда (И). Перечень работ и оценка времени их выполнения приведена в таблице 4.1: Таблица 4.1 – Перечень работ и оценка времени их выполнения.

№	Наименование работы	Количество исполнителей	Продолжительность, дн.
1	Составление и утверждение технического задания	И НР	1
2	Подбор и изучение материалов по теме	И	25

Продолжение таблицы 4.1

3	Выбор направления исследований	И НР	1
4	Календарное планирование работ по теме	И	2
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	И	10
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	И	11
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	И	14
8	Оценка эффективности полученных результатов	И НР	7
9	Составление и оформление пояснительной записки	И	22
10	Предоставление полученных результатов	И	2

Итого 95 дней, в том числе НР - 9 дней.

НР участвует в проекте 9,5 % от общей продолжительности проекта.

Календарный план – график, построенный для максимального по длительности исполнения варианта работ, в рамках научно - исследовательского проекта приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Календарный план-график

№ работ	Вид работ	Исполнители	Продолжительность выполнения работ														
			март		апрель			май			июнь			июль			
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Составление и утверждение технического задания	НР и инженер															
2	Подбор и изучение материалов по теме	НР и инженер															
3	Выбор направления исследований	НР и инженер															
4	Календарное планирование работ по теме	Инженер															
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер															
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	НР и инженер															
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер															
8	Оценка эффективности полученных результатов	НР и инженер															
9	Составление пояснительной записки	Инженер															
10	Публикация полученных результатов	Инженер															

## 4.2 Смета затрат на проект

Для расчета затрат на проект ( $K_{з/пр}$ ) необходимо рассчитать в деньгах следующие составляющие: материальные затраты ( $K_{\text{мат}}$ ), амортизацию ( $K_{\text{ам}}$ ), затраты на заработную плату ( $K_{з/пл}$ ), затраты на социальные нужды ( $K_{с.о.}$ ), прочие затраты ( $K_{пр}$ ), накладные расходы ( $K_{\text{накл}}$ ). После расчета всех вышеупомянутых составляющих воспользуемся следующей формулой:

$$K_{з/пр} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{з/пл} + K_{с.о.} + K_{пр} + K_{\text{накл}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{мат}}$  – материальные затраты;

$K_{\text{ам}}$  – амортизация компьютерной техники;

$K_{з/пл}$  – затраты на заработную плату;

$K_{с.о.}$  – затраты на социальные нужды (отчисления);

$K_{пр}$  – прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$  – накладные расходы.

### 4.2.1 Материальные затраты

Материальные затраты ( $K_{\text{мат}}$ ) принимаем в размере 1000 руб. на канцелярские товары.

### 4.2.2 Амортизация компьютерной техники

Амортизация ( $K_{\text{ам}}$ ) представляет собой исчисленный в денежном выражении износ основных средств в процессе их применения и производственного использования. Формула для расчета амортизации следующая:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт.}}}{T_{\text{кал}}} \cdot Ц_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}},$$

(2)

где  $T_{\text{исп.кт.}}$  – время использования компьютерной техники (90 дней);

$T_{\text{кал}}$  – календарное время (365 дней);

$C_{кт}$  – цена компьютерной техники (25000 руб);

$T_{сл}$  – срок службы компьютерной техники (5 лет).

Тогда:

$$K_{ам} = \frac{90}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1233 \text{ руб.}$$

#### 4.2.3 Затраты на заработную плату

Общая заработная плата включает в себя основную и дополнительную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$\text{Для И: } ЗП_{мес} = ЗП_о \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (3)$$

$$\text{Для НР: } ЗП_{мес} = ЗП_о \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (4)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1=10%).

$K_2$  – районный коэффициент (1,3=30%).

$ЗП_о$  – месячный оклад (для инженера – 17000 руб., для научного руководителя доцента – 26300 руб.).

Тогда:

$$\text{Для И: } ЗП_{мес} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.}$$

$$\text{Для НР: } ЗП_{мес} = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37610 \text{ руб.}$$

Расчет фактической заработной платы в зависимости от дней в проекте:

$$\text{Для И: } ЗП_ф = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n; \quad (5)$$

$$\text{Для НР: } ЗП_ф = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n, \quad (6)$$

где

21 – число рабочих дней в месяц;

$n$  – количество отработанных дней по факту.



Получим:

$$\text{Для И: } ЗП_{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 86 = 99560 \text{ руб.};$$

$$\text{Для НР: } ЗП_{\phi} = \frac{37610}{21} \cdot 9 = 16120 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату найдем по формуле:

$$K_{з/пл} = ЗП_{инж} + ЗП_{нр} \quad (7)$$

Получим:

$$K_{з/пл} = 99560 + 16120 = 115700 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4 Затраты на социальные нужды (отчисления)

В данном разделе отражены обязательные отчисления по установленным законодательным нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования от элемента «затраты на оплату труда».

Затраты на социальные нужды принимаются равными 30% от затрат на заработную плату ( $K_{з/пл}$ ):

$$K_{с.о.} = \frac{K_{з/пл} \cdot 30\%}{100\%} \quad (8)$$

$$K_{с.о.} = \frac{115700 \cdot 30}{100} = 34700 \text{ руб.}$$

#### 4.2.5 Прочие затраты

К элементу «Прочие затраты» себестоимости продукции (работы, услуги) относятся налоги, сборы, отчисления в специальные внебюджетные фонды, платежи по обязательному страхованию имущества, платежи за предельно допустимые выбросы загрязняющих веществ; вознаграждения за изобретения и рационализаторские предложения; затраты на командировки; плата сторонним организациям за пожарную и сторожевую охрану; за подготовку кадров; оплата услуг связи, вычислительных центров, банков; плата за аренду; представительские расходы; затраты на ремонт.

Принимаются равными в размере 10% от  $(K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о.}})$ :

$$K_{\text{пр}} = \frac{(K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о.}}) \cdot 10\%}{100\%} \quad (9)$$

Получим:

$$K_{\text{пр}} = \frac{(1000 + 1233 + 115700 + 34700) \cdot 10}{100} = 15260 \text{ руб.}$$

#### 4.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы ( $K_{\text{накл}}$ ) учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Принимаются в размере 200% от затрат на заработную плату ( $K_{\text{з/пл}}$ ):

$$K_{\text{накл}} = \frac{K_{\text{з/пл}} \cdot 200\%}{100\%} \quad (10)$$

Тогда:

$$K_{\text{накл}} = \frac{115700 \cdot 200}{100} = 231300 \text{ руб.}$$

После выполнения расчетов пунктов 1.2.1 – 1.2.6, вернемся к пункту 5.2 и рассчитаем затраты на проект:

$$K_{з/пр} = 1000 + 1233 + 115700 + 34700 + 15260 + 231300 = 399193 \text{ руб.}$$

Полученные данные сведем в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты полученных данных

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	1233
3	Затраты на заработную плату	115700
4	Затраты на социальные нужды	34700
5	Прочие затраты	15260
6	Накладные расходы	231300
	Итого:	399193

### **4.3 Определение ресурсной и экономической эффективности проекта**

Важность и необходимость разработки имитационной модели была связана со стремлением обеспечить надежную и стабильную работу источника бесперебойного питания для электроснабжения локальных вычислительных сетей.

Для стабильной работы локальных вычислительных сетей необходимо обеспечить их питанием качественной электрической энергией. Как правило, качество электрической сети не соответствует заданным требованиям и является весьма нестабильным. При эксплуатации электрических сетей, есть вероятность столкнуться со многими проблемами, такими как: возникновение импульсных бросков напряжения, при подключении дополнительных потребителей; провалы напряжения, как кратковременные, так и длительные (аварийные ситуации);

возможно, как повышение, так и понижение напряжения электрической сети, из-за изменения величины нагрузки, подключаемой к данной сети.

Разработка автоматизированной модели не связана со значительными финансовыми затратами и проблемой окупаемости проекта. Данные факторы не ограничивают реализацию проекта и его привлекательность для заинтересованных сторон в области информационных технологий.

В настоящей работе применена электрическая схема построения ИБП с отдельным зарядным устройством, которое позволяет существенно увеличить срок эксплуатации аккумуляторных батарей. Также был применён трёхуровневый инвертор напряжения, который позволил существенно снизить уровень высших гармоник.

В ходе работы были рассчитаны все функциональные элементы, входящие в состав источника бесперебойного питания, такие как: сглаживающие фильтры, неуправляемые выпрямители, инвертор и преобразователи постоянного напряжения и др.

Для каждого силового элемента источника была выбрана конкретная модель, комплектующие которой в свободном доступе существуют на рынке, полностью подходят по своим техническим характеристикам к требуемым условиям.

Также в работе проводилось моделирование и сравнение работы двух типов инверторов: трехуровневого и однофазного мостового. В результате сравнения гармонических составов было установлено, что при применении структуры трехуровневого инвертора уровень гармоник существенно снижается.

Гармонический состав выходного тока при добавлении активно - индуктивной нагрузки приведен в таблице 4.4, а гармонический состав выходного тока при добавлении выпрямительной нагрузки приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.4 - Гармонический состав выходного тока при добавлении активно - индуктивной нагрузки

Номер гармоники \ Тип инвертора	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Трехуровневый	0,82	100	0,01	1,64	0,02	0,59	0,02	0,65	0,02
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Однофазный мостовой	0,78	100	0,03	3,12	0,11	0,63	0,06	1,14	0,04
	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Таблица 4.5 - Гармонический состав выходного тока при добавлении выпрямительной нагрузки

Номер гармоники \ Тип инвертора	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Трехуровневый	0,81	100	0,02	1,63	0,02	0,59	0,03	0,66	0,03
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Однофазный мостовой	0,74	100	0,04	3,11	0,10	0,62	0,04	1,14	0,05
	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Сравнивая табличные данные, видим, что трехуровневый инвертор, в отличие от однофазного мостового, позволяет заметно снизить значения высших гармоник. Наиболее явно это наблюдается на гармониках под номерами 3, 5 и 7. Снижение величин данных гармоник особенно важно, потому что именно они оказывают наиболее сильное негативное влияние на работу оборудования, подключаемого к ИБП. Применение трехуровневого инвертора, в отличие от однофазного мостового, позволяет получить синусоиду напряжения на выходе, которая по форме более приближена к идеальной, даже при наличии реактивной нагрузки, что в свою очередь благоприятно сказывается на нагрузке.

В целом необходимо отметить, что данный проект является ресурсоэффективным и экономически выгодным, так как разработка имитационной модели позволяет на начальной стадии предотвратить риски, которые могут возникнуть при эксплуатации реального устройства, что позволит уберечь потребителя, от огромных финансовых потерь или даже от техногенных катастроф.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации для построения системы электропитания для защиты локальных вычислительных сетей номинальной мощностью 10 кВА была принята модель ИБП с двойным преобразованием электроэнергии, что обеспечивает необходимое условие неразрывности питающей синусоиды.

В ходе выполнения диссертации, были рассчитаны все функциональные элементы входящие в состав ИБП, такие как: сглаживающие фильтры, неуправляемые выпрямители, трехуровневый инвертор, преобразователи постоянного напряжения и др. Для каждого силового элемента ИБП была выбрана конкретная модель, комплектующие которой в свободном доступе существуют на рынке и полностью соответствуют по своим техническим характеристикам требуемым условиям. Разработана принципиальная электрическая схема ИБП с рассмотрением функционала каждого силового элемента на ней.

В моделирующей среде MATLAB Simulink была разработана и исследована имитационная модель работы ИБП на различные нагрузки. Когда ИБП работает на активно - индуктивную нагрузку наблюдается заметное сглаживание колебаний напряжений и тока. Выходное напряжение при этом практически не искажается. При работе ИБП на выпрямительную нагрузку наблюдается негативное влияние на качество питающей сети. Это связано с емкостным характером выпрямительной нагрузки. При набросе нагрузки данного типа наблюдается провал напряжения и бросок тока.

Также с помощью функции FFT анализ, был рассмотрен гармонический состав выходного тока в зависимости от работы ИБП на различную нагрузку. В процессе моделирования выяснилось что применение трёхуровневого инвертора, в разработанном ИБП, по сравнению с однофазным мостовым инвертором, позволило заметно снизить высшие гармоники выходных токов. Особенно явно это наблюдается на 3, 5, 7

гармониках. Снижение величин данных гармоник очень важно, так как именно они оказывают сильное негативное влияние на работу оборудования.

По окончании проектирования и моделирования, делаем вывод о том, что предложенный в магистерской диссертции источник бесперебойного питания полностью удовлетворяет требованиям технического задания.



## Список использованных источников

1 ГОСТ 33073-2014 ««Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

2 ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

3 Основы локальных вычислительных сетей\Обучение в интернет [Электронный ресурс], режим доступа: [http://www.lessons-tva.info/edu/e-inf3/m3t1\\_1.html](http://www.lessons-tva.info/edu/e-inf3/m3t1_1.html), свободный, дата обращения 20.05.2017.

4 Slavuta-club.info [Электронный ресурс] режим доступа: [http://www.upsinfo.ru/for\\_partners/library/ibpups\\_s\\_dvoynem\\_preobrazovaniem\\_maloy\\_i\\_sredney/](http://www.upsinfo.ru/for_partners/library/ibpups_s_dvoynem_preobrazovaniem_maloy_i_sredney/), свободный, дата обращения 25.05.2017.

5 ИБП с двойным преобразованием энергии малой и средней мощности: схемотехника и технические характеристики [Электронный ресурс], режим доступа: <http://www.tensy.ru/article09.html>, свободный, дата обращения 25.05.017.

6 Аналоги аккумуляторов для ИБП фирмы. [Электронный ресурс] режим доступа: <https://www.h-energy.ru/actual/?id=17>, свободный, дата обращения 25.05.2017.

7 Промышленные аккумуляторы Sonnenschein A400 [Электронный ресурс] режим доступа: <http://www.dryfit.ru/stationar/a400.php>, свободный , дата обращения 25.05.2 17.

8 Что такое крест-фактор (пик-коэффициент, коэффициент амплитуды, пик-фактор, crest factor, cross ratio, peak-to-average ratio (par), cf, c.f.) [Электронный ресурс], режим доступа: [http://peremena.com/blog/blog\\_peremena/что-такое-кrestfaktorpikkoeffitsient-koeffitsient-amplitudy-pikfaktor/](http://peremena.com/blog/blog_peremena/что-такое-кrestfaktorpikkoeffitsient-koeffitsient-amplitudy-pikfaktor/), свободный, дата обращения 25.05.017.

9 Каталог / Электронные компоненты, радиодетали / Активные компоненты / Полупроводниковые модули / IGBT модули [Электронный ресурс], режим доступа: <http://www.platan.ru/cgi-bin/qwery.pl/id=855848513>, свободный, дата обращения 25.05.2017.

10 Чип и Дип: электронные компоненты и приборы [Электронный ресурс], режим доступа <https://www.chipdip.ru/>, свободный, дата обращения 20.05.2017.

11 Лопухин А.А.: Источники бесперебойного питания без секретов. [Электронный ресурс], режим доступа: [do.gendocs.ru](http://do.gendocs.ru), свободный. – Загл. с экрана.

# Приложения

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Технические характеристики и габаритные параметры аккумуляторной батареи Sonnenshein A412/20

Герметичный стационарный свинцово-кислотный аккумулятор A412/20 G5, изготовлен по технологии «dryfit» (желеобразный электролит) и имеет намазные пластины со свинцово-кальциевым легированием.

Области применения:

- источники бесперебойного питания;
- системы охранно-пожарных сигнализаций;
- медицинская техника;
- телекоммуникация и связь;
- другие отрасли, где требуется гарантированное электропитание.

Основные характеристики A412/20:

- низкое газовыделение, благодаря высокой степени рекомбинации газов (99%);
- низкое внутреннее сопротивление;
- отличные характеристики при разряде высокими токами;
- отсутствие ограничений при транспортировке железнодорожным, автомобильным, морским и авиатранспортом (согласно правилам IATA).

Габариты:

- вес (кг): 9
- габариты (Д×Ш×В): 167×176×126

Прочее:

- емкость (Ah): 20
- напряжение (V): 12
- срок службы (лет): 12

- Технология: Gel
- тип: свинцово-кислотный
- тип клемм: под винт М-5

Таблица А.1 – Технические характеристики аккумуляторной батареи А412/20

Ном. U, В	Номинальная ёмкость, А·ч	Ток разряда, А	Время резервирования, мин	Ток резервирования, А
12	20	2	10	25

Таблица А.2 – Разряд выбранной батареи постоянным током при 20°C

$V_{pc}$	5 мин	10 мин	15 мин	20 мин	30 мин	1 ч	3 ч	5 ч	8 ч	10 ч
1.85	33	25	22	20	17	11	4,7	3,2	2,1	1,9
1.80	36	27	23	21	18	12	4,9	3,3	2,2	2
1.75	45	34	27	23	18	12	5	3,3	2,2	2
1.70	51	38	29	24	19	12	5	3,3	2,2	2
1.65	56	40	31	25	19	12	5			
1.60	60	42	31	26	19	12	5			

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Технические характеристики IGBT модуль CM200DY-12H

Выбранный IGBT модуль CM200DY-12H позиционируется фирмой производителем Mitsubishi Electric для работы в высокочастотном ключевом режиме. Каждый модуль состоит из двух IGBT транзисторов, каждый, из которых, имеет обратный быстро восстанавливающийся диод.

Таблица Б.1 – Технические характеристики IGBT модуля CM100DU-12H

$U_{к-э, макс}$ , В	$f_{ком}$ , кГц	$I_{к макс}$ , А
600	25	200



Рисунок Б.1 – Внешний вид IGBT модуля CM200DY-12H

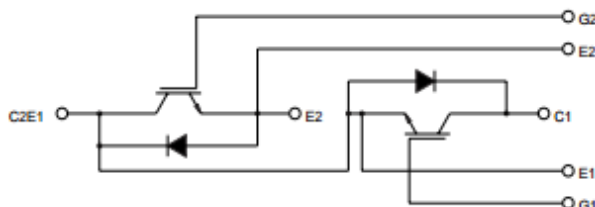


Рисунок Б.2 - Схема электрических соединений IGBT модуля CM200DY-12H

	Symbol	Ratings	Units
Junction Temperature	$T_j$	-40 to 150	°C
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 to 125	°C
Collector-Emitter Voltage (G-E SHORT)	$V_{CES}$	600	Volts
Gate-Emitter Voltage (C-E SHORT)	$V_{GES}$	±20	Volts
Collector Current ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ )	$I_C$	200	Amperes
Peak Collector Current	$I_{CM}$	400*	Amperes
Emitter Current** ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ )	$I_E$	200	Amperes
Peak Emitter Current**	$I_{EM}$	400*	Amperes
Maximum Collector Dissipation ( $T_C = 25^\circ\text{C}, T_j \leq 150^\circ\text{C}$ )	$P_C$	780	Watts
Mounting Torque, M5 Main Terminal	-	1.47 ~ 1.96	N · m
Mounting Torque, M6 Mounting	-	1.96 ~ 2.94	N · m
Weight	-	270	Grams
Isolation Voltage (Main Terminal to Baseplate, AC 1 min.)	$V_{iso}$	2500	Vrms

Рисунок Б.3 – Дополнительные технические характеристики

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Технические характеристики высокочастотного конденсатора К78-36

Конденсаторы К78-36 предназначены для работы в цепях переменного, пульсирующего токов. Фирмой производителем обеспечивается высокая стабильность параметров и долговечность.

Таблица В.1 – Технические характеристики конденсатора К78-36

Наименование показателя	Значения
Серия/Диэлектрик	К78-36/полипропиленовые металлизированные
Номинальная емкость, мкФ	$7 \pm 5\%$
Номинальное напряжение, В	450
Тангенс угла потерь	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление изоляции, Ом	$3 \cdot 10^9$

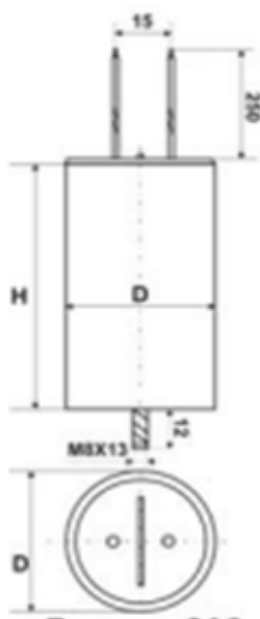


Рисунок В.1 – Внешний вид с указанием габаритных параметров конденсатора К78-36

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Технические характеристики транзистора IGBT HGTG20N60A4

Выбранный IGBT HGTG20N60A4 позиционируется фирмой производителем, как высокочастотный транзистор с ультравысокой скоростью переключений и с минимальной индуктивностью. При температуре нагрева 110 градусов, необходимо применять внешнее охлаждение, так как наблюдается снижение максимального допустимого тока до 40А.

Таблица Г.1 – Технические параметры IGBT HGTG20N60A4

$U_{к-э макс}, В$	$I_{к макс}, А$	$f_{ком}, кГц$	Допустимый перепад Т, °С
600	70	30	-55/+150

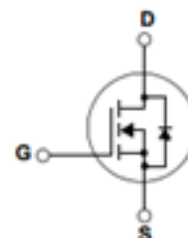
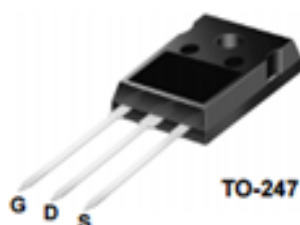


Рисунок Г.1 – Внешний вид и схема электрических соединений транзистора IGBT HGTG20N60A4

**Absolute Maximum Ratings**  $T_C = 25^{\circ}C$ , Unless Otherwise Specified

	HGTG20N60A4, HGTP20N60A4	UNITS
Collector to Emitter Voltage .....	600	V
Collector Current Continuous		
At $T_C = 25^{\circ}C$ .....	70	A
At $T_C = 110^{\circ}C$ .....	40	A
Collector Current Pulsed (Note 1) .....	280	A
Gate to Emitter Voltage Continuous .....	±20	V
Gate to Emitter Voltage Pulsed .....	±30	V
Switching Safe Operating Area at $T_J = 150^{\circ}C$ (Figure 2) .....	100A at 600V	
Power Dissipation Total at $T_C = 25^{\circ}C$ .....	290	W
Power Dissipation Derating $T_C > 25^{\circ}C$ .....	2.32	W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range .....	-55 to 150	°C
Maximum Lead Temperature for Soldering		
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s. ....	300	°C
Package Body for 10s, See Tech Brief 334 .....	260	°C

Рисунок Г.2 – Дополнительные технические характеристики



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

диод VS-40EPF04PBF компании «Vishay»

Выбранный диод VS-40EPF04PBF относится к быстрodeйствующему классу диодов и изготавливается специально для работы в источниках питания и сварочных аппаратах, что подразумевает большие значения максимального прямого тока.

Таблица Д.1 – Технические характеристики диода VS-40EPF04PBF

$I_{пр}, A$	40
$U_{обр}, B$	600
Прямое напряжение, В	1,25
Обратный ток утечки, мкА	100
Время восстановления, мкс	0,18

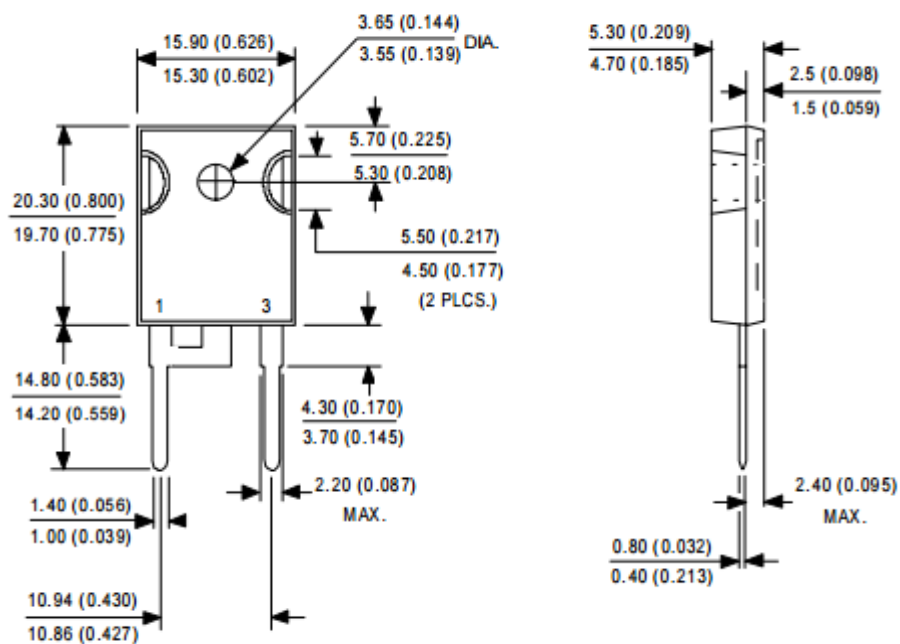


Рисунок Д.1 – Чертеж выбранного диода

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Технические параметры конденсатора К78-36

Выбранный конденсатор ЕСАР (К78-36) благодаря электрохимическому принципу работы, обладает следующими преимуществами:

- высокая удельная емкость;
- высокий максимально допустимый ток пульсации;
- высокая надежность.

Таблица Е.1 – Технические параметры конденсатора К78-36

Номинальное напряжение, В	450
Номинальная емкость, мкФ	100
Интервал рабочих температур, °С	-40/+55
Допуск номинальной емкости, %	20
Тангенс угла потерь, %	0,2

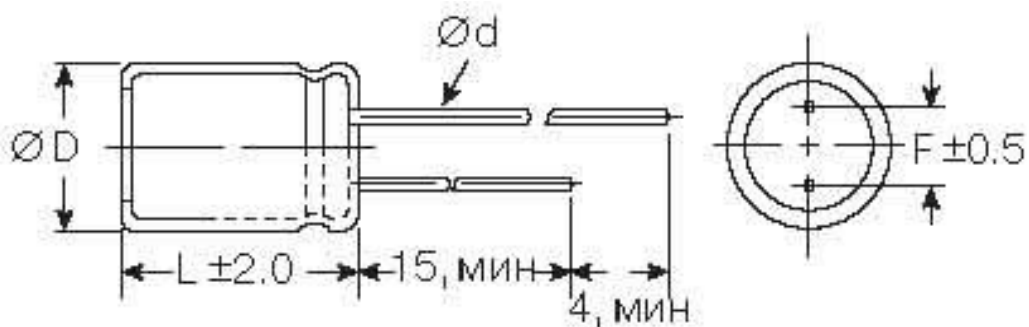


Рисунок Е.1 – Чертеж выбранного конденсатора

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Технические характеристики диода VS-40EPF04PBF

Выбранный диод VS-40EPF04PBF относится к быстродействующему классу диодов и изготавливается специально для работы в источниках питания и сварочных аппаратах, что подразумевает большие значения максимального прямого тока.

Таблица Ж.1 – Технические характеристики диода VS-40EPF04PBF

$I_{пр}, A$	60
$U_{обр}, B$	400
Прямое напряжение, В	1,3
Обратный ток утечки, мкА	500
Время восстановления, мкс	0,18

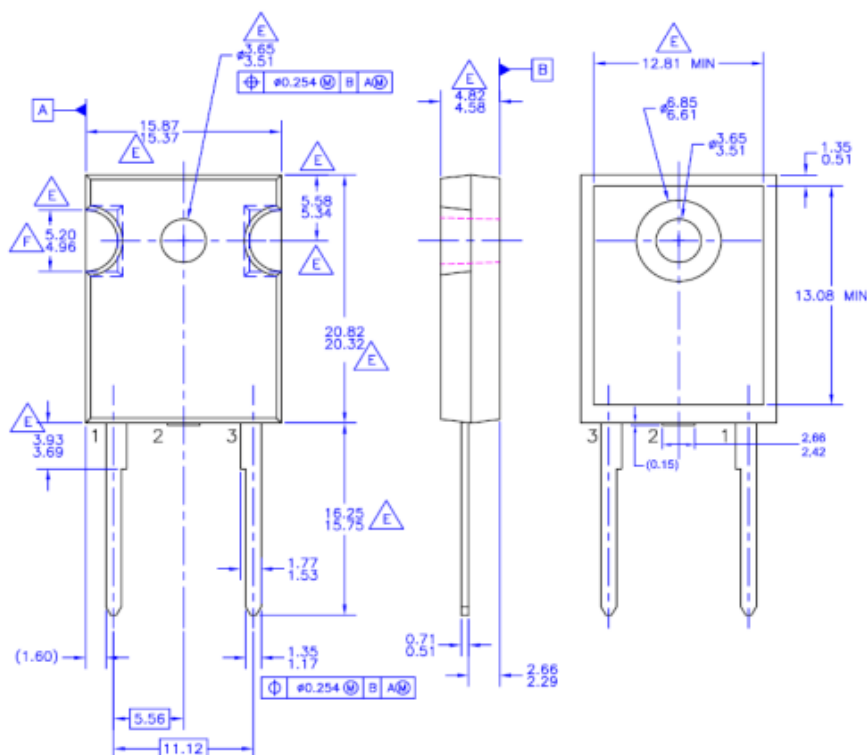


Рисунок Ж.1 – Чертеж диода VS-40EPF04PBF

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

### Технические характеристика конденсатора серии ЕСАР (К50-35)

#### В43456А9478М000

Выбранный конденсатор ЕСАР (К50-35) В43456А9478М000 позиционируется фирмой-изготовителем Epcos как конденсатор, разработанный для профессиональных источников питания, ИБП, преобразователей частоты.

Номинальное напряжение $V_R$ Импульсное напряжение $V_S$	350 ... 450 В (DC) $1.10 \cdot V_R$	
Номинальная емкость $C_R$ Допуск емкости	1000... 18000 мкФ $\pm 20\% \pm M$	
Ток утечки $I_{leak}$ (20 °C, 5 мин)	$I_{leak} < 0.3 \text{ мкА} \cdot \left( \frac{C_R}{\text{мкФ}} \cdot \frac{V_R}{\text{В}} \right)^{0.7} + 4 \text{ мкА}$	
Собственная индуктивность ESL	d = 51.6мм: = 15 нГн d > 64.3 мм: = 20 нГн Версия с низкой индуктивностью: d > 64.3 мм: = 13 нГн	
Срок службы 85 °C; $V_R$ ; $I_{AC,R}$ 40 °C; $V_R$ ; $1.5 \cdot I_{AC,R}$	> 12000 ч > 250000 ч	Требования: $\Delta C/C < \pm 30\%$ от начального значения ESR < 3 × нач. заданный предел $I_{leak} < \text{нач. заданный предел}$
Испытание на долговечность по напряжению 85 °C; $V_R$	2000 ч	Требования к параметрам после испытаний: $\Delta C/C < \pm 10\%$ от начального значения ESR < 1.3 × нач. заданный предел $I_{leak} < \text{нач. заданный предел}$
Испытание на виброустойчивость	МЭК 60068-2-6, тест Fc: Амплитуда смещения 0.75 мм, диапазон частот 10...55 Гц, максимальное ускорение 10 g, продолжительность 3 × 2 ч. Корпус конденсатора жестко зафиксирован на поверхности.	
Низкотемпературные характеристики	Отношение импедансов: $Z_{-40^\circ\text{C}}/Z_{+20^\circ\text{C}}$ (100Hz) < 7 (при $V_R < 400 \text{ В (DC)}$ ) < 9 (при $V_R = 450 \text{ В (DC)}$ )	
Климатическая группа МЭК	МЭК 60068-1: – $V_R < 400 \text{ В (DC)}$ : 40/085/56 (–40 °C/+85 °C/56-дневное испытание на влажный нагрев) – $V_R = 450 \text{ В (DC)}$ : 25/085/56 (–25 °C/+85 °C/56-дневное испытание на влажный нагрев) Хотя конденсаторы рассчитаны на работу при температурах –40...+85 °C, необходимо учитывать увеличение импеданса при охлаждении	
Подробные спецификации Групповые спецификации	Аналогичны SECC 30301-803, SECC 30301-807 МЭК 60384-4	

Рисунок К.1 – Технические характеристика конденсатора серии ЕСАР(К50-35) В43456А9478М000

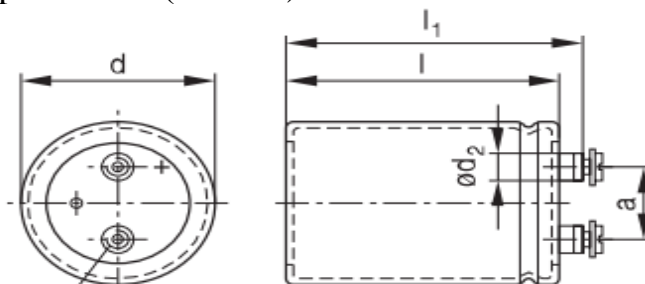


Рисунок 63 – Чертеж конденсатора серии ЕСАР(К50-35) В43456А9478М000

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

### Технические параметры конденсатора ЕСАР В43458-А9158-М

Выбранный конденсатор ЕСАР (К50-35) В43458-А9158-М позиционируется фирмой-изготовителем Epcos как конденсатор, разработанный для профессиональной и полупрофессиональной электроники, фильтрации, импульсных схем.

Таблица Л.1 – Технические параметры конденсатора ЕСАР В43458-А9158-М

Номинальное напряжение, В	400
Номинальная емкость, мкФ	1500
Интервал рабочих температур, °С	-40/+85
Допуск номинальной емкости, %	20
Тангенс угла потерь, %	0,15

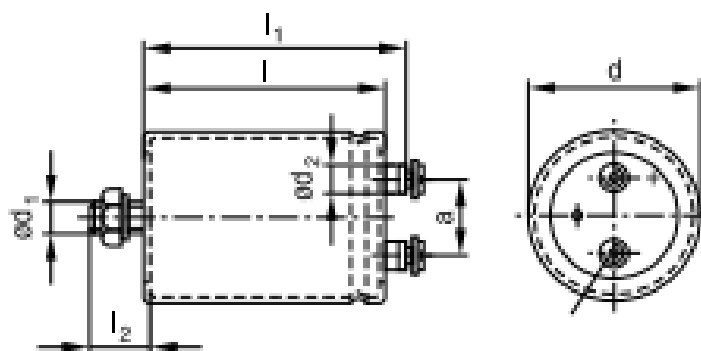


Рисунок Л.1 – Чертеж конденсатора ЕСАР В43458-А9158-М

## ПРИЛОЖЕНИЕ М

### Технические параметры транзистора IGBT IRGB4607DPBF

Выбранный IGBT IRGB4607DPBF позиционируется фирмой производителем, как высокочастотный транзистор.

Таблица М.1 - Технические параметры транзистора IGBT IRGB4607DPBF

$U_{к-э макс}, В$	$I_{к макс}, А$	$f_{ком}, кГц$	Допустимый перепад Т, °С
600	7	30	-55/+175

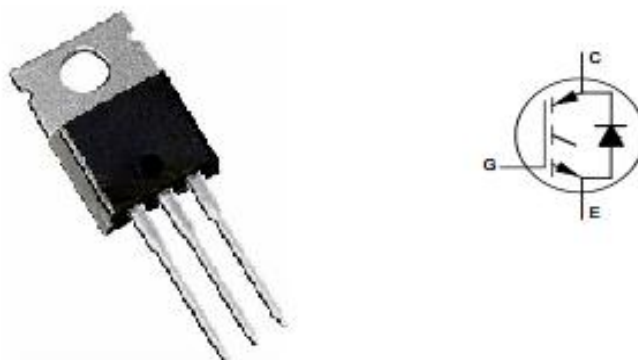


Рисунок М.1 – Внешний вид и схема электрических соединений транзистора IGBT IRGB4607DPBF

#### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$V_{CES}$	Collector-to-Emitter Voltage	600	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	11	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	7.0	
$I_{CM}$	Pulse Collector Current, $V_{GE}=20V$	12	
$I_{LM}$	Clamped Inductive Load Current, $V_{GE}=20V \text{ } \text{\textcircled{D}}$	16	
$I_F @ T_C = 25^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	8.0	
$I_F @ T_C = 100^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	5.0	V
$I_{FM}$	Diode Maximum Forward Current	16	
$V_{GE}$	Continuous Gate-to-Emitter Voltage	$\pm 20$	V
	Transient Gate-to-Emitter Voltage	$\pm 30$	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	58	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	29	
$T_J$	Operating Junction and	-40 to +175	°C
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 sec. (1.6mm) from case)		
	Mounting Torque, 6-32 or M3 Screw	10 lbf-in (1.1 N-m)	

Рисунок М.2 – Дополнительные технические характеристики

## ПРИЛОЖЕНИЕ Н

### Технические характеристики диода НФА04ТВ60

Выбранный диод НФА04ТВ60 относится к ультрабыстрому классу диодов и изготавливается специально для работы в источниках питания и сварочных аппаратах.

Таблица Н.1 – Технические характеристики диода НФА04ТВ60

$I_{пр}, А$	4
$U_{обр}, В$	600
Прямое напряжение, В	1,8
Обратный ток утечки, мкА	3
Время восстановления, мкс	0,017

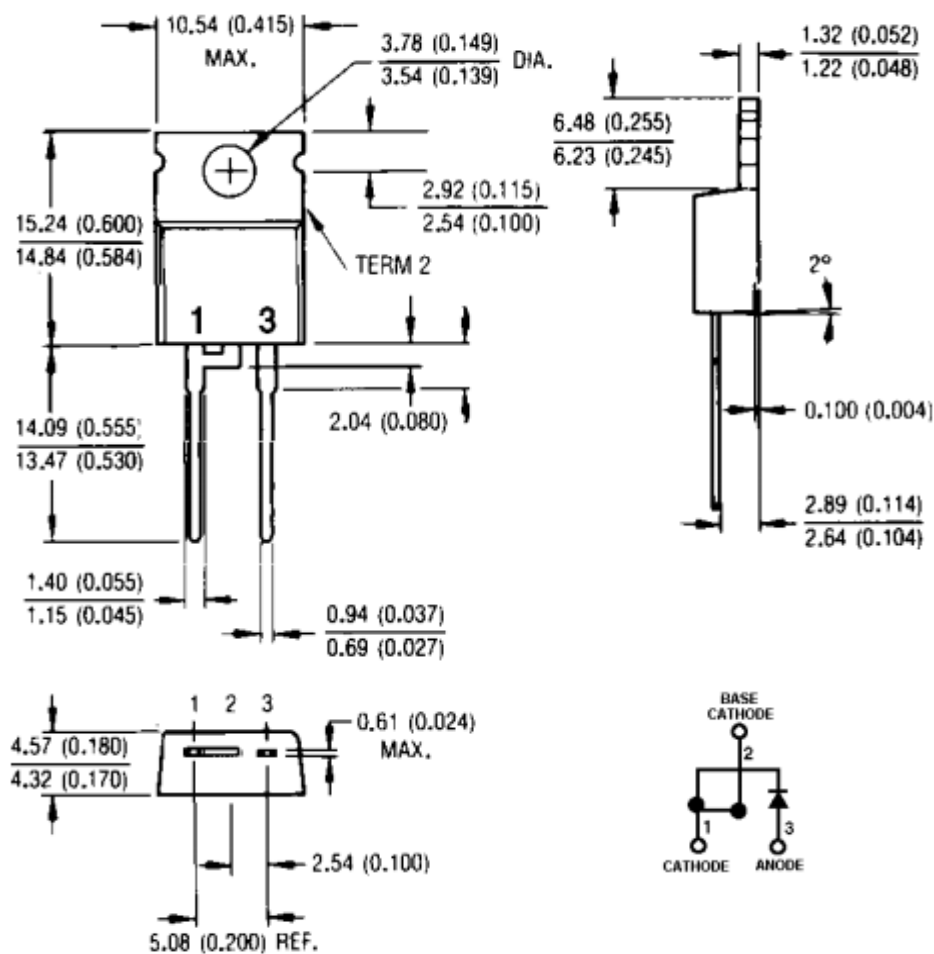


Рисунок Н.1 – Чертеж диода НФА04ТВ60

## ПРИЛОЖЕНИЕ П

### Технические параметры конденсатора ЕСАР (К50-35) ТКR100M2WJ20

Выбранный конденсатор ЕСАР (К50-35) ТКR100M2WJ20 позиционируется фирмой-изготовителем Jamicon как конденсатор, разработанный для профессиональной и полупрофессиональной электроники.

Таблица 7 – Технические параметры конденсатора ЕСАР (К50-35) ТКR100M2WJ20

Номинальное напряжение, В	450
Номинальная емкость, мкФ	10
Интервал рабочих температур, °С	-25/+105
Допуск номинальной емкости, %	20
Тангенс угла потерь, %	0,2

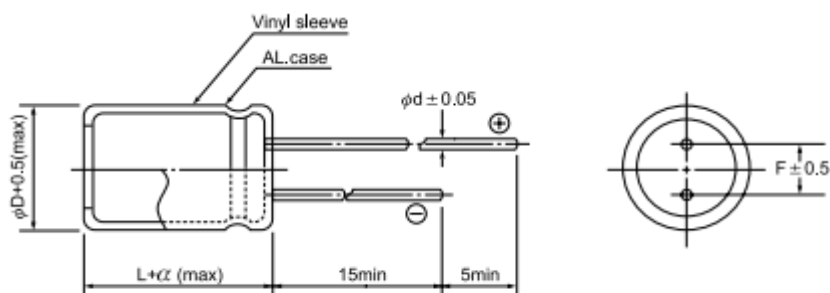


Рисунок П.1 – Чертеж конденсатора ЕСАР (К50-35) ТКR100M2WJ20



## ПРИЛОЖЕНИЕ Р

### Технические характеристики диода VS-10ETF06PBF

Выбранный диод VS-10ETF06PBF относится к быстродействующему классу диодов и изготавливается специально для работы в источниках питания и сварочных аппаратах, что подразумевает большие значения максимального прямого тока.

Таблица Р.1 – Технические характеристики диода VS-10ETF06PBF

$I_{пр}, A$	10
$U_{обр}, B$	600
Прямое напряжение, В	1,2
Обратный ток утечки, мкА	100
Время восстановления, мкс	0,145

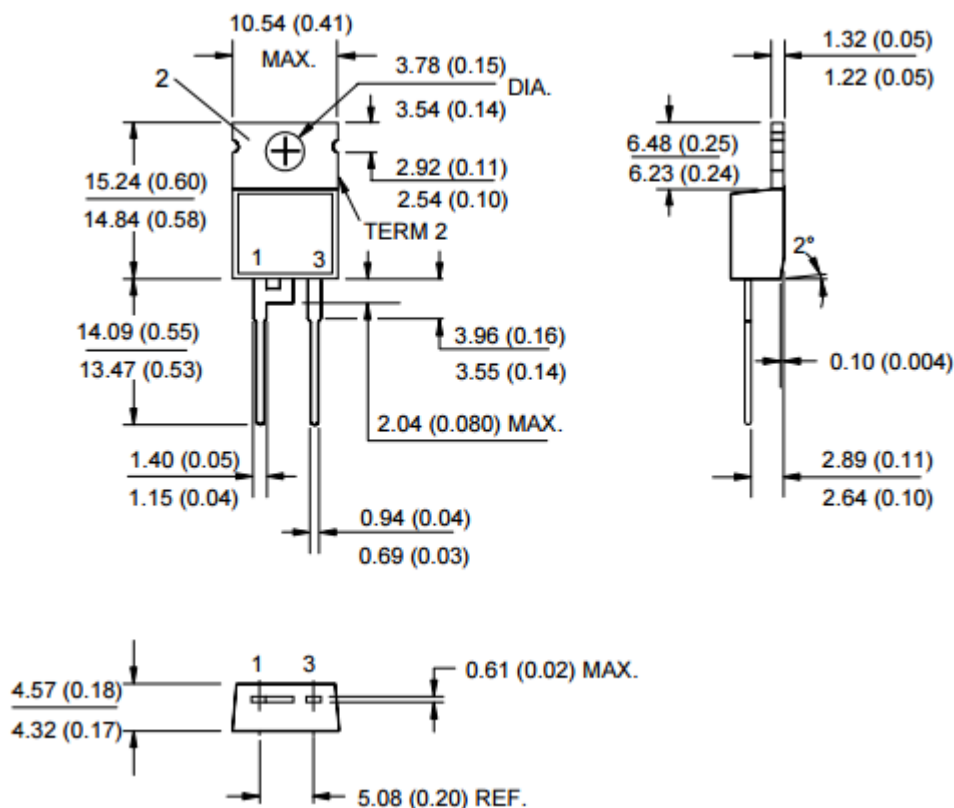


Рисунок Р.1 – Чертеж диода VS-10ETF06PBF

## ПРИЛОЖЕНИЕ С

### Технические параметры конденсатора ЕСАР (К50-35) ТКR100M2WJ20

Выбранный конденсатор ЕСАР (К50-35) ТКR100M2WJ20 позиционируется фирмой-изготовителем Jamicon как конденсатор, разработанный для профессиональной и полупрофессиональной электроники.

Таблица С.1 – Технические параметры конденсатора ЕСАР (К50-35) KR100M2WJ20

Номинальное напряжение, В	450
Номинальная емкость, мкФ	470
Интервал рабочих температур, °С	-40/+105
Допуск номинальной емкости, %	20
Тангенс угла потерь, %	0,2

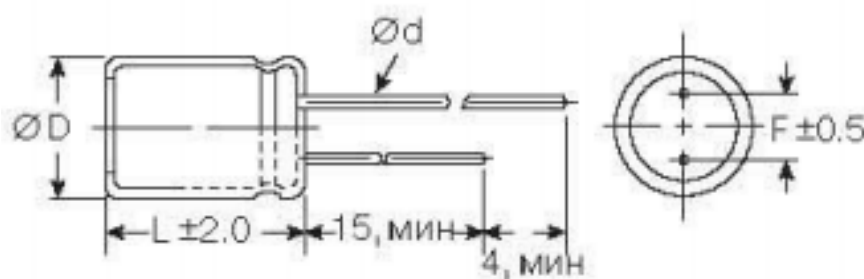


Рисунок С.1 – Чертеж конденсатора ЕСАР (К50-35) ТКR100M2WJ20