

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени АБУ РАЙХОНА БЕРУНИ**

**Факультет “Электроника и автоматика”**

**Кафедра “Электроника и микроэлектроника”**

*На правах рукописи*

**Якшигулов Марат Наильевич**

**ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА  
«ТРЕХФАЗНЫЙ ЗАВИСИМЫЙ ИНВЕРТОР»**

**Выпускная квалификационная работа  
на соискание степени бакалавра по направлению 5521700  
«Электроника и микроэлектроника»**

**Заведующий кафедрой:**

**проф. Илиев Х.М.**

**Руководитель:**

**ст. пр-ль Мочалов А.И.**

**Ташкент – 2014 г.**

## СОДЕРЖАНИЕ

Список условных обозначений и сокращений	5.
ВВЕДЕНИЕ	6.
ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.	9.
1.1 Виды преобразования параметров электроэнергии и устройств преобразовательной техники	9.
1.2 Понятие о процессе инвертирования, виды инверторов.	19.
ГЛАВА 2 ОБЗОР И АНАЛИЗ ЗАВИСИМЫХ ИНВЕРТОРОВ	32.
2.1 Зависимые инверторы	32.
2.2 Анализ и расчет зависимого трехфазного инвертора	46.
ГЛАВА 3 ВЫБОР СХЕМЫ И ПОДБОРКА ПАРАМЕТРОВ, А ТАК ЖЕ ПРОГРАММЫ МОДУЛИРОВАНИЯ.	50.
3.1 Выбор схемы инвертора.	50.
3.2 Выбор программы	54.
ГЛАВА 4 ПОСТРОЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	61.
4.1 Формирование виртуальной модели трехфазного зависимого инвертора.	61.
4.2 Последовательность выполнения виртуальной лабораторной работы	64.
Безопасность жизнедеятельности	65.
Экономическая часть	80.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86.
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	88.

**СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ,  
ПРИНЯТЫХ В ДАННОЙ РАБОТЕ.**

<b>ВЛР</b>	–	виртуальная лабораторная работа
<b>УВ</b>	–	управляемый выпрямитель
<b>АИ</b>	–	автономные инверторы
<b>ЗИ</b>	–	зависимый инвертор
<b>ППН</b>	–	преобразователь постоянного напряжения
<b>НПЧ</b>	–	непосредственные преобразователи частоты
<b>АСМ</b>	–	асинхронная машина
<b>СУ</b>	–	система управления
<b>ШИМ</b>	–	широтно-импульсная модуляция
<b>ШИП</b>	–	широтно-импульсный преобразователь
<b>ШИППН</b>	–	широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения
<b>ШИР</b>	–	широтно-импульсный регулятор
<b>ОХ</b>	–	ограничительная характеристика
<b>ЭДС</b>	–	Электродвижущая сила
<b>ПЭДС</b>	–	Противоположно направленная электродвижущая сила

## **ВВЕДЕНИЕ**

Подводя итоги и оценивая основные результаты социально-экономического развития страны в 2013 году, есть все основания заявить, что в истекшем году продолжился взятый курс на обеспечение высоких устойчивых темпов роста, макроэкономической сбалансированности, модернизации и диверсификации экономики. Создаются новые современные производства по выпуску телекоммуникационного оборудования, компьютерной техники и сотовой телефонии, широкого ассортимента бытовой электроники. Модернизируются, по сути дела, заново технологически обновляются практически все отрасли нашей экономики. Исходя из программных целей долгосрочного развития страны, важнейшими задачами и приоритетами экономической программы на 2014 год являются:

- продолжение принятой стратегии, обеспечивающей стабильно высокие темпы роста экономики, мобилизацию для этого имеющихся резервов и возможностей;

- ввод в строй важнейших высокотехнологичных и современных объектов и мощностей в промышленности, рост и совершенствование инвестиционного процесса;

- формирование в стране полноценной конкурентной среды, являющейся ключевым фактором технического и технологического обновления и модернизации производства, выхода на мировые рынки.

Ключевые задачи, решение которых предстоит – это дальнейшее ускоренное проведение модернизации, технического и технологического перевооружения предприятий, широкое внедрение современных гибких технологий, реализация мер по модернизации электроэнергетики, сокращению энергоемкости и внедрению эффективной системы энергосбережения. Дальнейшее повышение конкурентоспособности нашей экономики, рост благосостояния населения во многом зависят от того,

насколько бережно, экономно мы научимся использовать имеющиеся ресурсы и в первую очередь электро - и энергоресурсы<sup>1</sup>.

В Указе Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» от 01.03.2013 г. подчёркивается, что в экономически развитых и развивающихся странах ускоренными темпами ведутся разработки по практическому использованию альтернативных источников энергии как важнейшего фактора устойчивого развития и повышения конкурентоспособности экономик в условиях сокращения мировых запасов углеводородного сырья. Отсюда следует, что развитие альтернативной энергетики является актуальной задачей во всём мире [2].

Созданные в Узбекистане условия и объективные предпосылки для практического применения солнечной энергии служат основой для использования этого региона как площадки для экспериментального внедрения передовых технологий в этой сфере не только в республике, но во всей Средней Азии.

Основным поставщиком солнечной электрической энергии являются солнечные элементы, принцип работы которых основан на прямом преобразовании энергии солнечного излучения непосредственно в электрическую силу. Солнечные элементы вырабатывают энергию при низких эксплуатационных расходах и не загрязняют окружающую среду.

В настоящее время в Республике осваивается широкомасштабное производство эффективных солнечных элементов на промышленной основе, начинают производиться фотоэлектрические модули для станций. Кроме того, разрабатываются опытные образцы ветроэлектрических генераторов и установок на их основе.

Энергия, вырабатываемая фотоэлектрическими генераторами, имеет определенные особенности:

---

<sup>1</sup> Указ президента «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии»

– нестационарный характер выработки энергии, что приводит к необходимости использования аккумулятора.

– существенная зависимость мощности, отдаваемой солнечной батареей, от температуры, а также ориентации на Солнце.

– электрическая энергия вырабатывается в виде постоянного напряжения в диапазоне от 12 до 48 вольт.

Из перечисленных особенностей следует, что на выходе фотоэлектрических генераторов вырабатываемая энергия постоянного тока имеет нестабильный характер и требует дополнительных мер по стабилизации. Кроме того, часто возникает необходимость преобразования величины постоянного напряжения в сторону увеличения или, наоборот, уменьшения. Эти задачи успешно решаются с помощью транзисторных преобразователей – импульсных регуляторов-стабилизаторов постоянного напряжения. Простейшие схемы преобразователей представляют собой регуляторы постоянного напряжения.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена трехфазному зависимому инвертору. Актуальность темы определяется тем, что в ней рассматриваются вопросы постановки и использования в учебном процессе виртуальной лабораторной работы по изучению принципа работы трехфазного зависимого инвертора, имеющих широкую сферу практического применения, в том числе в системах энергообеспечения асинхронных двигателей. В процессе разработки преобразовательных устройств важным этапом является моделирование. При этом важно быть уверенным в достоверности результатов, полученных с помощью программ моделирования электронных схем. В связи с этим, актуальными являются вычислительные эксперименты с виртуальными моделями устройств, которые уже практически используются.

# ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

## 1.1. Виды преобразования параметров электроэнергии и устройств преобразовательной техники

Примерно 100% электрической энергии производится на электрических станциях трехфазного переменного тока с частотой 50 Гц (60 Гц).

Из них примерно 30% электрической энергии переменного тока преобразуется в постоянный ток (с помощью выпрямителей). А с учетом других видов преобразования, доля преобразованной электрической энергии составляет более 40 % от произведенной электрической энергии. Основные виды преобразования параметров электрической энергии представлены на рис. 1.1.

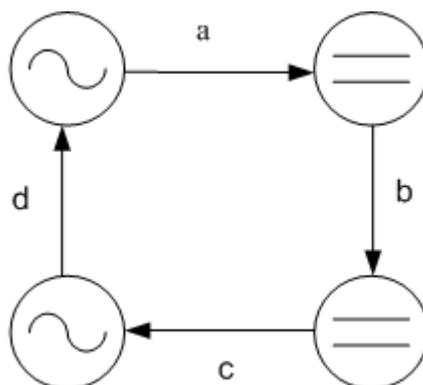


Рис 1.1. Основные виды преобразования

a - преобразование переменного тока в постоянный (выпрямление) применяется в тяговом электроприводе (ж/д), в промышленности применяется –электропривод (коллекторные двигатели постоянного тока);

b – преобразование электроэнергии постоянного тока с одними параметрами в электроэнергию постоянного тока с другими параметрами. Осуществляется с помощью импульсного преобразователя напряжения постоянного тока;

c – преобразование электрической энергии постоянного тока в электрическую энергию переменного тока –**инвертирование**.

d – преобразование электроэнергии переменного тока с одними параметрами в электроэнергию переменного тока с другими параметрами.

## Классификация полупроводниковых преобразователей для электропривода

Силовые полупроводниковые преобразователи в системах электропривода выполняют функцию регулирования скорости и момента электрического двигателя. Они включены между двигателем и основным источником питания. По принципу действия силовые преобразователи разделяются на следующие базовые типы<sup>2</sup> и представлены на рис 1.2:

- Широтно-импульсные преобразователи (ШИП), связывающие источник постоянного тока с двигателем постоянного тока;
- Управляемые выпрямители (УВ), связывающие источник переменного тока с двигателем постоянного тока, частным случаем управляемого выпрямителя является *выпрямитель неуправляемый* (В);
- Автономные инверторы (АИ), связывающие источник постоянного тока с двигателем переменного тока;
- Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ), связывающие источник переменного тока с двигателем переменного тока. Функциональные схемы базовых преобразователей показаны на рисунке 1.

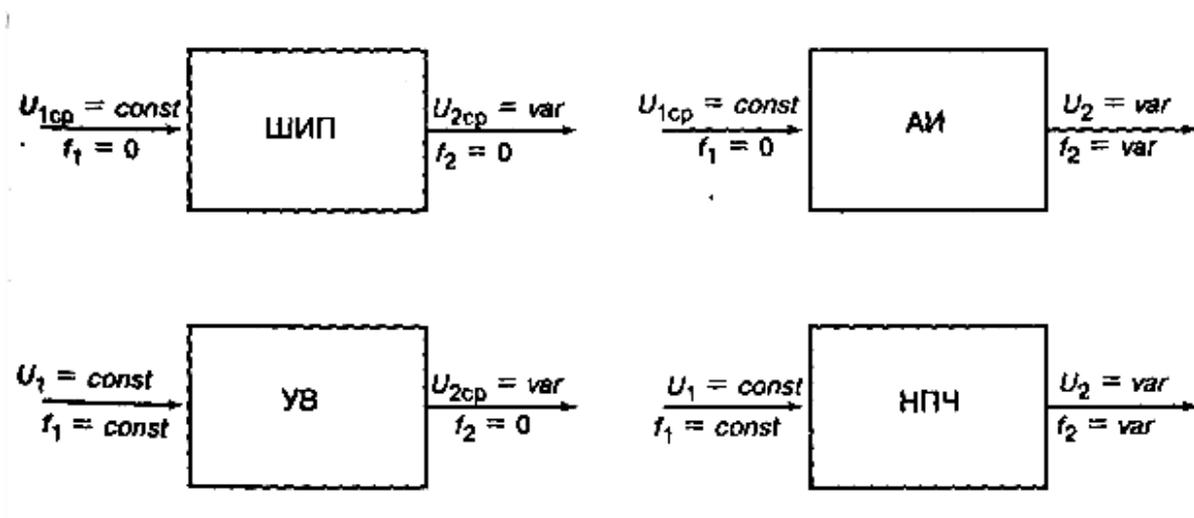


Рис.1.2 Базовые типы силовых преобразователей

<sup>2</sup> Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – Л.: Высшая школа, 1973. – с 350

Следует помнить, что постоянные напряжения ( $f=0$ ) характеризуются средними значениями  $U_{1cp}$ ,  $U_{2cp}$ , а переменные ( $f>0$ ) — действующими значениями ( $U_1$ ,  $U_2$ ).

**Широтно-импульсный преобразователь** преобразует постоянное напряжение питания ( $U_{1cp} = const, f_1 = 0$ ) в постоянное регулируемое напряжение на выходе ( $U_{2cp} = var, f_2 = 0$ ).

**Управляемый выпрямитель** преобразует переменное, обычно синусоидальное напряжение частоты  $f_1 = 50$  Гц постоянного действующего значения (обычно 220В), в постоянное регулируемое напряжение на выходе ( $U_{2cp} = var, f_2 = 0$ ).

**Автономный инвертор** преобразует постоянное напряжение питания ( $U_{1cp} = const, f_1 = 0$ ) в переменное напряжение на выходе с регулируемым действующим значением и регулируемой частотой ( $U_2 = var, f_2 = var$ ).

**Непосредственный преобразователь частоты** преобразует переменное, обычно синусоидальное, напряжение частоты  $f_1 = 50$  Гц постоянного действующего значения (обычно 220 В) в переменное напряжение на выходе с регулируемым действующим значением и регулируемой частотой ( $U_2 = var, f_2 = var$ ).

Возможные варианты применения базовых силовых преобразователей в электроприводах постоянного и переменного тока показаны на рис. 1.3.

В электроприводах постоянного тока исполнительным узлом является двигатель постоянного тока. При питании от источника постоянного тока (аккумулятор, солнечная батарея, генератор постоянного тока) в качестве силового преобразователя используется ШИП, если источником питания является сеть переменного тока, то может быть применен УВ либо сочетание В+ШИП (Рис.1.3).

В электроприводах переменного тока исполнительным двигателем является машина переменного тока. В этом случае при питании от источника постоянного тока применяется АИ, а при питании от источника переменного тока НПЧ, либо сочетания УВ+АИ, либо В+АИ.

Следует отметить, что для управления двигателями постоянного тока необходимо регулировать только напряжение, а для управления двигателями переменного тока — напряжение и частоту.

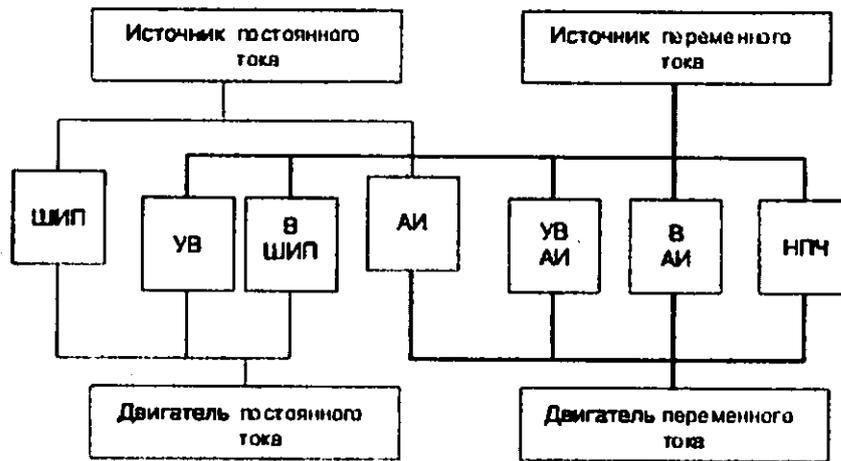


Рис.1.3. Базовые способы построения электроприводов постоянного и переменного тока

### Инверторы:

- **Зависимые** – (ведомые сетью) работают на частоте сети (50 Гц.). При электротяге на переменном токе зависимые инверторы устанавливаются на ЭПС (ВИП). При тяге на постоянном токе ВИП устанавливаются на тяговых подстанциях.<sup>3</sup>
- **Автономные** – служат для преобразования электрической энергии постоянного тока в электроэнергию переменного тока с возможностью плавного регулирования частоты и уровня напряжения. См. рис 1.4

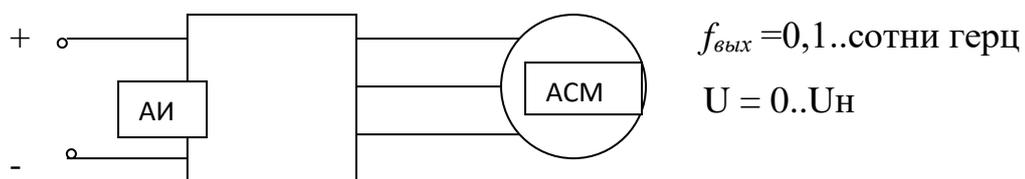


Рис.1.4 Блок схема работы АСМ

Такой вид создан для новых типов электровозов: ЭП=100, ЭП=200 ЭП=300

<sup>3</sup> Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – Л.: Высшая школа, 1973. – с 432

АИ – автономный инвертор

АСМ- асинхронная машина

Вид преобразования: преобразование электрической энергии однофазного переменного тока частоты 50 Гц в для асинхронного электропривода со звеном постоянного тока или с использованием непосредственного преобразователя частоты (НПЧ).

Примеры применения: см. рис 1.5.

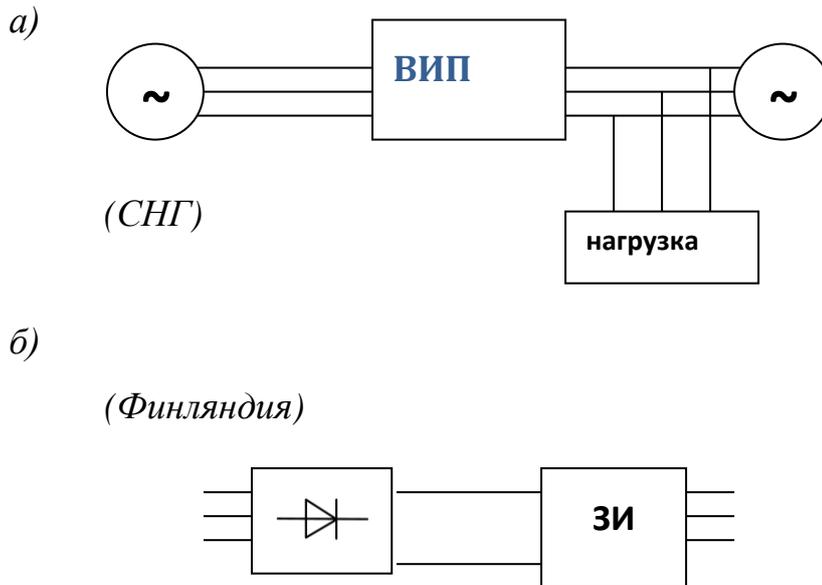


Рис.1.5 а) применение в странах СНГ. б) Применение в Финляндии.

ЗИ- зависимый инвертор

СПП – статические полупроводниковые преобразователи

СПВ – силовые полупроводниковые вентили (тиристоры, диоды)

КПД СПП достигает 99,5%

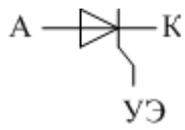
СПВ обладают почти идеальными характеристиками ключа 1-2 В, которые достигают тока 1000 А. В закрытом состоянии через вентиль протекает очень маленький ток, следовательно, потерь электрической энергии в открытом и закрытом состоянии почти нет.

### ***Силовые полупроводниковые приборы***

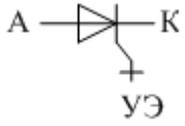
1. диоды



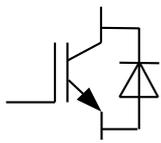
2. тиристоры незапираемые



3. тиристоры запираемые



4. биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)



5. полевые силовые транзисторы(MOSFET)

Диапазоны по основным параметрам:

10А – 4500А

100В – 8000В

50Гц – 1МГц

## Параметры силовых полупроводниковых вентиляей

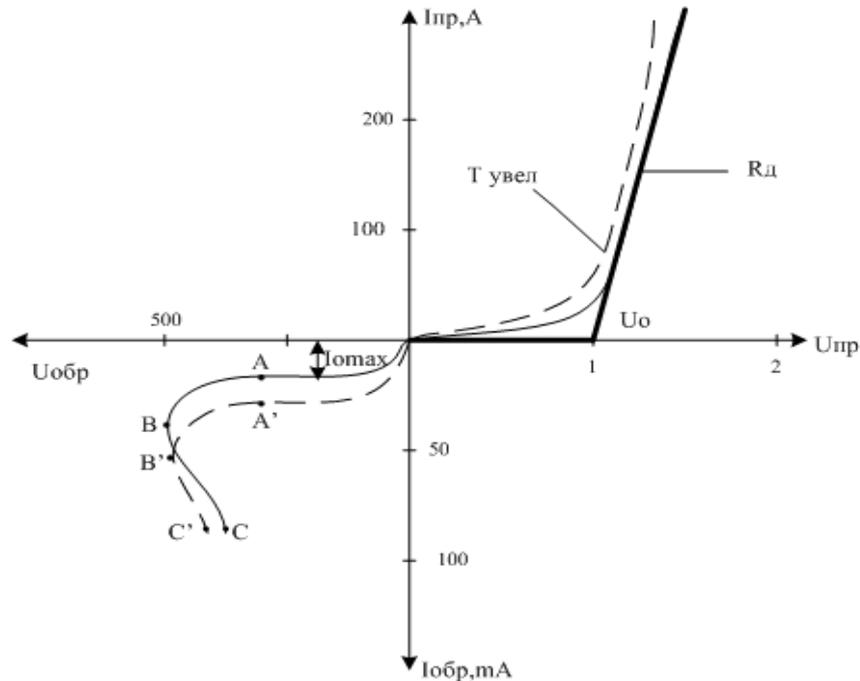


Рис.1.6 Вольтамперная характеристика (ВАХ) диода

$U_o$  – пороговое напряжение

$R_d$  – дифференциальное сопротивление

A – B –электрический пробой (обратимый)

B – C –тепловой пробой (необратимый), с нарушением структуры

$$R_d = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}}$$

С увеличением температуры ВАХ деформируется в сторону увеличения тока

$T_{пред} = 140^\circ \text{C}$  (для диода)

$R_T = \frac{\Delta t}{p}$  - тепловое сопротивление

*Предельные параметры вентиля:*

- по напряжению:

$U_{п}$  (повторяющееся напряжение) – максимальное, длительно допустимое мгновенное значение напряжения, которое может

прикладываться к вентилю в обратном направлении (или прямом направлении в закрытом состоянии для тиристора)

По повторяющемуся напряжению диоды делятся на классы:

$U_{нп}$  (неповторяющееся напряжение) – максимальное мгновенное значение напряжения, которое может прикладываться к вентилю резко (грозовые перенапряжения).

$U_{нп} = 1,16U_{нп}$  (для тиристоров  $U_{нп} = 1,11U_{нп}$ )

- по току:

$I_{п}$  (предельный ток) – максимально допустимое среднее значение тока через вентиль.

Параметры определяются в однополупериодной схеме выпрямления, при работе на активную нагрузку (50Гц)

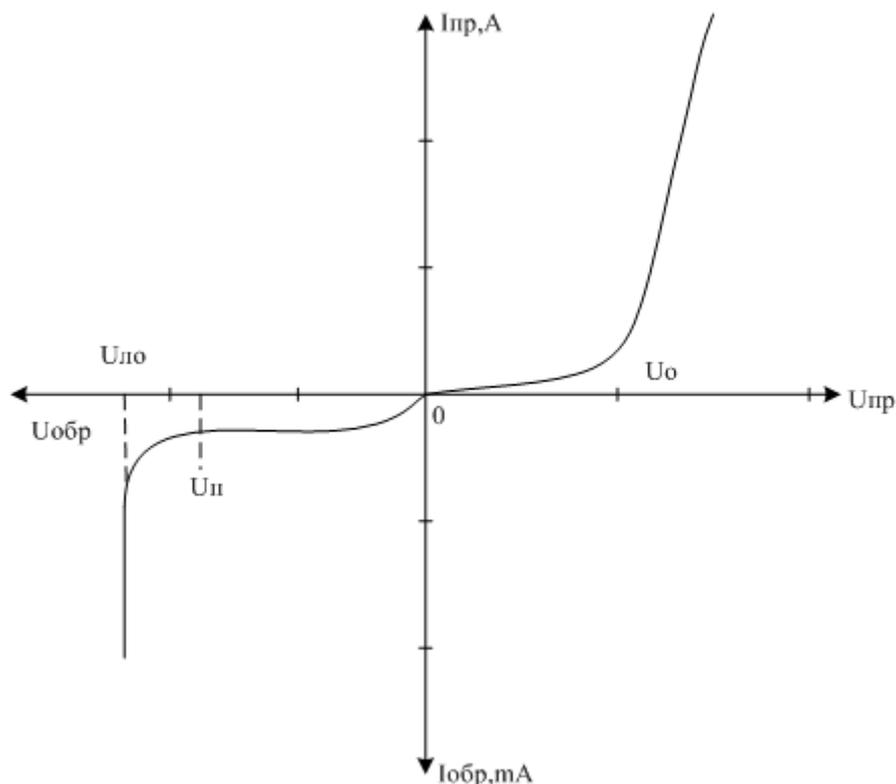


Рис.1.7 ВАХ лавинного диода.

$I_{уд}$  (ударный ток) – максимально допустимое амплитудное значение показано на рисунке 1.8.

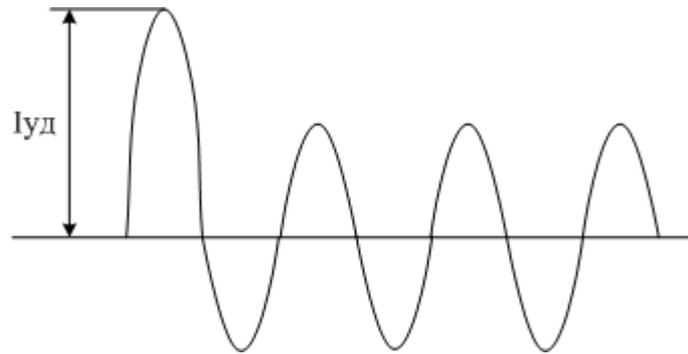


Рис.1.8 синусоидального тока, протекающего через вентиль в течении 0,01 сек.

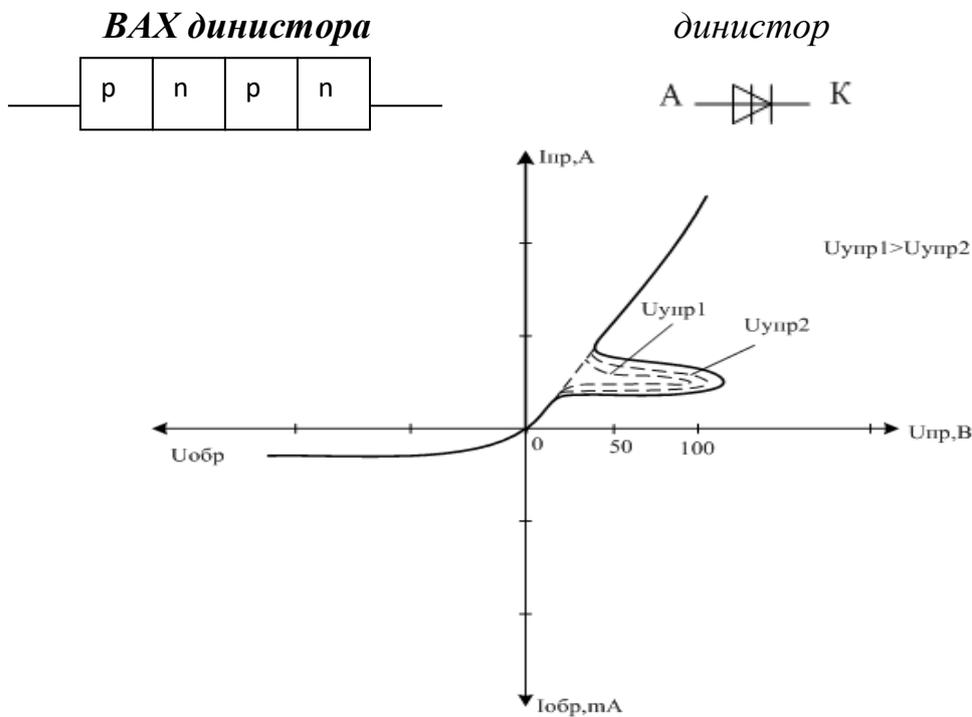
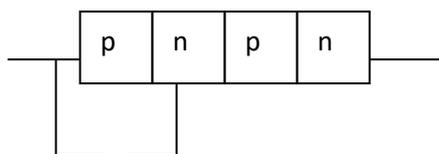


Рис.1.8 Структурная схема и ВАХ динистора.

$U_{в}$  –напряжение включения и ток включения.

$I_{с}$  (ток удержания) – минимальное значение тока в прямом направлении, при котором динистор остается во включенном состоянии. Если прямой ток станет меньше тока удержания, динистор переходит в непроводящее состояние.

Если к динистору от одной из средних структур сделать вывод, то получится трехвыводной полупроводниковый прибор – тиристор.



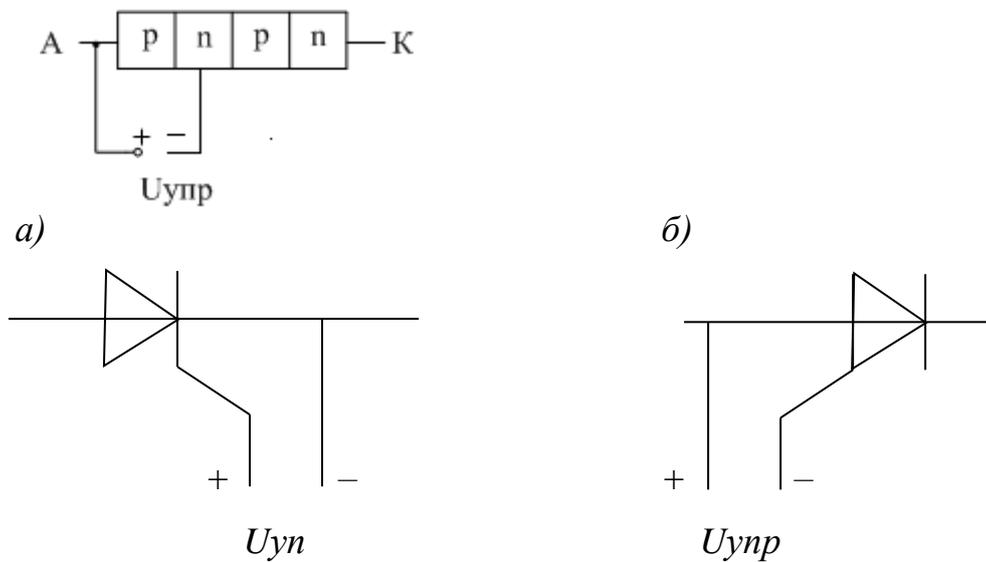


Рис.1.9 а) Тиристор, управляемый по катоду б) Тиристор, управляемый по аноду.

$T_{пред}=120 \mu\text{C}$  – для не лавинного тиристора

$T_{пред}=140 \mu\text{C}$  – для лавинного тиристора

Критическая скорость нарастания прямого напряжения  $dU/dt$  и прямого тока  $dI/dt$

## **1.2. Понятие о процессе инвертирования, виды инверторов.**

Инверторы – устройства, предназначенные для преобразования постоянного тока в переменный с регулируемым напряжением и частотой. Эти устройства применяются в источниках бесперебойного питания, при индукционном нагреве для регулирования скорости вращения электродвигателей переменного тока. В результате преобразования необходимо получить напряжение синусоидальной формы, амплитуду и частоту которого можно регулировать.

Работа инвертора основана на том, что ток в ветвях периодически прерывается с помощью вентилях. В качестве вентилях используют тиристоры, МОП-транзисторы, биполярные транзисторы с изолированным затвором.

Различают зависимые и независимые инверторы.

**Зависимые инверторы** (другое название – инверторы, ведомые сетью) требуют наличия внешних источников переменного напряжения. Такие инверторы используют в электроприводах.

**Независимые** (автономные) инверторы не требуют внешних источников. Переменное напряжение нужной частоты создается самим инвертором.

Технологии преобразования постоянного тока в переменный получили в последние годы значительное развитие. Современные инверторы обеспечивают получение синусоидального напряжения с малым коэффициентом гармоник, низкий уровень электромагнитных помех.

### **Двухтактный инвертор**

Схема двухтактного инвертора показана на рис. 1.10. Первичная обмотка трансформатора разделена на две секции. Число витков секций одинакова,  $W_{11} = W_{12}$ . Источник постоянного напряжения включен между

центральным выводом первичной обмотки трансформатора и общей точкой ключей 1  $K$  и 2  $K$ . В качестве ключей используют тиристоры или МОП-транзисторы.

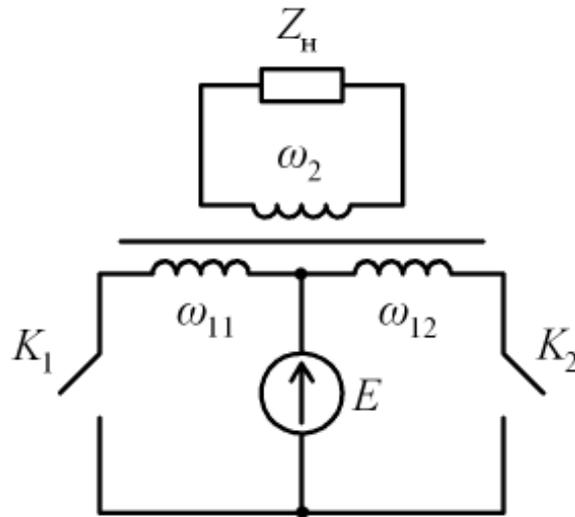


Рис. 1.10 Принципиальная схема двухтактного инвертора.

Ключи 1  $K$  и 2  $K$  замыкаются поочередно. Каждый из ключей замкнут половину периода  $T$ . Предположим для определенности, что в первую половину периода на интервале  $0 - T/2$  замкнут ключ 1  $K$ , а 2  $K$  разомкнут. Инвертор можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 1.11 а. Направление тока на интервале  $0 - T/2$  показано стрелкой.

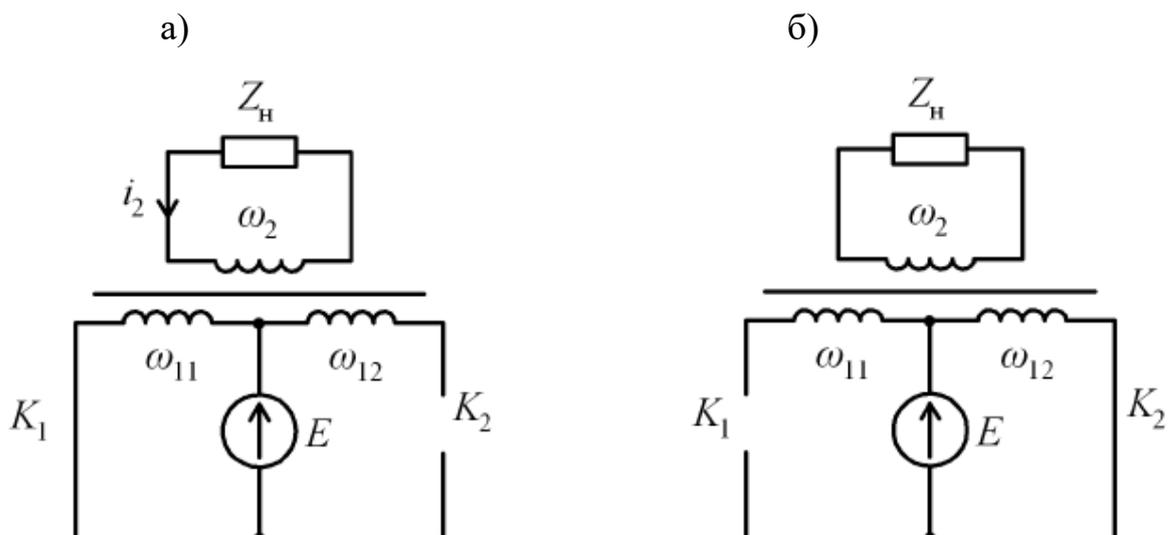


Рис. 1.11 коммутация ключей

Во вторую половину периода на интервале  $T/2 - T$  замкнут ключ  $K_2$ , а  $K_1$  разомкнут. Этому состоянию ключей соответствует эквивалентная схема на

рис. 1.1 б. Направление тока в нагрузке изменяется на противоположное. Таким образом, на сопротивлении нагрузки появится симметричное импульсное напряжение, частота которого  $f = 1/T$ . Форма тока во вторичной обмотке трансформатора зависит от характера нагрузки. Для получения токов и напряжений, форма которых близка к синусоидальной, необходимы меры по снижению уровня высших гармоник. Как правило, эти меры заключаются в следующем.

1. Включение на выходе инвертора сглаживающего фильтра.
2. Усложнение алгоритма работы ключей для уменьшения коэффициента гармоник.
3. Коммутация промежуточных отводов первичной обмотки трансформатора.

### **Мостовой инвертор**

Схема мостового инвертора показана на рис. 1.13. В одну диагональ моста, образованного ключами  $K1 - K4$ , включен источник постоянного напряжения, а в другую – нагрузка. Ключи переключаются так, что в одну половину периода замкнута одна диагональная пара ключей, а во вторую – другая пара ключей. Примем для определенности, что на интервале  $0 - T/2$  замкнуты ключи  $K1$  и  $K4$ , а на интервале  $T/2 - T$  замкнуты ключи  $K2$  и  $K3$ . Если нагрузка имеет резистивный характер, напряжение  $u(t)$  нагрузки будет иметь форму симметричных прямоугольных импульсов<sup>4</sup>. Регулирование частоты переменного напряжения обеспечивается изменением частоты коммутации ключей.

---

<sup>4</sup> Автономные источники питания. – Лекции. Бекиров Э.А. (книга). – Симферополь, 2010г.с 235

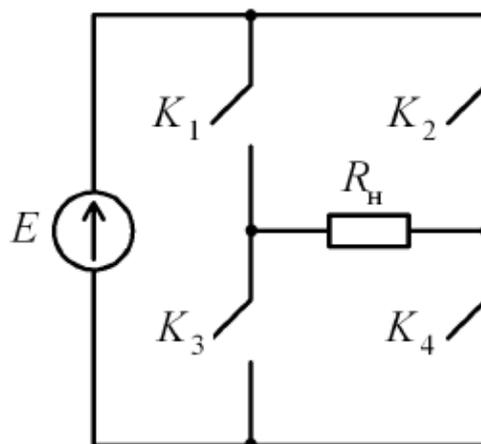


Рис. 1.13 Схема мостового инвертора

Для получения напряжения, форма которого близка к синусоидальной, последовательно с нагрузкой включают сглаживающий LC-фильтр. (рис. 1.14).

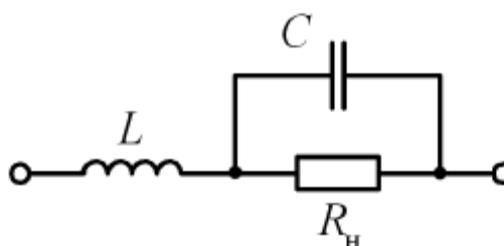


Рис. 1.14 сглаживающий LC-фильтр

Комплексная передаточная функция фильтра

$$H(j\omega) = \frac{1/LC}{-\omega^2 + j\omega \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}}$$

Амплитудно-частотная характеристика фильтра убывает, если частота сигнала превышает частоту среза. Это обеспечивает подавление гармоник с порядковыми номерами  $n = 2, 3, \dots, N$

### Способы формирования напряжения синусоидальной формы.

Напряжение на выходе инвертора должно иметь форму, близкую к синусоидальной. В противном случае уменьшается коэффициент мощности устройства, возрастают электромагнитные помехи. Если инвертор

используется в качестве источника питания асинхронного электродвигателя, наличие высших гармоник вносит дополнительные потери.

Если нагрузка мостового инвертора резистивная, выходное напряжение имеет форму прямоугольных импульсов (рис. 1.15). Разложение в ряд Фурье такого сигнала содержит только нечетные гармоники:

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{E_0}{4\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_1 t).$$

Амплитуда  $n$ -й гармоники

$$U_n = \frac{E_0}{4\pi} \frac{1}{n}.$$

Для уменьшения амплитуд нечетных гармоник на выходе инвертора включают  $LC$ -фильтр нижних частот (ФНЧ). Схема простейшего ФНЧ показана на рис. 1.14. Однако использование только сглаживающего фильтра оказывается недостаточно эффективным. Для подавления третьей и пятой гармоник, имеющих наибольшие амплитуды, необходим фильтр нижних частот (рис. 1.14) с частотой среза, близкой к частоте первой гармоники. Для реализации такого фильтра требуются индуктивная катушка и конденсатор больших номиналов. Соответственно, такой фильтр имеет большие массу и габариты.

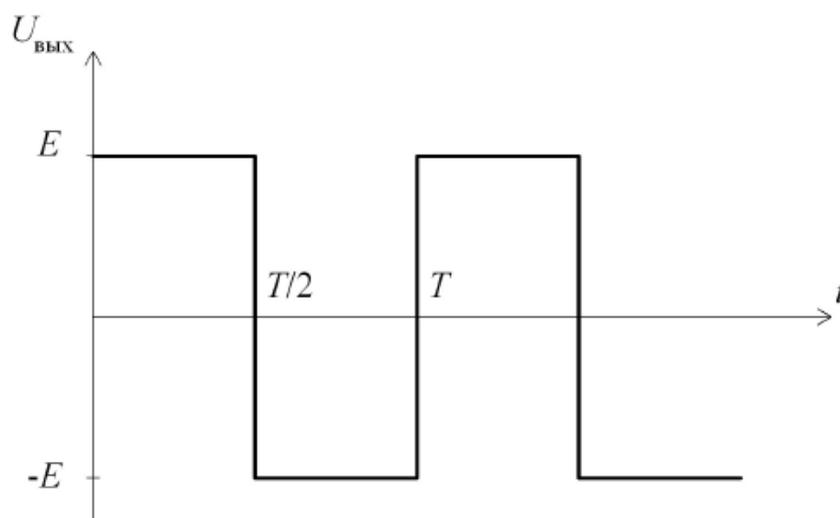


Рис. 1.15 резистивное выходное напряжение

Сглаживающий фильтр может иметь большую частоту среза и, следовательно, меньшие габариты, если в спектре выходного напряжения гармоники низшего порядка ( $n = 3, 5$ ) отсутствуют. Напряжение с уменьшенным содержанием высших гармоник можно получить с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ)<sup>5</sup>.

### **Однократная широтно-импульсная модуляция.**

При такой модуляции импульсное напряжение содержит только один импульс за половину периода (рис. 1.16). Такое напряжение мы получим, если ключи в схеме на рис. 1.13 замыкаются со смещением во времени. Диаграмма, показывающая интервалы замыкания ключей, изображена в нижней части рис. 1.16.

Покажем, что с помощью однократной ШИМ можно исключить из спектра одну из высших гармоник, изменяя угол включения  $d$ . Разложение в ряд Фурье последовательности импульсов на рис. 1.16 содержит только нечетные синусоиды:

$$u_{\text{вых}}(t) = \sum_{n=1, 3, \dots}^{\infty} U_n \sin(n\omega t)$$

Амплитуда  $n$ -й гармоники

$$U_n = \frac{E_0}{4\pi} \frac{1}{n} \cos(n\delta).$$

---

<sup>5</sup> Автономные источники питания. – Лекции. Бекиров Э.А. (книга). – Симферополь, 2010г.с 278

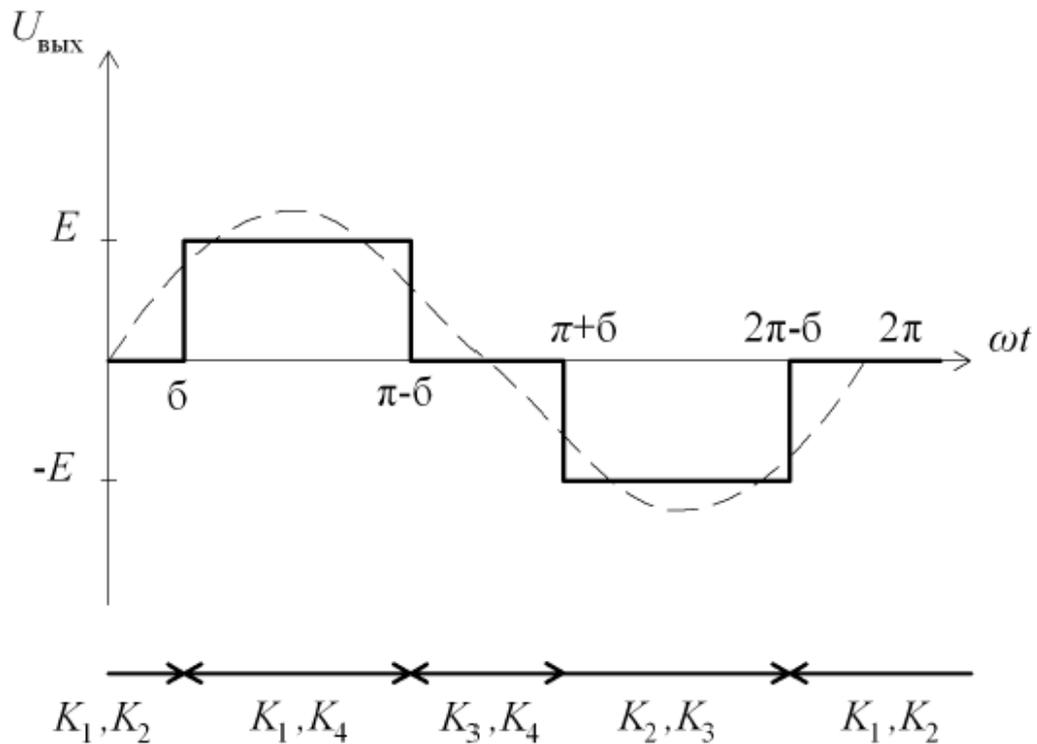


Рис. 1.16 Диаграмма с интервалами замыкания ключей.

Варьируя угол включения  $d$ , мы изменяем амплитуды гармоник.

Примем, что  $d = 30^\circ$ . Тогда амплитуда первой гармоники

$$U_1 = \frac{E_0}{4\pi} \cos(30^\circ) = \frac{E_0}{8\pi},$$

а амплитуда третьей гармоники равна нулю:

$$U_3 = \frac{E_0}{4\pi} \frac{1}{3} \cos(90^\circ) = 0.$$

Можно исключить пятую гармонику, полагая  $\pi = 180^\circ$ . Однако для одновременного исключения третьей и пятой гармоник необходимо сформировать импульсное напряжение более сложной формы.

### Многократная широтно-импульсная модуляция.

В этом случае напряжение представляет серию импульсов за половину периода. На рис. 1.17 показано напряжение, имеющее два импульса одинаковой полярности на полупериоде. Напряжение такой формы позволяет исключить две высшие гармоники. Однако это не могут быть одновременно третья и пятая гармоники.

Для исключения третьей и пятой гармоник необходимо напряжение, содержащее три импульса на полупериоде.

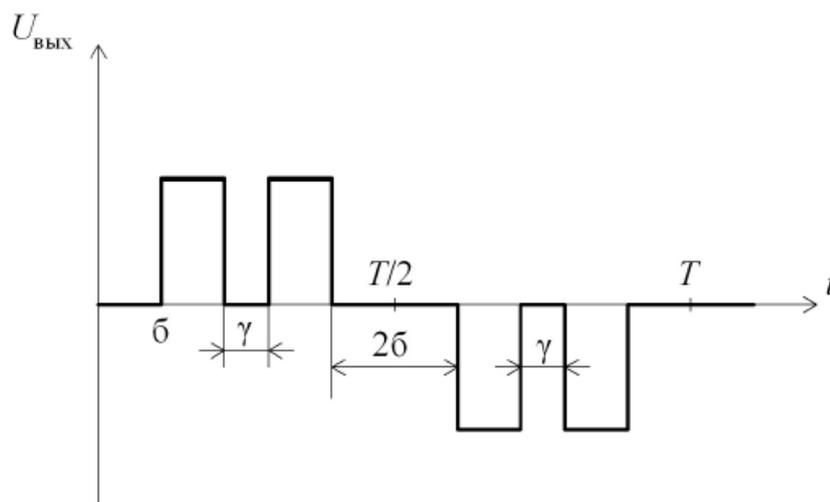


Рис. 1.17 Многократная широтно-импульсная модуляция.

### Синусоидальная широтно-импульсная модуляция.

Другой способ исключения высших гармоник из спектра заключается в модуляции длительности импульсов по синусоидальному закону. Такой способ эффективен при большом числе импульсов на полупериоде основной гармоники.

Форма сигналов широтно-импульсного модулятора показана на рис. 1.18. В течение полупериода цикла преобразования длительность центрального импульса максимальна, а длительность крайних импульсов уменьшается. Такой тип ШИМ называется асимметричным, т.к. длительности управляющих импульсов неодинаковы. Высшие гармонические составляющие в выходном напряжении такого инвертора будут меньше, чем при симметричной широтно-импульсной модуляции.

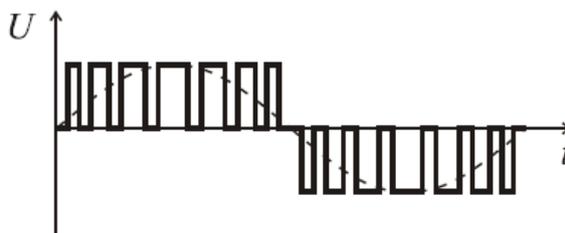


Рис. 1.18 Форма сигналов широтно-импульсного модулятора

Рассмотренные способы формирования выходного напряжения могут использоваться в мостовом инверторе на рис. 1.13.

### **Резонансные инверторы**

Для регулирования формы и частоты выходного напряжения в инверторах, рассмотренных выше, используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Выходное напряжение в схемах с ШИМ имеет пульсирующую форму. Недостаток инверторов с ШИМ заключается в том, что они имеют значительные коммутационные потери. Эти потери возникают из-за того, что в момент коммутации напряжение и ток ключа не равны нулю. Одним из способов уменьшения коммутационных потерь является проектирование схемы инвертора таким образом, чтобы коммутация ключей осуществлялась при нулевом токе («мягкое» выключение) или нулевом напряжении («мягкое» включение). Такие инверторы называют резонансными. По сравнению с ШИМ-преобразователями в резонансных схемах меньше коммутационные потери и перегрузки силовых элементов. Для них не требуются ключи, способные выдерживать большие пиковые токи и импульсные напряжения. Отметим основные преимущества резонансных инверторов перед инверторами с ШИМ.

1. Низкие коммутационные потери. Следствием этого является больший КПД.

2. Более высокие частоты коммутации ключей. Это ведет к уменьшению размеров магнитных элементов и всего инвертора.

3. Меньший уровень электромагнитных помех. Простейшая схема резонансного инвертора показана на рис. 1.19. На входе включен источник постоянного напряжения. Резонансная  $LC$ -цепь включена между источником и нагрузкой. Регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью ключа.

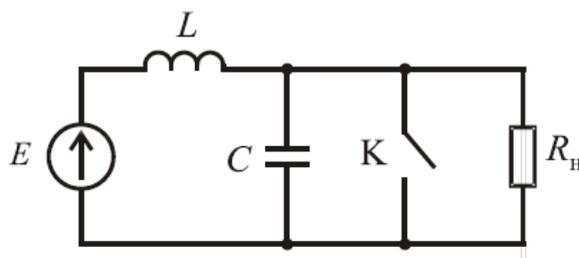


Рис. 1.19 Простейшая схема резонансного инвертора

Ключ замыкается и размыкается с фиксированной частотой. Когда ключ замкнут, ток в дросселе возрастает. После размыкания ключа напряжение конденсатора изменяется по синусоидальному закону. Процесс замыкания и размыкания ключа повторяется, а на конденсаторе появляется периодическое напряжение, форма которого близка к синусоидальной. Индуктивность дросселя и емкость конденсатора выбираются такими, чтобы частота свободных колебаний  $LC$ -контура совпадала с частотой коммутации ключа. Подстройкой частоты коммутации добиваются нулевого напряжения в момент размыкания ключа. Резонансные схемы нашли применение в мощных тиристорных электроприводах и системах бесперебойного питания. Однако в маломощных преобразователях они используются редко.

### Трехфазные инверторы

Во многих случаях необходимы инверторы, генерирующие трехфазное синусоидальное напряжение. Такое напряжение требуется для трехфазных асинхронных двигателей с регулируемой скоростью вращения, различных электромеханических систем и т.д.

Простой трехфазный инвертор можно получить, объединив три однофазных инвертора. Для построения такого инвертора необходимы 6 ключей. Получаемые фазные напряжения представляют прямоугольные импульсы, смещенные относительно друг друга на треть периода. Трехфазное напряжение можно получить с помощью трех мостовых инверторов, показанных на рис. 1.13. При этом число ключей достигнет двенадцати.

Число ключей в инверторе, построенном на основе трех мостовых схем, можно уменьшить в два раза. Для этого необходимо, чтобы временной интервал, в течение которого ключ замкнут, был сдвинут на треть или половину периода по отношению к интервалу замыкания соседнего ключа.

Трехфазная мостовая схема инвертора показана на рис. 1.20. К инвертору подключена резистивная нагрузка. Такой инвертор может работать в двух режимах: 120-градусном и 180-градусном.

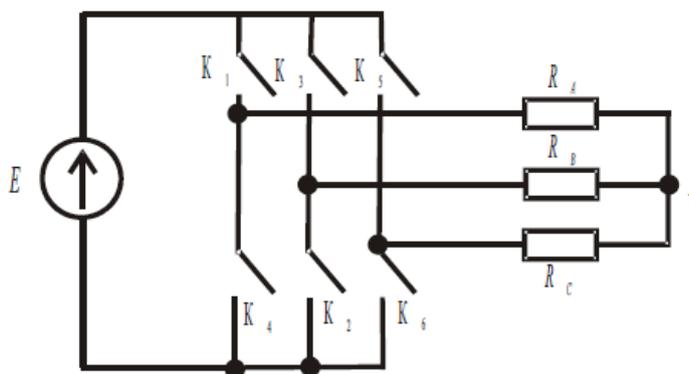


Рис. 1.20 Трехфазная мостовая схема инвертора.

При 120-градусном режиме каждый ключ находится в проводящем состоянии треть периода. В любой момент замкнуты два ключа, и ток замыкается через два из трех резисторов нагрузки. Замыкание ключей осуществляется в последовательности 61 – 12 – 23 – 34 – 45 – 56. Отметим, что в замкнутом состоянии находятся ключи, относящиеся к разным фазам. Поэтому такой режим называют режимом межфазной коммутации. Временные диаграммы напряжений, соответствующие 120- градусному режиму, показаны на рис. 1.21. Как следует из рис. 1.21, фазные напряжения представляют последовательность прямоугольных импульсов, сдвинутых на треть периода, а линейные напряжения имеют шестиступенчатую форму.

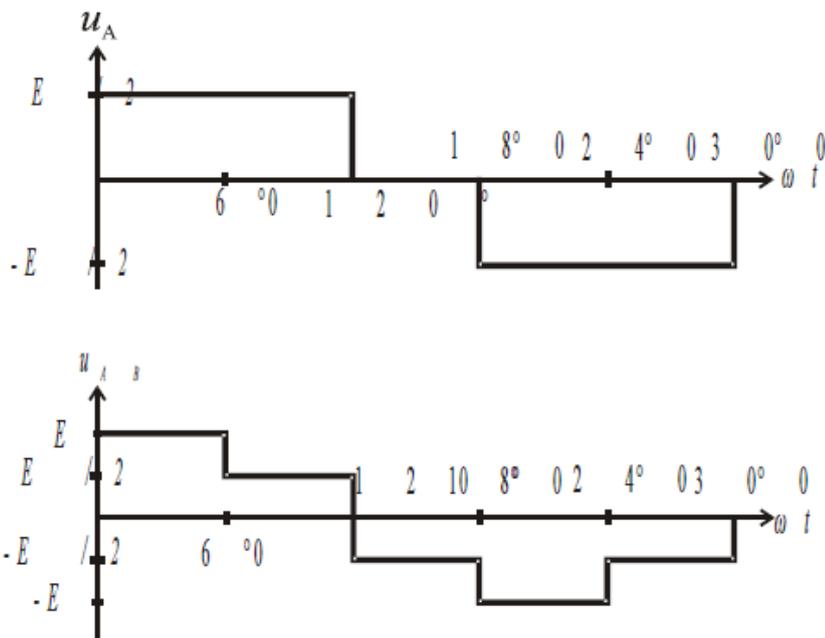


Рис. 1.21 Временные диаграммы напряжений (120 градусов)

При 180-градусном режиме работы каждый ключ замкнут половину периода, В этом режиме одновременно замкнуты три ключа – два нечетных ключа и один четный либо два четных ключа и один нечетный. Замыкание ключей осуществляется в последовательности 561 – 612 – 123 – 234 – 345 – 456. Поскольку одновременно замкнуты ключи во всех трех фазах, такой режим называют режимом пофазной коммутации. В каждый момент времени два резистора нагрузки подключены к источнику параллельно, а третий – последовательно с ними. Поэтому напряжение на параллельных резисторах равно  $E/3$ , а на последовательном –  $2E/3$ .

Временные диаграммы напряжений трехфазной мостовой схемы при пофазной коммутации показаны на рис. 1.22.

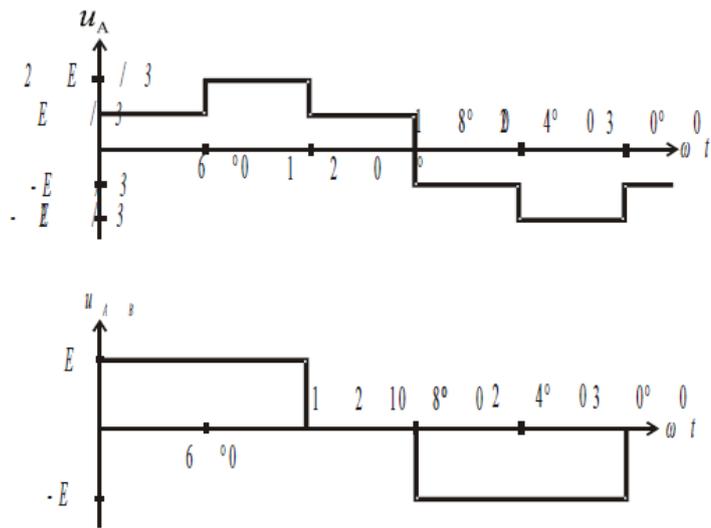


Рис. 1.22 Временные диаграммы напряжений (180 градусов)

Линейные напряжения на выходе инвертора представляют последовательность прямоугольных импульсов, сдвинутых на треть периода, а фазные напряжения имеют шестиступенчатую форму.

## ГЛАВА 2. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЗАВИСИМЫХ ИНВЕРТОРОВ

### 2.1. Зависимые инверторы

Процесс инвертирования в системе «источник постоянного тока – сеть переменного тока (приемник)» может быть осуществлен на базе обычного управляемого выпрямителя. Для этого вначале рассмотрим процесс передачи мощности от источника переменного тока к потребителю постоянного тока<sup>6</sup>.

В зависимости от условий применения инверторов в аппаратуре, их можно классифицировать по конструктивным признакам:

1. Централизованный однофазный инвертор.
2. Централизованный трехфазный инвертор.
3. Централизованный однофазно-трехфазный инвертор.
4. Встроенные однофазные инверторы.
5. Система инвертор — двигатель или вентильный электродвигатель переменного тока.

Каждый тип инвертора имеет свои особенности и к каждому из них предъявляются свои специфические требования.

1. Централизованный однофазный инвертор.

Обычно от централизованного источника питания требуется синусоидальная форма кривой выходного напряжения. Это требование обусловлено тем, что каждый вид нагрузки по-своему реагирует на нелинейные искажения. Коэффициент искажений выходного напряжения обычно не должен превышать 10%. Точность выходного напряжения определяется требуемой точностью частоты для самого чувствительного к изменению частоты потребителя, и может достигать до сотых долей процента. Точность стабилизации выходного напряжения выше  $\pm(2—3\%)$  обеспечивать нецелесообразно, так как падение напряжения в линии питания потребителей инвертора и искажение формы кривой являются неизбежным дестабилизирующим фактором.

2. Централизованный трехфазный инвертор.

---

<sup>6</sup> Нежданов И.В. Инверторы на тиристорах (1965) с 201

К данным инверторам предъявляются обычно менее жесткие требования по точности стабилизации величины выходного напряжения и частоты. Однако в ряде случаев в отношении стабильности поддержания выходной частоты могут предъявляться и более жесткие требования. Что касается формы кривой выходного напряжения, то в случае трехфазного инвертора получить форму кривой с коэффициентом нелинейных искажений меньше 10% не представляет особых трудностей. В зависимости от частоты выходного напряжения, мощности, перегрузочной способности и особенностей нагрузки трехфазные централизованные инверторы структурно могут быть выполнены в виде:

1. Трехфазного инвертора.
2. Однофазного инвертора с трехфазным фазорасщепителем.
3. Однофазного инвертора с трехфазным преобразователем частоты.
4. Двух однофазных инверторов.
5. Трех однофазных инверторов.

На мощности свыше 100—500 ватт частоту выходного напряжения свыше 400—1000 Гц при широком диапазоне изменения нагрузки и повышенных требованиях к форме кривой и к симметрии выходного напряжения трехфазный централизованный инвертор целесообразно выполнять по варианту 1 или 5. Вариант 5 по сравнению с вариантом 1 имеет несколько большую функциональную надежность, так как при срыве процесса инвертирования в одном из трех однофазных инверторов, например, вследствие выхода силового тиристора из строя, питание нагрузки продолжает осуществляться от двух однофазных инверторов. Недостатком варианта 5 является обязательное наличие выходного силового (инверторного) трансформатора. Маломощные централизованные трехфазные инверторы, работающие на фиксированную нагрузку, целесообразно с целью экономии веса (за счет упрощения системы управления) выполнять по варианту 2 или 4. Вариант 3 следует применять при выполнении инвертора «на низкие частоты с большой перегрузочной

способностью (особенно при низком напряжении источника питания постоянного тока и при больших выходных мощностях).

### 3. Централизованный однофазно-трехфазный инвертор.

Часто мощность однофазной нагрузки составляет 70—80%, а трехфазной нагрузки 20—30% от общей установленной мощности потребителей. Основными потребителями однофазного напряжения являются электронная аппаратура, следящие системы, датчики. Основными потребителями трехфазного напряжения, являются различного рода электродвигатели. Общим требованием ко всем централизованным однофазно-трехфазным инверторам является отсутствие биения частот однофазного и трехфазного напряжений. Требования по точности стабилизации выходных параметров этого типа инверторов такие же, как у приведенных выше. Централизованный однофазно-трехфазный инвертор в зависимости от соотношений мощностей и частот однофазной и трехфазной частей, от требуемой стабильности, уровня однофазного и трехфазного напряжений и от ряда других требований также может быть выполнен в различных вариантах:

1. С отдельными однофазными и трехфазными инверторами.
2. С трехфазным инвертором и с симметрирующим устройством.
3. С двумя однофазными инверторами.
4. с тремя однофазными инверторами.
5. С однофазным инвертором и трехфазным фазорасщепителем.
6. С однофазным инвертором и трехфазным преобразователем частоты.
7. С трехфазным инвертором и однофазным преобразователем частоты.

При разных, но близких частотах однофазных и трехфазных выходных напряжений, при требовании независимого регулирования выходного напряжения и при недопустимости взаимного влияния режимов работы однофазной и трехфазной частей целесообразно централизованный однофазно-трехфазный инвертор выполнять по варианту 1. Варианты 6 и 7 целесообразно применять при больших различиях в частотах выходного

напряжения на однофазной и трехфазной сторонах и при низком значении одной из этих частот. Варианты 2, 3, 4 и 5 могут применяться только в случае равенства частот однофазного и трехфазного выходного напряжения. Вариант 2 целесообразно применять в случае мощного трехфазного выхода и относительно маломощного однофазного. Вариант 5 целесообразно применять в случае маломощного (по абсолютной величине) трехфазного выхода, работающего на фиксированную нагрузку. Варианты 3 и 4 целесообразно применять при близких мощностях однофазного и трехфазного выхода и при отсутствии требований, обуславливающих целесообразность выполнения централизованного инвертора по варианту 1.

#### 4. Встроенные однофазные инверторы.

Однофазные инверторы для уменьшения общего веса изделия, удобства размещения и компактности могут встраиваться в блоки различного рода электроаппаратуры (чаще всего радиоаппаратуры). В случае питания радиоаппаратуры применяются чаще всего инверторы, преобразующие постоянное напряжение одного уровня в постоянное напряжение другого уровня. Требования к точности поддержания выходного напряжения постоянного тока встроенных однофазных инверторов выше требований, предъявляемых к централизованным инверторам, достигают до 1—01, %.

5. Система инвертор — электродвигатель или вентильный электродвигатель переменного тока.

Эта система позволяет получить такие характеристики электропривода, которые невозможно получить ни при какой другой системе питания электродвигателей переменного тока. Вес и габариты всей установки также получаются оптимальными. Эта система представляет собой бесколлекторный электропривод с широким диапазоном регулирования скорости вращения и с характеристиками, аналогичными обычным коллекторным двигателям постоянного тока [Л. 10].

#### **Обратимость свойств выпрямителя и инвертора**

На рис. 2.1 а) показана схема выпрямителя, содержащего один тиристор  $V$  соединяющий источник мощности переменного напряжения  $U$  и приемник мощности постоянного напряжения, в данном случае – двигатель постоянного тока  $D$ . На зажимах вращающегося двигателя возникает постоянная ЭДС вращения (противоЭДС), направления встречно питающему напряжению. ЭДС вращения возникает в проводниках обмотки вращающегося якоря двигателя при пересечении ими линий индукции поля возбуждения.<sup>7</sup>

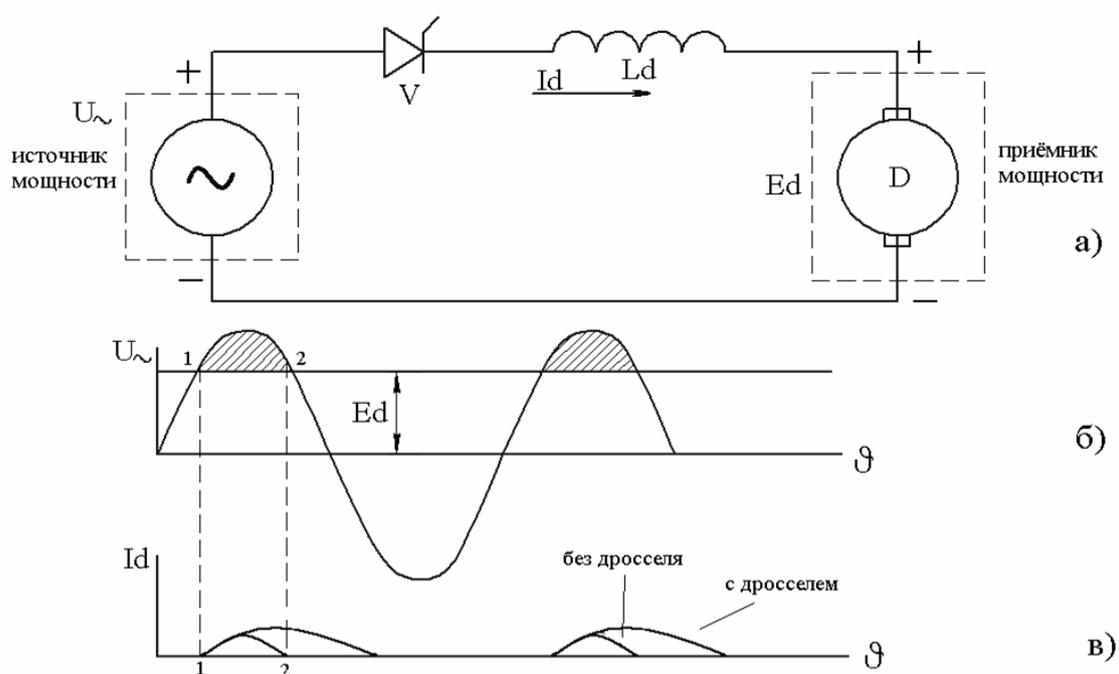


Рис. 2.1 Принцип работы зависимого инвертора

Напряжением питания в данном случае служит последовательность положительных полуволн переменного напряжения, полученных на выходе однополупериодного выпрямителя  $V$  (рис. 2.1 б).

Будем считать, что на тиристор  $V$  подаются импульсы включения, как только на его аноде появляется положительный потенциал. Условием передачи мощности источника переменного напряжения  $U$  к потребителю  $D$  является встречное включение противо ЭДС двигателя по отношению к питающей сети. Это означает, что полярность напряжения  $U$ , показания без

<sup>7</sup> Силовая электроник Г.С. Зиновев 2012 г с 140

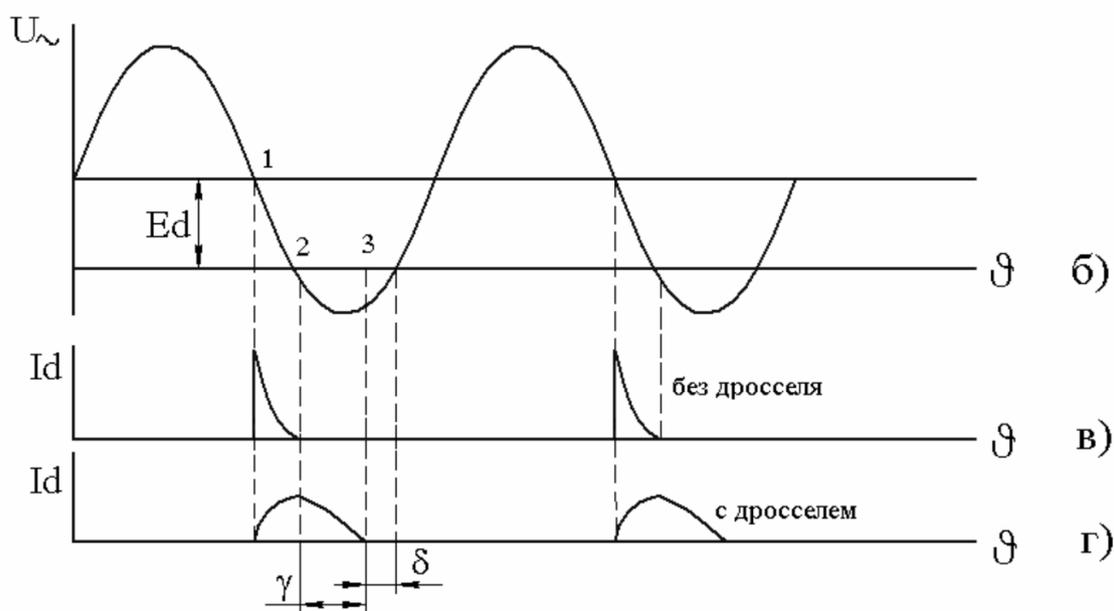
скобок, соответствует условию передачи полезной мощности в двигатель Д. В свою очередь, вспоминая условия перехода тиристора (или диода) в состояние проводимости, мы видим, что тиристор V может включиться при выполнении  $dEU \rightarrow 0$ . Это условие показано на рис. 2.1 б) в виде заштрихованной части полуволны синусоидального напряжения  $U$ . Если бы в цепи отсутствовала индуктивность  $L$  (дрессель), то ток, поступающий в двигатель, отображался бы в виде пунктирной кривой (рис. 2.1 в), на участке 1-2, повторяющей по форме огибающую заштрихованную площадку синусоиды (рис. 2.1б). В точке 2 тиристор V переходит в непроводящее состояние. Если же в цепи присутствует дроссель  $L$ , то ЭДС самоиндукции затягивает процесс отключения тиристора, несмотря на то, что напряжение на его аноде  $< 0$ . Лишь после того, как под действием разности напряжений ток уменьшится до нуля, тиристор будет отключен. Итак, условием полезного преобразования энергии (передачи полезной мощности) от источника к приемнику будет:

1. Напряжение источника и ЭДС приемника должны быть направлены встречно

2. Напряжение (ЭДС) источника должно хотя бы в определенные интервалы времени (или в определенные интервалы сетевого угла на периоде  $2\pi$ ) превосходить противоЭДС (напряжение) приемника.

Зависимый инвертор должен передать мощность от источника постоянного тока в сеть переменного. Этот процесс является обращенным по отношению к выпрямлению. Рассмотрим процесс инвертирования для той же схеме однополупериодного выпрямителя (рис. 2.1 а), переведенного в режим инвертора. Для обеспечения передачи мощности от двигателя постоянного тока Д, работающего в генераторном режиме, в сеть переменного тока, необходимо, во-первых, переключить выходные зажимы двигателя так, как это показано на рис. 2.1 а). В этом случае ток двигателя сможет протекать через тиристор V в направлении разрешенной проводимости, когда тиристор будет открыт. Во-вторых, необходимо выполнить сформулированное ранее

условие передачи полезной мощности от источника (двигатель) к приемнику (сеть), заключающееся во встречном по отношению к источнику подключению полярности приемника. Это означает, что тиристор  $V$  должен включаться на участках отрицательной полуволны напряжения  $U_d$ . Но включение тиристора будет возможным, когда на его аноде при подаче импульса включения будет положительный потенциал. Из рис. 2.2 а) и б) видно, что потенциал на аноде тиристора  $V$  будет положителен, начиная с точки 1, в которой напряжение  $U$  приходит через ноль до точки 2, в которой синусоида  $U$  пересекает постоянную ЭДС двигателя. Если отпирающий импульс на тиристор  $V$  подан в точке 1, то при отсутствии дросселя ток двигателя, а значит и мощность, будут поступать в приемник на участке 1-2 сетевого угла  $\vartheta$ . Форма тока в этом случае повторяет форму участка кривой отображающей разность напряжения. Эти участки прерывистого тока показаны на рис. 2.2 в). Правее точки 2 при отсутствии индуктивности тиристор  $V$  теоретически мгновенно запирается, поскольку напряжение на



его аноде становится отрицательным .

Рис 2.2. Выходные диаграммы инвертора

При наличии в цепи инвертора индуктивности поведение тиристора и картина протекания тока будет другой.

При включении тиристора  $V$  в точке 1 ток плавно возрастает до некоторого максимального значения в точке 2. Правее точки 2, как уже говорилось, напряжение на аноде тиристора  $V$  становится отрицательным, однако тиристор продолжает находиться во включенном состоянии, поскольку через него проходит ток, поддерживаемый ЭДС дросселя. После спада тока до 0 тиристор отключается, поскольку обеспечиваются два необходимых для этого условия: отсутствие тока ( $=0$ ) и отрицательное напряжение на аноде ( $<0$ ). Для надежного запираания тиристора необходимо, вообще говоря, выполнение и третьего: обеспечение поддержания отрицательного потенциала на аноде после спада тока до нуля в течение некоторого времени, необходимого для восстановления запирающих свойств тиристора. Это время соответствует сетевому углу, который называется углом запаса. Таким образом, для надежного восстановления запирающих свойств тиристора необходимо условие –  $UdE_{\sim} < 0$ .

На рис. 2.2 г) показан угол коммутации  $\gamma$ , в течении которого ток спадает до нуля, и угол запаса, в течение которого ток через тиристор отсутствует, а на его аноде существует отрицательный потенциал. Теперь, основываясь на сформулированных условиях работы инвертора, рассмотрим схему однофазного двухполупериодного инвертора.

### **Однофазный двухполупериодный инвертор со средней точкой.**

Рассмотрим процесс инвертирования на базе однофазного выпрямителя. На рис. 2.3 представлена общая структурная схема тиристорного преобразователя П, работающего на нагрузку, содержащую противо ЭДС (двигатель постоянного тока Д). Для полярности напряжения на выходе преобразователя, показанную в скобках, и аналогичной полярности для ЭДС двигателя преобразователь П работает в режиме выпрямителя В и передает мощность от сети переменного тока в двигатель Д. При изменении полярности напряжений на противоположную, показанную без скобок, преобразователь переходит в режим работы инвертора И, и

мощность от двигателя Д, работающего в генераторном режиме, поступит в сеть переменного тока.

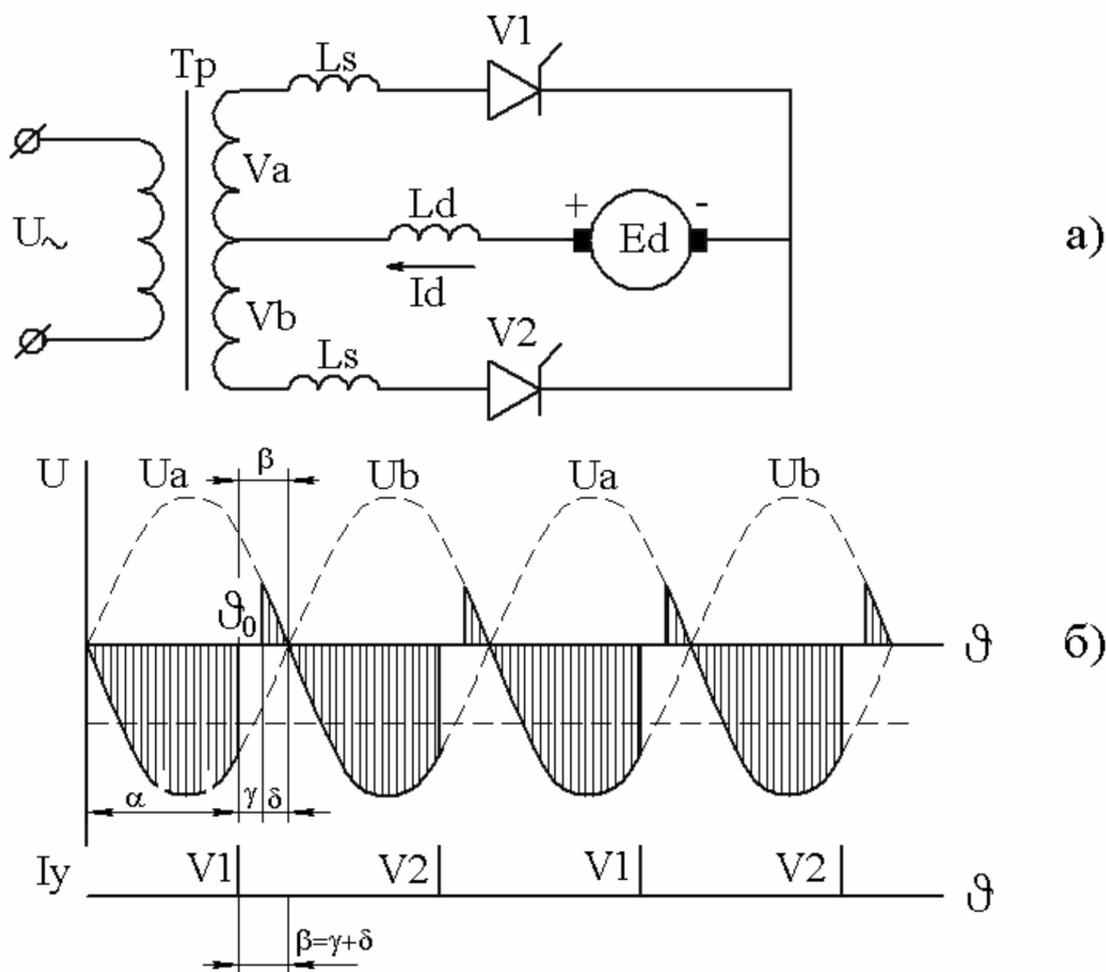


Рис. 2.4 Однофазный двухполупериодный инвертор со средней точкой  
Среднее напряжение на его выходе отвечает выражению

$$\langle U_d \rangle = U_{d0} \cos \alpha - \frac{x_s I_d}{\theta_n};$$

где  $\theta_n$  – период пульсаций выпрямленного напряжения.

Для перевода выпрямителя в режим инвертирования необходимо изменить полярность на его зажимах, условно сделав ее отрицательной. Из формулы внешней характеристики можно видеть что при углах регулирования напряжение становится отрицательным. Этот режим при

$1U\alpha > 2\pi$  и  $< 0$  и будет отвечать условию инвертирования. Теперь рассмотрим работу однофазного инвертора со средней точкой

Пусть в проводящем состоянии находится тиристор  $V_2$  и при совместном действии ЭДС двигателя (генератора) и фазного напряжения полуобмотки в цепи протекает идеально сглаженный ток. В некоторый момент времени, соответствующий точке, которая отстоит от точки пересечения фазных напряжений и на угол, на управляющий электрод  $V_1$  подается отпирающий импульс. Тиристор  $V_1$  открывается, и в короткозамкнутом контуре « $V_1 - V_2 - обмотка - обмотка$ » начинается коммутационный процесс. Под действием разности напряжений на аноде тиристора  $V_2$ , ток в тиристоре  $V_2$  уменьшается, а ток в тиристоре  $V_1$  нарастает, причем благодаря большой индуктивности. Процесс коммутации заканчивается на участке угла так же, как у выпрямителя. Ток оказывается «перехваченным» тиристором  $V_1$ . После запираания  $V_2$  на его аноде в течение угла запаса сохраняется отрицательный потенциал, необходимый для восстановления запирающих свойств тиристора. Далее, по прошествии  $\pi$ , радиан сетевого угла с тем же углом регулирования отпирающий импульс подается на тиристор  $V_2$ , и все процессы повторяются и т.д. Мощность от источника постоянного тока поступает через преобразователь, работающий в режиме инвертора, в сеть переменного тока.

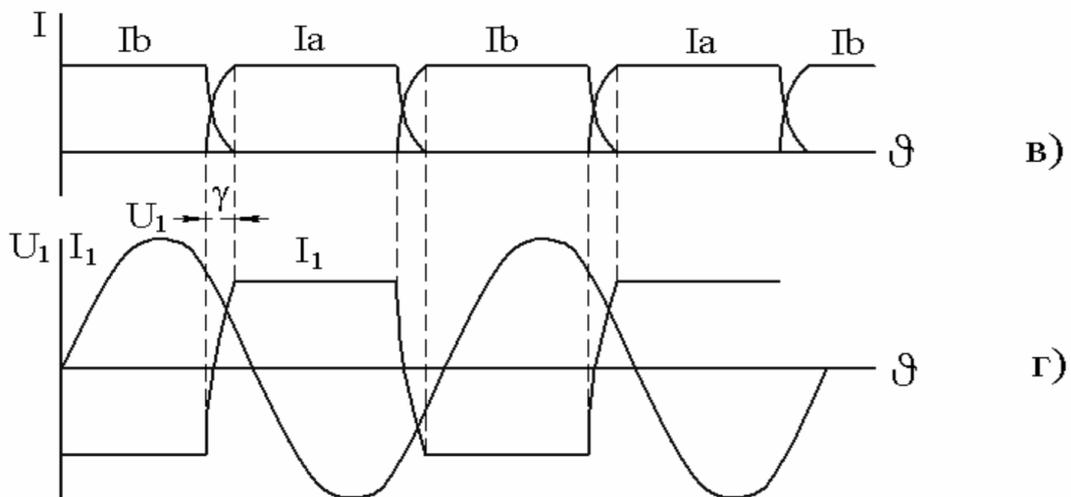


Рис. 2.6 Выходная характеристика инвертора.

При анализе инвертора удобно вводить в качестве регулирующего угла не угол  $\alpha$ , а угол, дополняющий его до величины, называемой углом опережения. Этот угол отсчитывается от момента подачи отпирающего импульса до точки пересечения фазных напряжений коммутируемых фаз. Угол  $\beta$  соответствует угловому расстоянию от точки подачи импульса  $\theta_0$  до точки пересечения напряжений. Можно заметить, что угол коммутации и угол запаса  $\delta$  связаны соотношением

На рис. 2.6 в) показаны проходящие соответственно через тиристоры V1 и V2, а на рис. г) – напряжение и ток первичной обмотки трансформатора, по форме полуволн, повторяющий токи и . Подставив в выражение угол регулирования

$$\langle U_{d\beta} \rangle = -U_{d0} \cos \beta - \frac{x_s I_{d\beta}}{\theta}$$

Для рассматриваемого случая однофазного инвертора  $\pi\theta = \pi$ :

$$\langle U_{d\beta} \rangle = -U_{d0} \cos \beta - \frac{x_s I_{d\beta}}{\pi}$$

Из этого следует, что уменьшение угла опережения  $\beta$  приводит к уменьшению угла запаса  $\delta$ . Поскольку угол запаса должен отвечать неравенству. Для того, чтобы определить максимальную величину нагрузочного тока инвертора, допустимую при заданном минимально возможном угле запаса для различных углов опережения, воспользуемся коммутационным уравнением выпрямителя, подставив туда угол регулирования  $\alpha$ , выраженный через угол опережения

$$\frac{I_{d\beta} x_s}{U_{ma}} = \cos(\beta - \gamma) - \cos \beta$$

Присоединим сюда выражение входной характеристики. Кроме этого учтем, что в

$$U_{d0} = \frac{2}{\pi} U_{ma} \cdot$$

В результате получим уравнение ограничительной характеристики инвертора

$$\langle U_{d\beta} \rangle = -\frac{2}{\pi} U_{ma} \cos \delta + \frac{x_s I_{d\beta}}{\pi}$$

Совместное решение показывает, какой минимальный угол опережения  $\beta$  следует устанавливать в инверторе, чтобы коммутировать требуемый ток при заданном для тиристорov угле запаса.

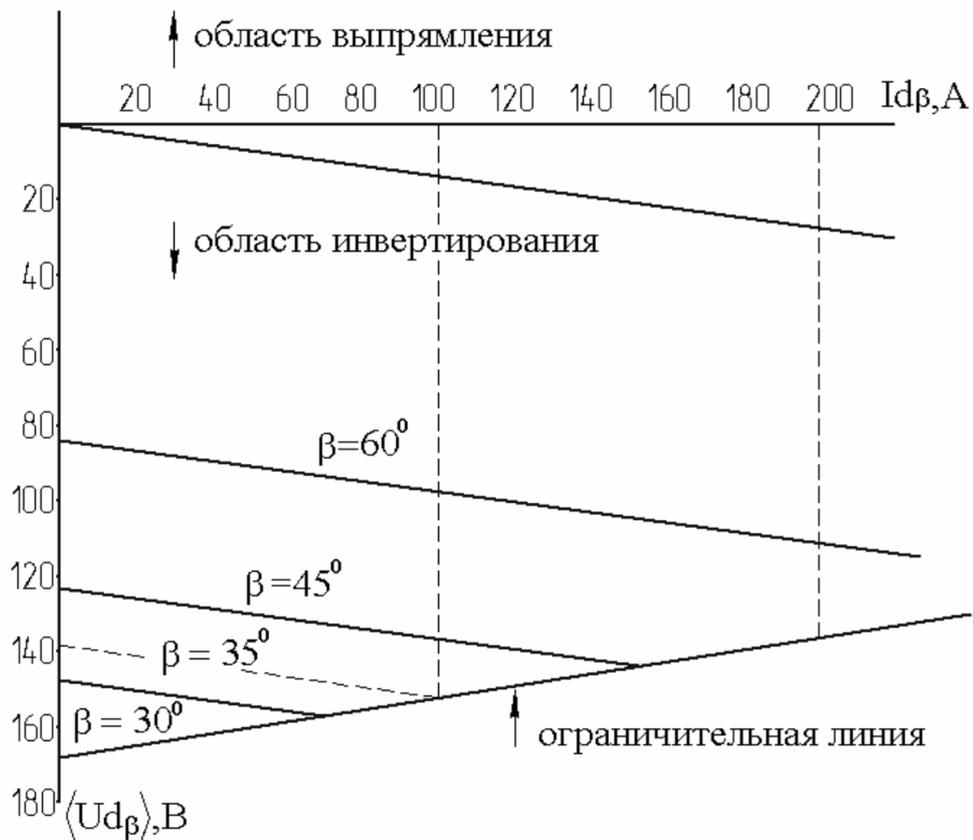


Рис. 2.7 Результаты построения характеристик приведены.

### Трехфазный мостовой инвертор

Инверторный режим обеспечивается на базе трехфазного управляемого мостового выпрямителя. Для инвертора, как было показано ранее, в качестве углов регулирования используются углы опережения  $\beta - \alpha = \pi$ .

Схема трехфазного инвертора вместе с двигателем постоянного тока, на зажимах которого генерируется ЭДС, изображена на рис 30 а). На

линейной диаграмме фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора (рис. 2.8 б) показаны участки коммутации с фазы на фазу, осуществляемые соответствующими тиристорами. Верхние (положительные) полуволны напряжений коммутируются верхней (анодной) группой тиристоров (рис. а), а лишние полуволны, соответственно, нижней (катодной) группой тиристоров .

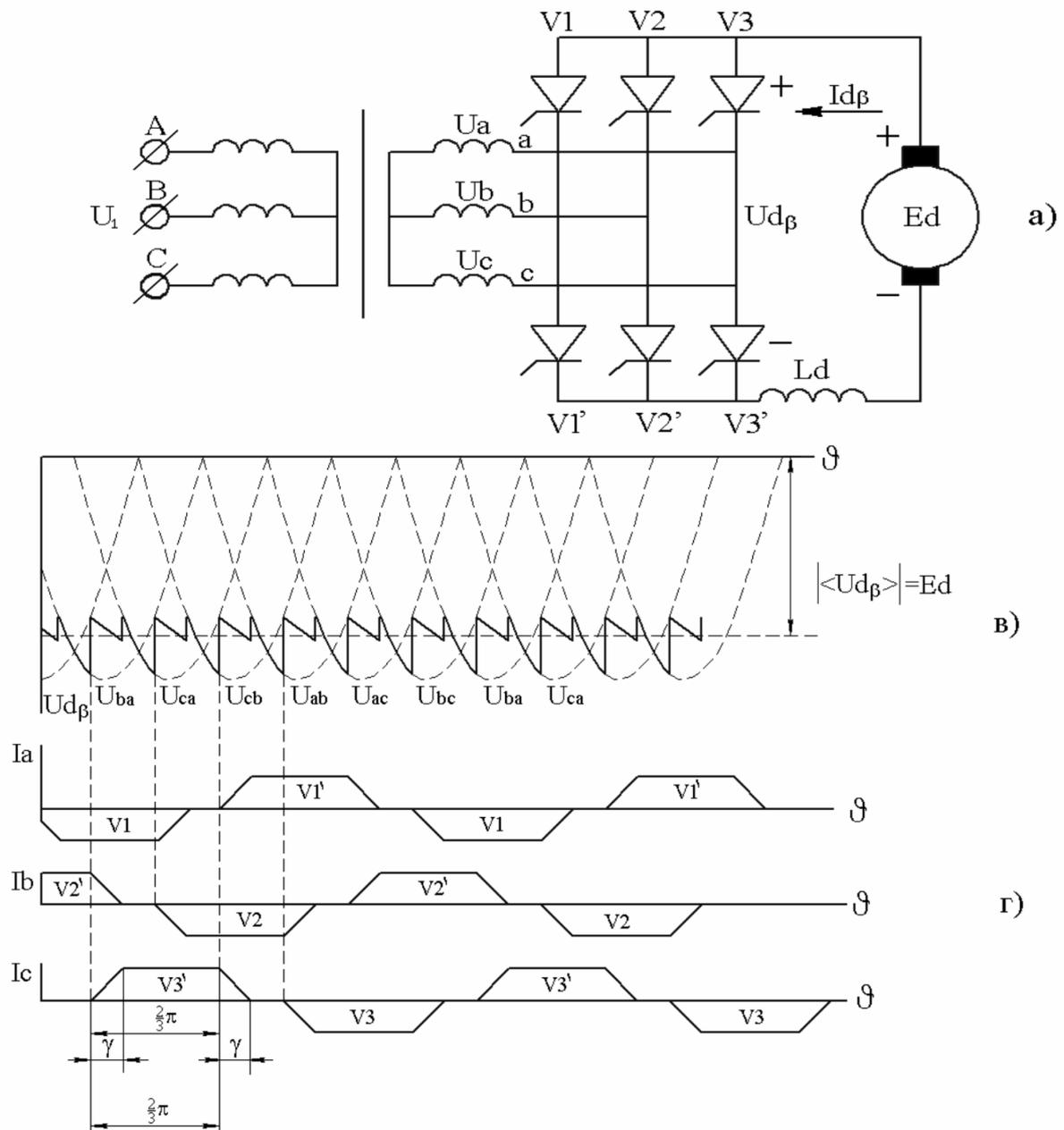


Рис. 2.8 Трехфазный мостовой инвертор. Диаграммы напряжения и ТОКОВ

Следует заметить, что при подаче отпирающего импульса на тиристор анодной группы будет включен тиристор, чей потенциал на катоде будет ниже, чем потенциал отключаемого тиристора той же анодной группы. Например, в точке  $\vartheta_0$  отпирающий импульс подается на тиристор  $V_2$  анодной группы инвертора. Тиристор  $V_2$  имеет потенциал. Благодаря разности напряжений на участке произойдет отключение тиристора  $V_1$  и фазы  $a$  и «перехват» тока тиристором  $V_2$  и фазой  $b$ . Аналогично для нижней катодной группы тиристоров при подаче управляющего импульса будет включен тиристор, потенциал анода которого будет выше потенциала отключаемого тиристора той же группы. Например, в точке  $\vartheta'_0$  подается импульс на тиристор анодной группы  $1'V$ , потенциал анода которого выше чем потенциал анода отключаемого тиристора  $3'V$ , равный. В данном случае на участке угла коммутации  $\gamma$  произойдет отключение, и ток, поступающий от двигателя (генератора) постоянного тока, перейдет с фазы  $c$  на фазу  $a$ .

Основываясь на изложенном правиле, на диаграмме рис. 2.8 б) показана последовательность коммутации с фазы на фазу, осуществляемая тиристорами инвертора под действием управляющих импульсов (на диаграмме не показаны), сдвинутых по отношению к точкам пересечения фазных напряжений на угол опережения  $\beta$ . Входное напряжение инвертора может быть получено сложением абсолютных величин мгновенных фазных огибающих, изображенных жирной линией на рис. 2.8 б). Результат такого сложения в виде мгновенного значения входного напряжения инвертора, представлен на рис. 2.8 в). Фазные токи, сдвинутые по фазе, изображены на рис. 2.8 г). Положительные полуволны токов соответствуют проводящему состоянию тиристоров катодной группы 3,2,1, а отрицательные – проводящему состоянию тиристоров анодной группы. Длительность протекания полуволны тока через каждую фазу соответствует сетевому углу. Для того, чтобы получить выражение входной характеристики инвертора, можно воспользоваться характеристикой аналогичного выпрямителя, подставив туда угол.

## 2.2. Анализ и расчет зависимого трехфазного инвертора

Расчет основных элементов силовой части инвертора.

Исходные данные для проектирования. Полный расчетный вес вторичного источника питания (инвертора) складывается из собственного веса инвертора и веса, на который нужно увеличить основной источник питания для покрытия потерь во вторичном, источнике питания. Следовательно, для уменьшения полного расчетного веса инвертора необходимо, с одной стороны, уменьшать собственный вес инвертора и, с другой стороны, увеличивать его к. п. д. для уменьшения веса основного источника питания. Уменьшить собственный вес инвертора можно следующими путями:

1. Выбором оптимальной схемы инвертора по весовым характеристикам.
2. Подбором оптимальных параметров и режимов работы составных элементов и составных частей инвертора.
3. Увеличением нагрузки на каждый составной элемент инвертора.

Третий способ уменьшения собственного веса инвертора связан с уменьшением к.п.д., надежности и срока службы инвертора, следовательно, ограничен определенными рамками. Вопрос повышения к.п.д. инвертора, как правило, находится в противоречии с вопросами уменьшения собственного веса инвертора, поэтому в каждом конкретном случае необходимо искать компромисс, учитывая удельный энергетический вес основного источника питания<sup>8</sup>. Габариты инвертора также играют большую роль, так как приводят к увеличению веса и габаритов корпуса объекта, в котором он расположен. Обычно в техническом задании на проектирование однофазного инвертора бывают заданы параметры:

1. Максимальная и минимальная мощности нагрузки.
2. Максимальный и минимальный коэффициенты МОЩНОСТИ.

---

<sup>8</sup> Раскин Л.Я. Стабилизированные автономные инверторы тока на тиристорах с 45

3. Коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения переменного тока инвертора  $k_{НМ}$  (%) или форма кривой выходного напряжения.

4. Номинальная частота выходного напряжения инвертора и допуск по частоте.

5. Величина номинального выходного переменного напряжения  $U_K$ , допуск по величине напряжения и диапазон подрегулировки выходного переменного напряжения или величина установки.

6. Величина номинального значения источника постоянного напряжения  $U_n$  и диапазон изменения этого напряжения.

7. Максимально допустимый ток потребления инвертора (/д.макс).

8. Максимальная и минимальная температуры окружающей среды инвертора.

9. Надежность инвертора в течение заданного срока службы и заданного общего ресурса работы.

10. Время непрерывной работы инвертора или режим работы инвертора.

11. Максимально допустимый вес и габариты инвертора.

12. Максимально допустимая величина пульсации постоянного тока, потребляемого инвертором.

Источником питания постоянного тока инвертора обычно является электромашинный генератор постоянного тока либо аккумуляторная батарея. Для этих видов источников постоянного тока и будет произведен расчет основных элементов инвертора.

В большинстве случаев для питания потребителей желательна форма кривой выходного напряжения, близкая к синусоидальной с  $k_{НМ} < 10\%$ . Приводимый ниже расчет силовой части инвертора относится именно к случаю проектирования инвертора с синусоидальной формой кривой выходного напряжения с учетом только ее первой гармонической по схеме.

Для удобства проектирования однофазного инвертора на тиристорах исходные соотношения:

- Минимальная угловая частота выходного напряжения
- Максимальная угловая частота выходного напряжения
- Максимальное напряжение питания инвертора
- Минимальное напряжение питания инвертора
- Максимальное напряжение питания силовой части инвертора
- Минимальное напряжение питания силовой части

Если в цепи питания силовой части инвертора находятся только силовые контакты контактора автомата защиты, падение напряжения на которых исчисляется единицами милливольт при номинальном токе, то величиной можно пренебречь. Если же в цепь питания силовой части инвертора включен полупроводниковый ключ, осуществляющий защиту инвертора, то падением напряжения на этом ключе, особенно при напряжении источника питания ниже 20 в, пренебрегать нельзя.

Для обеспечения заданного в техническом задании максимального общего тока, потребляемого инвертором, произведем ориентировочное распределение допустимых потерь по блокам. Максимальный ток потребления инвертора определяет требуемую установленную мощность источника питания постоянного тока (например, емкость аккумуляторных батарей) и имеет место чаще всего при максимальной активной мощности нагрузки и при минимальном напряжении источника питания постоянного тока. Для этого режима мы и будем оговаривать допустимые значения потерь в каждом отдельном блоке инвертора.

Максимально допустимая мощность потребления инвертора.

Максимальная активная мощность нагрузки.

Минимальная активная мощность нагрузки

Коэффициент полезного действия инвертора

Общие допустимые потери в инверторе

Общие потери можно представить в виде суммы потерь в отдельных блоках инвертора.

Мощность потерь в автомате защиты потери в силовом ключе автомата защиты; потери в цепях управления автомата за щиты в зависимости от мощности инвертора и схемы автомата защиты.

Мощность потерь в силовой части мощность потерь в инверторном дросселе, равная обычно  $(0,02-^{0,05})$  мощность потерь в коммутирующих конденсаторах; мощность потерь в силовых тиристорах; мощность потерь в инверторном трансформаторе.

Мощность потерь в коммутирующих конденсаторах можно принять приблизительно, кроме случая изменения проходным регулятором напряжения на входе силовой части инвертора.

Мощность потерь в значительной степени зависит от предполагаемой схемы системы управления и обычно равна: Большие потери обычно имеет система управления с отдельным задающим генератором и при прямоугольной форме кривой напряжения управляющих сигналов. Мощность потерь в регуляторе напряжения в режиме, обычно мала и составляет  $(0,01 - 0,03)$ . Исключение составляют проходные регуляторы напряжения, где мощность потерь в этом режиме может быть максимальной и составлять до 0,1. Приводимые выше численные коэффициенты для расчета мощности потерь в отдельных блоках и элементах инвертора относятся к однофазным инверторам мощностью от нескольких сот ватт до нескольких киловатт. Сумма предварительно распределенных допустимых мощностей потерь по отдельным блокам инвертора не должна превышать:

Среднее значение тока, потребляемого силовой частью .

Мощность, потребляемая силовой частью инвертора.

Внутреннюю мощность потерь в силовой части можно с достаточной степенью точности предположить постоянной при изменении нагрузки от 70 до 100%.

## ГЛАВА 3. ВЫБОР СХЕМЫ И ПОДБОРКА ПАРАМЕТРОВ, А ТАК ЖЕ ПРОГРАММЫ МОДУЛИРОВАНИЯ.

### 3.1. Выбор схемы инвертора.

При выборе схемы инвертора следует руководствоваться следующими принципами: простота и надежность схемы, простота в эксплуатации, высокая точность поддержания частоты и значения выходного напряжения, высокая перегрузочная способность, синусоидальная форма выходного напряжения. При всем этом требуется однофазное выходное напряжение.

Для создания виртуальной лабораторной работы, я выбираю схему трехфазного инвертора с нулевой точкой.

Ведомые инверторы выполняются по тем же схемам, что и управляемые выпрямители. Переход от выпрямительного к инверторному режиму возможен в системе, содержащей выпрямитель и электрическую машину (ЭМ). Реактор (индуктивность  $d L$ ) между выпрямителем и ЭМ воспринимает на себя разницу мгновенных значений ЭДС выпрямителя и ПЭДС двигателя. Нагрузка на ЭМ, работающую в двигательном режиме, ЭДС выпрямителя создается в основном положительными участками полуволн напряжения и ее среднее значение положительно. Также положительна ПЭДС двигателя.

Если угол управления увеличить до  $90^\circ$ , то ЭДС выпрямителя уменьшится до нуля, и двигатель остановится. При этом ЭДС выпрямителя в одинаковой степени создается положительными и отрицательными участками полуволн напряжения. Изменение направления потока мощности в системе, содержащей вентили, возможно только по второму способу, описанному выше<sup>9</sup>. Для того чтобы перейти из выпрямительного режима в инверторный, нужно:

- 1) Привести во вращение ЭМ в другом направлении, подведя к ней механическую энергию и переведя ее в генераторный режим;

---

<sup>9</sup>Зиновьев Г.С. "Основы силовой электроники", Новосибирск, НГТУ, 2003. с 129.

2) Увеличить угол управления (больше  $90^\circ$ ), чтобы в основном использовать отрицательные участки полуволн напряжения сети и сделать среднее значение ЭДС инвертора отрицательным.

При описании процессов в ведомом инверторе, кроме угла управления  $\alpha$  (угла запаздывания), используется угол управления  $\beta$  (угол опережения), отсчитываемый от точки, находящейся через  $180^\circ$  от точки естественной коммутации. Следовательно,  $\pi = \alpha + \beta$ .

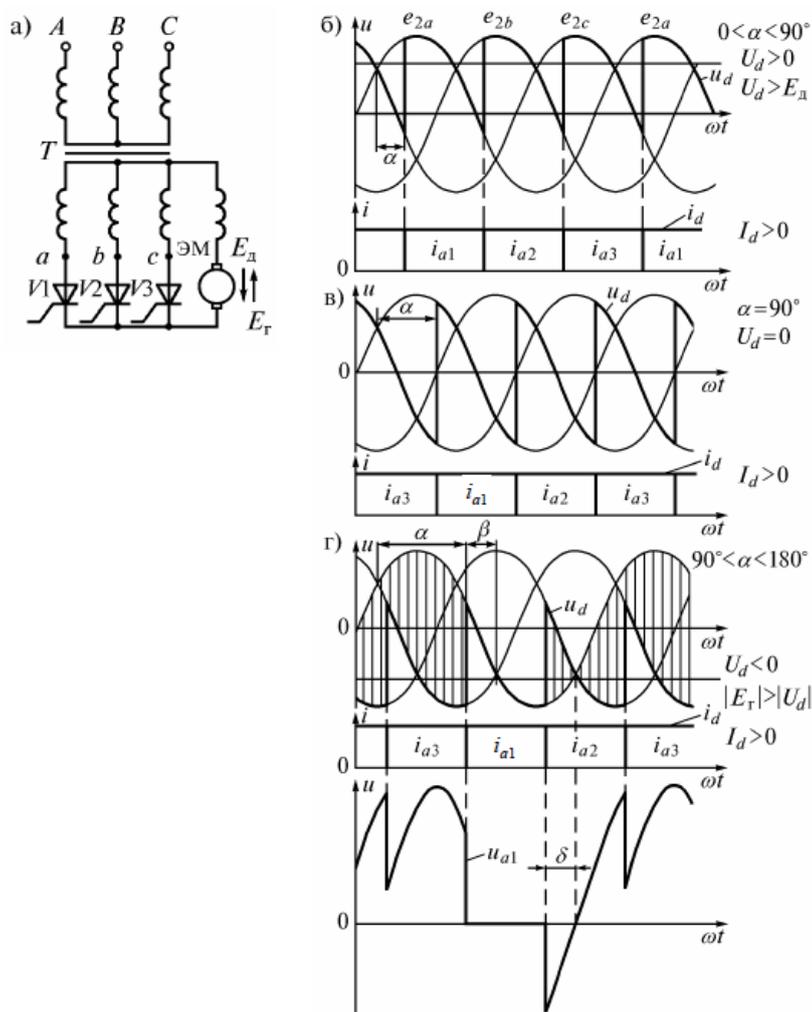


Рис. 3.1 Схема трехфазного зависимого нулевого инвертора

Переход из выпрямительного режима в инверторный режим в трехфазной нулевой схеме (а); б, в, г – диаграммы токов и напряжений при различных углах  $\alpha$ , иллюстрируют процессы в схеме

Условия устойчивой работы инвертора.

В инверторном режиме изменяется вид напряжения на вентиле. В течение угла  $\beta$  должны восстановиться управляющие свойства тиристора.

$\beta$  - угол, предоставляемый на выключение или восстановление управляющих свойств тиристора, может быть определен по формуле

$$\beta = \pi - \alpha,$$

где  $\alpha$  - угол коммутации.

Обозначим  $\min \beta$  – минимальный угол, предоставляемый на выключение, при котором инвертор может еще устойчиво работать.

Ограничительная характеристика (ОХ) - это геометрическое место точек, при котором угол  $\min \beta$  постоянен. Эта характеристика ограничивает область устойчивой работы ведомого инвертора (рис. 3.1 б). Ведомый инвертор может работать только в области выше ограничительной характеристики.

Обычно минимальный угол, предоставляемый на выключение, составляет  $15^\circ \dots 25^\circ$ . Угол  $\min \beta$  выбирается с учетом как времени выключения тиристора, так и других факторов. При выборе  $\min \beta$  учитывают:

- 1) время выключения тиристора;
- 2) возникающие перегрузки по току;
- 3) несимметрию напряжения сети;
- 4) несинусоидальность напряжения сети;
- 5) несимметрию управляющих импульсов.

Если  $\beta < \min \beta$ , то происходит прорыв анодного тока в вентилях и опрокидывание инвертора. Прорыв - это включение вентиля без подачи управляющего импульса. При преждевременном включении возникает аварийный режим – короткое замыкание в цепи постоянного тока, т.к. ЭДС генератора и ЭДС трансформатора направлены согласно. Этот аварийный режим называется опрокидыванием инвертора. Единственная возможность прекращения анодного тока – выключение автоматического выключателя в

цепи постоянного тока. Выключение выключателя на стороне переменного тока не прерывает ток короткого замыкания.

Для предотвращения опрокидывания инвертора максимальный угол управления  $\max \beta$  выбирается так, чтобы даже при перегрузке не был возможен выход за пределы ограничительной характеристики.

### 3.2. Выбор программы

Multisim-это единственный в мире эмулятор схем, который позволяет вам создавать лучшие продукты за минимальное время. Он включает в себя версию Multicap, что делает его универсальным средством для программного описания и немедленного последующего тестирования схем.

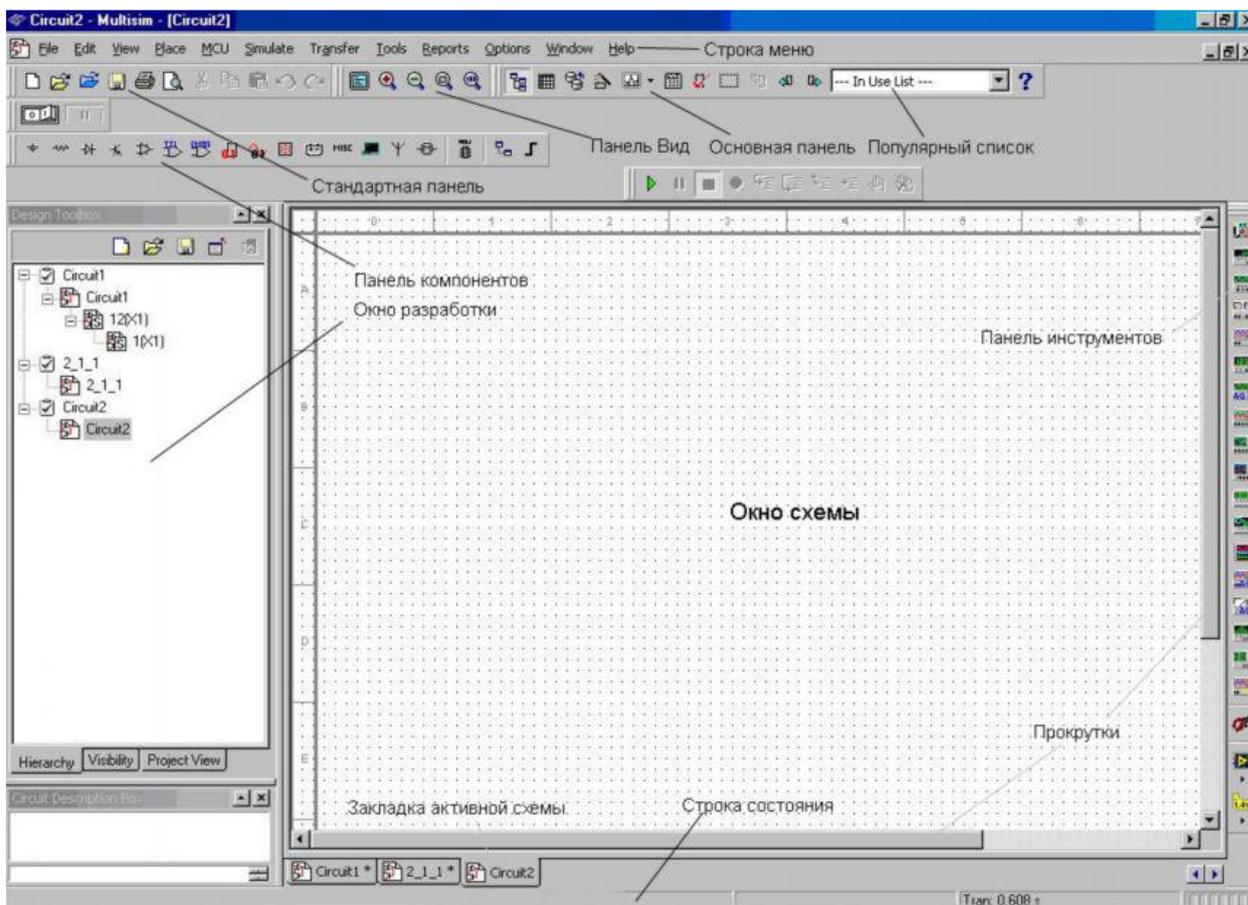
NI Multisim 10.0 позволяет объединить процессы разработки электронных устройств и тестирования на основе технологии виртуальных приборов для учебных и производственных целей. Подразделение Electronics Workbench Group компании National Instruments анонсировало выпуск Multisim 10.0 и Ultiboard 10.0, самых последних версий программного обеспечения для интерактивного SPICE-моделирования и анализа электрических цепей, используемых в схемотехнике, проектировании печатных плат и комплексном тестировании. Эта платформа связывает процессы тестирования и проектирования, предоставляя разработчику электронного оборудования гибкие возможности технологии виртуальных приборов. Совместное использование программного обеспечения для моделирования электрических цепей Multisim 10.0 компании National Instruments со средой разработки измерительных систем LabVIEW, позволяет сравнивать теоретические данные с реальными непосредственно в процессе создания схем обычных печатных плат, что снижает количество проектных итераций, число ошибок в прототипах и ускоряет выход продукции на рынок.

Можно использовать Multisim 10.0 для интерактивного создания принципиальных электрических схем и моделирования их режимов работы. «Multisim 10.0 составляет основу платформы для обучения электротехнике компании National Instruments, включающей в себя прототип рабочей станции NI ELVIS и NI LabVIEW. Он дает возможность студентам получить всесторонний практический опыт на всем протяжении полного цикла проектирования электронного оборудования», - заявил Рей Алмгрен, вице-президент компании National Instruments по академическим связям. «При помощи этой платформы студенты могут с легкостью перейти от теории к

практике, создавая опытные образцы и углубляя свои знания в основах проектирования схем», - отметил он<sup>10</sup>.

База данных компонентов включает более 1200 SPICE-моделей элементов от ведущих производителей, таких как Analog Devices, Linear Technology и Texas Instruments, а также более 100 новых моделей импульсных источников питания. Помимо этого, в новой версии программного обеспечения появился помощник Convergence Assistant, который автоматически корректирует параметры SPICE, исправляя ошибки моделирования. Добавлена поддержка моделей МОП-транзисторов стандарта BSIM4, а также расширены возможности отображения и анализа данных, включая новый пробник для значений тока и обновленные статические пробники для дифференциальных измерений.

### Средства Multisim 10



<sup>10</sup>Опорный лист силовых электронных модулей производителя Mitsubishi Electronics с 5

, переменного напряжения, заземление, беспроводные соединения - VCC, VDD, VSS, VEE), signal voltage sources (источники прямоугольных В Multisim есть базы данных трех уровней:

-Из Главной базы данных ( Master Database) можно только считывать информацию, в ней находятся все компоненты;

-Пользовательская база данных ( User Database) соответствует текущему пользователю компьютера. Она предназначена для хранения компонентов, которые нежелательно предоставлять в общий доступ;

- Корпоративная база данных (Corporate Database). Предназначена для тех компонентов, которые должны быть доступны другим пользователям по сети.

Средства управления базами данных позволяют перемещать компоненты, объединять две базы в одну и редактировать их. Все базы данных разделяются на группы, а они, в свою очередь, на семейства. Когда пользователь выбирает компонент и помещает его в схему, создается новая копия, Все изменения с ней никак не затрагивают информацию, хранящуюся в базе данных.

База данных Master Database разделена на группы:

1) Sources. Содержит все источники напряжения и тока, заземления. Например, power sources (источники постоянногоимпульсов, источник сигнала через определенные промежутки времени), signal current sources (постоянные, переменные источники тока, источники прямоугольных импульсов)

2) Basic. Содержит основные элементы схемотехники: резисторы, индуктивные элементы, емкостные элементы, ключи, трансформаторы, реле, коннекторы и т.д.

3) Diodes. Содержит различные виды диодов: фотодиоды, диоды Шоттки, светодиоды и т.д.

4) Transistors. Содержит различные виды транзисторов: pnp-,npn-транзисторы, биполярные транзисторы, МОП-транзисторы, КМОП-транзисторы и т.д.

5) Analog. Содержит все виды усилителей: операционные, дифференциальные, инвертирующие и т.д.

6) TTL. Содержит элементы транзисторно-транзисторной логики

7) CMOS. Содержит элементы КМОП-логики.

8) MCU Module – управляющий модуль многопунктовой связи (от англ. multipoint control unit)

9) Advanced\_Peripherals. Содержит подключаемые внешние устройства ( дисплеи, терминалы, клавишные поля).

10) Misc Digital. Содержит различные цифровые устройства.

11) Mixed. Содержит комбинированные компоненты

12) Indicators. Содержит измерительные приборы( вольтметры, амперметры), лампы и т.д.

Анализ

В Multisim предусмотрено множество режимов анализа данных эмуляции, от простых до самых сложных, в том числе и вложенных.

Основные виды анализа:

1) DC – анализ цепи на постоянном токе.

Анализ цепей на постоянном токе осуществляется для резистивных схем. Это правило следует напрямую из теории электрических цепей; при анализе на постоянном токе конденсаторы заменяют разрывом, катушки индуктивности – коротким замыканием, нелинейные компоненты, такие как диоды и транзисторы, заменяют их сопротивлением постоянному току в рабочей точке. Анализ цепи на постоянном токе выявляет узловые потенциалы исследуемой схемы

2) AC – анализ цепи на переменном токе.

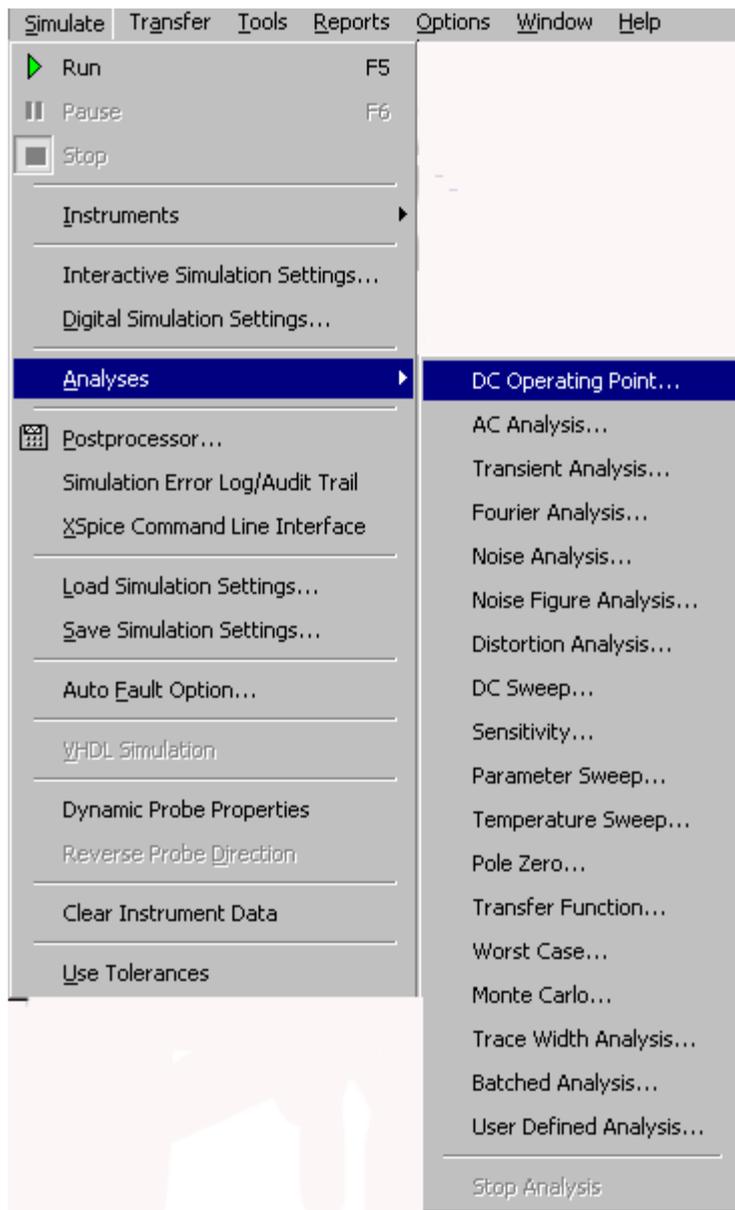
Анализ цепей на переменном токе заключается в построении частотных характеристик.

### 3) Transient – анализ переходных процессов

Анализ переходных процессов в цепях позволяет определить форму выходного сигнала, то есть построить график сигнала как функции времени.

Чтобы начать анализ, выберите пункт меню Simulate\ Analyses и выберите требуемый режим.

Список всех функций Multisim приведен на рисунке:



Кроме встроенных функций анализа есть возможность определить свою функцию с помощью команд SPICE.

При подготовке к анализу необходимо настроить его параметры, например, диапазон частот для анализатора переменного тока (AC analysis). Необходимо также выбрать выходные каналы (traces).

Плоттер (Grapher) – основной инструмент просмотра результатов эмуляции. Он открывается из меню View/Grapher и автоматически при работе эмуляции.

Множество настроек плоттера находятся в окне свойств. Например, можно изменять масштабы, диапазоны, заголовки, стили линий осей.



### Общие правила моделирования

При моделировании схем необходимо соблюдать следующие общие правила:

1) Любая схема должна обязательно содержать хотя бы один символ заземления.

2) Любые два конца проводника либо контакта устройства, встречающихся в точке, всегда считаются соединенными. При соединении трех концов (Т-соединение) необходимо использовать символ соединения (узел). Те же правила применяются при соединении четырех и более контактов.

3) В схемах должны присутствовать источники сигнала (тока или напряжения), обеспечивающие входной сигнал, и не менее одной контрольной точки (за исключением анализа схем постоянного тока).

### Топология схем

1) В схеме не должны присутствовать контуры из катушек индуктивности и источников напряжения.

2) Источники тока не должны соединяться последовательно

3) Не должно присутствовать короткозамкнутых катушек

4) Источник напряжения должен соединяться с катушкой индуктивности и трансформатором через последовательно включенный резистор. К конденсатору, подключенному к источнику тока, обязательно должен быть параллельно присоединен резистор.

## ГЛАВА 4 ПОСТРОЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

### 4.1 Формирование виртуальной модели трехфазного зависимого инвертора.

Введём параметры элементов в программу MULTISIM, соединим их, как на выбранной схеме (трехфазная схема с нулевым выводом). Получим на рабочем поле программы образ виртуальной модели зависимого инвертора. Как показано на рис. 4.1, схема состоит из трех трансформаторов соединенных в звезду (Т1, Т2, Т3), трех источников питания имитирующих 3-х фазное напряжение V1, V2, V3 (сдвиг фазы 120 градусов). Трех управляемых вентилей VD1, VD2, VD3, а именно тиристоров модели «2N1599», комплексной нагрузки состоявшей из источника питания (обратная ЭДС), резистора R4 и индуктивности L1,2,3 переключаемые ключами K1,2,3.

Рассмотрим принцип работы схемы.

В схеме нулевого трехфазного зависимого инвертора угол  $\beta$  осуществляется от точек пересечения фазных ЭДС. Поскольку ток от источника питания  $E_0$  должен протекать по обмоткам трансформатора, преодолевая фазные ЭДС, то рабочей зоной являться отрицательные полуволны.

Пусть в точке  $\theta$  равной нулю проводит ток вентель VD3, преодолевая противоЭДС вторичной обмотки фазы С в точке  $\theta = 2\pi/3$  ЭДС вторичной обмотки фазы С изменит полярность на противоположную и из противоЭДС превратится в согласно включенную ЭДС, что при открытом вентиле VD3 приведет к "опрокидыванию" инвертора. Чтобы не допустить этого, в точке  $(\alpha - \beta)$  система управления открывает вентель VD1, ток проходит на фазу А так как противоЭДС вторичной обмотки фазы С, действующая в этой цепи, меньше чем в цепи вентеля VD3, а анод VD3 имеет потенциал фазы С. В результате VD3 оказывается под воздействием запирающего напряжения, но закрыться мгновенно он не может из-за ЭДС самоиндукции, которая

поддерживает прежнее направления тока на тиристоре VD3, пока не израсходуется энергия, запасенная в магнитном поле индуктивного сопротивления. Поэтому в течении интервала будут одновременно открыты оба вентиля VD1 и VD3, что приводит к появлению коммутационного контура между фазами А и С. Далее процессы повторяются во всех точках переключения вентилей.

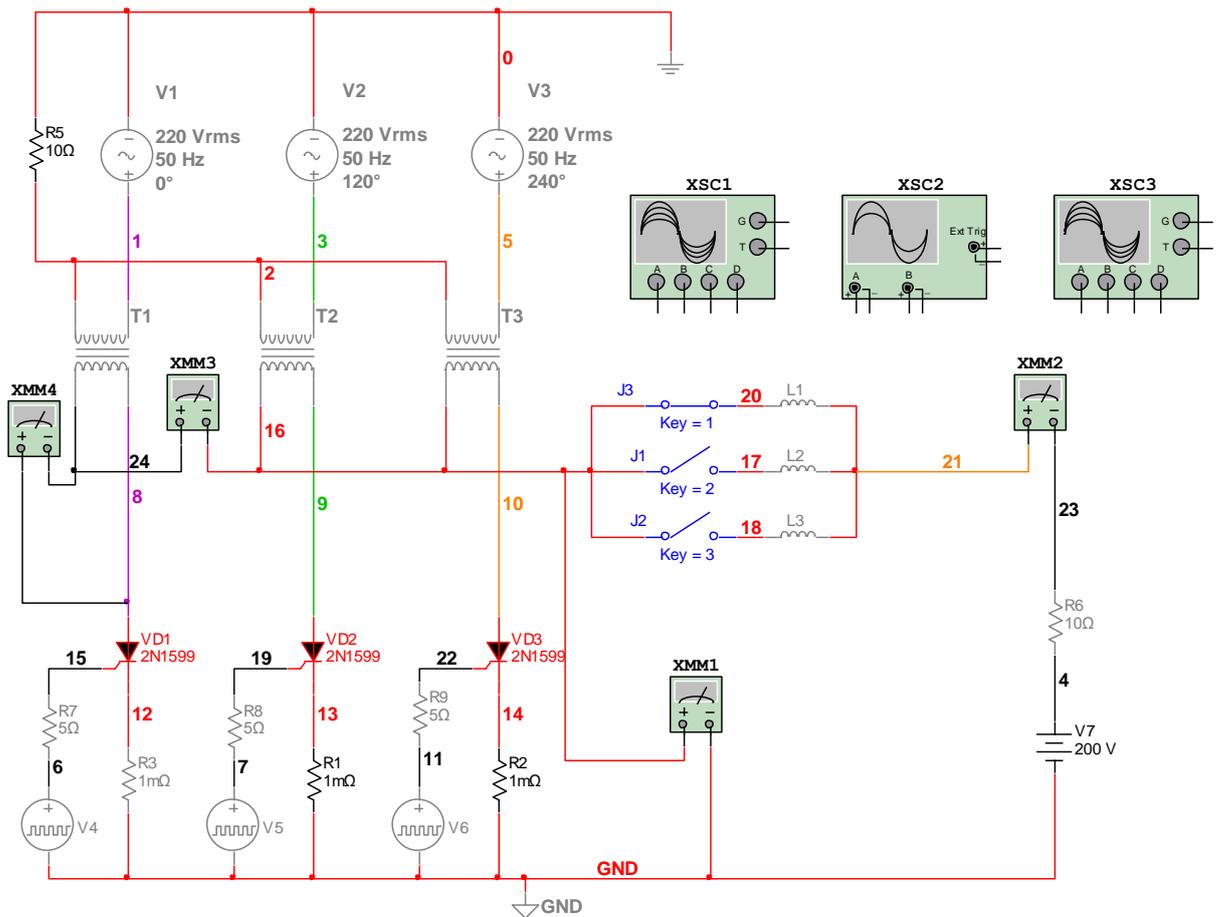


Рис. 4.1 Схема виртуальной модели трехфазного зависимого инвертора с нулевым выводом.

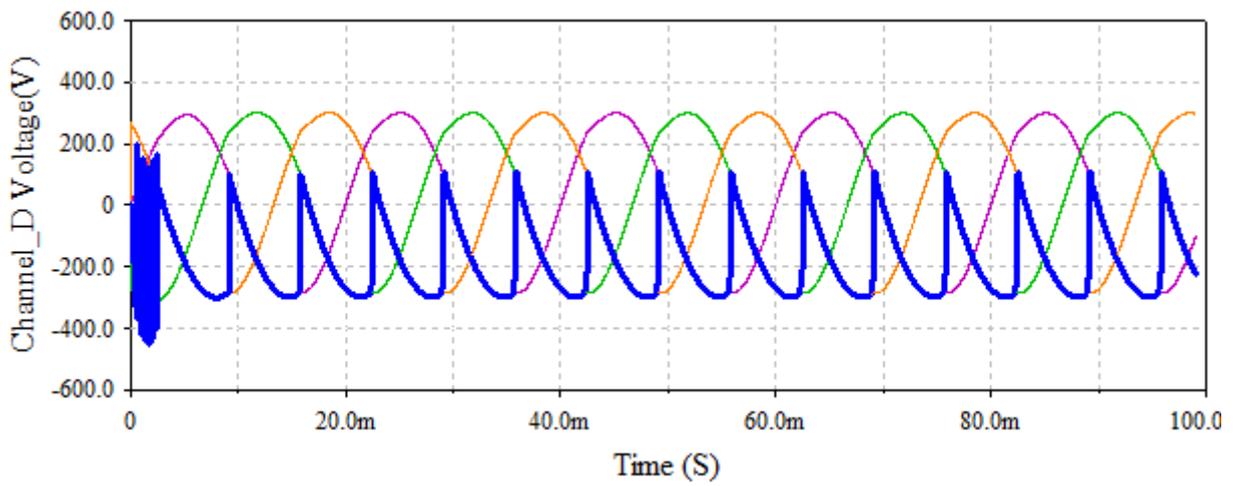


Рис 4.2 Осциллограммы напряжения и тока нагрузки

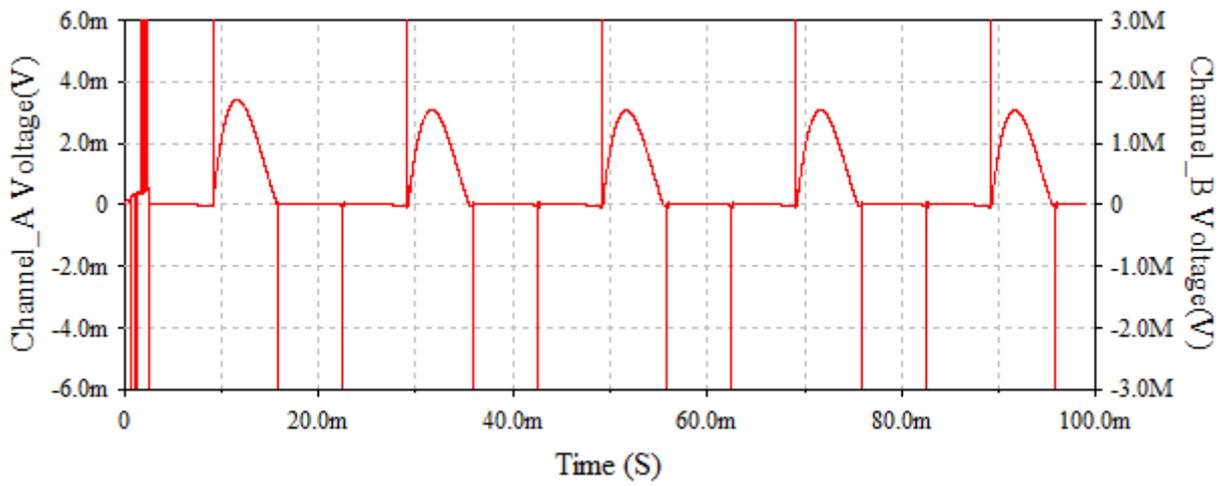


Рис 4.3 Ток тиристора VD1

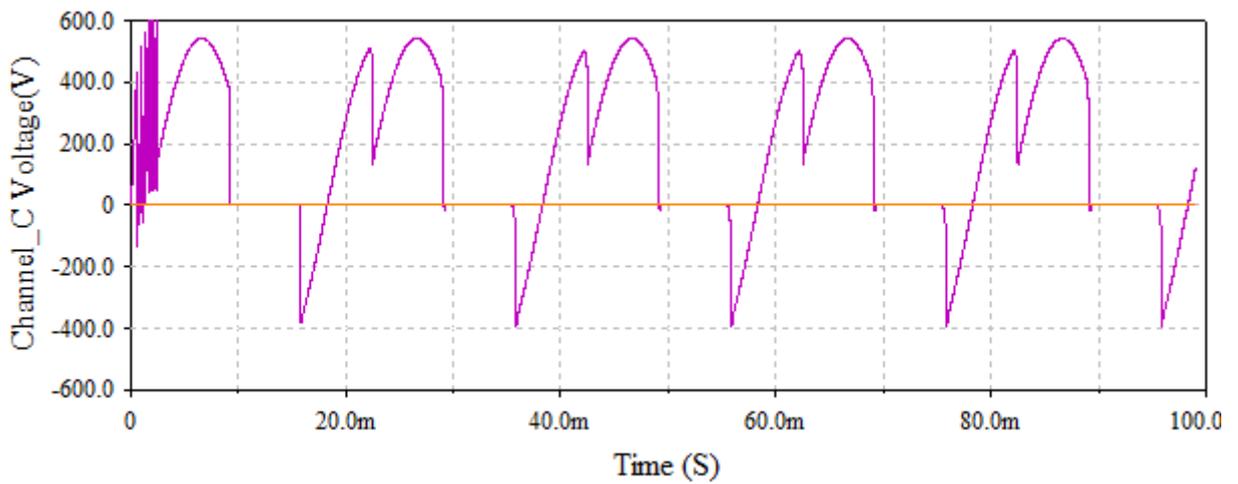


Рис 4.4 Напряжение на теристоре VD1

## 4.2. Последовательность выполнения ВЛР

Подготовка к выполнению виртуальной лабораторной работы

1. Осуществить загрузку компьютера.
2. Выполнить пуск программы Multisim (версии 10 и выше).
3. Определить местоположение файла с моделью однофазного автономного параллельного инвертора тока (grid-controlled inverter).
4. Открыть найденный файл на рабочем поле программы ELECTRONICS WORKBENCH.

Исследовать трехфазный зависимый инвертор с нулевым выводом трансформатора:

1. Зарисовать осциллограммы напряжения и тока нагрузки  $u_{ан}$ ,  $i_{ан}$ , вентилей  $u_{ак}$ ,  $i_{ак}$  при трёх значениях индуктивности дросселя.
2. По осциллограммам определить период и частоту работы инвертора.
3. Изменяя с помощью потенциометра в цепи постоянного тока входное напряжение инвертора, наблюдать осциллограммы тока в цепях нагрузки и тиристоров.
4. Сделать выводы о влиянии величин индуктивности  $L_d$  и напряжения источника постоянного тока на величину и форму тока нагрузки.

Осциллограммы снимаются для трех значений индуктивности дросселя  $L_d$ : 100, 50 и 10 мГн. Для ступенчатого изменения нагрузки следует использовать виртуальные ключи. Подключение и отключение дросселей с различным значением индуктивности осуществляется с помощью виртуальных ключей “Key-1 – Key-3”.

## Безопасность жизнедеятельности

Представляемая бакалаврская работа является исследовательской и не предполагает выполнения каких-либо физических работ. Следовательно, в разделе безопасности жизнедеятельности может быть описано рабочее место. В этом случае должны быть указаны рекомендации по организации режима работы за ЭВМ (ПК), рассмотрены меры по обеспечению эргономичности и безопасности рабочего места. Также в данном разделе будет произведен расчет освещенности производственного помещения, и приведены сведения по утилизации производственных материалов и устаревшей оргтехники.

В работе рассматривается рабочий кабинет; габариты помещения: 12х5х4м; в помещении установлены два светильника УВЛН-4х80-1 по 4 лампы ЛБ-80 в каждом. Имеются два оконных проема размером 1,6х2,2 м; общая площадь оконных проемов равна 7,04 м<sup>2</sup>. Размещение оборудования и документации в кабинете так же, как и расчет указанных параметров, приведен далее.

Режим работы оператора ЭВМ

Характеристика условий труда.

При работе с компьютером человек подвергается вредному воздействию:

- ВЧ - электромагнитных полей;
- инфракрасного излучения;
- ионизирующего излучения;
- шума;
- вибрации;
- статического электричества.

Работа с ПК (ЭВМ) характеризуется значительным умственным напряжением и нервно-эмоциональной нагрузкой работника, высокой напряженностью зрительной работы и достаточно большой нагрузкой на мышцы рук при работе с клавиатурой. Большое значение имеет

рациональная конструкция и расположение элементов рабочего места, что важно для поддержания оптимальной рабочей позы человека-оператора ПК.

### **Организация эффективного режима работы.**

Для снижения вредного воздействия ЭВМ до пренебрежимо малого требуется соблюдение правильного режима труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с появлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках. Все это приводит к снижению эффективности и является симптомами вреда, наносимого здоровью людей. Для предотвращения вредных последствий работы за ПК Минздравом РУз были выработаны соответствующие нормы работы.

В таблице 5.1 представлены сведения о регламентированных перерывах, которые необходимо делать при работе на компьютере, в зависимости от продолжительности рабочей смены, видов и категорий трудовой деятельности с ВДТ (видеодисплейным терминалом) и ПЭВМ (в соответствии с «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ»):

Табл. 5.1

#### **Время регламентированных перерывов при работе на компьютере**

Категория работы с ВДТ или ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работы с ВДТ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	<i>Группа А, количество знаков</i>	<i>Группа Б, количество знаков</i>	<i>Группа В, часов</i>	<i>При 8-часовой смене</i>	<i>При 12-часовой смене</i>
I	до 20 000	до 15 000	до 2,0	30	70
II	до 40 000	до 30 000	до 4,0	50	90
III	до 60 000	до 40 000	до 6,0	70	120

*Примечание:* Время перерывов дано при соблюдении указанных Санитарных правил и норм. При несоответствии фактических условий труда

требованиям Санитарных правил и норм время регламентированных перерывов следует увеличить на 30%.

В соответствии все виды трудовой деятельности, связанные с использованием компьютера, разделяются на три группы:

А: Работа по считыванию информации с экрана ВДТ или ПЭВМ с предварительным запросом.

Б: Работа по вводу информации.

В: Творческая работа в режиме диалога с ЭВМ.

Работа по приведенной выше классификации соответствует группе В по виду работы и категории работы II или III в зависимости от поставленной задачи. Режим труда должен неукоснительно соблюдаться; при этом эффективность перерывов повышается при сочетании с производственной гимнастикой или организации специального помещения для отдыха с удобной мягкой мебелью, аквариумом и т. п.

### **Параметры микроклимата**

Параметры микроклимата могут меняться в широких пределах, в то время как необходимым условием жизнедеятельности человека является поддержание постоянства температуры тела благодаря терморегуляции, т.е. способности организма регулировать отдачу тепла в окружающую среду. Принцип нормирования микроклимата – создание оптимальных условий для теплообмена тела человека с окружающей средой.

Вычислительная техника является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлены компьютеры, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата. В санитарных нормах установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения.

Объем помещений, не должен быть меньше 19,5 м<sup>3</sup>/человека с учетом максимального числа одновременно работающих в смену. Нормы микроклимата подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры, приведены в таблицах 5.2 и 5.3:

Табл. 5.2

Параметры микроклимата для помещений, где установлены компьютеры

Период года	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Температура воздуха в помещении	22...24 °С
	Относительная влажность	40...60 %
	Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Теплый	Температура воздуха в помещении	23...25 °С
	Относительная влажность	40...60 %
	Скорость движения воздуха	0,1...0,2 м/с

Табл. 5.3

Нормы подачи свежего воздуха в помещения с ПК

Характеристика помещения (объем помещения, в м <sup>3</sup> на человека)	Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м <sup>3</sup> на человека/час
До 20	Не менее 30
20...40	Не менее 20
Более 40	Естественная вентиляция

Для обеспечения комфортных условий могут быть использованы как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, современная отопительная система).

### **Анализ вредных факторов**

При работе с персональным компьютером может проявиться ряд вредных факторов и опасностей, к числу которых относятся:

1. повышенная или пониженная влажность воздуха;
2. повышенная или пониженная подвижность воздуха;

3. недостаточная освещенность рабочей зоны;
4. прямая и отраженная блескость;
5. повышенный уровень шума на рабочем месте;
6. повышенный уровень статического электричества;
7. повышенный уровень электромагнитных излучений;
8. повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может пройти через тело человека;

### **Освещение**

Недостаточность освещения.

Существует три вида освещения:

- 1). Естественное освещение;
- 2). Искусственное освещение;
- 3). Совмещенное.

Согласно СНиП в помещениях вычислительных центров необходимо применить систему комбинированного освещения.

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного освещения обычно используются люминесцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ, которые попарно объединяются в светильники, которые должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300лк, а комбинированная - 60лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности - 200 и 300лк соответственно.

Кроме того, все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Иными словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости. Произведем далее расчет естественного и искусственного освещения для стандартного производственного помещения (кабинета инженера-программиста).

#### *Расчет естественного освещения*

Расчет производится согласно КМК 2.01.05-98 РУз. Помещение имеет длину в 12 м.; ширину в 5 м.; высоту в 4 м.

Освещение боковое, одностороннее, выделение пыли и других аэрозолей допустимо с концентрацией не более 5 мг/м<sup>3</sup>. Остекление помещения – вертикальное; рамы деревянные двойные.

1). Определим необходимую площадь световых проемов:

Площадь пола помещения  $S = 12 \cdot 5 = 60 \text{ м}^2$  Нормальный коэффициент естественного освещения (КЕО)  $= e \cdot m \cdot c = 2 \cdot 1 \cdot 1 = 2$ , где:

$e=2$  – значение КЕО в % при рассеянном свете от небосвода, определяемое с учетом характера зрительной работы;

$m=1$  – коэффициент светового климата;

$c=1$  – коэффициент солнечного климата.

Далее также будут применены следующие величины:

$n_0=9$  - световая характеристика окна; она зависит от глубины помещения, выступа окна и соотношения длин сторон;

$K_{зд} = 1,2$  - коэффициент, учитывающий уменьшение КЕО от затемнения противостоящим зданием;

$r_1 = 3$  - коэффициент, учитывающий повышение КЕО при боковом освещении благодаря свету, отраженному от внутренних поверхностей;

$t_0$  - общий коэффициент светопропускания, вычисляющийся как

$t_0 = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdot t_4 = 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 0,27$ , при этом:

$t_1 = 0,8$  - зависит от вида светопропускающего материала;

$t_2 = 0,6$  - зависит от вида проема;

$t_3 = 0,7$  - зависит от степени загрязнения светопропускающего материала;

$t_4 = 0,8$  - зависит от несущих конструкций.

Итак, в рассматриваемом нами случае эквивалентная площадь необходимых световых проемов может быть найдена по следующей формуле:

$$S = \frac{(S \cdot KEO \cdot n_0 \cdot K_{зд})}{t_0 \cdot r_1 \cdot 100} = \frac{60 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 1.2}{0.3 \cdot 3 \cdot 100} = 14,4 \text{ м}^2$$

В случае использования стандартных окон размером 1,6 х 2,2 м получаем необходимое для осуществления естественного освещения количество окон  $N \approx \frac{S_0}{S_{окна}} = \frac{14,4}{1,6 \cdot 2,2} \approx 4$ . В этом случае площадь световых проемов равна 7,04 м<sup>2</sup>.

### **Шум и вибрация**

Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах<sup>11</sup> и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека, вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и

---

<sup>11</sup> Смотреть 17. Безопасность жизнедеятельности: Учебн. /Под ред. С. В. Белова. – М.:с98

безопасность труда. Длительное воздействие интенсивного шума (выше 80 дБ) на слух человека приводит к его частичной или полной потере.

Ниже, в таблице, согласно КМК 2.01.08- 96 РУз, а так же уровни вибрации по ГОСТ. 12.1.012 – 90 ССБТ указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Табл. 5.6

Предельные уровни звука, дБ, на рабочих местах.

Категория напряженности труда	Категория тяжести труда			
	I. Легкая	II. Средняя	III. Тяжелая	IV. Очень тяжелая
<i>I. Мало напряженный</i>	80	80	75	75
<i>II. Умеренно напряженный</i>	70	70	65	65
<i>III. Напряженный</i>	60	60	-	-
<i>IV. Очень напряженный</i>	50	50	-	-

Уровень шума на рабочем месте операторов не должен превышать 50 дБ. Уровень вибрации может быть снижен путем установки оборудования на специальные виброизоляторы.

#### **Электромагнитное и ионизирующее излучения.**

Считается, что как кратковременное, так и длительное воздействие всех видов излучения от экрана монитора не опасно для здоровья персонала, обслуживающего компьютеры. Однако исчерпывающих данных относительно опасности воздействия излучения от мониторов на работающих с компьютерами не существует и исследования в этом направлении продолжаются.

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера представлены в таблице 5.7.

Максимальный уровень рентгеновского излучения на рабочем месте оператора компьютера обычно не превышает 10 мкбэр/ч, а интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучений от экрана монитора лежит в пределах 10...100 мВт/м<sup>2</sup>.

Допустимые значения параметров неионизирующих ЭМ-излучений  
(в соответствии с СанПиН 2.2.2.542-96)

Наименование параметра	Допустимые
Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50см от поверхности видеомонитора	10 В/м
Напряженность магнитной составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50см от поверхности видеомонитора	0,3 А/м
Напряженность электростатического поля не должна превышать: для взрослых пользователей. для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений	20 кВ/м 15 кВ/м

Для снижения воздействия этих видов излучения рекомендуется применять мониторы с пониженным уровнем излучения (ТСО-95 и выше); устанавливать защитные экраны, а также соблюдать регламентированные режимы труда и отдыха, описанные выше.

**Виды уменьшения опасности поражения электрическим током в производстве.**

*Защитное замыкание* – это искусственное замыкание на землю фазы сети с изолированной нейтралью, в которой возникла утечка, с целью шунтирования цепи однофазного прикосновения человека.

Существует несколько схем устройств защитного замыкания для сетей с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В. При сопротивлении шунтирования, обеспечивающем при однофазном прикосновении ток через человека менее порогового отпускаящего, защитное замыкание рассматривается как резервная мера защиты, снижающая вероятность поражения людей электрическим током.

*Выравнивание потенциалов* – метод снижения напряжений прикосновения шага между точками электрической цепи, к которым возможно одновременное прикосновение или на которых может

одновременно стоять человек. Достигается выравнивание потенциалов путем искусственного повышения потенциала опорной поверхности ног до уровня потенциала токоведущей части (металлическое соединение токоведущей части и опорной поверхности).

*Выравнивание потенциалов* применяется при пофазном ремонте ВЛ электропередачи под напряжением. Для выполнения работ человек вынимается с помощью телескопической изоляционной вышки до уровня провода. Затем с помощью изолирующей штанги накладывают перемычку между металлической люлькой, изолированной от земли, и фазным проводом линии. После этого работы выполняются без электрозащитных средств. Ток утечки протекает через перемычку и изоляцию вышки в землю. Человек не попадает под напряжение, так как разность потенциалов провода, которого он касается, и опорной поверхностью ног равна нулю. После окончания работ перемычка снимается с помощью изолирующей штанги, и человек опускается на землю. Выравнивание потенциалов, обеспечивающее снижение напряжения прикосновения и шага, применяется также при контурном защитном заземлении.

*Малое напряжение* – это номинальное напряжение не более 42 В между фазами и по отношению к земле, применяемое в целях уменьшения опасности поражения электрическим током. Малое напряжение обеспечивает безопасность по следующим причинам: при малом напряжении через сопротивление протекает соответственно и «малый» ток и при малом напряжении сопротивление тела человека велико, что способствует ещё большему уменьшению тока через человека.

В производственных условиях применяют два малых напряжения – 12 и 36 (42) В. Напряжение до 36 В включительно применяется в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и вне помещений для питания следующих электроприемников: ручных электрифицированных инструментов (дрель, гайковерт, паяльник, пила, рубанок и др.), переносных ручных ламп, светильников местного стационарного освещения с лампами

накаливания, светильников общего освещения обычной конструкции с лампами накаливания, размещенных над полом на высоте менее 2,5м.

Напряжение не выше 12 В включительно должно применяться для питания ручных переносных ламп в особо опасных помещениях при особо неблагоприятных условиях работы: в стесненных условиях, при соприкосновении работающего с большими металлическими заземленными поверхностями (работа в металлической емкости сидя или лёжа на токопроводящем полу, в кабельном колодце, в смотровой яме и др.).

Источниками малого напряжения служат батареи гальванических элементов, аккумуляторы, выпрямительные установки, преобразователи частоты, трансформаторы. Применение автотрансформаторов или реостатов запрещается, так как в этом случае сеть малого напряжения электрически связана с сетью высшего напряжения. Наиболее часто применяют трансформаторы. Единственный недостаток трансформаторов для получения малого напряжения – возможность перехода высшего напряжения на корпус или на сторону малого напряжения. Для исключения этой опасности корпус трансформатора и один из выводов (нейтраль или среднюю точку обмотки малого напряжения) заземляют или зануляют, а между обмотками высшего и малого напряжений помещают заземленный экран.

*Изолирующая площадка* – это площадка, пол и ограждение которой изолированы от земли. Изоляция площадки ограничивает ток через человека при прикосновении к частям электрооборудования под напряжением. Изолирующие площадки используют для обслуживания электрооборудования, в котором по технологическим или другим соображениям не выполнено защитное заземление или зануление корпусов. Устраивают изолирующие площадки с таким расчетом, чтобы человек, стоя на площадке, не мог одновременно прикоснуться к незаземленному корпусу оборудования или конструктивным элементам здания или заземленным частям другого технологического оборудования. Изоляцию площадки от земли выполняют с таким сопротивлением, чтобы напряжение, максимально

возможное на незаземленном корпусе по отношению к земле, обуславливало через человека ток не более порогового ощутимого. Для входа или подъема на изолирующую площадку устраивают изолирующие дорожки или лестницы или соответствующей длины изолирующие вставки дорожек или лестниц.

Если пол изолирующей площадки металлический, применяют выравнивание потенциалов: пол постоянно или на время выполнения работы соединяют металлическим предметом с незаземленным корпусом.

Защитному заземлению подлежат: корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников, приводы электрических аппаратов (выключателей, разъединителей, отделителей и т.п.), вторичные обмотки измерительных трансформаторов, каркасы распределительных щитов, щитов управления, щитков и шкафов, а также съемные или открывающиеся части их, если на этих участках 110 В постоянного тока, металлические конструкции РУ, металлические кабельные конструкции и соединительные муфты, металлические оболочки и броня кабелей, металлические оболочки проводов, металлические рукава и трубы электропроводки, кожуха и опорные конструкции шинопроводов, лотки, короба, струны, тросы и стальные полосы, на которых укреплены (кроме конструкций, на которых укреплены кабели с заземленной металлической оболочкой или броней), а также металлические конструкции, на которых устанавливается электрооборудование; металлические оболочки и броня кабелей и проводов напряжением до 42 В переменного тока и 110 В постоянного тока, проложенных на общих металлических конструкциях (в том числе в общих трубах, коробах, лотках и т.п.) вместе с кабелями и проводами, металлические оболочки и броня которых подлежат заземлению; металлические корпуса передвижных и переносных электро-приемников; электрооборудование, размещенное на движущихся частях станков, машин и механизмов; строительные и производственные конструкции, стационарно проложенные трубопроводы, металлические корпуса технологического

оборудования, подкрановые и железнодорожные рельсовые пути в тех помещениях и наружных установках, в электроустановках которых применяется заземление; а также металлическим конструктивные элементы ВЛ (опоры, арматура и др.).

*Заземлению не подлежат:* корпуса электрооборудования, аппаратов и электромонтажных конструкций, установленных на заземленных металлических конструкциях, РУ, на щитах, шкафах, щитках, станинах станков, машин и механизмов, при условии обеспечения надежного электрического контакта с заземленными основаниями; арматура изоляторов, оттяжек, кронштейнов и осветительная арматура на деревянных опорах ВЛ или деревянных конструкциях открытых подстанций.

Электрозащитные средства (ЭЗС) – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги и электромагнитного поля. По характеру применения средства защиты подразделяются на две категории: средства коллективной защиты и средства индивидуальной защиты. По степени защиты ЭЗС подразделяются на основные и дополнительные. Основные ЭЗС – это средства защиты, изоляция которых длительно выдерживает рабочее напряжение электроустановки и которые позволяют прикасаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Дополнительные ЭЗС – это средства защиты, дополняющие основные, а также служащие для защиты от напряжений прикосновения и шага, которые сами по себе не могут при данном напряжении обеспечить защиту от поражения током, а применяются совместно с основными ЭЗС.

К основным ЭЗС для работы в электроустановках напряжением выше 1000В относятся: изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения; изолирующие устройства и приспособления для работ на ВЛ с непосредственным прикосновением электроинструмента к токоведущим частям ( изолирующие лестницы, площадки, изолирующие тросы, канаты, корзины телескопических

вышек, кабины для работы у провода и др.). К дополнительным ЭЗС, применяемым в электроустановках, напряжением выше 1000 В, относятся: диэлектрические перчатки, боты, ковры; изолирующие подставки и накладки; диэлектрические колпаки; переносные заземления; оградительные устройства; плакаты безопасности.

К основным ЭЗС, применяемым в электроустановках, напряжением до 1000В относятся: изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения, диэлектрические перчатки и слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками. К дополнительным ЭЗС в электроустановках напряжением до 1000 В относятся: диэлектрические галоши и ковры, переносные заземления, изолирующие подставки и накладки, оградительные устройства, плакаты безопасности.

Кроме перечисленных ЭЗС, в электроустановках применяют также такие средства индивидуальной защиты, как очки, каски, противогазы, рукавицы, предохранительные монтерские пояса и страховочные канаты.

### **Пожарная безопасность**

Для компьютеров характерна высокая плотность размещения элементов электронных схем. В непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты. При этом возможно оплавление изоляции. Для отвода избыточной теплоты служат системы вентиляции и кондиционирования воздуха. При постоянном действии эти системы представляют собой дополнительную пожарную опасность.

Помещение по пожарной опасности относится к категории Д. Имеется телефонная связь и пожарная сигнализация. Материалы, применяемые для ограждающих конструкций и отделки рабочих помещений должны быть огнестойкими. Для предотвращения возгорания в зоне расположения

компьютеров и другой оргтехники обычных горючих материалов и электрооборудования, принимают следующие меры:

- в качестве вспомогательного средства тушения пожара могут использоваться гидрант или устройства с гибкими шлангами;

- наличие углекислотных огнетушителей типов ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8. Согласно типовым правилам пожарной безопасности на каждые 100 м<sup>2</sup> площади помещения приходится один огнетушитель;

- для непрерывного контроля машинного зала и зоны хранения носителей информации устанавливают систему обнаружения пожаров, для этого можно использовать комбинированные извещатели типа КИ-1 из расчета один извещатель на 100 м<sup>2</sup> помещения.

Во всех служебных помещениях имеется «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники.

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Техничко-экономическое обоснование проекта

- Создание виртуальной лабораторной работы, для замены стендового прибора. Методическое пособие, которые раскрывает содержание и методику проведения работы с использованием ИКТ, организацию самостоятельной работы учащихся.

- Экономическая эффективность ВЛР. Получение дополнительного объёма полезной информации студентом по сравнению с существующими методами обучения; Экономия времени на обучение, получаемая в результате внедрения ВЛР, по сравнению с существующими методами обучения.

### 2. Определить объем инвестиции

Нижеследующим таблице дано приведенные затраты на ВКР

Табл. 6.1.

Объем инвестиции на покупку материально-производственных запасов

№	Наименование материалов	Кол-во	Цена материала за единицы	НДС 20%	Стоимость материала с учетом НДС
1	Асбест труба		5000	1000	6000
2	Спираль Ni Cr		6000	1200	7200
3	Кирпич		5000	1000	6000
4	Коробка		10000	2000	12000
5	Проволки	4	800	640	1440
6	Зонд Мо	2	3000	1200	4200
7	Слюда		500	100	600
8	Подложка		3000	600	3600
9	Керамика		1000	200	1200
10	Болт, гайки		500	100	600
11	Алебастр		500	100	600
12	Итого				43440

Табл. 6.2

Объем инвестиции на покупку малоценного инвентаря и контрольно-измерительных приборов

№	Наименование	Кол-во	Цена за единицы	НДС 20%	Общая стоимость с учетом НДС
1	Дрель	1	50000	10000	60000
2	Тиски	1	15000	3000	18000
3	Пила	1	7000	1400	8400
	Сварка	1	25000	5000	30000
	Отвёртка	1	5000	1000	6000
	Латр	1	20000	4000	24000
	Вольтметр	1	15000	3000	18000
	Итого				164400

Табл. 6.3

Стоимость основных фондов

№	Наименование основных фондов	Кол-во	Стоимость ОФ
1	Лаборатория		135000
2	Оборудование		164400
3	Итого		299400

Амортизационные отчисления составляет 20% от стоимости ОФ

$$A_{отч} = 20\% * ОФ$$

$$A_{отч} = 0,2 * 299400 / 12$$

$$A_{отч} = 4990 \text{ сум}$$

Затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание 12% от стоимости ОФ

$$P_m = 12\% * ОФ$$

$$P_m = 0,2 * 299400 / 12$$

$$P_m = 2994 \text{ сум}$$

## Расчет заработной платы производственных рабочих

№	Наименование операции	должн ость	Кол. дней	Дневной зароботок	Стоимосит выполненных работ
1	Выбор темы на разработку	СНС	1	15000	15000
2	Изучение и анализ литератур по теме	МНС	2	7050	14100
3	Разработка интерфейса программы	МНС	2	7050	14100
4	Занесения плана лекции	МНС	3	7050	21150
5	Отладка программы	МНС	1	7050	7050
6	Тестирования комплекс программы	МНС	2	7050	14100
7	Выявление ошибок	МНС	2	7050	14100
8	Исправление ошибок	МНС	2	7050	14100
9	Экономическая часть	МНС СНС	2 1	7050 15000	14100 15000
10	Охрана труда	МНС СНС	2 1	7050 15000	14100 15000
11	Разработка пояснительной записки	МНС	1	7050	7050
12	Рецензирование	СНС	1	15000	15000
13	Оформление и защита ВКР	МНС	1	7050	7050
	Итого:		24		201000

Основная заработанная плата определяется как сумма оплаты труда всех рабочих и премии в размере 40%

$$З_{осн} = С_{ОТ} * 0,4 + С_{ОТ}$$

$$З_{осн} = 201000 * 1,4$$

$$З_{осн} = 281400$$

Дополнительной заработной платы производственных рабочих берется 10% от основного з/п.

$$З_{д} = К_{д} * З_{осн}$$

$$З_{д} = 0,1 * 281400$$

$$З_{д} = 28140$$

Фонд оплаты труда определяется как сумма основной и дополнительной заработной платы.

$$\text{ФОТ} = \text{З осн} + \text{Зд}$$

$$\text{ФОТ} = 281400 + 28140$$

$$\text{ФОТ} = 309540 \text{ сум}$$

Затраты на социальное страхование рассчитывается 25% от ФОТ.

$$\text{Офсс} = 25\% * \text{ФОТ}$$

$$\text{Офсс} = 0,25 * 309540$$

$$\text{Офсс} = 77385$$

Транспортные расходы рассчитывается 20% от Зосн.

$$\text{Ртр} = 0,2 * 281400$$

$$\text{Ртр} = 56280 \text{ сум}$$

Расход пара на производственные нужды.

Длина - 4            Ширина - 5

$$V = 20 * 663,05$$

$$V = 13261 \text{ сум}$$

$V = \text{длина} * \text{ширина}$ .

Расходы на электроэнергию определяется по формуле:

$$W = N * T * S$$

$$W = 1 * 144 * 112,20$$

$$W = 16156,8$$

$N$  – установленная мощность

$T$  - время работы

$S$  – стоимость электроэнергии за кВт

Объем инвестиции определяется по формуле:

$$K = \text{МПЗ} + \text{ФОТ} + \text{Аоф} + \sum P$$

$$K = 46680 + 309540 + 4336,6 + 165684,8 = 526241,4 \text{ сум}$$

Табл. 6.5

## Смета затрат на проведение разработки

№	Наименование статьей затрат	Сумма
1	Стоимость выполненных работ	574312,1
2	Затраты на производство	441778,6
3	Производственная себестоимость	410824,6
4	Расходы периода	30954
5	Материальные затраты	76097,8
6	Сырьё	46680
7	Электроэнергия + отопления	29414,8
8	ФОТ	309540
9	Социальное страхование	77385
10	Амортизация	4336,6
11	Прочие затраты	19563
12	Основная заработная плата	201000

Табл. 6.6

## Расчет экономической эффективности выполненных работ

№	Наименование показателей	Ед.изм ерения	сумм	Примечание
1	Стоимость выполненных работ	Сум	574312,1	Таблица
2	Затраты на производства	Сум	441778,6	Таблица
3	Инвестиции	Сум	526241,4	Формула
4	Экономическая эффективность	Сум	132533,5	Формула
5	Срок окупаемости	Месяц	4	Формула
6	Рентабельность	%	25%	Формула

Экономическую эффективность определим по формуле:

$$\mathcal{E} = (C1 - C2) * Q$$

$$\mathcal{E} = 132533,5 \text{ сум}$$

C1 и C2 – себестоимость до и после

$$C1 = C2 * 1,3$$

Q – объем производство

Рентабельность определим по формуле

$$R = \mathcal{E} * 100\% / K$$

$$R = 132533,6 / 526241,4 * 100\%$$

$$R = 25\%$$

Определяем срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = K / \text{Э}$$

$$T = 526241,4 / 132533,6$$

$$T = 4$$

Э = экономическая эффективность капитала, К = капитал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выпускной квалификационной работы получены сравнительные результаты анализа виртуальной модели трехфазного зависимого инвертора с нулевым выводом. Данные, полученные в ходе проведенных экспериментов, могут быть использованы в учебном процессе при постановке виртуальных лабораторных работ по электроэнергетическим предметам, изучаемым студентами направлений «Электроника и микроэлектроника», «Электроника и приборостроение».

Отличительной особенностью данной работы явилось стремление максимально приблизить виртуальную модель к идеальному устройству по электрическим параметрам и оценить адекватность компьютерного моделирования.

В ходе выполнения разработки решены следующие задачи:

- дано обоснование актуальности темы,
- дан обзор и рассмотрена классификация зависимых инверторов;
- выбрана схема для проведения исследований и заданы параметры его элементов для построения виртуальной модели;
- проведены эксперименты с виртуальной моделью трехфазного зависимого инвертора;

Выводы. Виртуальная модель трехфазного зависимого инвертора отличается высокой сходимостью результатов. В то же время необходимо отметить следующее, что процесс виртуального моделирования так же, как и физическое макетирование, требует определенной наладки схемы, прежде чем она выйдет на основной режим работы. Из сказанного следует вывод о том, что виртуальное моделирование – достаточно сложный и тонкий процесс, требующий от специалиста глубоких профессиональных знаний и умений. Только в этом случае может быть достигнут желаемый положительный результат. Поэтому при подготовке специалистов по

данному направлению необходимо изучать основы работы зависимых инверторов.

В результате выполнения выпускной работы подготовлены наглядные материалы в виде учебных плакатов. Материалы данной работы могут быть использованы при подготовке бакалавров по направлениям «Электроника и микроэлектроника», «Электроника и приборостроение» в изучении предмета «Вторичные источники энергии», а также в дальнейших исследованиях процессов в электронных схемах и устройствах различных классов.

Таким образом, все задачи, сформулированные в задании на выпускную квалификационную работу, выполнены в полном объеме. Цели, поставленные в данной выпускной квалификационной работе, достигнуты.

## Список используемой литературы

1. Указ президента «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» от 01.03.2013
2. Автономные источники питания. – Лекции. Бекиров Э.А. (книга). – Симферополь, 2010г.
3. Источники электропитания РЭА. Справочник под ред. Г. С. Найвельта, М., «Радио и связь», 1986, 576 с. с ил.
4. Ирвинг М. Готтлиб «Источники питания. Инверторы, конверторы. Линейные и импульсные стабилизаторы». Пер. с англ., «Постмаркет», М., 2000.
5. И.И.Белопольский, Е.И.Каратникова, Л.Г.Тикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М., Энергетика, 1973г.
6. Горюнов. Справочник по диодам стабилитронам, полупроводниковых приборам.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – Л.: Высшая школа, 1973. – 752 с.
8. Опорный лист силовых электронных модулей производителя Mitsubishi Electronics  
[<http://www.mitsubishichips.com/Global/common/cfm/eLineUp.cfm?FOLDER=/product/powermod>].
9. Основы преобразовательной техники. О.З. Попков 2007г.
10. Силовая электроник Г.С. Зиновьев 2012 г.
11. Нежданов И.В. Инверторы на тиристорах (1965)
12. Раскин Л.Я. Стабилизированные автономные инверторы тока на тиристорах (1970)
13. Зиновьев Г.С. “Основы силовой электроники”, Новосибирск, НГТУ, 2003.
14. В.С. Руденко и др. “Основы преобразовательной техники”, М.: Высшая школа, 1980.
15. “Справочник по преобразовательной технике” под редакцией Чиженко М.И., Киев, Техника, 1978.
16. интернет ресурс: <http://www.allbest.ru>
17. Безопасность жизнедеятельности: Учебн. /Под ред. С. В. Белова. – М.: Высшая школа, 2009. – 448 с