

**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*

**Маматов Ойбек Абдумаликович**

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКОГО МАКЕТА  
И ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО  
АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

**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

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЁ РАЗВИТИЯ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Общие сведения о силовой электронике .....	11
1.2 Основные виды устройств преобразовательной техники ...	12
1.3 Перспективы развития силовой электроники .....	14
<b>ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНВЕРТОРАХ .....</b>	<b>19</b>
2.1 Понятие об инвертировании и инверторах .....	19
2.2 Автономные инверторы .....	21
2.3 Принципы построения автономных инверторов .....	22
<b>ГЛАВА 3 ОДНОФАЗНЫЕ АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>27</b>
3.1 АИН на однооперационных тиристорах .....	27
3.2 Однофазный мостовой инвертор на двухоперационных тиристорах .....	30
3.3. Аналитический расчет параметров однофазного инвертора напряжения .....	32
3.4 АИН на биполярных транзисторах с последовательным включением нагрузки .....	35
3.5. Однофазный инвертор с широтно-импульсным способом регулирования напряжения .....	38
<b>ГЛАВА 4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОГО МАКЕТА И ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>42</b>
4.1. Исследование однофазного автономного инвертора напряжения на физическом макете .....	42

<b>4.2 Формирование виртуальной модели автономного инвер-</b>	
<b>тора напряжения и проведение экспериментов на компьютере .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Сравнительный анализ результатов на физическом макете</b>	
<b>и виртуальной модели .....</b>	<b>52</b>
<b>ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....</b>	<b>54</b>
<b>БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ .....</b>	<b>62</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>73</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>75</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В Докладе Президента Республики Узбекистан Ислама Каримова на заседании Кабинета Министров, посвященном итогам социально-экономического развития в 2013 году и важнейшим приоритетным направлениям экономической программы на 2014 год, сказано, 2014 год станет годом ввода в строй важнейших высокотехнологичных и современных объектов и мощностей в промышленности [1]. В этой связи значительная роль отводится созданию и использованию альтернативных источников электроэнергии, в первую очередь фотоэлектрических (солнечных) электростанций [2]. В Указе Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» от 01.03.2013 г. отмечено, 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.

В Узбекистане накоплен значительный опыт проведения научных и экспериментальных исследований в области применения альтернативных источников энергии, прежде всего солнечной энергии, по которым разработки проводятся в течение многих десятилетий. В республике создан не имеющий аналогов в Центральной Азии научно-экспериментальный центр – НПО «Физика-Солнце» Академии наук, результаты исследований которого получили мировое признание.

Наиболее активно и результативно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию низкопотенциальных установок для горячего водо- и теплоснабжения, фотоэлектрическим и термодинамическим преобразованиям для получения электричества, использованию

солнечной энергии в технологиях синтеза специальных материалов, термобработки материалов и конструкций.

Освоено производство фотоэлектрических установок различной мощности. Во многих вузах и профессиональных колледжах осуществляется подготовка квалифицированных кадров для этой сферы.

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 и 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. 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:

- 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.

В то же время большинство бытовых потребителей (холодильники, телевизоры и другие) требует переменного напряжения 220 вольт с частотой 50 герц. Для преобразования постоянного напряжения солнечных станций в переменное напряжение с необходимыми характеристиками требуются устройства, называемые инверторами. Инверторы для солнечных станций отличаются высоким уровнем надежности, перегрузочной способностью, наличием встроенных электронных систем защиты.

В солнечных электростанциях инверторам отводится важная роль. Основная задача инвертора заключается в преобразовании энергии постоянного тока, вырабатываемой солнечной электростанцией, в энергию переменного тока, удобного для использования различными потребителями в быту, промышленности и на транспорте. Отсюда следует вывод, что изучение принципов построения, работы схем, моделирования и проектирования инверторов является актуальной задачей при подготовке бакалавров по направлению «Электроника и приборостроение».

Инверторы относятся к широкому классу полупроводниковых вентильных преобразователей параметров электрической энергии [3,4]. В общем смысле вентильные преобразователи предназначены для преобразования параметров и характеристик электроэнергии, вырабатываемой первичными источниками электроэнергии, к виду, удобному (или необходимому) для потребителей.

Для преобразования и регулирования параметров электрической энергии широко применяются силовые электронные устройства. Обычно они являются источниками вторичного электропитания потребителей электрической энергии и обеспечивают их электрической энергией с необходимыми параметрами и соответствующим качеством.

К функциям силовых электронных устройств можно отнести: преобразование электрической энергии; электрическую изоляцию цепей питания

друг от друга и от первичного источника; высокую стабильность вторичных питающих напряжений в условиях значительного изменения первичного питающего напряжения и нагрузок; эффективное подавление пульсаций во вторичных питающих цепях постоянного тока, требуемую форму переменного напряжения и тока, постоянство угла сдвига их фаз и высокую стабильность их частот и т.д.

Использование полупроводниковых приборов обеспечивает высокую надежность, экономичность, большой срок службы средств вторичного электропитания при их сравнительно малых габаритах и массе.

Автономными инверторами принято называть преобразователи энергии постоянного тока в энергию переменного тока, с частотой, которая задается независимо от частоты источника питания.

В зависимости от протекающих электромагнитных процессов автономные инверторы подразделяют на следующие типы: инверторы тока, инверторы напряжения и резонансные инверторы.

В инверторах тока форма выходного напряжения близка к синусоидальной, в ней отсутствует третья и кратные ей гармоники. Также его отличительной чертой являются относительно малые пульсации входного тока.

Из сказанного следует вывод, что в процессе подготовки бакалавров по направлению «Электроника и приборостроение» актуальным является изучение принципов построения и работы инверторов различных типов, а также основ их проектирования, освоение методов автоматизированного проектирования.

Автономные инверторы относятся к широкому классу вентильных преобразователей электроэнергии, входящих в раздел силовой электроники. Основными элементами преобразователей являются электрические вентили. Проводимость большинства вентилях в существенной мере зависит от направления электрического тока: в одном («прямом») направлении их про-

водимость велика, а в другом («обратном») – мала. Значит, вентиль имеет два явно выраженных состояния: включенное (замкнутое) и выключенное (разомкнутое). Вентили бывают неуправляемыми и управляемыми. В последних можно управлять моментом наступления их высокой проводимости (включением) посредством сигналов управления малой мощности.

В настоящее время большое внимание уделяется виртуальным лабораторным работам с использованием компьютерных программ. В этой связи возникает необходимость в сравнительном анализе результатов компьютерного моделирования и исследования электрических преобразователей энергии на физических макетах и лабораторных стендах.

Актуальность темы подтверждается тем, что она посвящена вопросам создания и использования в учебном процессе виртуальных моделей инверторов, имеющих важную сферу практического применения.

Цель данной выпускной квалификационной работы – создание виртуальной модели, позволяющей исследовать электромагнитные процессы, протекающие в однофазном автономном инверторе напряжения, и сравнение результатов моделирования и макетирования устройства.

# ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЁ РАЗВИТИЯ

## 1.1 Общие сведения о силовой электронике

В преобразовательной технике в 20-х годах прошлого столетия начали разрабатываться статические преобразователи электроэнергии – выпрямители и инверторы с применением газоразрядных электронных приборов - ртутных выпрямителей, тиратронов, газотронов, игнитронов и т.д. Однако их низкий к.п.д., невысокая надежность, существенное влияние на питающую сеть, затрудняли широкое использование этих устройств. Вместе с тем именно с развитием и совершенствованием газоразрядных приборов усилиями ученых В.Шиллинга, М.Демонтивье, М.Мюллер-Любека, И.Л.Каганова, М.А.Чернышева, Д.А.Завалишина, и др. развивалась теория преобразования энергии, ими были разработаны основные схемы выпрямителей, инверторов и исследованы электромагнитные процессы в их силовых цепях. Новый этап в развитии преобразовательной техники начался с конца 50-х годов, в период появления мощных полупроводниковых приборов - диодов, тиристоров, а затем мощных биполярных транзисторов. Эти приборы, разработанные в основном на Ge, Si и AsGa, существенно превосходили газоразрядные приборы, отличались меньшими габаритами и массой, повышенной надежностью, быстродействием, КПД и могли использоваться в достаточно широком температурном диапазоне [11].

Первыми работами в СНГ, посвященными исследованию полупроводниковых приборов и их применению для преобразования электрической энергии, были труды академиков В.Ф. Миткевича, И.Д. Папалекси, А.И. Ларионова и др.

Последующее развитие полупроводниковой преобразовательной техники характеризовалось появлением новых схмотехнических и конструктивных решений, расширением номенклатуры устройств, созданием и разра-

боткой теории новых схем, использующих различные виды модуляции, формированием самостоятельных научных школ – Московской, Ленинградской, Украинской, Белорусской, Уральской и Сибирской. В Узбекистане в 1962 г. на инженерно-физическом факультете Ташкентского политехнического института была создана кафедра «Промышленная электроника», которую возглавил профессор Умаров Б.У. Основные направления ее научно-учебной деятельности были связаны с развитием силовой электроники.

## 1.2 Основные виды устройств преобразовательной техники

Основные виды устройств силовой электроники символически изображены на рис. 1.1.

Дадим определения некоторых видов устройств преобразовательной техники. [9,10

Выпрямителями называют преобразователи переменного напряжения  $U_{\sim}$  в постоянное напряжение  $U_{=}$  (рис. 1.1, а).

Инверторами называют преобразователи постоянного напряжения  $U_{=}$  в переменное напряжение  $U_{\sim}$  (рис. 1.1, б).

Преобразователи частоты — это преобразователи переменного напряжения одной частоты  $U_{f1}$  в переменное напряжение другой постоянной или регулируемой частоты  $U_{f2}$  (рис. 1.1, в).

Преобразователи числа фаз — это преобразователь  $m_1$  фазного переменного входного напряжения  $U_{m1}$  в переменное напряжение  $U_{m2}$  с другим числом фаз  $m_2$  (рис. 1.1, г).

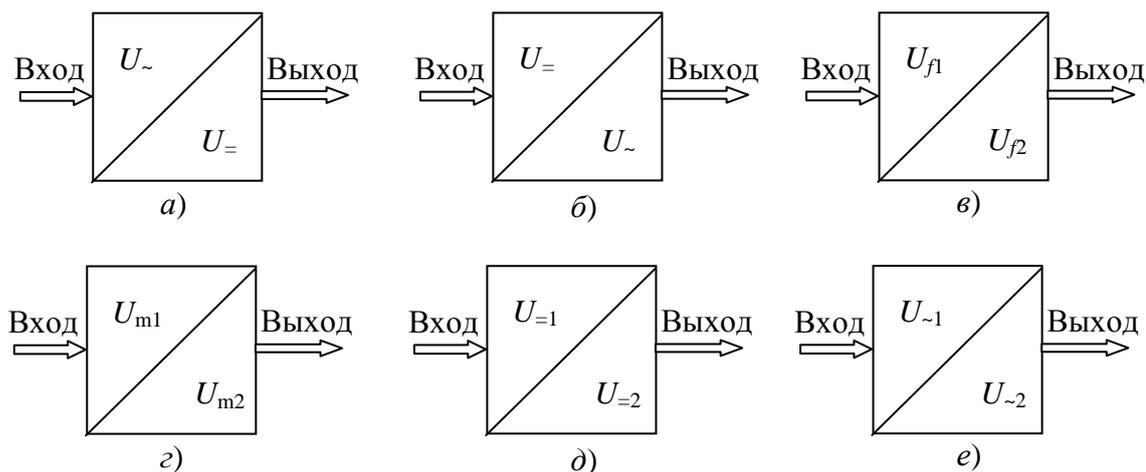


Рис. 1.1. Основные виды преобразователей параметров электроэнергии

Регуляторы (трансформаторы) постоянного напряжения — это статические преобразователи, преобразующие постоянное напряжение одного значения  $U_{=1}$  в постоянное напряжение другого значения  $U_{=2}$  (рис. 1.1, д).

Регуляторы переменного напряжения — это статические преобразователи, преобразующие переменное напряжение одного значения  $U_{\sim 1}$  в переменное напряжение другого значения  $U_{\sim 2}$  (рис. 1.1, е).

Существуют и другие виды преобразования электрической энергии: формирование мощных импульсов напряжения для питания лазеров, сигнальных устройств, маяков, получение мощных импульсов электромагнитных полей и др.

Используя названные типы преобразователей, можно решать различные задачи и создавать преобразовательные установки для питания конкретных потребителей.

### 1.3 Перспективы развития силовой электроники

Последнее десятилетие прошлого столетия характеризовалось дальнейшим расширением номенклатуры систем с полупроводниковыми преобразователями для самых различных отраслей техники.

Характерными особенностями этих систем являются:

- использование современной полупроводниковой техники – полевых транзисторов и транзисторов IGBT и программируемых контроллеров в системе управления;

- электромагнитная совместимость с питающей сетью и высокие показатели качества потребляемой из сети энергии;

- малые удельные значения массы и объема на единицу мощности;

- возможность сопряжения с различными системами автоматизации и управления на базе персональных компьютеров;

- встроенная самодиагностика, сводящая к минимуму техническое обслуживание и простой технологического оборудования.

Следует отметить тесную взаимосвязь первых двух особенностей современных систем с полупроводниковыми преобразователями электрической энергии, т.к. только с появлением мощных, полностью управляемых приборов появилась возможность, с помощью самих же преобразователей, работающих на стороне переменного тока с импульсной модуляцией на высоких частотах, активно влиять на показатели качества потребляемой ими электроэнергии [5].

Несмотря на эти преимущества силовой электроники, уровень преобразования электрической энергии в СНГ систематически снижается и оценивается величиной в 20% против 38% в 1978 году. Особенно резкое отставание имеется в области вентильного электропривода переменного тока. При доле электропривода переменного тока в энергопотреблении по стране в 45% , доля регулируемого электропривода переменного тока не превышает 2% существующего парка электроприводов. Использование полупроводни-

ковых преобразователей только для систем регулируемого электропривода позволило бы снижать потребление электроэнергии от 10 до 25%.

В то же время в США доля регулируемого электропривода составляет более 50%, что дает экономию электрической энергии в промышленности 190 млрд.квт.час., в быту 100 млрд.квт.час. в год. Важнейшее направление энергосбережения в Германии - применение вентильного электропривода: в 1983 году доля регулируемого электропривода была лишь 5%, а к началу 21-го века выросла до 60%.

Наше отставание по промышленному использованию полупроводниковых преобразователей объясняется взаимосвязанными причинами: относительной дешевизной электрической энергии, а также относительной сложностью и дорогоевизной энергосберегающих мероприятий.

Устройства полупроводниковой преобразовательной техники широко применяются практически во всех отраслях народного хозяйства. Одной из основных областей эффективного использования устройств преобразовательной техники является электропривод. Для электроприводов постоянного тока применяется несколько серий тиристорных агрегатов, предназначенных для использования в металлургии, станкостроении, на транспорте и в других отраслях народного хозяйства. В области регулируемого электропривода переменного тока применяются высокоэффективные устройства, преобразующие ток промышленной частоты в переменный ток регулируемой частоты.

Для различных областей техники разработано много типов преобразователей частоты со стабилизированными выходными параметрами. В частности, для индукционного нагрева металла разработана серия высококачественных преобразователей с диапазоном мощностей от 160 до 800 кВт.

Применение импульсных методов регулирования скорости подвижного состава посредством тиристорных преобразователей существенно повышает эффективность использования электроэнергии в этой отрасли. За счет

применения выпрямительных агрегатов с глубоким регулированием выходных напряжения и тока значительно улучшается качество ряда технологических процессов в электрометаллургической и химической отраслях промышленности.

Достоинства вентильных преобразователей определили их широкое применение в системах бесперебойного электроснабжения. Для этой цели разработан ряд выпрямителей и автономных инверторов на диапазон мощностей от единиц до нескольких сотен киловатт. Достаточно широка область применения преобразовательных устройств в сфере бытовой электроники (регуляторы и стабилизаторы напряжения и др.).

Таким образом, вентильные преобразователи играют существенную роль в современной технике.

В настоящее время под устройствами преобразовательной техники понимаются и широко применяются преобразователи на основе полупроводниковых приборов, которые имеют множество преимуществ по сравнению с другими элементами.

Мощные преобразователи широко используются в цветной металлургии, химической промышленности, на железнодорожном и городском электротранспорте, в электрооборудовании горно-металлургической промышленности, в чёрной металлургии, энергетике, в различных приводах экскаваторов, зарядке аккумуляторов, сварочных аппаратах, в высоковольтных линиях передачи постоянного тока.

Преобразовательная техника считается одним из эффективных направлений электротехники. Широкое применение мощных полупроводниковых преобразователей в различных областях народного хозяйства является движущим фактором развития техники. До недавнего времени мощные полупроводниковые преобразователи выполнялись на однооперационных тиристорах. При использовании параллельного или последовательного со-

единения этих тиристоров возникают проблемы равного распределения протекающего через них тока и прикладываемого к ним обратного напряжения, а также другие проблемы. Совершенствование мощных полупроводниковых приборов, появление новых видов полупроводниковых приборов создаёт основу для создания полупроводниковых преобразователей с высокими технико-экономическими показателями.

В настоящее время в мощной преобразовательной технике широко применяются биполярные транзисторы с изолированным затвором - IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors). Можно утверждать, что создание этих приборов ведёт к революционным изменениям в силовой электронике. В настоящее время IGBT транзисторы обеспечивают коммутацию тока ~2000 А и напряжения ~4,5 кВ. Эти приборы начинают вытеснять мощные (до единиц МВт) двухоперационные тиристоры GTO (Gate Turn Off).

Необходимо также отметить, что результатом совершенствования зарубежными фирмами тиристоров GTO явилось создание тиристоров, коммутируемых по затвору - IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor).

Новым в работе полупроводникового прибора IGCT является то, что при запираании он переходит из состояния р-п-р-п в состояние р-п-р в течение 1 мкс. В запертом состоянии он продолжает работать полностью в режиме транзистора. В открытом состоянии он работает полностью в тиристорном режиме.

Положительные свойства полупроводникового прибора IGCT заключаются в следующем:

- а) стойкость к  $\frac{dU}{dt}$ ;
- б) работа без конденсатора, предохраняющего от перенапряжений;
- в) отсутствие различных проблем при последовательном соединении.

Ближайшие перспективы силовой электроники в нашей стране определяются альтернативной энергетикой, развитию которой государство придаёт огромное значение [1, 2]. В первую очередь это касается преобразования энергии Солнца и ветра в электроэнергию и дальнейшего её использования потребителями. Известно, что солнечные модули и ветровые установки вырабатывают энергию постоянного тока с характерными признаками нестабильности. Значительная часть потребителей требует энергии переменного тока. Таким образом, необходимо обеспечить стабилизацию параметров вырабатываемой электроэнергии и преобразование её к виду, удобному для потребителей.

Из сказанного вытекает возрастающая потребность в стабилизаторах напряжения и тока, инверторах, регуляторах напряжения и других устройствах силовой электроники.

Дальнейший толчок развитию этому направлению даёт применение микропроцессоров для управления инверторами и другими видами преобразователей электроэнергии.

## ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНВЕРТОРАХ

### 2.1 Понятие об инвертировании и инверторах

Инвертированием в силовой электронике называют процесс преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока, т.е. процесс, обратный выпрямлению [4]. Устройства, осуществляющие такое преобразование, являются инверторами.

Различают два класса инверторов:

- зависимые инверторы, или инверторы, ведомые сетью;
- независимые или автономные инверторы.

Зависимый инвертор работает при условии наличия в его выходной цепи источника переменного напряжения, который задает форму, частоту и величину напряжения образованной им сети переменного напряжения. В этой сети могут находиться потребители переменного тока, и задача зависимого (от этой сети) инвертора сводится к поставке в эту сеть недостающей или дополнительной активной мощности. С примером использования зависимого инвертора мы сталкиваемся в системе передачи электрической энергии постоянным током при связи двух энергосистем переменного напряжения. При этом на передающем конце линии выпрямитель преобразует переменное напряжение в постоянное, а на приемном конце зависимый инвертор преобразует постоянный ток в переменный, добавляя в приемную энергосистему свою активную энергию. Возможна смена функций вентиляционных преобразователей на обратные для обращения потока активной мощности в линии постоянного тока.

Автономным называется инвертор, работающий на автономную нагрузку и независимый от промышленной электрической сети.

Некоторые из многих возможных применений инверторов представлены на рис. 2.1.

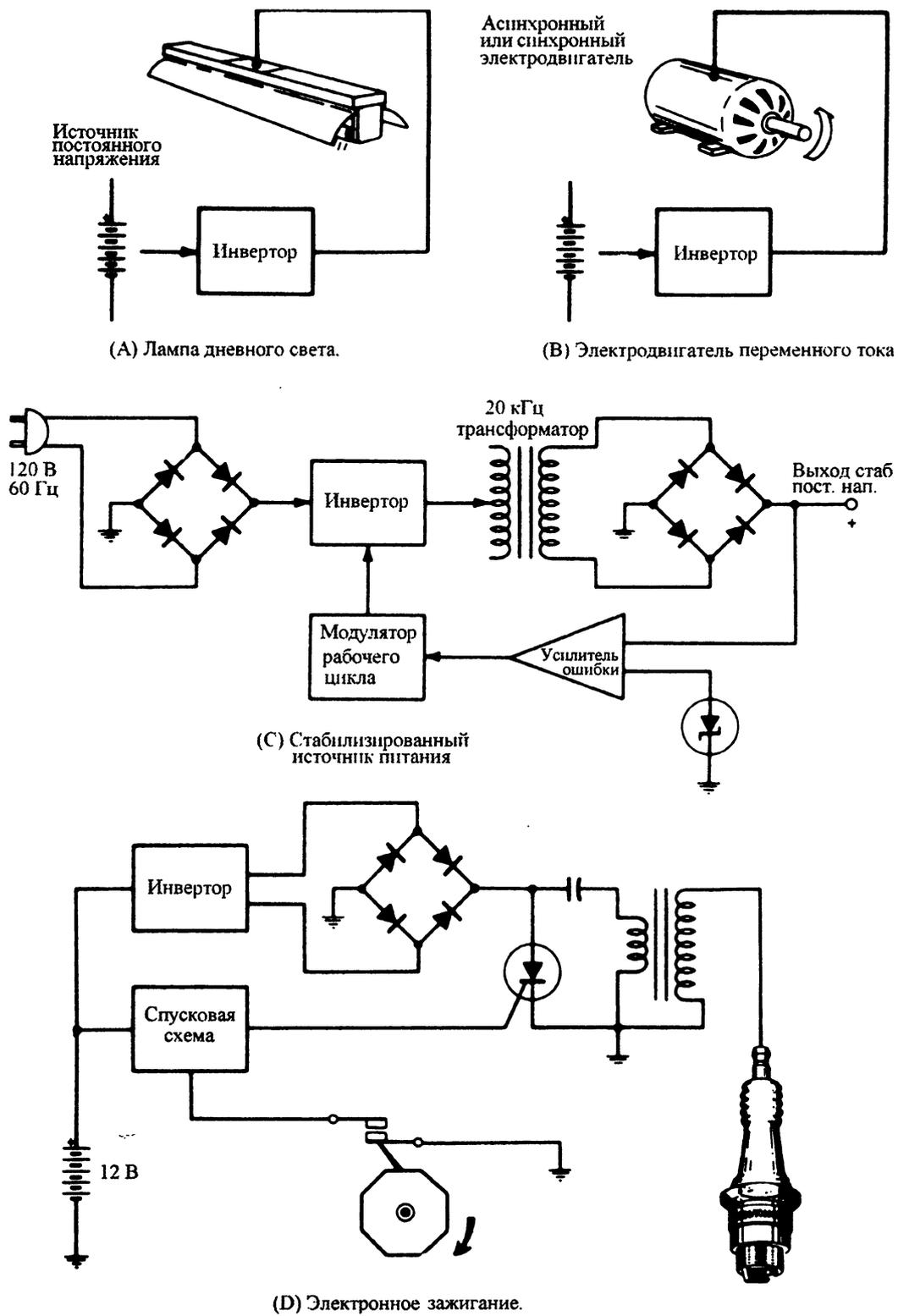


Рис. 2.1. Типичные примеры применения инверторов

## 2.2 Автономные инверторы

Автономный (независимый) инвертор представляет собой преобразователь электрической энергии постоянного тока в переменный, выходные параметры которого (форма, амплитуда и частота выходного напряжения) определяются схемой преобразователя, системой управления и режимом его работы, в отличие от инвертора, ведомого сетью, выходные частота и напряжение которого соответствуют параметрам сети.

Таким образом, если для зависимого инвертора сеть переменного тока является нагрузкой, то автономный инвертор с промышленной сетью вообще никак не связан.

Так же как и выпрямители, инверторы различаются по мощности, напряжению, числу фаз вторичной обмотки трансформатора, способу регулирования выходного напряжения, по схеме инвертирования и другим менее существенным факторам.

Автономный инвертор может работать при условии отсутствия на его выходе каких-либо источников переменного напряжения [5]. При этом частота выходного напряжения автономного инвертора определяется частотой импульсов управления вентилями инвертора, а форма и величина выходного напряжения – характером и величиной нагрузки и в определенной мере – схемой автономного инвертора.

По характеру протекающих электромагнитных процессов различают три типа автономных инверторов:

- 1) инверторы тока (АИТ);
- 2) резонансные инверторы (АИР);
- 3) инверторы напряжения (АИН).

По числу фаз выходного напряжения они делятся на однофазные, трёхфазные и многофазные инверторы; по построению схем: с нулевым выводом, мостовые и полумостовые.

### 2.3 Принципы построения автономных инверторов

Автономный инвертор представляет собой электрическое устройство, силовая часть которого состоит в самом общем случае из следующих основных узлов (рис. 2.2): входного фильтра  $\Phi_1$ , коммутатора  $K$ , содержащего тиристоры, диоды и коммутирующие элементы, трансформатора  $Tr$  и выходного фильтра  $\Phi_2$  [13,14].

На вход схемы инвертора тока должен присоединяться дроссель с большой индуктивностью. В таком случае конденсатор, участвующий в коммутации, заряжается апериодически, входной ток идеально сглажен и непрерывен. Таким образом, источник работает в режиме генератора тока. По способу присоединения коммутационного конденсатора относительно нагрузки инверторы тока делятся на последовательные, параллельные, последовательно-параллельные.

В резонансных инверторах в составе нагрузки вместе с большой индуктивностью другие реактивные элементы образуют колебательный контур, и возникает резонанс напряжений. В таких схемах тиристоры запираются при достижении анодными токами тиристоров нулевого значения. Источник питания резонансного инвертора может работать в режиме генератора тока или генератора напряжения.

Если источник питания резонансного инвертора работает в режиме генератора напряжения, схема называется резонансным инвертором с открытым входом. Если источник питания резонансного инвертора работает в режиме генератора тока, схема называется резонансным инвертором с закры-

тым входом. Такие инверторы также подразделяются на последовательные, параллельные, последовательно-параллельные.

В инверторах напряжения источник питания работает в режиме генератора напряжения, и его внутреннее сопротивление должно быть мало. Если его внутреннее сопротивление будет большим, в таком случае к входу инвертора присоединяется конденсатор большой ёмкости.

Работа автономного инвертора и его технико-экономические показатели в основном определяются схемой инвертирования, под которой, как правило, понимают схему соединения ключевых элементов и элементов для их коммутации, а также трансформатора и в отдельных случаях входного или выходного фильтра (если последний оказывает непосредственное влияние на процесс инвертирования). От схемы инвертирования зависят форма кривой выходного напряжения, форма кривой потребляемого тока, внешняя (или нагрузочная) характеристика, КПД инвертора, допустимое изменение коэффициента мощности нагрузки (указываемого обычно по основной гармонике напряжения на нагрузке), максимальное (мгновенное) значение тока нагрузки, определяющее для большинства схем порог устойчивой работы инвертора.

Разделение устройств данного класса на инверторы тока, инверторы напряжения и резонансные инверторы весьма условно. За определяющий признак в этом случае принимается проводимость цепи постоянного тока со стороны непосредственно преобразующей части (например, тиристорной мостовой схемы) относительно переменной составляющей напряжения. Рассмотрим это более подробно на примере двух автономных инверторов, питающихся от источника постоянного напряжения  $U_d$  (рис. 2.3).

В цепи постоянного тока первого инвертора (рис. 2.3, *a*) включен реактор с большой индуктивностью. Тогда в интервале между коммутациями ключевых элементов  $K_1—K_4$  ток в реакторе изменяется незначительно. В этом

случае ключевые элементы инвертора изменяют направление (но не мгновенное значение) тока в нагрузке, так что нагрузка питается как бы от источника тока, что и нашло отражение в соответствующей терминологии — инвертор тока.

Нагрузка таких схем носит, как правило, емкостный характер, так как при индуктивной нагрузке из-за скачкообразного изменения тока возникли бы перенапряжения, нарушающие нормальную работу элементов схемы. В некоторых разновидностях инверторов тока, рассчитанных на работу с нагрузкой индуктивного характера, предусматриваются устройства для отвода части энергии, накопленной в индуктивностях нагрузки.

В схеме на рис. 2.3,б источник постоянного напряжения подключен непосредственно к ключевым элементам, которые периодически с изменением полярности подключают это напряжение к нагрузке. В результате нагрузка питается как бы от источника переменного напряжения. Такая схема классифицируется как инвертор напряжения. Нагрузка в этом случае должна носить активный или активно-индуктивный характер (если на выходе инвертора не установлены фильтры), так как при емкостном характере нагрузки из-за скачкообразного изменения напряжения имели бы место всплески токов. Для устранения перенапряжений на элементах схемы часть энергии, накопленной в индуктивности нагрузки, возвращают в источник постоянного напряжения. Для этого ключевые элементы шунтируют диодами, включенными «обратно» по отношению к полярности питающего источника. Такие диоды иногда называют «обратными» диодами (на рис. 2.3,б они не показаны).

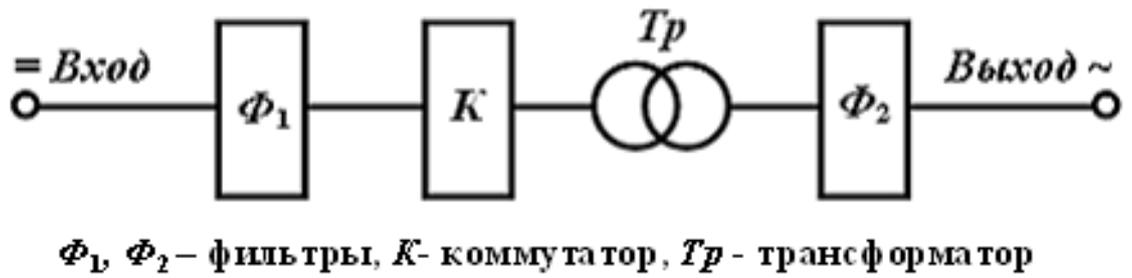


Рис. 2.2. Структурная схема инвертора

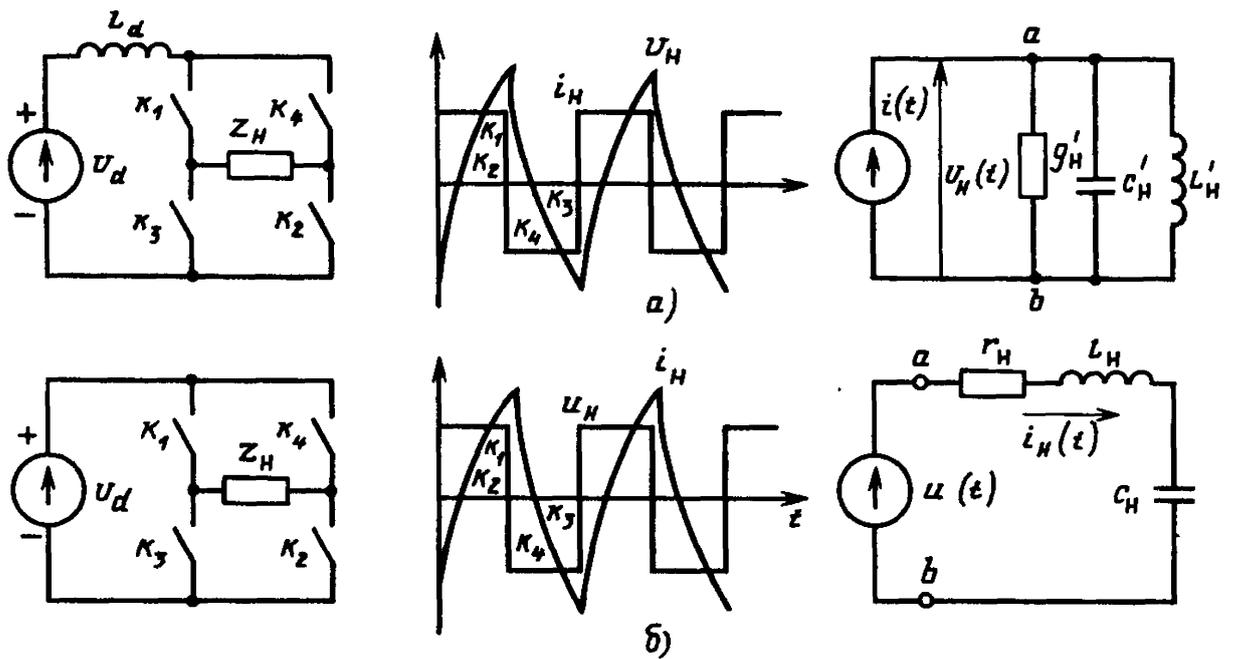


Рис. 2.3. Схемы замещения инверторов и диаграммы их выходных параметров: *a* – инвертор тока; *б* – инвертор напряжения

Законы изменения токов в цепи нагрузки инвертора напряжения при определенных условиях подобны законам изменения узловых потенциалов на шинах нагрузки инвертора тока. Такое соответствие законов известно в электротехнике как принцип дуальности (двойственности) цепей. В рассматриваемом случае дуальными элементами в схемах инверторов (см. рис. 2.3) являются:

- а) источник напряжения и источник тока;
- б) сопротивление и проводимость нагрузки;
- в) индуктивность и емкость.

Используя принцип дуальности, можно результаты анализа процессов в схеме инвертора одного типа, например инвертора тока, путем определенных преобразований распространить на схему инвертора другого типа — инвертора напряжения, и наоборот.

Индуктивность сглаживающего реактора  $L_d$  в инверторе тока имеет конечное значение и оказывает существенное влияние на динамические характеристики инвертора. В частности, чем меньше эта индуктивность, тем меньше всплески и провалы выходного напряжения при скачкообразных изменениях нагрузки инвертора. В цепи постоянного тока некоторых инверторов напряжения имеется индуктивность, обеспечивающая коммутацию тиристоров. Поэтому наличие индуктивности в цепи постоянного тока еще не является достаточным признаком для определения типа схемы (инвертор тока или инвертор напряжения.) Необходимо знать характер изменения входного тока инвертора. Как правило, считают, что в инверторах тока входной ток непрерывен или прерывается на незначительное по сравнению с межкоммутационным интервалом время.

## ГЛАВА 3 ОДНОФАЗНЫЕ АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

### 3.1 АИН на однооперационных тиристорах

Схема АИН на однооперационных тиристорах изображена на рис. 3.1 [4]. В этой схеме тиристоры отпираются парами: либо  $T_{1,2}$ , либо  $T_{3,4}$ . Изменение порядка включения тиристоров приводит также к изменению напряжения нагрузки  $U_n$ . При активно-индуктивной нагрузке в результате протекания тока через открытые тиристоры в индуктивности накапливается энергия. Появляющийся за счёт этой энергии ток протекает через диоды  $D_1, D_2$  или  $D_3, D_4$ .

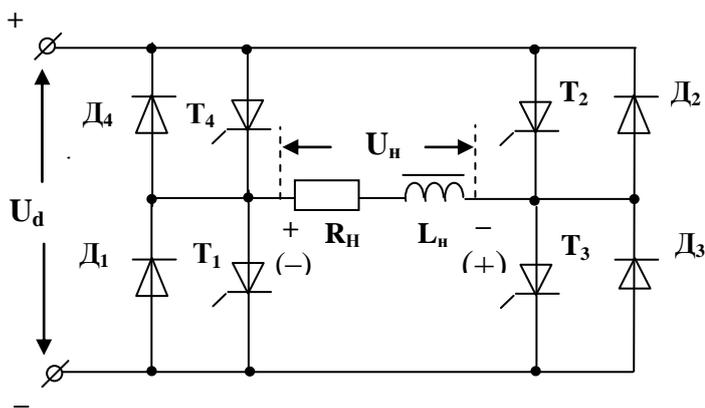


Рис. 3.1 Схема АИН на однооперационных тиристорах

В работе данной схемы не учтены вспомогательные устройства принудительной коммутации и процессы, протекающие в них. На интервале  $V_0-V_1$  тиристоры  $T_3, T_4$  открыты. Напряжение нагрузки равно  $E$  с полярностью, указанной без скобок. В момент  $V=V_1$  тиристоры  $T_3, T_4$  запираются, а  $T_1, T_2$  отпираются. За счёт индуктивности  $L_n$  под действием э.д.с. самоиндукции на интервале  $V_1-V_2$  ток  $i_n$  продолжает протекать в том же направлении через диоды  $D_1, D_2$ , по причине непроводящего состояния только что запёртых тиристоров  $T_3, T_4$  и непроводимости  $T_1, T_2$  на данном интервале. В результате отпирания диодов полярность напряжения нагрузки изменяется. В момент

$V=V_2$   $i_n=0$ , диоды  $D_1$  и  $D_2$  закрываются (диаграммы на рис. 3.2, а,б,г). В связи с существованием в течение  $\psi=180^\circ$  управляющих импульсов на тиристорах  $T_1, T_2$ , начиная с момента  $V=V_2$ , нагрузка присоединена к источнику.

При переходе тока нагрузки через ноль его направление изменяется. Начиная с момента  $V=V_2$  полярность напряжения  $U_n$  соответствует направлению тока  $i_n$ , что свидетельствует о потреблении энергии источником из нагрузки.

Процессы, возникающие в автономных инверторах, наряду с периодом повторения, связаны с параметрами нагрузки, формой напряжения нагрузки и способами его формирования. Приведенные выше диаграммы выполнены для случая  $\psi=180^\circ$ . Здесь значение напряжения нагрузки определяется величиной  $E$ , а изменение тока и напряжения нагрузки следует определять отдельно.

Определяем гармонические составляющие выходного напряжения инвертора (рис. 3.2, б). Разложив напряжение  $U_n$  в ряд Фурье, получим

$$U_n(\omega t) = \frac{4U_d}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{\gamma} \sin \gamma \omega t \right)$$

Его первая гармоника  $U_{n(1)}(\omega t) = \frac{4U_d}{\pi} \sin \omega t$ , амплитуда  $U_{nm(1)} = \frac{4}{\pi} U_d = 1,27U_d$ ,

действующее значение  $U_{n(1)} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} U_d = 0,9U_d$ .

Как видно из формы выходного напряжения инвертора, показанной на диаграмме рис. 3.2, б, изменение величины  $U_n$  осуществляется изменением значения напряжения  $U_d$ . Кроме того, изменение величины  $U_n$  производится также изменением ширины импульсов внутри каждого полупериода (рис.3.3). В этом случае используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

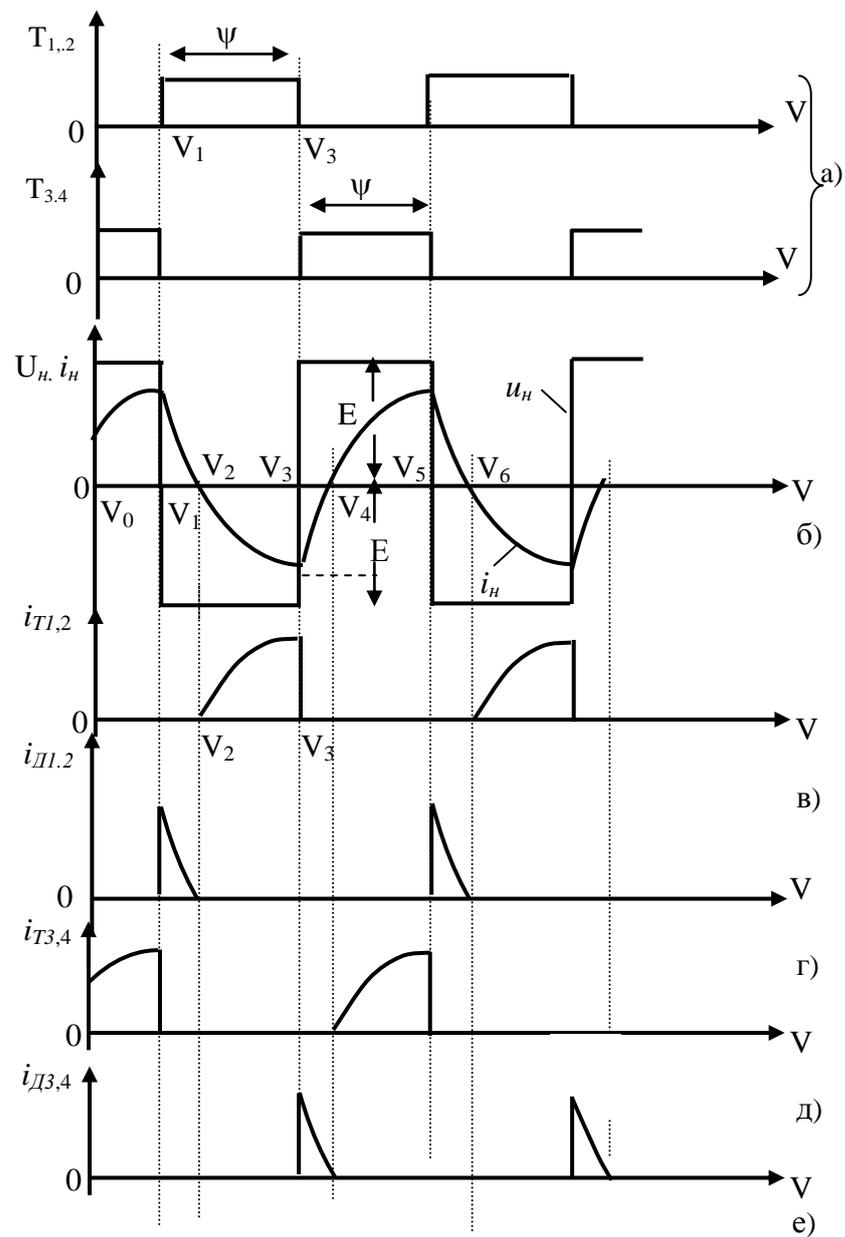


Рис. 3.2 Временные диаграммы АИН на однооперационных тиристорах

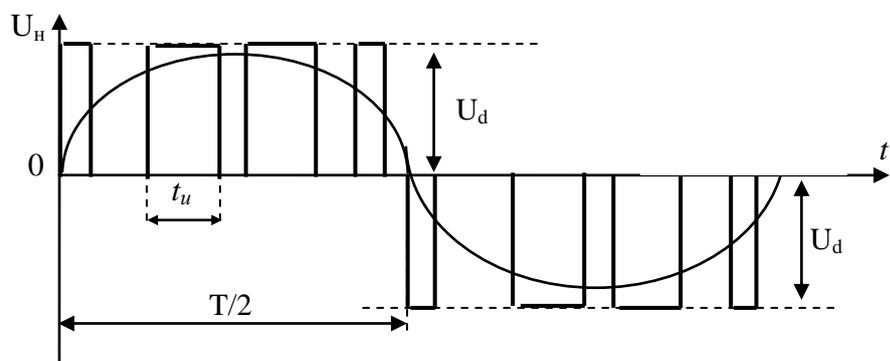


Рис. 3.3 Кривая выходного напряжения АИН с ШИМ

### 3.2 Однофазный мостовой инвертор на двухоперационных тиристорах

На рис.3.4 приведена мостовая схема на двухоперационных тиристорах [3]. Ее работа протекает следующим образом.

В промежутке времени  $0-\pi$  проводят ток тиристоры Т1,Т2 по цепи  $(+E)-T1-a-b-T2-(-E)$ . При  $\nu = \pi$  его значение достигнет  $i=I$ .

В этот момент времени тиристоры Т1,Т2 запирают и подают открывающие импульсы на Т3, Т4. Но их открывание не произойдет по следующей причине. Поскольку в индуктивном элементе  $L$  в момент коммутации ток не равен нулю и составляет  $i=I$ , то согласно второму закону коммутации его значение при  $\nu = \pi$  должно остаться неизменным. Это достигается за счет ЭДС самоиндукции  $e_c = -Ldi/dt$ , которая примет полярность без скобок. В результате ток нагрузки потечет по цепи  $(+e_c)-R-b-D3-E-D4-a-(-e_c)$  встречно источнику питания  $E$ . Создаваемое падение напряжения на диодах  $D3, D4$ , равное  $\Delta U = 1 \div 1,5$  В, будет приложено в запирающем направлении по отношению к тиристорам Т3, Т4. Поэтому они не откроются, хотя на них подан отпирающий импульс напряжения. Такое состояние сохранится до момента  $\nu = \Theta_1$  когда значение тока  $i$  станет равным нулю. В этот момент энергия  $W_L = LI^2/2$  полностью выделится частично в активном сопротивлении  $R$  и частично возвратится источнику питания  $E$ .

Начиная с момента  $\Theta_1$  ток  $i$  потечет в обратном направлении по цепи  $(+E)-T3-b-a-T4-(-E)$  через тиристоры Т3, Т4, если на них будет подан отпирающий сигнал. В дальнейшем электромагнитные процессы в инверторе повторяются.

Рассмотрим алгоритм формирования напряжения на выходных зажимах инвертора. Это легко проследить по диаграмме (рис.3.4,б) включения полупроводниковых приборов. При открытых Т1, Т2 зажим «а» подключен к положительному полюсу источника  $E$  а «б» - к отрицательному.

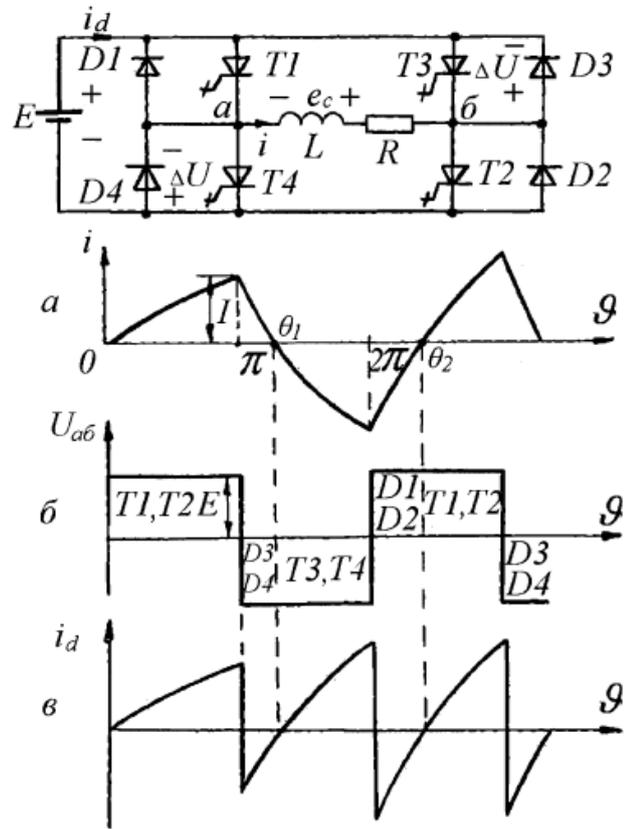


Рис. 3.4 Мостовая схема инвертора на двухоперационных тиристорах:  $a$ – кривая тока нагрузки;  $\delta$  - кривая напряжения на нагрузке;  $\nu$  - кривая тока источника питания

При открытых диодах  $D3, D4$  полярность на зажимах  $a-b$  изменится, поскольку зажим «б» подключается к положительному полюсу источника питания, а «а» - к отрицательному. Таким образом, на диагонали моста  $a-b$  формируется напряжение прямоугольной формой (меандр) с высотой прямоугольника, равной полупериоду. На основании рассмотренного принципа работы инвертора можно сделать следующие выводы.

1) Неотъемлемой частью и основным признаком инверторов напряжения являются обратные диоды, сбрасывающие энергию индуктивного элемента источнику питания.

2) Источник питания должен обладать свойством принимать реактивную энергию при коммутациях. В качестве такового может быть применен или выпрямитель с конденсаторным фильтром или аккумуляторная батарея.

3) Форма выходного напряжения отличается от синусоидальной и содержит высшие гармоники.

4) Скорость нарастания напряжения  $du/dt$  очень высока, поэтому должны быть приняты меры, ограничивающие этот параметр.

### 3.3. Аналитический расчет параметров однофазного инвертора напряжения

Для получения аналитических выражений, необходимых для расчета основных параметров инвертора, воспользуемся методом основной гармоники. Для этого разложим в ряд Фурье кривую выходного напряжения, имеющую форму меандра (рис.3.4,б):

$$u_{ab} = \frac{4E}{\pi} \left( \sin \vartheta + \frac{1}{3} \sin 3\vartheta + \frac{1}{5} \sin 5\vartheta + \dots + \frac{1}{\nu} \sin \vartheta \nu \right). \quad (3.1)$$

Его первая гармоника имеет амплитуду  $U_{ab} = \frac{4E}{\pi} \sin \vartheta$ .

$$U_{\omega_{\text{ам}(1)}} = \frac{4E}{\pi} = 1,27E \text{ и действующее значение } U_{\text{аб}(1)} = \frac{4E}{\pi\sqrt{2}} = 0,9E .$$

Выражение для первой гармоники тока будет иметь вид:

$$i_{(1)} = \frac{4E}{\pi z} \sin(\vartheta - \varphi), \quad (3.2)$$

где  $\varphi_{(1)} = \text{arctg} \frac{\omega L}{R}, z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} .$

На рис.3.5 приведены первые гармоники напряжения  $U_{\text{аб}}$  и  $I_1$ . Среднее значение тока диодов будет равно

$$I_D = \frac{1}{\pi} \int_0^{\varphi} i_{(1)} d\vartheta = \frac{4E}{\pi^2 z} (1 - \cos \varphi) . \quad (3.3)$$

Среднее значение тока тиристорov

$$I_T = \frac{1}{\pi} \vartheta = \frac{4E}{\pi^2 z} (1 + \cos \varphi) . \quad (3.4)$$

Среднее значение тока источника питания

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_{(1)} d\vartheta = \frac{8E}{\pi^2 z} \cos \varphi . \quad (3.5)$$

Мощность, потребляемая от источника

$$P = E I_d = \frac{8E^2}{\pi^2 z} \cos \varphi . \quad (3.6)$$

Полученные формулы дают возможность произвести приближенный расчет параметров инвертора.

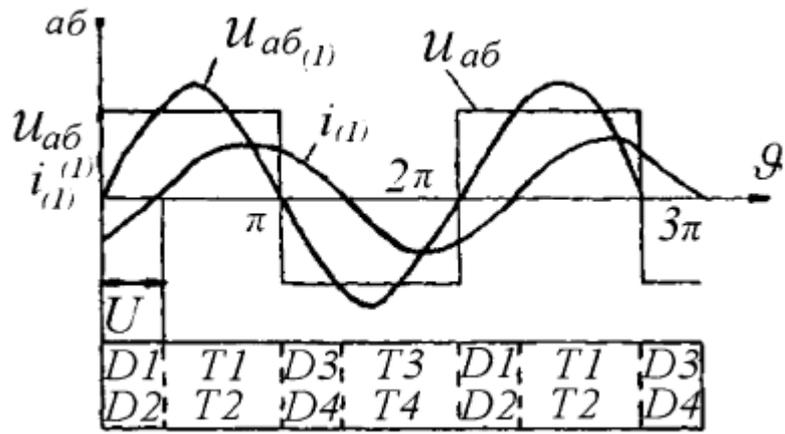


Рис. 3.5 Кривые тока и напряжения инвертора на двухоперационных тиристорах

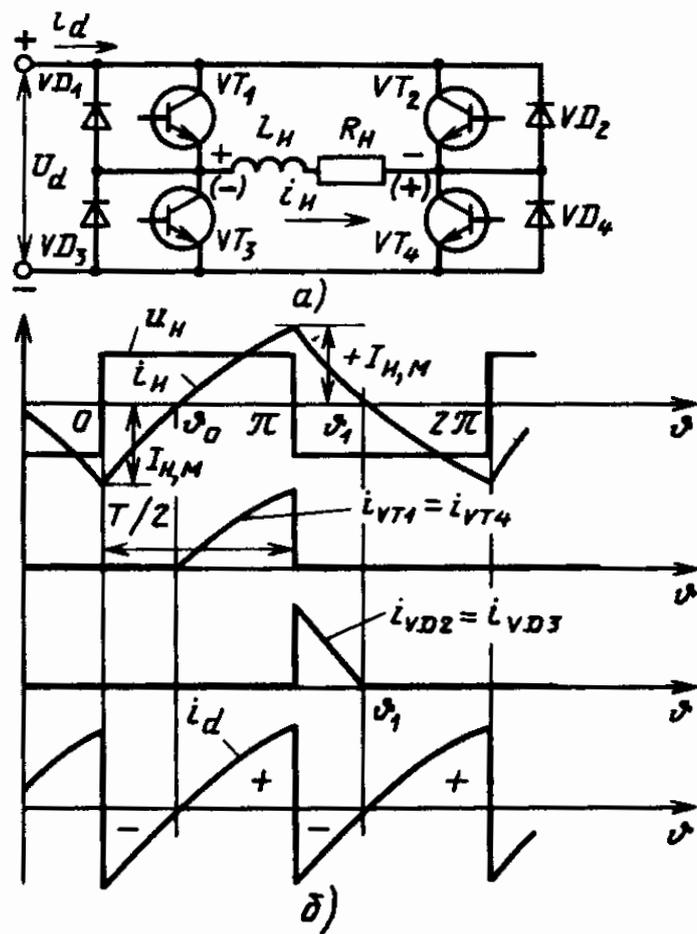


Рис. 3.6. Однофазный инвертор напряжения на транзисторах с последовательным соединением активной  $R_H$  и индуктивной  $L_H$  составляющих нагрузки:

$a$  — схема;  $b$  — диаграммы токов и напряжений на элементах схемы

### 3.4 АИН на биполярных транзисторах с последовательным включением нагрузки

На рис. 3.6, *a* представлена схема инвертора на транзисторах  $VT_1$  —  $VT_4$ , зашунтированных в обратном направлении диодами  $VD_1$  —  $VD_4$ , которые служат для возврата реактивной мощности нагрузки в источник постоянного тока [13,14]. В данной схеме активная часть нагрузки соединена последовательно с реактивной частью. Примем следующие допущения:

- 5) транзисторы и диоды являются «идеальными», т. е. их сопротивления в открытом состоянии, время включения и выключения равны нулю;
- 6) в элементах схемы нет потерь энергии;
- 7) внутреннее сопротивление источника постоянного тока равно нулю.

На рис. 3.6, *b* представлены диаграммы, иллюстрирующие работу схемы. Когда открыты транзисторы  $VT_1$  и  $VT_4$ , напряжение на нагрузке имеет полярность, указанную на рис. 3.6, *a* (без скобок), а ток нагрузки нарастает по экспоненциальному закону. В момент  $\omega t = \pi$  поступают управляющие импульсы, запирающие транзисторы  $VT_1, VT_4$  и отпирающие  $VT_2, VT_3$ . Поскольку ток  $i_n$  в индуктивности нагрузки не может измениться скачком, то он продолжает протекать в том же направлении, но уже не через транзисторы  $VT_1$  и  $VT_4$ , а через диоды  $VD_2$  и  $VD_3$ , которые включаются при выключении транзисторов  $VT_1$  и  $VT_4$  из-за возникновения противо-ЭДС индуктивности нагрузки, превышающей напряжение источника питания  $U_d$ .

Включение диодов  $VD_3$  и  $VD_2$  приводит к изменению знака напряжения нагрузки на противоположное (полярность, указанная на рис. 3.6, *a* в скобках). Под воздействием встречного напряжения ток нагрузки  $i_n$ , протекающий через диоды  $VD_3, VD_2$  в источник питания, будет уменьшаться также по экспоненциальному закону.

При спадании тока  $i_n$  до нуля (в момент  $\nu = \nu_1$  диоды  $VD_2$  и  $VD_3$  выключаются и ток нагрузки начинают проводить транзисторы  $VT_2$  и  $VT_3$ , на базах которых с момента  $\nu=l$  присутствует управляющий импульс. Далее аналогичные процессы периодически повторяются.

Таким образом, на нагрузке будет напряжение прямоугольной формы. Ток нагрузки будет иметь экспоненциальную форму, а значение его определится параметрами нагрузки. Ток через обратно включенные диоды  $VD_1$  —  $VD_4$  начнет протекать на интервалах, начала которых совпадают с моментами поступления управляющих импульсов, а длительность зависит от индуктивности нагрузки. Во время протекания тока через диоды  $VD_1$ —  $VD_4$  происходит возврат энергии из нагрузки в источник постоянного тока. Отсутствие диодов в схеме приводило бы к появлению недопустимых перенапряжений на транзисторах. Диаграмма тока, потребляемого от источника постоянного напряжения, приведена на рис. 3.6, б. На этой диаграмме положительные площади соответствуют отдаче энергии источником постоянного напряжения, а отрицательные — приему.

Закон изменения токов в схеме удобно в данном случае определить, используя метод мгновенных значений, так как ток нагрузки в момент коммутации не изменяет своего значения.

Дифференциальное уравнение для тока нагрузки на интервалах  $\nu_0$  —  $l$  и  $l$  —  $\nu_1$  имеют следующий вид:

$$\omega L_n \frac{di_n}{d\vartheta} + i_n R_n \pm U_d = 0, \quad (3.7)$$

где знак плюс соответствует интервалу  $\nu_0$  —  $l$ , а знак минус — интервалу  $l$  —  $\nu_1$ ;

Запишем решение уравнения (3.7) в общем виде

$$\omega = 2\pi / T.$$

$$i_{\text{H}} = \pm \frac{U_d}{R_{\text{H}}} + Ae^{-\vartheta/\omega\tau}, \quad (3.8)$$

где  $\tau = L_{\text{H}}/R_{\text{H}}$ .

Постоянная интегрированная  $A$  определяется из условий непрерывности тока нагрузки при коммутации и повторяемости его формы в каждом периоде в установившемся режиме работы: при  $\nu = 0$ ,

$$\text{при } \left. \begin{array}{l} i_{\text{H}} = -I_{\text{H}m}, \\ \vartheta = \pi \\ i_{\text{H}} = \pm I_{\text{H}m}. \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

Подставляя (3.9) в (3.8), получаем

$$\begin{aligned} -I_{\text{H}m} &= \frac{U_d}{R_{\text{H}}} + A; \\ +I_{\text{H}m} &= \frac{U_d}{R_{\text{H}}} + Ae^{-\pi/\omega\tau}, \end{aligned}$$

откуда

$$A = -\frac{U_d}{R_{\text{H}}(1 + e^{-\pi/\omega\tau})}.$$

С учетом полученного значения  $A$  выражение (3.8) можно записать в следующем виде:

$$i_{\text{H}} = \pm \frac{U_d}{R_{\text{H}}} \left( 1 - \frac{2e^{-\vartheta/\omega\tau}}{1 + e^{-\pi/2\tau}} \right). \quad (3.10)$$

Средние значения токов транзисторов и диодов можно найти интегрированием уравнения (3.10) на интервалах  $\nu_0$  — л и  $\pi$  —  $\nu_1$ . Согласно (3.10) токи в элементах инвертора напряжения являются функциями параметров нагрузки, в то время как в инверторе тока параметры нагрузки определяют форму и значение выходного напряжения. В рассматриваемой схеме выходное напряжение имеет прямоугольную форму с амплитудой, равной напря-

жению питания  $U_d$ . Разложив кривую прямоугольной формы в гармонический ряд,

$$U_{1m} = \frac{4}{\pi} U_d. \quad (3.11)$$

получим амплитуду первой гармоники выходного напряжения:

Из принципа работы рассматриваемого инвертора следует, что его выходное напряжение не зависит от нагрузки. Если источник, питающий инвертор напряжения, имеет одностороннюю проводимость (например, выпрямитель), то его необходимо шунтировать конденсатором для приема возвращаемой из нагрузки энергии.

### **3.5. Однофазный инвертор с широтно-импульсным способом регулирования напряжения**

Способ широтного регулирования напряжения обладает таким существенным недостатком как значительное увеличение амплитуд высших гармоник с увеличением глубины регулирования.

Этого недостатка можно избежать, если на протяжении полупериода частоты управления регулировать ширину нескольких импульсов выходного напряжения, а не одного, как это было ранее.

Такой способ дает возможность не только снизить амплитуду высших гармонических с глубиной регулирования, но и формировать ширину импульсов по любому закону, в том числе и по синусоидальному.

Наибольшее применение на практике получили три способа широтно-импульсного регулирования напряжения инверторов:

а. Регулирование по прямоугольному закону, когда среднее значение выходного напряжения и ширина импульса изменяются по прямоугольному признаку;

б. Регулирование по трапецеидальному закону - в этом случае среднее значение выходного напряжения имеет вид трапеции;

в. Регулирование по синусоидальному закону, когда ширина импульсов выходного напряжения регулируется по синусоидальному закону.

В основу устройств широтно-импульсного регулирования однофазных и трехфазных инверторов напряжения положен нуль-орган (компаратор), на неинвертирующий вход которого подается опорное  $u_{\text{оп}}$  напряжение треугольной формы, а на инвертирующий - модулирующее напряжение  $u_{\text{м}}$  прямоугольной, трапецеидальной или синусоидальной формы.

На рис. 3.7 показан принцип формирования модулирующих импульсов с помощью нуль-органа при модулирующем напряжении  $u_{\text{м}}$  прямоугольной формы и опорном напряжении треугольной формы  $u_{\text{оп}}$  [13].

В точках равенства опорного и модулирующего напряжений в моменты времени  $t_1, t_2, t_3, t_4$  происходит срабатывание нуль-органа. В результате на выходе формируются импульсы напряжений, длительность которых изменяется пропорционально модулирующему напряжению. Отсюда данный способ получил наименование широтно-импульсного моделирования напряжения, а сокращенно ШИМ (широтно-импульсная модуляция).

В промежутках времени  $0 - t_1, t_2 - t_3$   $u_{\text{оп}} < u_{\text{м}}$ , в результате на выходе формируются отрицательные импульсы выходного напряжения  $u_{\text{вых}}$ .

В промежутках времени  $t_1 - t_2, t_3 - t_4$   $u_{\text{оп}} > u_{\text{м}}$ , что приводит к изменению полярности выходных импульсов напряжения. Изменяя величину постоянного модулирующего напряжения, можно регулировать ширину положительных и отрицательных импульсов выходного напряжения нуль-органа. Полученные импульсы напряжения позволяют с помощью программируемых контроллеров сформировать импульсы управления транзисторами инверторов по заданному закону.

Принципиально в однофазных инверторах формирование импульсов управления может осуществляться при однополярном опорном напряжении треугольной формы и двуполярном пилообразной формы. В трехфазных инверторах система управления ШИМ может быть выполнена только при двуполярном опорном напряжении.

При ШИМ инверторы выполняются на транзисторах, поскольку частота управления составляет 5-10 кГц (рис. 3.8) [13,14].

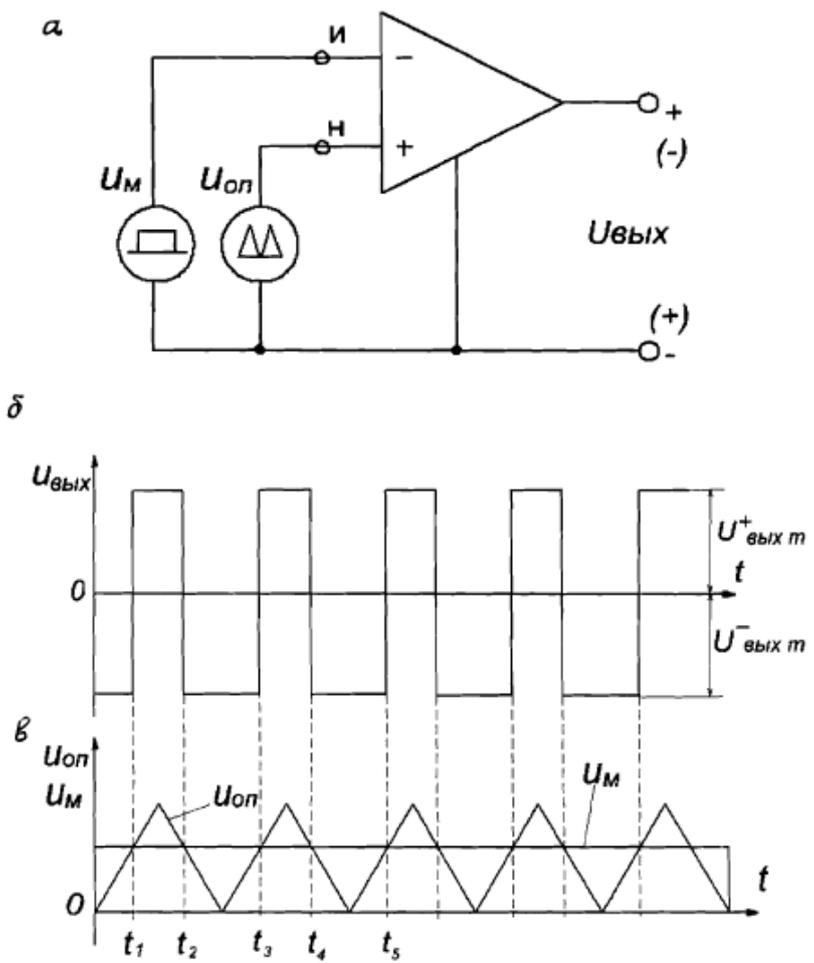


Рис. 3.7 Формирователь модулирующих импульсов:  
*а* – нуль-орган (компаратор); *б* – кривые опорного  $u_{оп}$ , модулирующего  $u_M$  напряжений, *в* – кривые выходного  $u_{вых}$  напряжения нуль-органа

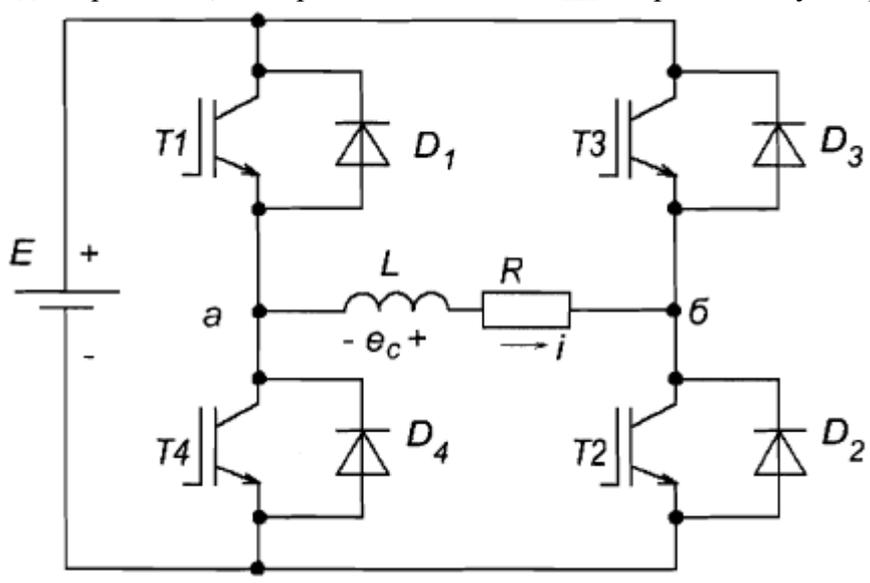


Рис. 3.8 Силовая схема однофазного мостового инвертора на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT)

## **ГЛАВА 4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОГО МАКЕТА И ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

### **4.1. Исследование однофазного автономного инвертора напряжения на физическом макете**

В качестве физического макета использовался лабораторный стенд «Автономный инвертор напряжения». Его лицевая панель изображена на рис. 4.1. Здесь же приведены осциллограммы выходного напряжения и тока однофазного автономного инвертора напряжения при активно-индуктивной нагрузке. Встроенные в стенд приборы позволяют измерить следующие параметры автономного инвертора напряжения: действующие значения напряжения и тока нагрузки, средние значения входного тока при активной и активно-индуктивной нагрузке. Кроме того на макете имеются контрольные гнезда, позволяющие подключить осциллограф и наблюдать форму выходного напряжения и тока инвертора, напряжения и тока транзисторов, обратных диодов, входного тока инвертора при различном характере нагрузки

С помощью осциллографа можно измерить максимальное значение напряжения, прикладываемого к транзисторам и обратным диодам.

Снятые в процессе измерений показания измерительных приборов занесены в таблицу 4.1.

В ходе эксперимента для повышения точности измерений использовался цифровой измерительный прибор – мультиметр Щ4313. Его показания взяты за основу и представлены в таблице 4.1.

## ФИЗИЧЕСКИЙ МАКЕТ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

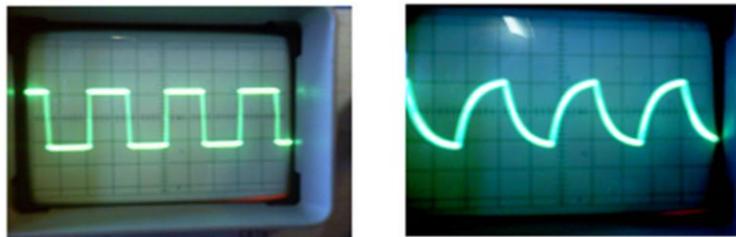
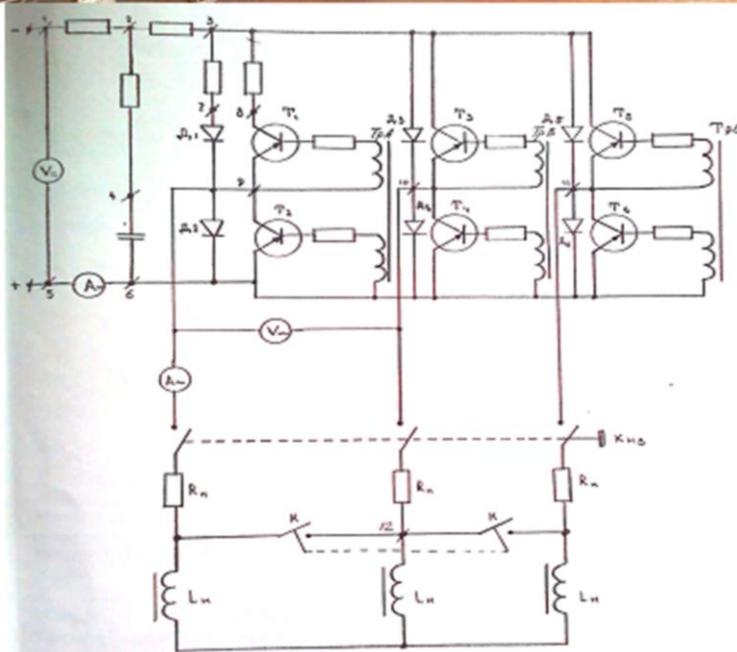


Рис. 4.1. Лицевая панель физического макета автономного инвертора напряжения и снятые осциллограммы напряжения и тока при активно-индуктивной нагрузке в однофазном режиме

## **4.2 Формирование виртуальной модели автономного инвертора напряжения и проведение экспериментов на компьютере**

Для формирования виртуальной модели однофазного автономного инвертора напряжения за основу взят программный комплекс MULTISIM[6,8].

Рассмотрим некоторые возможности и особенности выбранного программного средства.

MULTISIM (прежнее название Electronics Workbench) – электронная лаборатория на компьютере Система схемотехнического моделирования MULTISIM предназначена для моделирования и анализа электронных схем. Для краткости её называют программой. В последнее время используются версии программы с 10 по 13.

Программа MULTISIM позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы большой степени сложности. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой набор широко распространенных электронных компонентов. Есть возможность подключения и создания новых библиотек компонентов. Параметры компонентов можно изменять в широком диапазоне значений. Простые компоненты описываются набором параметров, значения которых можно изменять непосредственно с клавиатуры, активные элементы – моделью, представляющей собой совокупность параметров и описывающей конкретный элемент или его идеальное представление. Модель выбирается из списка библиотек компонентов, параметры модели также могут быть изменены пользователем. Широкий набор приборов позволяет производить измерения различных величин, задавать входные воздействия, строить графики. Все приборы изображаются в виде, максимально приближенном к реальному, поэтому работать с ними просто и удобно. Результаты моделирования можно вывести на принтер или импортировать в текстовый или графический редактор для их дальнейшей обработки. Программа MULTISIM совместима с программой P-SPICE, то есть предо-

ставляет возможность экспорта и импорта схем и результатов измерений в различные её версии.

Основные достоинства программы:

– Экономия времени. Работа в реальной лаборатории требует больших временных затрат на подготовку эксперимента. Теперь, с появлением MULTISIM, электронная лаборатория всегда будет под рукой, что позволяет сделать изучение электронных схем более доступным.

– Достоверность измерений. В природе не существует двух совершенно одинаковых элементов, то есть все реальные элементы имеют большой разброс значений, что приводит к погрешностям в ходе проведения эксперимента. В MULTISIM все элементы описываются строго установленными параметрами, поэтому каждый раз в ходе эксперимента будет повторяться результат, определяемый только параметрами элементов и алгоритмом расчета.

– Удобство проведения измерений. Учеба невозможна без ошибок, а ошибки в реальной лаборатории порой очень дорого обходятся экспериментатору. Работая с MULTISIM, экспериментатор застрахован от случайного поражения током, а приборы не выйдут из строя из-за неправильно собранной схемы. Благодаря этой программе в распоряжении пользователя имеется такой широкий набор приборов, который вряд ли будет доступен в реальной жизни. Таким образом, всегда имеется уникальная возможность для планирования и проведения широкого спектра исследований электронных схем при минимальных затратах времени.

– Графические возможности. Сложные схемы занимают достаточно много места, изображение при этом стараются сделать более плотным, что часто приводит к ошибкам в подключении проводников к элементам цепи. MULTISIM позволяет разместить схему таким образом, чтобы были чётко видны все соединения элементов и одновременно вся схема целиком. Возможность изменения цвета проводников позволяет сделать схему более

удобной для восприятия. Можно отображать различными цветами и графиками, что очень удобно при одновременном исследовании нескольких зависимостей.

– Стандартный интерфейс Windows. Программа MULTISIM использует стандартный интерфейс Windows, что значительно облегчает её использование. Интуитивность и простота интерфейса делают программу доступной любому, кто знаком с основами использования операционной системы Windows.

– Совместимость с программой P-SPICE. Программа MULTISIM базируется на стандартных элементах программы SPICE. Это позволяет экспортировать различные модели элементов и проводить обработку результатов, используя дополнительные возможности различных версий программы P-SPICE.

В библиотеки компонентов программы входят пассивные элементы, транзисторы, управляемые источники, управляемые ключи, гибридные элементы, индикаторы, логические элементы, триггерные устройства, цифровые и аналоговые элементы, специальные комбинационные и последовательностные схемы. Активные элементы могут быть представлены моделями как идеальных, так и реальных элементов. Возможно также создание своих моделей элементов и добавление их в библиотеки элементов. В программе используется большой набор виртуальных приборов для проведения измерений: амперметры, вольтметры, осциллографы, мультиметры, Бode-плоттеры (графопостроители частотных характеристик схем), функциональные генераторы, генераторы слов, логические анализаторы и логические преобразователи.

Программа MULTISIM может проводить анализ схем на постоянном и переменном токах. При анализе на постоянном токе определяется рабочая точка схемы в установившемся режиме работы. Результаты этого анализа не

отражаются на приборах, они используются для дальнейшего анализа схемы. Анализ на переменном (АС) токе использует результаты анализа на постоянном токе для получения линеаризованных моделей нелинейных компонентов. Анализ схем в режиме АС может проводиться как во временной, так и в частотной области. Программа также позволяет производить анализ цифро-аналоговых и цифровых схем. В MULTISIM можно исследовать переходные процессы при воздействии на схемы входных сигналов различной формы. MULTISIM позволяет строить схемы различной степени сложности при помощи следующих операций:

- выбор элементов и приборов из библиотек, – перемещение элементов и схем в любое место рабочего поля, – поворот элементов и групп элементов на углы, кратные 90 градусам,
- копирование, вставка или удаление элементов, групп элементов, фрагментов схем и целых схем,
- изменение цвета проводников,
- выделение цветом контуров схем для более удобного восприятия,
- одновременное подключение нескольких измерительных приборов и наблюдение их показаний на экране монитора,
- присваивание элементу условного обозначения,
- изменение параметров элементов в широком диапазоне.

Все операции производятся при помощи мыши и клавиатуры. Управление только с клавиатуры невозможно. Путем настройки приборов можно:

- изменять шкалы приборов в зависимости от диапазона измерений, – задавать режим работы прибора,
- задавать вид входных воздействий на схему (постоянные и гармонические токи и напряжения, треугольные и прямоугольные импульсы).

Графические возможности программы позволяют:

- одновременно наблюдать несколько кривых на графике,

- отображать кривые на графиках различными цветами,
- измерять координаты точек на графике,
- импортировать данные в графический редактор, что позволяет произвести необходимые преобразования рисунка и вывод его на принтер.

MULTISIM позволяет использовать результаты, полученные в программах P-SPICE, PCB, а также передавать результаты из MULTISIM в эти программы. Можно вставить схему или её фрагмент в текстовый редактор и напечатать в нем пояснения или замечания по работе схемы.

Панель компонентов состоит из пиктограмм полей компонентов, поле компонентов - из условных изображений компонентов. Расположение элементов в полях ориентировано на частоту использования компонента. В библиотеки элементов программы MULTISIM входят аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые компоненты. Все компоненты можно условно разбить на следующие группы:

- базовые компоненты,
- источники,
- линейные компоненты,
- ключи,
- нелинейные компоненты,
- индикаторы,
- логические компоненты,
- узлы комбинационного типа,
- узлы последовательного типа,
- гибридные компоненты.

Особенности работы однофазного автономного инвертора напряжения (АИН) на транзисторах с последовательным соединением активной и индуктивной составляющей нагрузки [13, 14] отражены в его виртуальной модели. На рис. 4.1 изображена лицевая панель виртуального лабораторного

стенда, созданного при помощи программы MULTISIM. Здесь импульсы управления подаются в базовые цепи транзисторов от генераторов импульсов. Для измерения напряжений и тока в характерных узлах схемы предназначены виртуальные измерительные приборы:

- амперметр в цепи источника постоянного напряжения – для измерения среднего значения входного тока инвертора;

- амперметр в цепи нагрузки – для измерения действующего значения выходного тока инвертора;

- вольтметр в цепи нагрузки – для измерения действующего значения выходного напряжения инвертора.

Для вышеперечисленных измерений используется один тип виртуального измерительного прибора – мультиметр, в первом случае установленный в режим амперметра постоянного тока, во втором – амперметра переменного тока, и в третьем – вольтметра переменного тока.

Наблюдать форму сигналов в характерных точках схемы можно с помощью виртуальных осциллографов. Известно, что осциллографы позволяют наблюдать форму напряжения между точками его подключения. Для наблюдения формы тока в измеряемую цепь последовательно подсоединяются шунты – резисторы с малой величиной сопротивления, не оказывающего влияния на основные процессы в схеме. Так как напряжение и ток резистора совпадают по форме, то, наблюдая напряжение в шунте, мы фактически наблюдаем форму тока в исследуемой цепи. Такие шунты сопротивлением  $100\text{ м}\Omega$  установлены в цепи источника входного напряжения, входного конденсатора, во входной цепи инверторного транзисторного моста, в цепях диода и коллектора транзистора с целью наблюдения за формой тока в перечисленных элементах схемы.

Наблюдение за формой напряжения осуществляется на следующих элементах схемы: база–эмиттер (управляющие импульсы), коллектор–эмиттер транзистора, полной нагрузки и активного сопротивления нагрузки.

Осциллограммы напряжения в характерных точках схемы приведены на рис. 4.2.

## ОДНОФАЗНЫЙ АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

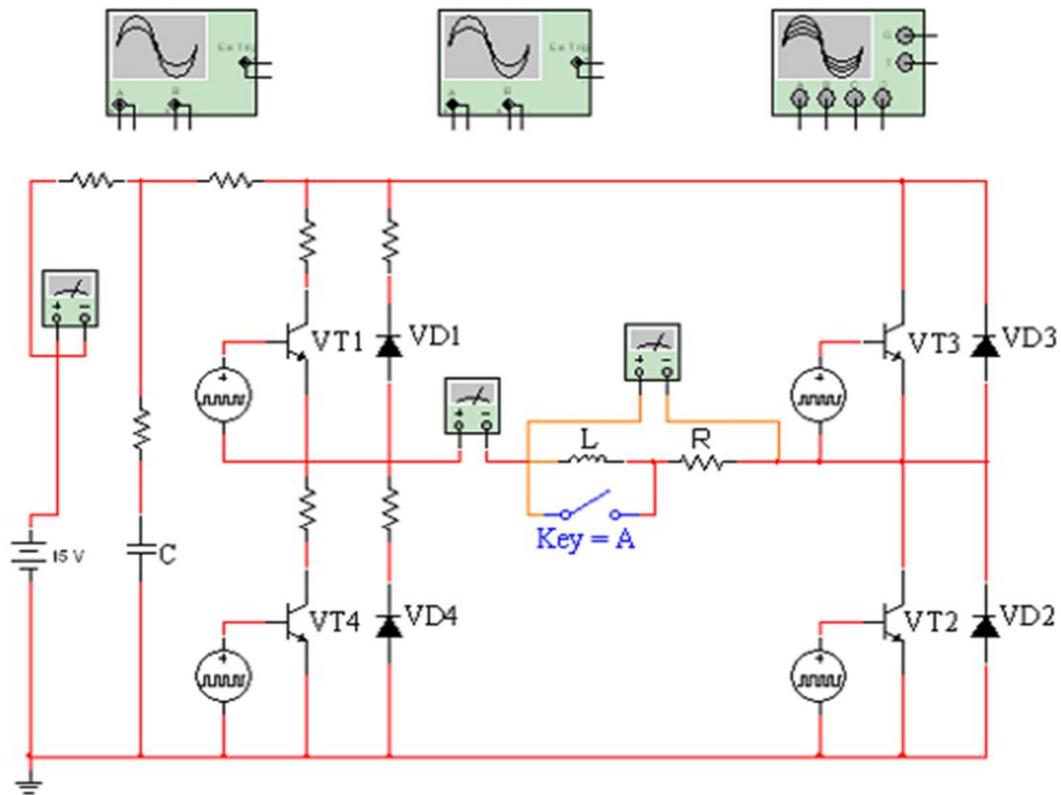


Рис. 4.1 Исследуемая схема однофазного автономного инвертора напряжения на рабочем поле MULTISIM

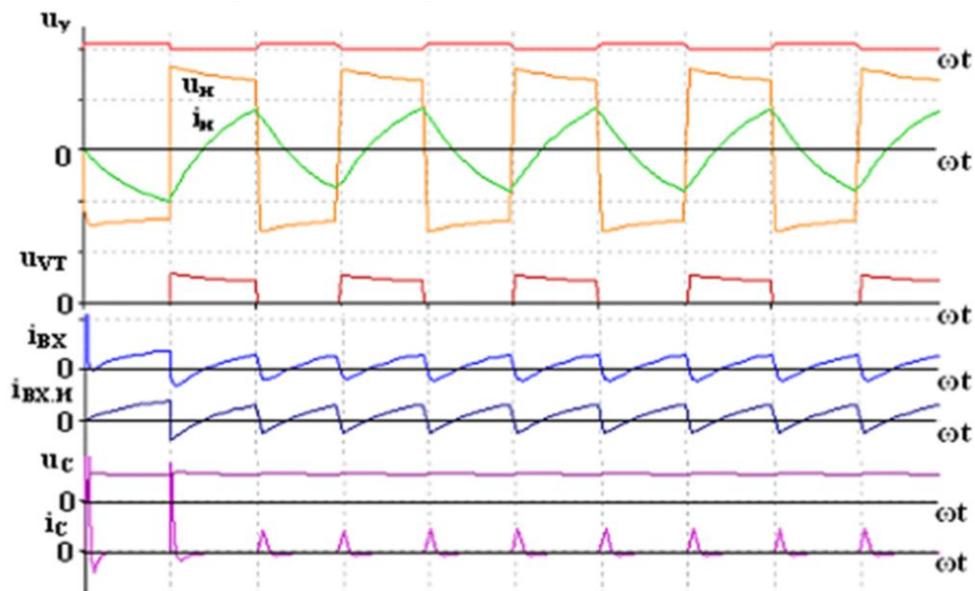


Рис.4.2 Осциллограммы виртуальной модели однофазного АИН:  
 $u_y$  – импульсы управления,  $i_{вх}$  – входной ток,  $i_{вх.и}$  – входной коммутатора,  
 $u_c$  – напряжение конденсатора,  $i_c$  – ток конденсатора

### 4.3 Сравнительный анализ результатов на физическом макете и виртуальной модели

Сравнительная оценка результатов измерений электрических режимов работы реального автономного инвертора напряжения и его виртуальной модели представлена таблице 4.1.

Таблица 4.1

Сравнительная таблица результатов исследования однофазного автономного инвертора напряжения на лабораторном стенде и его виртуальной модели в MULTISIM

Характер нагрузки	Наименование параметра	Лабораторные испытания	Виртуальная модель	Погрешность %
<b>R</b>	Среднее значение входного напряжения $U_d$ , В	15	15	-
	Действующее значение входного тока $I_d$ , мА	1,7	1,717	1,00
	Действующее значение выходного напряжения $U_n$ , В	13	13,161	1,20
	Действующее значение выходного тока $I_n$ , А	0,5	0,506	1,20
<b>RL</b>	Среднее значение входного напряжения $U_d$ , В	15	15	-
	Действующее значение входного тока $I_d$ , мА	0,8	0,9	1,25
	Действующее значение выходного напряжения $U_n$ , В	14	14,1	0,71
	Действующее значение выходного тока $I_n$ , А	0,2	0,197	1,5

Здесь за эталон принята реальная схема автономного инвертора напряжения, используемая в лабораторном стенде. Таким образом, фактически в работе исследовалась адекватность виртуальной модели электромагнитным процессам, происходящим в реальной схеме. Из таблицы 4.1 видно, что максимальная относительная погрешность напряжений и токов виртуальной модели выпрямителя не превышает 1,5%.

Визуальная оценка осциллограмм физического макета и виртуальной модели убеждает в их аналогичности, то есть указывает на адекватность модели.

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

I. Техничко-экономическое обоснование проекта.

II. Определить объем инвестиции.

Стоимость основных фондов.

Объем инвестиции на покупку материально-производственных запасов.

Объем инвестиции на покупку малоценного инвентаря и контрольно-измерительных приборов.

Расчет заработной платы производственных рабочих.

III. Определить экономическую эффективность, годовой доход.

IV. Определить срок окупаемости инвестиции.

1. Техничко-экономическое обоснование проекта.

Цель, сущность и задачи проекта и его актуальность.

Экономическая эффективность проекта.

2. Определить объем инвестиции.

В нижеследующих таблицах даны приведенные затраты на ВКР.

Таблица 1

## Объем инвестиции на покупку материально-производственных запасов

№	Наименование материалов	Кол-во	Цена материала за единицу	НДС 20%	Стоимость материала с учетом НДС
1.	Силовой трансформатор	1	56500	1130	57630
2.	Конденсаторная батарея	1	28500	5700	34200
3.	Блок коммутационный	1	25000	5000	30000
4.	Шнур	1	2300	460	2760
5.	Выключатель	1	2100	420	2520
6.	Клеммы соединительные	4	1000	200	1200
7.	Ручки управления	2	1500	300	1800
8.	Хомуты крепления	3	500	100	600
9.	Болты	50	30	6	36
10.	Гайки	2	30	6	36
11.	Подставки	1	3200	640	3840
12.	Держатель	1	7200	1440	8640
13.	Корпус	2метра	8500	170	8670
14.	Провода монтажные	1кг	300	60	360
15.	Ацетон	0,5	9400	1880	11280
16.	Краска	0,5	9600	1920	11520
17.	Оргстекло	0,05	14600	2920	17520
18.	Припой	0,1	110000	2200	112200
19.	Канифоль	1м	7000	140	7140
20.	Бумага шлифовальная		6300	126	6426
	Итого				

Таблица 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	компьютер	1	1800000	160000	1960000
2	Принтер	1	300000	60000	360000
	Итого				2320000

Таблица 3

Стоимость основных фондов

№	Наименование основных фондов	Кол-во	Стоимость ОФ
1	Лаборатория	1	1500000
2	Оборудования		1320000
	Итого		2820000

Амортизационные отчисления составляют 20 % от стоимости ОФ:

$$A_{отч} = 0,2 \times ОФ / 12,$$

$$A_{отч} = 0,2 \times 2820.000 / 12,$$

$$A_{отч} = 47000 \text{ сум.}$$

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

$$Pm = 12\% * ОФ / 12,$$

$$P_m = 0,12 \times 2820000 / 12,$$

$$P_m = 28200 \text{ сум.}$$

Таблица 4

Расчет заработной платы производственных рабочих

№	Наименование операции	Должность	Количество дней	Средняя однодневная заработная плата	Стоимость выполненной работы
1	Выбор темы на разработку	СНС	1	15000	15000
2	Изучение и анализ литературы по теме	МНС	2	7050	14100
3	Разработка интерфейса программы	МНС	2	7050	14100
4	Составление 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	2	7050	14100
		СНС	1	15000	15000
10	Охрана труда	МНС	2	7050	14100
		СНС	1	15000	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 заработная плата определяется как сумма оплаты труда всех рабочих и премии в размере 40 % :

$$Z_{осн} = COT * 0,4 + COT$$

$$Z_{осн} = 201000 \times 1,4,$$

$$Z_{осн} = 281400 \text{ сум.}$$

Дополнительная заработная плата производственных рабочих берется 10 % от основного З/п:

$$Z_{д} = K_{д} * Z_{осн}$$

$$Z_{д} = 0,1 \times 281400$$

$$Z_{д} = 281400 \text{ сум}$$

Фонд оплаты труда определяется как сумму основной и дополнительной заработной платы

$$\Phi OT = Z_{осн} + Z_{д}$$

$$\Phi OT = 281400 + 28140$$

$$\Phi OT = 309540 \text{ сум}$$

Затраты на социальное страхование рассчитывается 25% от ФОТ

$$O_{фсс} = 25\% * \Phi OT$$

$$O_{фсс} = 0,25 \times 309540$$

$$O_{фсс} = 77385 \text{ сум}$$

Транспортные расходы рассчитывается 20% от Зосн:

$$P_{тр} = 0,2 * Z_{осн}$$

$$P_{тр} = 0,2 \times 281400$$

$$P_{тр} = 56280 \text{ сум}$$

Расход пара на производственные нужды:

Длина – 7 м, Ширина – 5 м, V = длина x ширина, V = 7 x 5 = 35 м<sup>2</sup>

$$V = 35 \times 663,05 = 23206,75.$$

Расходы на электроэнергию определяются по формуле:

$$W = N \cdot T \cdot S,$$

где N – установленная мощность, кВт, T – время работы, S – стоимость электроэнергии за кВт:

$$W = 1 \times 144 \times 112,2, W = 16156,8 \text{ сум.}$$

Объем инвестиции определяется по формуле:

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

$$K = 92400 + 309540 + 47000 + 123843,55 = 572783,55 \text{ сум.}$$

Таблица 5

Смета затрат на проведение разработки

№	Наименование статьей затрат	Сумма
1	Стоимость выполненных работ	803840,44
2	Затраты на производство	618338,8
3	Производственная себестоимость	587384,8
4	Расходы периода	30954
5	Материальные затраты	131763,55
6	Сырьё	92400
7	Электроэнергия +отопление	39363,55
8	ФОТ	309540
9	Социальное страхование	77385
10	Амортизация	47000
11	Прочие затраты	21696,25
12	Основная заработная плата	201000

Таблица 6

## Расчет экономической эффективности выполненных работ

№	Наименование показателей	Ед.изм ерения	Сумма	Примечание
1	Стоимость выполненных работ	Сум	803840,44	Таблица
2	Затраты на производство	Сум	618338,8	Таблица
3	Инвестиции	Сум	572783,55	Формула
4	Экономическая эффективность	Сум	185501,64	Формула
5	Срок окупаемость	Месяц	3,08	Формула
6	Рентабельность	%	32,4	Формула

Экономическую эффективность определим по формуле:

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

$$C1 = C2 * 1,3,$$

где C1 и C2 – себестоимость до и после, Q – объём производство:

$$\mathcal{E} = (803840,44 - 618338,8) \cdot 1,$$

$$\mathcal{E} = 185501,64 \text{ сум.}$$

Рентабельность определим по формуле:

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

$$R = \frac{185501,64 \times 100\%}{572783,55},$$

$$R = 3238 = 32,4\%.$$

Определяем срок окупаемости:

$$T_{ок} = \frac{K}{\mathcal{E}},$$

где  $\mathcal{E}$  – экономическая эффективность,  $K$  – капитал:

$$T_{ок} = \frac{572783,55}{185501,64},$$

$$T_{ок} = 3,08.$$

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

БЖД - это область знаний, изучающая опасности, угрожающие человеку в среде обитания (природной, производственной, бытовой), и способы защиты от них. В основу теории безопасности человека положена концепция деятельности, одним из наиболее существенных моментов которой является аксиома о потенциальной опасности в любом из видов деятельности. В таком случае, безопасность можно определить как такое состояние жизнедеятельности, при котором с определенной вероятностью исключается принесение ущерба здоровью человека. Такое состояние достигается с помощью определенного механизма управляющих воздействий на те факторы, от которых зависят условия БЖД.

Проблема сохранения окружающей природной среды, обеспечение экологической безопасности охватывает все сферы жизнедеятельности человека. В основных законодательных документах Узбекистана отмечается необходимость повышения эффективности государственного управления в области охраны природы и использования природных ресурсов, контроля состояния окружающей среды. Проблема охраны природы и улучшения окружающей среды носит ярко выраженный характер и требует объединенных усилий всех звеньев при производстве исследований.

### Анализ опасных и вредных факторов, причин и динамики травматизма

Опасным называется производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному резкому ухудшению здоровья. Если же производственный фактор приводит к заболеванию или снижению работоспособности, то его считают вредным. Опасные и вредные производственные факторы подразделяются

на четыре группы: физические, химические, биологические и психофизиологические.

К физическим опасным и вредным производственным факторам в энергетике можно отнести: подвижные части производственного оборудования, повышенное значение напряжения в электрической цепи, повышенный уровень ионизирующих излучений, повышенную напряженность электрического, магнитного полей и другие.

К химическим опасным и вредным производственным факторам относятся химические вещества, которые по характеру воздействия на организм человека подразделяются на токсические, раздражающие, сенсibiliзирующие, канцерогенные, мутагенные, влияющие на репродуктивную функцию. По путям проникновения в организм человека они делятся на проникающие через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт, кожные покровы и слизистые оболочки.

К биологическим опасным и вредным производственным факторам относятся патогенные микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности, а также макроорганизмы.

К психофизиологическим опасным и вредным производственным факторам относятся физические и нервно-психические перегрузки.

Основными результатами воздействия опасных и вредных производственных факторов на работников являются соответственно травмы и профессиональные заболевания. Частным случаем профессионального заболевания является профессиональное отравление.

Целью анализа травматизма является разработка мероприятий по предупреждению несчастных случаев. Анализ травматизма включает два этапа. Первый из них - тщательное всестороннее расследование обстоятельств и причин несчастного случая на месте его происшествия, второй - системати-

ческий анализ и обобщение причин несчастных случаев. Среди методов анализа травматизма можно выделить следующие:

- монографический;
- экономический;
- эргономический;
- психофизиологический;
- статистический.

Результатом анализа травматизма является выделение причин производственного травматизма и профессиональной заболеваемости Среди причин производственного травматизма можно выделить несколько групп:

Технические причины: несовершенство технологических процессов, конструктивные недостатки оборудования, приспособлений, инструментов; недостаточная механизация тяжелых работ; несовершенство ограждений, предохранительных устройств, средств сигнализации и блокировок; прочностные дефекты материалов и т.п.

Организационные причины, зависящие от уровня организации труда на предприятии. К ним, например, относятся: нарушение правил эксплуатации оборудования, транспортных средств, инструмента; недостатки в организации рабочих мест; нарушение правил и норм транспортировки и хранения оборудования; недостатки в обучении рабочих безопасным методам труда и т.п.

Санитарно-гигиенические причины зависят от особенностей организма человека. Профессиональные отравления могут быть обусловлены всеми указанными выше причинами, а профессиональные заболевания чаще всего вызываются санитарно-гигиеническими и психофизиологическими причинами.

В настоящее время около 99% всей полезной физической работы, необходимой для общества осуществляется машинами, управляемыми человеком.

Все больше функций человека на производстве сводится к управлению, контролю, программированию. Труд рабочего становится трудом оператора.

Для того чтобы управлять технологическим процессом, наблюдать и контролировать работу машин оператору необходимы данные, которые характеризуют как ход процесса, так и отдельных его звеньев. Человек создал современные машины, выполняющие мощнейшие операции. Однако, в ряде случаев дальнейшее совершенствование машин не только не увеличивает производительность труда, но и оставляет ее на прежнем месте, а иногда и уменьшает.

На современном этапе назрела необходимость в создании специализированных служб предприятия на объектах промышленности. К основным направлениям деятельности этих служб относятся:

- повышение безопасности выпускаемой продукции, проведение экологической экспертизы и снятие с производства экологически опасной продукции;
- разработка и совершенствование технологических процессов в целях экономии природных ресурсов и сокращения негативного воздействия на окружающую среду. Внедрение экологически чистых производств и технологий. Экологическая экспертиза новой техники и технологий;
- снижение до регламентированного уровня или полная ликвидация загрязнения атмосферы, водных объектов, почвы и недр, энергетических загрязнений окружающей среды (шума, вибрации, излучений);
- строительство оборудования и эксплуатация природоохранных объектов (очистных сооружений, утилизационных установок, оборотных систем);
- организация работ по утилизации попутных и побочных продуктов, твердых производственных отходов;
- функциональные системы контроля качества окружающей среды.

## Электробезопасность. Статическое электричество.

Помещение лаборатории по опасности поражения электрическим током можно отнести к 1 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности (сухое, бес пыльное, с нормальной температурой воздуха, изолированными полами и малым числом заземленных приборов).

На рабочем месте оператора из всего оборудования металлическим является лишь корпус системного блока компьютера, но здесь используются системные блоки, отвечающие стандарту фирмы IBM, в которых кроме рабочей изоляции предусмотрен элемент для заземления и провод с заземляющей жилой для присоединения к источнику питания. Таким образом, оборудование обменного пункта выполнено по классу 1 (ПУЭ).

Электробезопасность помещения обеспечивается в соответствии с ПУЭ.

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- Рода и величины напряжения и тока
- Частоты электрического тока
- Пути тока через тело человека
- Продолжительности воздействия на организм человека

Электробезопасность в помещении лаборатории обеспечивается техническими способами и средствами защиты, а так же организационными и техническими мероприятиями.

Рассмотрим основные причины поражения человека электрическим током на рабочем месте:

- Прикосновение к металлическим нетоковедущим частям (корпусу, периферии компьютера), которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.
- Нерегламентированное использование электрических приборов.
- Отсутствие инструктажа сотрудников по правилам электробезопасности.

В течении работы на корпусе компьютера накапливается статическое электричество. На расстоянии 5-10 см от экрана напряженность электростатического поля составляет 60-280 кВ/м, то есть в 10 раз превышает норму 20 кВ/м. Для уменьшения напряжённости применять применение увлажнители и нейтрализаторы, антистатическое покрытия пола.

Кроме того, при неисправности каких-либо блоков компьютера корпус может оказаться под током, что может привести к электрическим травмам или электрическим ударам. Для устранения этого я предлагаю обеспечить подсоединение металлических корпусов оборудования к заземляющей жиле.

Электробезопасность обеспечивается в соответствии с ГОСТ 12.1.030. - 81. Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Электробезопасность в лаборатории обеспечивается техническими способами и средствами защиты, а так же организационными и техническими мероприятиями:

1. Прикосновение к металлическим нетоковедущим частям системного блока ПЭВМ, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.

2. Запрещенное использование электрических приборов, таких как электрические плиты, чайники, обогреватели.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, я рекомендую применять защитное заземление.

Заземление корпуса ЭВМ обеспечено подведением заземляющей жилы к питающим розеткам. Сопротивление заземления 4 Ом, согласно (ПУЭ) для электроустановок с напряжением до 1000 В.

#### Организационные и технические мероприятия по обеспечению электробезопасности

Основным организационным мероприятием является инструктаж и обучение безопасным методам труда, а так же проверка знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью применительно к выполняемой работе.

#### Проектирование сети зануления ЭУ .

Зануление – это преднамеренное электросоединение с нулевым защитным проводником (НЗП), который многократно заземлен и соединен с глухозаземленной нейтралью трансформатора, металлических нетоковедущих частей ЭУ или другого ЭО, которые могут оказаться под U.

Зануление ЭУ следует выполнять при напряжении 380 В и выше ~ тока и 440 В и выше = тока во всех ЭУ.

Занулению подлежат:

- корпуса ЭУ, приводы электрических аппаратов;
- вторичные обмотки измерительных трансформаторов;
- каркасы РП и щитов;
- металлические конструкции РУ и части электрических линий;
- металлические корпуса передвижных и переносных ЭУ;
- ЭУ, размещенные на движущихся частях станков, машин и механизмов.

Рассчитать отключающую способность проектируемого зануления ЭУ цеха и определить потребное сопротивление ЭУ нейтрали трансформатора, если известно, что электропитание осуществляется по трехжильному кабелю от сухого трансформатора с вторичным напряжением 400/230 В; для защиты ЭД с короткозамкнутым ротором установлены плавкие предохранители с кратностью тока 4; в кабеле использованы медные жилы.

Исходные данные:

- Трансформатор: - мощность  $S = 1000$  кВА;
- соединение обмоток  $Y/Y_0$ ;
- напряжение на высокой стороне 20-35 кВ;
- Номинальная мощность ЭД  $P_d = 125$  кВт;
- Длина проводов  $l_n = 400$  м.

Расчет по заданию:

Сечение фазных проводов по току нагрузки зануляемой ЭУ.

Ток нагрузки  $I_d$  (А), электродвигателя

$$I_d = \frac{1000 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\phi \cdot \eta_d} = \frac{1000 \cdot 125}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,93 \cdot 0,92} = 210,9 (A)$$

где  $U_n = 400$  В - номинальное линейное напряжение;

$\cos\phi = 0,93$  - коэффициент мощности эл. двигателя;

$\eta_d = 0,92$  - КПД эл. двигателя.

Расчетный ток плавкой вставки

$$I_{нв} \geq \frac{I_n}{2,5} = \frac{5 \cdot I_0}{2,5} = 2 \cdot 210,9 = 421,8(A)$$

где  $I_n$  - пусковой ток

По величине  $I_{пв}$  - принимаем проектный ток ПВ и выбираем плавкий предохранитель ПН-2-600 с номинальным током ПВ 500А.

Сечение фазных проводов через экономическую плотность тока  $j_{фп}$

$$S_{фп} = \frac{I_0}{j_{фп}} = \frac{210,9}{2,5} = 84,36(мм)^2$$

По таблице 1.3.5 книги [11] выбираем сечение фазных проводов  $S_{фп} = 95 \text{ мм}^2$ , а допустимый ток  $I = 175 \text{ А}$ .

Требуемый по ПУЭ [11] ток однофазного кз:

$$I_{кз}^m = K \cdot I_n = 4 \cdot 500 = 2000(A)$$

Сопротивление петли "фаза-нуль":

$$Z_n = \sqrt{(R_\phi + R_{нзп})^2 + (X_\phi + X_{нзп} + X_n)^2}$$

где  $R_\phi = \rho \cdot l_n / S_\phi = 0,018 \cdot 400 / 95 = 0,076 \text{ Ом}$  - активное сопротивление фазного проводника;

$R_{нзп}$  - активное сопротивление нулевого защитного проводника;

$X_\phi$  - внутреннее сопротивление фазного проводника;

$X_{нзп}$  - внутреннее индуктивное сопротивление Н.З.П.;

$X_n$  - внешнее индуктивное сопротивление.

В качестве Н.З.П. выберем жилу кабеля сечением:

$S_{нзп} \geq 0,5 \cdot S_{фп} \geq 0,5 \cdot 95 = 47,5 \text{ мм}^2$ , (по таблице 1.3.5 книги [11] принимаем  $S_{нзп} = 50 \text{ мм}^2$ ) тогда:

$R_{нзп} = 0,018 \cdot 400 / 50 = 0,144 \text{ Ом}$ , а величинами  $X_{нзп}$ ,  $X_n$  и  $X_\phi$  - пренебрегаем из-за их малых величин:

$$Z_n = \sqrt{(0,076 + 0,144)^2} = 0,22(Ом)$$

Фактический ток при однофазном коротком замыкании  $I_{кз}^\phi$

$$I_{кз}^{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_m/3 + Z_n} = \frac{230}{0,009 + 0,22} = 1040(A)$$

где,  $Z_T/3$  - полное сопротивление трансформатора = 0,009 Ом по таблице 7.3 [6] для сухих трансформаторов;  $U_{\phi}$  – фазное напряжение.

Полученное значение  $I_{кз}^{\phi} = 1040$  А сравниваем с  $I_{кз}^{\Gamma} = 2000$  А

$I_{кз}^{\phi} < I_{кз}^{\Gamma}$  - условие не выполняется, следовательно, нужно вместо предохранителя нужно применить автомат с кратностью тока 1.25, тогда:

$$I_{кз}^m = K \cdot I_n = 1.25 \cdot 500 = 625(A)$$

$I_{кз}^{\phi} < I_{кз}^{\Gamma}$  - условие выполняется следовательно отключающая способность конструируемого заземления обеспечена.

Потребное сопротивление ЗУ нейтрали трансформатора :

$$R_o = R_{зм} \cdot \frac{U_{пр.доп}}{U_{\phi} - U_{пр.доп}} = 20 \cdot \frac{20}{230 - 20} = 0,19(Ом)$$

где  $R_{зм}$  - сопротивление замыкания фазы на землю ( $R_{зм} \geq 20$  Ом);

$U_{пр.доп} = 20$  В - предельно допустимое напряжение прикосновения, выбирается по таблице 2 книги [12];

$R_o = 0,19 < R_{нo} = 4$  Ом - условие выполняется.

Конструктивное решение по результатам расчета.

Таким решением является схема зануления кустовой электросети 400 / 230 В для конкретного электродвигателя с расчетными данными.

ПУЭ при организации проектного зануления рекомендует:

Присоединение нейтрали генератора, трансформатора на стороне до 1кВ к заземлителю или ЗУ при помощи зануляющего проводника сечением не менее  $2,5 \text{ мм}^2$  для алюминиевого изолированного проводника, ЗУ располагается в непосредственной близости от генератора или трансформатора. Его сопротивление в любое время года не должно превышать 4 Ом.

Присоединение зануляемых частей ЭУ или других установок к глухозаземленной нейтральной точке, выводу или средней точке обмоток источника тока при помощи НЗП. Его проводимость должна быть не менее 50% проводимости вывода фаз. Этот проводник должен быть выполнен:

А) при выводе фаз шинами – шиной на изоляторах;

Б) при выводе фаз кабелем – жилой кабеля. В кабелях с алюминиевой оболочкой допускается использовать ее в качестве НЗП вместо четвертой жилы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выпускной квалификационной работы получены сравнительные результаты анализа однофазного автономного инвертора напряжения на физическом макете и виртуальной модели, имитирующей работу инвертора напряжения. Данные, полученные в ходе проведённых 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 реальному 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 вентильных преобразователей параметров электроэнергии и инверторов;
- выбрана схема инвертора для проведения исследований и заданы параметры его элементов для построения виртуальной модели;
- проведены эксперименты на физическом макете, выполнены измерения параметров реального автономного инвертора напряжения;
- аналогичные эксперименты проведены с виртуальной моделью однофазного инвертора напряжения;
- выполнен сравнительный анализ результатов виртуального моделирования и исследования физического макета, оценена погрешность модели и сделаны выводы об адекватности виртуальной модели.

В заключение можно сказать следующее. С одной стороны, виртуальная модель однофазного автономного инвертора отличается высокой сходимостью результатов. В то же время процесс виртуального моделирования не такой простой, как кажется на первый взгляд. Он так же, как и физическое макетирование, требует тщательного планирования эксперимента, определённой наладки схемы, вывода на нужный режим работы. Кроме того, в некоторых случаях программный комплекс ведёт себя непредсказуемо. Например, выбор полюса «земли» в исследуемой схеме может привести к изменению результатов моделирования. 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.

В результате выполнения выпускной работы подготовлены наглядные материалы в виде учебных плакатов - баннеров. 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. Поставленные в данной выпускной квалификационной работе цели достигнуты.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.press-service.uz/ru/news/4875/> Доклад Президента Республики Узбекистан Ислама Каримова на заседании Кабинета Министров, посвященном итогам социально-экономического развития в 2013 году и важнейшим приоритетным направлениям экономической программы на 2014 год.
2. <http://www.press-service.uz/ru/document/4638/> Указ Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии» 01.03.2013 г.
3. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника./Под ред. В.А. Лабунцова.–М.: Энергоатомиздат, 1988.–320 с.
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника.–М.:Высш. школа, 1982.–496 с.
5. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники.–Новосибирск: изд-во НГТУ, 2001. – 199 с.
6. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. - М.: Солон-Р, 1999.
7. Кулик В.Д. Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи: учебное пособие / ГОУВПО СПбГТУРП.–СПб, 2010, 90 с.
8. Марков Б.Г. Моделирование электронных схем в программе «Electronics Workbench»: учеб.-метод. пособие. — Волгоград: Изд-во ВГПУ «Перемена», 2006.
9. Преобразовательная техника. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М.– Киев: Вища школа, 1978. – 424 с.
10. Попков О.З. Основы преобразовательной техники.–М.: Издательский дом МЭИ, 2007.– 200 с.

11. Раздорожный А.А. Охрана труда и производственная безопасность. Учебно-методическое пособие.–Москва: «Экзамен», 2005.–512 с. (Серия «Документы и комментарии»).

12. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: Справ. пособие / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов, Т.П. Новикова. – М.: Радио и связь. – 1984. – 256 с.

13. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк.–М.: Издательский дом МЭИ, 2007.–632 с.

14. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники: учебник для вузов.–М.: Энергоатомиздат, 1992.–296 с.

15. Справочная книга радиолюбителя-конструктора / А.А. Бокуняев, Н.М. Борисов, Р.Г. Варламов и др.; Под общ. ред. Н.И. Чистякова. – М.: Радио и связь, 1990. – 624 с. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1147).

16. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М. Чиженко.– К.: Техніка, 1978.

17. Шаисламов Ш.Ш. «Кучланиш ростлагичлари ва инверторлар» фанидан маърузалар матни.–Тошкент, 2005.–82 бет.

18. [www.edu.nstu.ru](http://www.edu.nstu.ru)

19. [www.electronicworkbench.com](http://www.electronicworkbench.com)