

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

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

На правах рукописи
УДК 621.3.031.8:[621.314+621.383.2/5]

Атабаев Азиз Баходирович

**«МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ»**

Специальность: 5А310801 – Электроника и электронная техника
(Промышленная электроника)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание степени магистра по специальности
«Промышленная электроника»

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. доц. Тачилин С.А.

Заведующий кафедрой:

д.ф.-м.н проф. Илиев Х.М.

Ташкент – 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ	9
1.1 Назначение и применение	9
1.2 Классификация солнечных электростанций и особенности их применения в децентрализованном электроснабжении	9
1.3 Определение требуемой мощности СЭС	15
ГЛАВА 2 ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ И ИХ МОДЕЛИ	17
2.1. Характеристики солнечных модулей	17
2.2 Каскадное соединение солнечных модулей. Общие принципы построения ФЭС	21
2.3 Модели солнечного элемента, солнечной батареи и аккумулятора	24
ГЛАВА 3 ВИДЫ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ (ФЭС), СВЯЗЬ ИХ РОЛИ И МЕСТА СО СТРУКТУРОЙ ФЭС	31
3.1 Сетевые зарядные устройства ФЭС	31
3.2. Зарядные устройства в составе автономных ФЭС	34
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЯМИ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ ФЭС. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	40
4.1 Моделирование сетевого зарядного устройства	48
4.2 Моделирование импульсного преобразователя постоянного напряжения	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	69

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на сохраняющиеся серьезные проблемы в глобальной экономике [1], Узбекистан в 2012 году продолжил устойчивыми темпами развивать экономику страны, обеспечил стабильный рост уровня жизни населения, упрочил наши позиции на мировом рынке.

Валовой внутренний продукт страны возрос на 8,2 процента, объем промышленного производства – на 7,7, сельского хозяйства – на 7, объемы розничного товарооборота – на 13,9 процента.

Определяя важнейшие направления и приоритеты экономической программы развития Узбекистана на 2013 год, прежде всего мы исходим из рубежей, достигнутых в экономике за истекший период, долгосрочных целей на перспективу, а также той реальной и прогнозируемой ситуации, которая складывается на мировом рынке [2].

Исходя из этого, важнейшим мобилизующим приоритетом на 2013 год должны стать сохранение устойчивых высоких темпов роста, макроэкономической стабильности и повышение конкурентоспособности нашей экономики.

На текущий год ставится задача обеспечить рост экономики страны на 8 процентов, прежде всего за счет дальнейшего роста промышленности на 8,4 процента, сельского хозяйства – на 6 процентов, роста инвестиций в основной капитал – на 11 процентов, сферы услуг – почти на 16 процентов и доведение ее доли в ВВП до 53 процентов.

Основным источником достижения поставленных целей должно стать опережающее развитие высокотехнологичных отраслей промышленности, обеспечивающих прирост продукции с высокой добавленной стоимостью, таких как химическая, нефтегазовая и нефтехимическая промышленность,

машиностроение и металлообработка, промышленность строительных материалов, легкая, пищевая промышленность и другие.

Необходимо принять дополнительные меры по использованию альтернативных источников энергии, внедрению автоматизированной системы учета и контроля потребления электрической энергии, осуществлению мероприятий по сокращению технологических потерь при выработке и транспортировке электроэнергии.

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.

Первым вестником энергетического кризиса был кризис 70-х годов прошлого столетия. С этого момента интерес к возобновляемым источникам энергии значительно возрос. Истощение запасов природных невозобновляемых источников энергии (нефть, газ, уголь и уран) и экологическая опасность от эксплуатации атомных и теплоэлектростанций только способствовали этому. К возобновляемым источникам энергии, прежде всего, относятся: солнечная энергия, энергия ветра, гидроэнергия, энергия биомассы. [3].

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, термообработки 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 и ветровыми 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.

Фотоэлектрические генераторы вырабатывают электроэнергию в светлое время суток, одновременно обеспечивая потребителей и заряжая аккумуляторную батарею. Поскольку большинство бытовых потребителей (холодильники, телевизоры и другие) требует переменного напряжения 220 вольт с частотой 50 герц, энергию постоянного тока, вырабатываемую фотоэлектрическим генератором или накопленную в аккумуляторе, необходимо преобразовать в энергию переменного тока с необходимыми характеристиками. Такое преобразование осуществляют устройства, называемые инверторами. Инверторы для солнечных станций отличаются высоким уровнем надежности, перегрузочной способностью, наличием встроенных электронных систем защиты.

В темное время суток основным источником электроэнергии становится аккумуляторная батарея, отдающая накопленный заряд потребителям. Однако срок действия аккумуляторной батареи весьма ограничен и существенно зависит от режима её эксплуатации и обслуживания. Например, каждый аккумулятор имеет ограниченное число полных циклов «заряд-разряд». Для кислотных аккумуляторов с номинальным значением напряжения 12 В недопустим глубокий разряд ниже 10,5-11 В, с другой стороны перезаряд аккумулятора выше напряжения 14,3 В также приводит к отрицательным последствиям, ухудшающим его эксплуатационные свойства и сокращающим срок службы. В связи с этим в системах электроснабжения с фотоэлектрическими генераторами существует необходимость в таких зарядных устройствах, которые не только обеспечивали бы зарядку аккумуляторов, но и автоматически отслеживали пределы оптимального режима их работы.

В данной работе под названием «Фотоэлектрическая электростанция» будем понимать систему электроснабжения бытовых и промышленных потребителей, в состав которой входят солнечная батарея, аккумулятор, зарядно-контрольное устройство и инвертор. В дальнейшем изложении диссертации понятия «фотоэлектрическая станция», «фотоэлектрическая электростанция», солнечная электростанция будем считать синонимами.

Фотоэлектрическая электростанция может быть связана с электрической сетью переменного тока. В таком случае роль зарядных устройств могут также исполнять традиционные выпрямительные схемы.

Актуальность темы определяется тем, что она посвящена исследованию зарядных устройств для фотоэлектрических электростанций, имеющих важную сферу практического применения.

Цель данной диссертационной работы – создание и оптимизация параметров виртуальных моделей зарядных устройств для фотоэлектрических станций.

В работе исследуются режимы зарядных устройств различных типов – от традиционных выпрямительных схем до современных схем контроллеров заряда-разряда аккумуляторов.

ГЛАВА 1 НАЗНАЧЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЗВИТИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

1.1 Назначение и применение

Фотоэлектрические (солнечные) электростанции (ФЭС) предназначены для преобразования солнечной (световой) энергии в электрическую энергию, обладающую характеристиками и параметрами, удобными для её использования потребителями.

Преобразование солнечной энергии в доступные для использования виды осуществляется двумя способами: фотоэлектрическим (прямое преобразование световой энергии в электрическую) и фототермическим (преобразование световой энергии в тепловую, а затем при необходимости, например, с помощью пара, в электрическую) [3].

Применение ФЭС рассчитано практически на всех потребителей, питающихся от традиционных первичных источников электроэнергии. Дальнейшее увеличение использования фотоэлектрических станций способствует общему развитию промышленности. И в этой области отечественные производители могут конкурировать на общемировом уровне с иностранными.

1.2 Классификация солнечных электростанций и особенности их применения в децентрализованном электроснабжении

Принципиально солнечные электростанции (СЭС) могут быть двух типов: термодинамические и фотоэлектрические [4]. Термодинамические СЭС основаны на нагревании теплоносителя солнечным излучением с по-

мощью специальных оптических систем с дальнейшим преобразованием тепловой энергии в механическую и далее в электрическую.

Фотоэлектрические станции используют эффект прямого преобразования солнечного излучения в электроэнергию, открытый в 1839 году французским физиком Беккерелем. Фотоэлементы в большинстве случаев представляют собой кремниевые полупроводниковые фотодиоды.

При поглощении света полупроводниковой структурой энергия фотонов передается электронам материала, что вызывает появление свободных носителей заряда. Носители заряда создают потенциальный градиент в области p-n перехода, под воздействием которого возникает электрический ток через электроприёмники. Типичная величина разности потенциалов – 0,5 В, плотность фототока – 200 А/м² при удельной мощности солнечного излучения 1 кВт/м².

Концепция термодинамических СЭС была разработана в 50-х годах прошлого века. Практическая реализация таких электростанций получила распространение в 70–80 годах.

Преобразование солнечного излучения в тепловую энергию теплоносителя может быть осуществлено по трём принципам: применение рассредоточенных коллекторов, использование системы с центральной солнечной башней, построение солнечного коллектора с центральной трубой.

Солнечные электростанции с рассредоточенными коллекторами имеют на сегодняшний день наибольшее распространение. Преобразование солнечного излучения в тепловую энергию теплоносителя осуществляется множеством сравнительно небольших концентрирующих коллекторов, каждый из которых независимо ориентируется на Солнце.

Концентраторы имеют зеркальную отражательную поверхность параболической формы. В фокусе концентраторов устанавливается приемное устройство, в котором солнечная энергия передаётся жидкости теплоно-

сителю. Нагретая жидкость от всех коллекторов консолидируется, и ее тепловая энергия используется для получения механической энергии в соответствующих тепловых двигателях.

В качестве теплоносителя может использоваться вода, которая под воздействием концентрированного солнечного излучения преобразуется в пар, используемый в паровой турбине. Часто теплоносителями в солнечном контуре являются различные химические вещества с высокой теплоемкостью и температурой кипения (например, натрий, диссоциированный аммиак, углеводородный оксид дифениля и др.). В последнем случае в состав СЭС входит теплообменник, предназначенный для получения водяного пара во вторичном контуре. Далее пар высокого давления поступает на лопатки турбины, которая вращает турбогенератор. Использованный пар после турбины концентрируется и возвращается в энергетический блок, где вода вновь преобразуется в пар.

В течение летних месяцев СЭС, построенная южнее 45° северной широты, может работать по 10–12 часов в день с номинальной мощностью. Однако темное время суток и сезонные колебания продолжительности светового дня определяют необходимость дублирующих энергетических установок на органическом топливе. Часто, для согласования мощностей СЭС и потребителей электроэнергии, в состав станции вводят накопители тепловой энергии, позволяющие эффективно покрывать энергопотребление в часы максимальных нагрузок.

СЭС с параболическими зеркалами на сегодня представляют самый распространенный тип электростанций, мощность которых достигает 80 МВт с ближайшей перспективой строительства станций на мощности 160 и 320 МВт.

В солнечных электростанциях башенного типа оптическая система представляет собой комплекс однотипных, автономно ориентируемых зер-

кал-гелиостатов. Приемник концентрированного солнечного излучения устанавливается на башне. Дальнейшие преобразования тепловой энергии в электрическую осуществляются аналогично энергопреобразованию на тепловых электростанциях.

В эксплуатационно-техническом плане СЭС башенного типа менее зрелы, чем станции с рассредоточенными коллекторами. Однако в течение последних двадцати лет были построены экспериментальные станции во многих странах: США, Японии, Испании, Италии, Франции и др. Проводятся исследования процессов энергопреобразования во всех элементах СЭС, в том числе и перспективных типов тепловых машин, таких как двигатели Стерлинга, Брайтона.

Разновидностью СЭС термодинамического типа является электростанция в виде «солнечной трубы», проект которой был разработан в начале 80-х годов XX века. Идея такой электростанции состоит в нагревании большого объема воздуха, находящегося под солнечным коллектором большой площади. Нагретый воздух поднимается и засасывается в трубу, где создается устойчивый воздушный поток, вращающий аэрогенератор.

Для получения приемлемых технико-экономических характеристик такой СЭС «солнечная труба» должна быть очень больших размеров. Так, опытный образец станции с номинальной мощностью 50 кВт, построенный и успешно проработавший 7 лет в Испании, имел диаметр крыши-коллектора 240 м и высоту трубы 197 м.

Следует отметить, что подобные СЭС хорошо сочетаются с сельскохозяйственным производством – например с теплицами, что позволяет повышать их экономические показатели.

Основными путями совершенствования термодинамических СЭС сегодня являются:

– увеличение единичной мощности станций;

- улучшение их экологических характеристик, достигаемых путем замены дублирующих ТЭС накопителями тепловой энергии;
- повышение энергоэффективности основных элементов солнечных электростанций, что в конечном итоге определяет снижение стоимости производимой ими электроэнергии.

В целом СЭС термодинамического типа целесообразны для применения в «большой» системной энергетике. Такие станции производят достаточно дешевую электроэнергию (8...10 центов за кВт·ч), сопоставимую по цене с электроэнергией экологически чистых ТЭС.

Фотоэлектрическая станция, кроме собственно фотопреобразователя – солнечной панели, содержит аккумуляторную батарею с зарядным устройством, инвертор для преобразования постоянного напряжения в переменное стандартной частоты и другие вспомогательные элементы. Основные элементы фотоэлектрической системы показаны на рис. 1.1 [4].

Солнечные панели 1 выдают электроэнергию в соответствии с интенсивностью солнечного освещения. Контроллер 3 обеспечивает режим генерирования максимума мощности для текущих климатических условий, коммутирующее устройство 5 обеспечивает подключение выхода панелей к инвертору 6, питающему нагрузки переменного тока 9. Избыточная мощность через зарядное устройство 7 аккумулируется в аккумуляторной батарее 8. При отсутствии солнечного света нагрузка питается от аккумулятора.

Диод в цепи аккумуляторной батареи защищает ее от избыточного заряда, а диоды в цепи солнечных панелей не позволяют аккумулятору разряжаться на панель при отсутствии освещения.

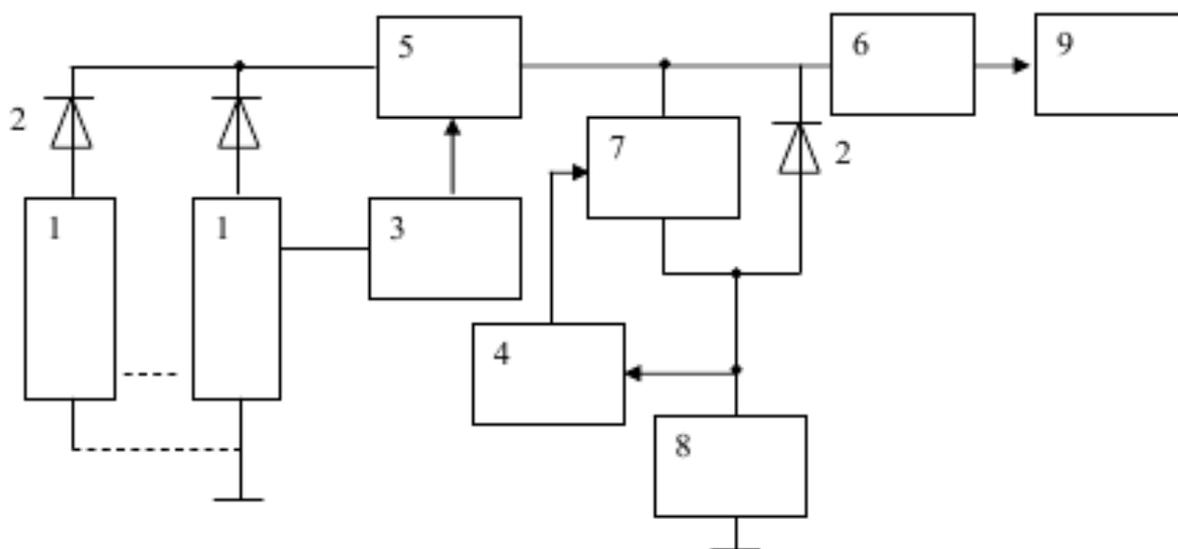


Рис.1.1 Структурная схема фотоэлектростанции: 1 – солнечные панели; 2 – диоды; 3 – контроллер пиковой мощности; 4 – контроллер зарядного тока; 5 – ключ; 6 – автономный инвертор; 7 – зарядное устройство; 8 – аккумуляторная батарея; 9 – нагрузка



Рис. 2.1 Вольт-амперные характеристики модуля при различной интенсивности солнечного освещения

1.3 Определение требуемой мощности СЭС

Для определения требуемой мощности фотопреобразователей целесообразно использовать данные не о полной установленной мощности потребителей электроэнергии объекта электроснабжения P , а о среднесуточном потреблении электроэнергии W .

Эксплуатация автономной ФЭС в режиме многолетней непрерывной работы предполагает отсутствие периодической подзарядки АБ от внешнего источника. В этом случае солнечная батарея – единственный источник энергии в системе, который при минимуме ее пиковой мощности должен полностью обеспечить электроэнергией автономный объект.

Для определения мощности СЭС необходимо рассчитать общее количество электроэнергии, которое может выработать один солнечный модуль за расчетный промежуток времени. Для расчета потребуются значение солнечной радиации, которое берется в период работы станции, когда солнечная радиация минимальна $E_{мес}$. В случае круглогодичного использования – это декабрь.

Определив значение солнечной радиации за интересующий нас период и разделив его на 1000, получим так называемое количество пикочасов, т. е., условное время, в течение которого солнце светит как бы с интенсивностью 1000 Вт/м².

Модуль мощностью P_m в течение выбранного периода выработает следующее количество энергии:

$$W_m = \frac{k P_m E}{1000}, \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где E – значение инсоляции за выбранный период, кВт·ч/м²; k – коэффициент, учитывающий поправку на потерю мощности солнечных элементов при нагреве на солнце, а также наклонное падение лучей на поверхность модулей в течение дня. Величина k принимается равной 0,5 летом и 0,7 в зимний период. Разница в его значении зимой и летом обусловлена меньшим нагревом элементов в зимний период.

Полная мощность модулей СЭС определяется из выражения:

$$P_{СЭС} = \frac{30 \cdot W}{W_{м}} P_{м}, \text{ кВт},$$

где W – среднесуточное потребление электроэнергии объектом электропитания, кВт·ч.

ГЛАВА 2 ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ И ИХ МОДЕЛИ

2.1. Характеристики солнечных модулей

Собственно солнечные панели представляют собой группы из нескольких фотоэлектрических модулей, соединенных последовательно-параллельно для получения требуемых мощности и напряжения. Модуль, в свою очередь, объединяет несколько солнечных ячеек – фотоэлементов. Обычно мощность ячейки около 1 Вт, размер – несколько квадратных миллиметров.

Большинство фотоэлементов представляет собой кремниевые полупроводниковые фотодиоды. При облучении полупроводниковой структуры внешним источником света, энергия полученных фотонов передается электронам, что вызывает появление свободных носителей электрического заряда, разделенных р-n переходом. Носители заряда: электроны и дырки создают потенциальный градиент в области перехода и создают ток при наличии внешней электрической цепи.

Энергетические характеристики фотоэлементов, главным образом, определяются следующими факторами: интенсивностью солнечного освещения, величиной нагрузки, рабочей температурой.

Влияние интенсивности солнечного освещения на вид вольт-амперной характеристики солнечного модуля иллюстрируется кривыми, показанными на рис. 2.1.

При снижении интенсивности солнечного излучения вольт-амперная характеристика фотоэлемента сдвигается вниз, что определяет значительное снижение тока короткого замыкания. Напряжение холостого хода при этом уменьшается незначительно.

Величиной, оказывающей влияние на интенсивность облучения

фотоэлектрической панели, является угол падения солнечных лучей на ее поверхность. Если обозначить через Q угол падения лучей, отложенный от нормали приемной поверхности панели, то зависимость тока нагрузки, вызываемого солнечной батареей, от величины Q имеет косинусоидальный характер $I = I_0 \cdot \cos Q$, где I_0 – максимальный ток панели, облучаемой перпендикулярно падающими световыми лучами. Указанная зависимость, называемая косинусом Kelly, дает удовлетворительный результат для углов Q в диапазоне от 0 до 50° . С дальнейшим увеличением Q выходные параметры фотопреобразователя заметно отклоняются от косинусоидальной зависимости и при $Q = 85^\circ$ ячейка прекращает генерировать электроэнергию.

Следует отметить, что коэффициент полезного действия фотопреобразователя мало зависит от интенсивности солнечной радиации в рабочем диапазоне. Данная зависимость представлена графически на рис. 2.2.

По графику видно, что в диапазоне изменения интенсивности солнечного излучения $800 \dots 1000 \text{ Вт/м}^2$ эффективность фотопреобразования меняется незначительно [5]. Следовательно, мощность фотоэлектрического модуля в облачный день снижается по сравнению с солнечным только из-за меньшей солнечной энергии, падающей на приемную поверхность фотопреобразователя. Обычно, при небольшой облачности, солнечная панель может выдавать до 80% своей максимальной мощности.

В пасмурную погоду эта величина снижается до 30% . Для солнечных панелей большой площади, состоящих из множества последовательно-параллельно соединенных ячеек, следует учитывать теневой эффект, возникающий при частичном затемнении панели.

Если ячейка в последовательной цепи полностью затенена, то она из источника мощности превращается в потребителя. Из-за последовательной связи с освещенными ячейками в цепи протекает ток, разогревающий зате-

ненную ячейку мощностью потерь, выделяющейся на ее внутреннем сопротивлении.

Таким образом, происходит снижение электрической мощности, снимаемой с панели.

Для минимизации отрицательного влияния теневого эффекта на энергетику солнечной панели последовательную цепь фотоэлектрических модулей делят с помощью обходных диодов (рис. 2.3) на несколько коротких участков.

Следовательно, генерируемая модулем мощность увеличивается при более низкой температуре. Однако максимуму мощности при различных температурах соответствуют различные напряжения, как показано на рис. 2.4..

Для устранения этого недостатка фотоэлектростанция должна снабжаться регулятором напряжения. Величина нагрузки солнечной батареи в значительной степени влияет на величину снимаемой с нее мощности. Рабочая точка фотоэлектрической панели может быть определена как точка пересечения ее вольт-амперной характеристики с вольт-амперной характеристикой нагрузки. Точно также может быть определена рабочая точка на пересечении энергетических характеристик фотопреобразователя и нагрузки. Вид рабочих характеристик системы показан на рис. 2.5. Очевидно, что максимальную мощность можно снять с солнечной батареи на нагрузку с сопротивлением R_2 .

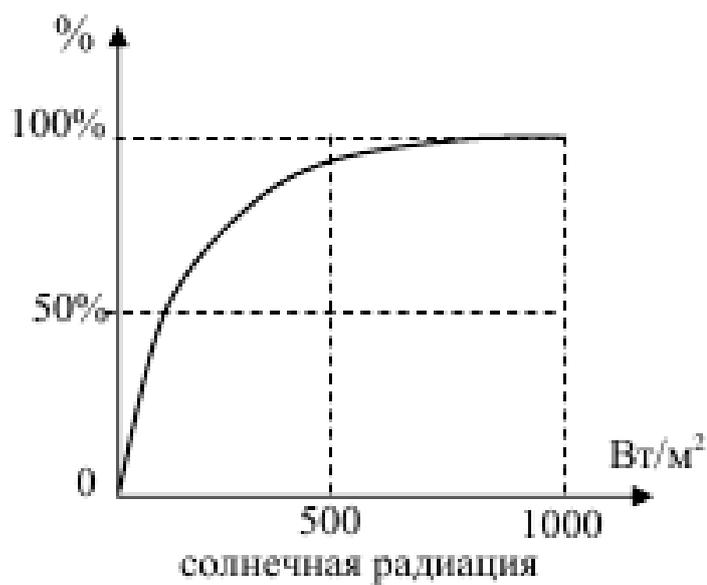


Рис. 2.2 Зависимость эффективности фотопреобразования от интенсивности солнечного освещения

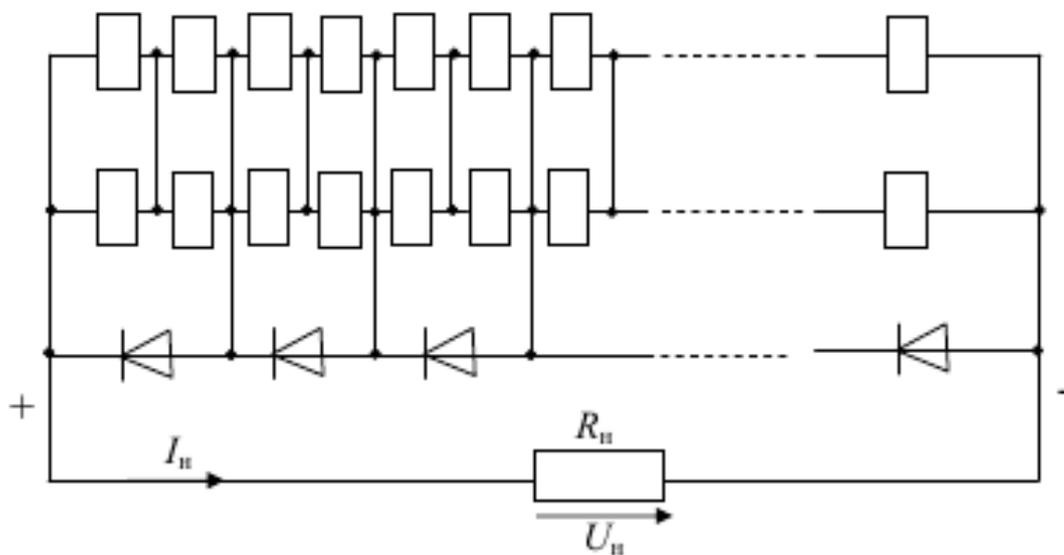


Рис. 2.3 Схема включения обходных диодов

Солнечные элементы на основе кремния имеют КПД 12...15 %. КПД лабораторных образцов достигает 23 % [5]. Мировое производство солнечных элементов превышает 50 МВт в год и увеличивается ежегодно на 30 % .

2.2 Каскадное соединение солнечных модулей. Общие принципы построения ФЭС.

Каскадное соединение модульных фотопреобразователей позволяет построить фотоэлектрические станции (ФЭС) на мощности до сотен кВт. Общая площадь солнечной панели, требуемой для получения необходимой мощности энергоустановки, определяется исходя из приведенных выше значений КПД фотопреобразования и удельного уровня электрической освещенности поверхности солнечной батареи, которая зависит от времени суток, широты местности, метеоусловий, расположения поверхности фотопреобразователя относительно солнечного излучения и др.

Исходными данными для определения экономической эффективности использования солнечных электростанций (СЭС) являются:

- среднемесячная дневная энергетическая освещенность E (кВт/м²);
- средние годовые суммы суммарной радиации на горизонтальную поверхность $E_{год}$, кВт·ч/м²;
- среднемесячные суммы суммарной радиации на горизонтальную поверхность $E_{мес}$, кВт·ч/м².

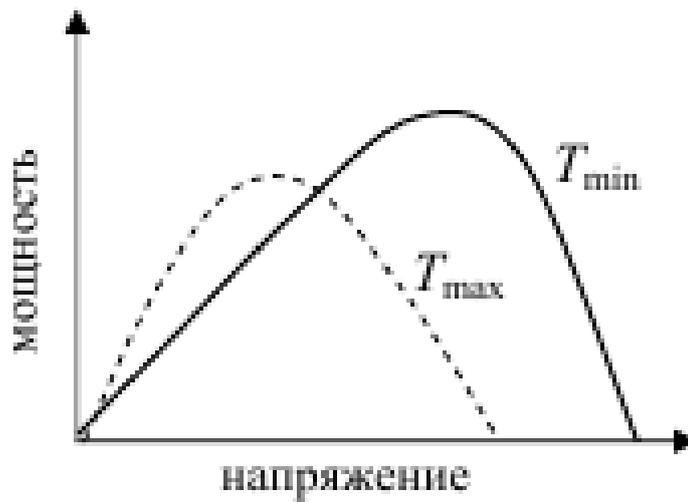


Рис. 2.4 Зависимость мощностной характеристики солнечного модуля от температуры

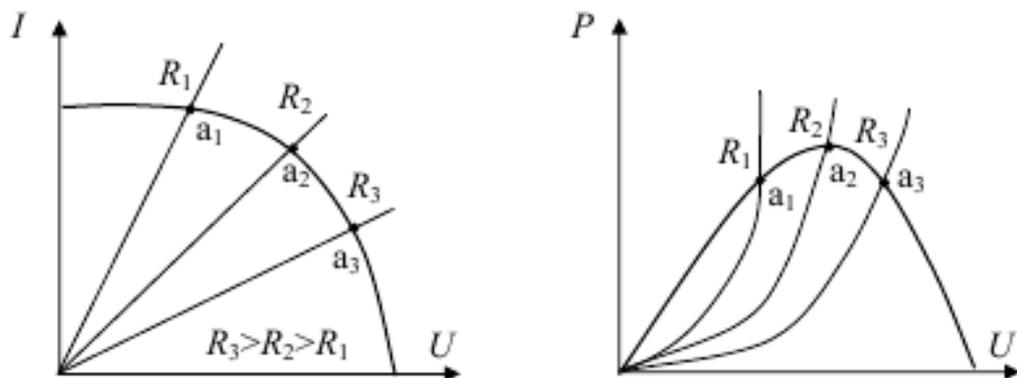


Рис. 2.5. Вольт-амперные и энергетические характеристики фотоэлектрических систем: R_1, R_2, R_3 – сопротивления нагрузок

Технически приемлемый уровень солнечной радиации в настоящее время может быть определен из выражения:

$$E \geq 0,2 \text{ кВт/м}^2.$$

Основу любой СЭС составляют фотоэлектрические модули, средняя удельная стоимость которых составляет \$3...4 /Вт [6].

Для производства электрической энергии переменного тока стандартных параметров, кроме собственно фотоэлектрического преобразователя, необходим полупроводниковый преобразователь постоянного напряжения, накопитель электроэнергии – аккумуляторная батарея, согласующие устройства, коммутационная аппаратура и др. Удельная стоимость полнокомплектной СЭС соответственно возрастает до $K_{\text{уст.уд}} = \$7500...9000$ /кВт установленной мощности.

Полная стоимость комплектного оборудования СЭС определяется из выражения:

$$K_{\text{уст}} = K_{\text{уст.уд}} \cdot P_{\text{СЭС}}.$$

К капитальным затратам на СЭС следует также отнести стоимость проектных $K_{\text{пр}}$ и строительных $K_{\text{стр}}$ работ по определению месторасположения и установки станции на местности.

2.3 Модели солнечного элемента, солнечной батареи и аккумулятора

Фотоэлектрические генераторы для прямого преобразования энергии излучения Солнца в электрическую, собранные из большого числа последовательно соединенных фотопреобразователей солнечных элементов (СЭ), получили название солнечных батарей (СБ). Современные СБ генерируют на свету значительную электрическую мощность и применяются как для питания космических аппаратов (КА), так и для многих наземных автономных устройств различного назначения.

Солнечные батареи состоят из десятков и сотен тысяч отдельных СЭ, соединенных параллельно-последовательно с целью обеспечения требуемых номиналов тока и напряжения.

Рассмотрим математическую модель СБ [7]. Эта модель, описываемая вольтамперной характеристикой (ВАХ) при заданной освещённости и температуре, является базовой для расчета энергии СБ.

Для анализа энергетических процессов в автономных СЭП в настоящее время целесообразно использовать методы компьютерного имитационного моделирования.

Это позволяет оценить:

— обеспечение энергобаланса в автономных СЭП при известных энергетических характеристиках основных и буферных источников энергии и временной диаграмме энергопотребления со стороны нагрузки;

— влияние энергетических характеристик СЭП на обеспечение энергобаланса в системе в условиях временных изменений энергетических характеристик источников электропитания;

— влияние на энергетические характеристики СЭП таких параметров, как освещённость солнечной батареи, температура, время года, и других факторов.

Для проведения анализа энергетических процессов необходимо разработать математическую модель солнечной батареи. Рассмотрим математическую модель солнечного элемента при протекании постоянного тока [8].

Принцип действия солнечных элементов с р-п-переходами зависит от неосновных носителей, поэтому их относят к приборам, работающим на неосновных носителях заряда. На рис.2.6 представлена идеализированная модель солнечного элемента.

Уравнения, определяющие модель, представленную на рис.2.6, имеют вид:

$$I_n = I_\phi - I_d$$
$$I_d = I_0 \times \left[\exp\left(\frac{V}{\varphi_T}\right) - 1 \right]$$
$$\varphi_T = \frac{k \times T}{e},$$

где V - напряжение на р-п-переходе,

$\varphi_T = \frac{k \times T}{e}$ - тепловой потенциал, равный контактной разности потенциалов на границе р-п-перехода при отсутствии внешнего напряжения (при $T = 300$ К, $\varphi_T = 0,025$ В); e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Здесь I_ϕ – ток фотонов, зависящий от плотности потока излучения; I_d – ток, протекающий через идеализированный р-п-переход; I_n – ток нагрузки; V – выходное напряжение.

На основании данных уравнений не представляется возможным построение более или менее точной ВАХ солнечного элемента [8].

Исследования влияния различных условий на выходные характеристики солнечного элемента привели к включению в уравнение солнечного элемента трех дополнительных параметров: A , $R_{п}$, $R_{ш}$.

Тогда

$$I_{н} = I_{\phi} - I_{о.н} \times \left[\exp\left(\frac{e \times (V + I_{н} \times R_{п})}{A \times k \times T}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{ш}},$$

где A – эмпирический показатель, принимающий значения от 1 до 5; $R_{п}$ – последовательное сопротивление солнечного элемента; $R_{ш}$ – шунтовое сопротивление элемента; $I_{н}$ – выходной ток нагрузки; I_{ϕ} – ток, протекающий через переход фотодиода; $I_{о.н}$ – обратный ток насыщения. Эквивалентная схема данной модели представлена на рис.2.7.

На рис. 2.8 показана ВАХ солнечного элемента, где

$U_{хх}$ – напряжение холостого хода;

$I_{кз}$ – ток короткого замыкания;

$U_{ном}$ – напряжение в точке максимальной мощности;

$I_{ном}$ – ток в точке максимальной мощности.

Данная модель используется при анализе работы солнечных элементов и батарей, а также в расчетах параметров солнечных батарей.

Эквивалентная схема солнечной батареи изображена на рис. 2.9.

В общем виде блок-схему работы фотоэлектрической системы электропитания на нагрузку можно представить в виде солнечной батареи (СБ), аккумуляторной батареи (АБ), коммутирующего устройства (КУ) и нагрузки (рис. 2.10). Эквивалентная электрическая схема представлена на рис. 2.11.

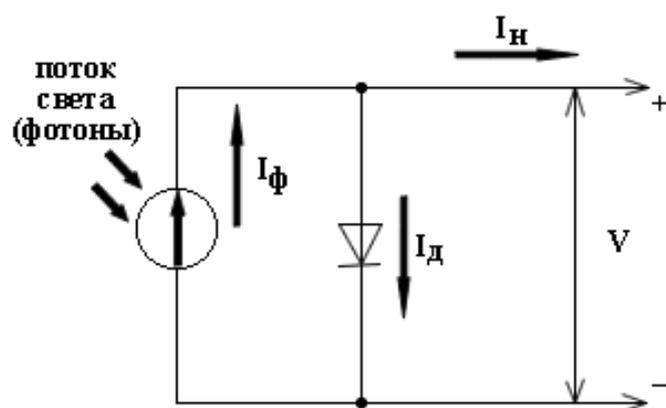


Рис. 2.6 Электрическая эквивалентная схема
солнечного элемента

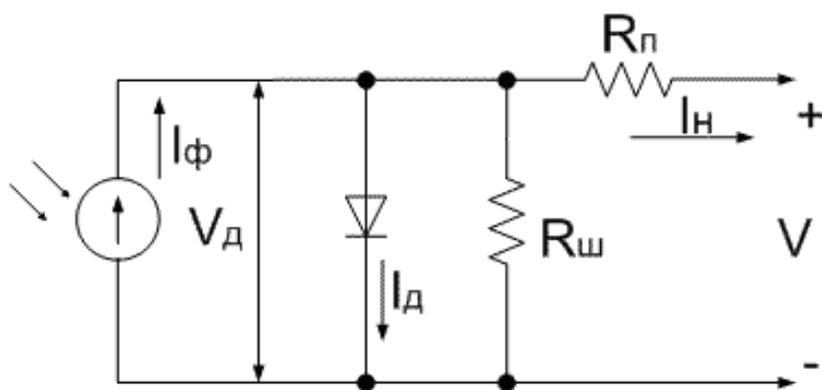


Рис. 2.7 Модернизированная эквивалентная схема
солнечного элемента

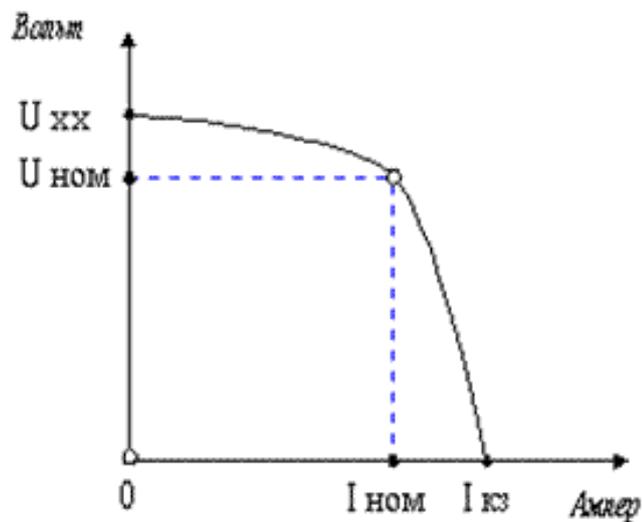


Рис. 2.8 Модернизированная эквивалентная схема
солнечного элемента

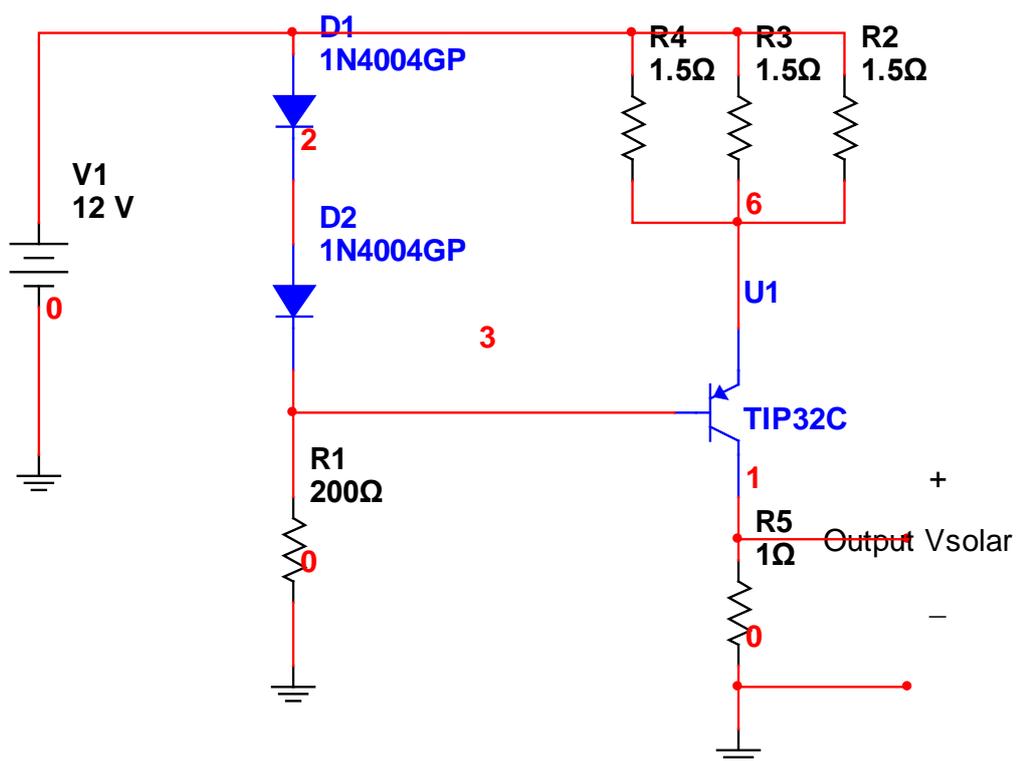


Рис. 2.9 Эквивалентная схема
солнечной батареи

Изображенная на рис. 2.11 схема представляет собой эквивалентную схему замещения СБ, работающей параллельно с АБ и коммутируемую при помощи КУ [10].

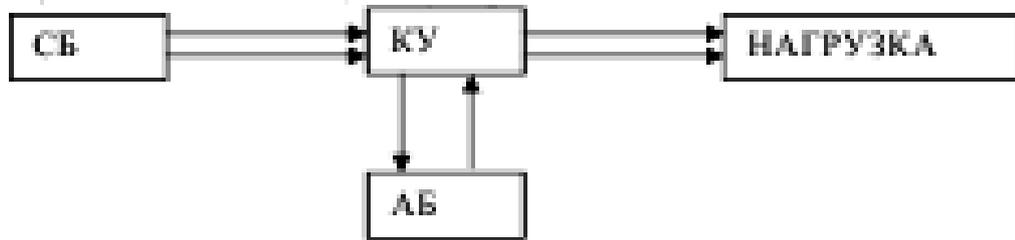


Рис. 2.10 Блок-схема фотоэлектрической системы

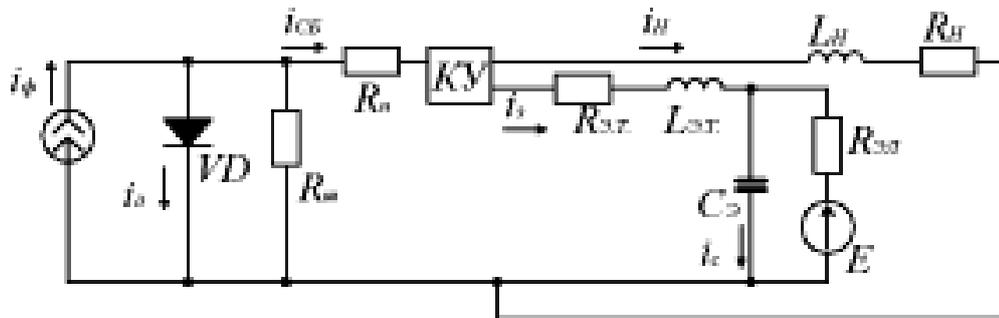


Рис. 2.11 Эквивалентная схема, включающая солнечную батарею, аккумулятор и нагрузку

Схема включает в себя следующие элементы: источник тока, диод VD , шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ и сопротивление $R_{п}$, аккумулятор, представляющий источник ЭДС E , электрические поля поляризации и емкость электродов, разделенных слоем электролита, которые приближенно учтены посредством эквивалентной емкости $C_э$, параметрам электродов вместе с тоководами соответствует сопротивление $R_{э.т.}$ и индуктивность $L_{э.т.}$, Сопротивление электролита $R_{эл}$ и сопротивление $R_{э.т.}$ составляют внутреннее сопротивление аккумулятора [1].

Если в качестве нагрузки включен двигатель постоянного тока, то нагрузка является активно-индуктивной с сопротивлением R_H и индуктивностью L_H .

Рассмотрим работу АБ на нагрузку – разряд АБ на нагрузку.

В этом случае эквивалентная электрическая схема имеет вид (рис.2.12).

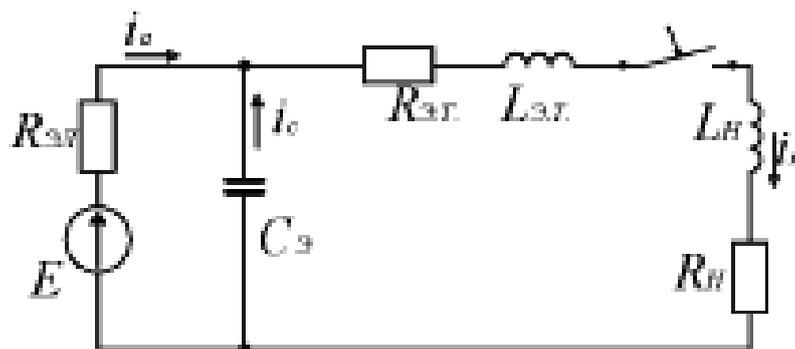


Рис. 2.12 Эквивалентная электрическая схема аккумулятора с нагрузкой

По результатам второй главы диссертации можно сделать следующий вывод. Для изучения режимов и электромагнитных процессов в фотоэлектрических системах электроснабжения (ФСЭ) необходимо их моделировать. Модели СЭ, СБ и АКБ представляются электрическими эквивалентными схемами замещения. Кроме того, достаточно глубокого изучения и исследования требуют режимы и электромагнитные процессы, происходящие в зарядных устройствах ФСЭ. Для этого используем современные моделирующие программные комплексы, в библиотеках элементов которых содержатся все компоненты анализируемых в данной работе схем.

ГЛАВА 3 ВИДЫ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ (ФЭС), СВЯЗЬ ИХ РОЛИ И МЕСТА СО СТРУКТУРОЙ ФЭС

По структуре фотоэлектрические электростанции подразделяются на станции, соединённые с централизованной сетью электроснабжения, и автономные (станции островной системы). В зависимости от структуры ФЭС определяются виды зарядных устройств и их роль в системе энергообеспечения. Рассмотрим эти виды зарядных устройств с точки зрения моделирования процессов, исследования режимов схем, выбора и оптимизации параметров моделей.

3.1 Сетевые зарядные устройства ФЭС

Структурная схема фотоэлектрической станции, соединённой с промышленной сетью, изображена на рис. 3.1. В состав структуры входят такие важные функциональные узлы, как солнечный генератор, преобразователь постоянного напряжения, инвертор и счётчик электроэнергии.

Как видно из рисунка 3.1, в данную структуру не входит аккумулятор и, соответственно, зарядное устройство. Однако здесь возможны разные варианты. Зарядное устройство может входить в состав ФЭС, если всё-таки необходимо использовать аккумулятор как резервный источник, обеспечивающий питание потребителей при временном отсутствии сети в то время суток, когда солнечный модуль не может вырабатывать энергию.

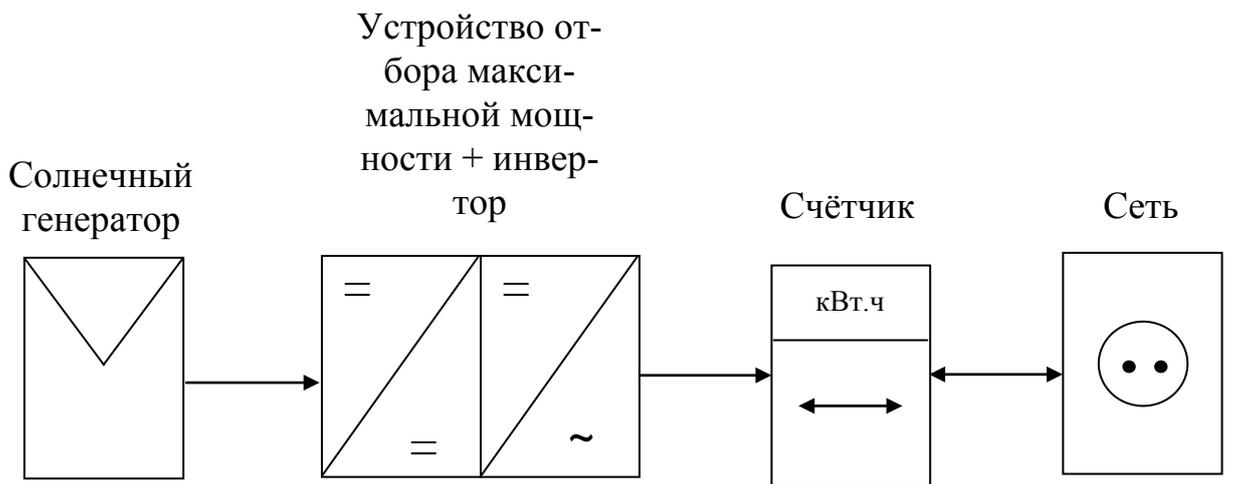


Рис. 3.1 Структурная схема фотоэлектрической станции, соединённой с промышленной сетью

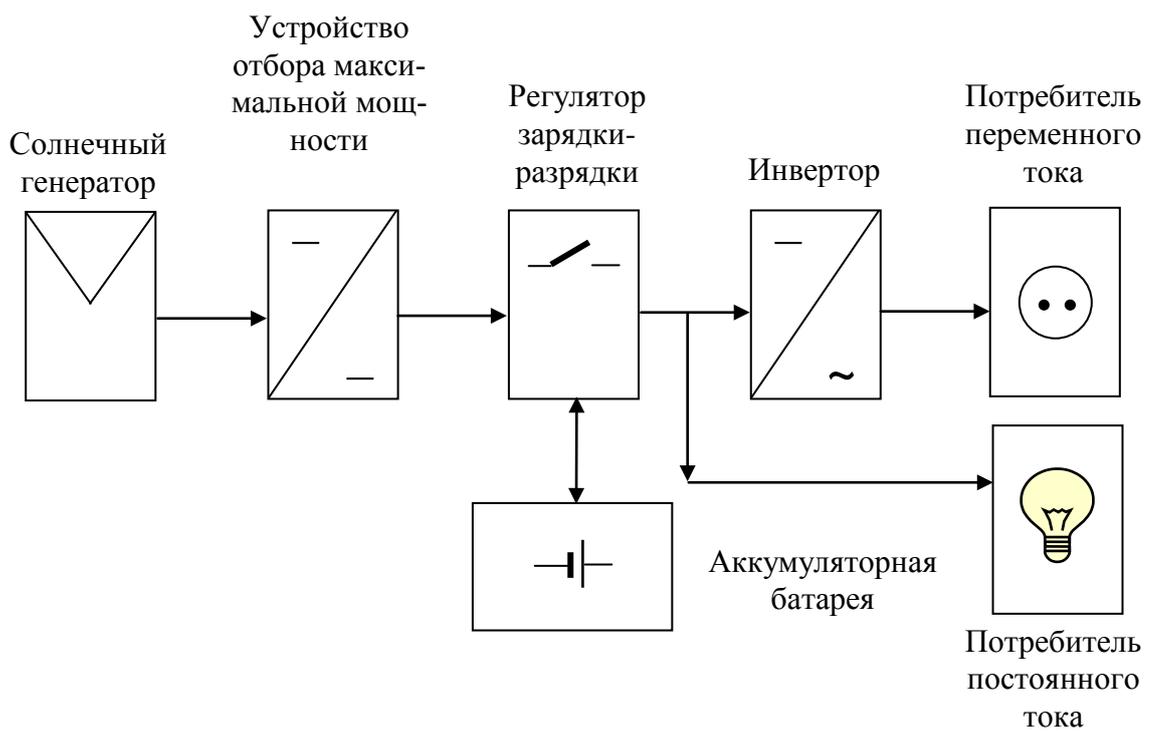


Рис. 3.2 Структурная схема автономной фотоэлектрической станции (островной системы)

Например, если потребитель требует бесперебойного питания, а ночью сеть может пропадать, то потребуются дополнительный источник в виде аккумулятора. Если ещё при этом приоритет в обеспечении энергии отдаётся централизованной сети, то аккумулятор может подзаряжаться и ночью, когда сеть действует. В таком случае зарядным устройством аккумулятора может быть классическая схема выпрямителя, содержащая узлы защиты от перезаряда и глубокого разряда аккумулятора.

Отметим, что выпрямительные устройства изучены на протяжении многих лет довольно глубоко и всесторонне, значительный объём учебной литературы и научных публикаций прошлых лет посвящены их анализу и моделированию. Несмотря на это, имеются такие режимы работы выпрямителей, которые и в настоящее время представляют особый интерес с точки зрения их моделирования и глубоко не исследованы. Это напрямую относится к работе выпрямителя на противо-ЭДС, в роли которой выступает аккумуляторная батарея, то есть имеет непосредственное отношение к зарядным устройствам ФЭС.

На начальном этапе моделирования необходимо определиться с выбором и использованием модели вентиля. В первую очередь это касается вида вольт-амперной характеристики, используемой в процессе моделирования. Представление характеристики реального вентиля аналитическим выражением или упрощённым графическим представлением называется аппроксимацией.

Как показывает практика моделирования, при выборе аппроксимации электрического вентиля возможны три варианта:

- 1) вентиль в виде идеального ключа без потерь: в проводящем состоянии замкнут накоротко, в непроводящем – полностью разомкнут, то есть имеется разрыв в электрической цепи;

2) модель неидеального ключа, в которой учитываются некоторые параметры реального вентиля: ЭДС отсечки (пороговое напряжение), сопротивление в проводящем состоянии (прямое сопротивление), сопротивление утечки разомкнутого вентиля. Разновидностью такого представления является модель с ломаной многоугольной характеристикой, в которой может быть также учтён обратный ток вентиля (тепловой ток);

3) модель с непрерывным представлением характеристики, максимальной приближенной к реальному вентилю.

В данной работе эксперименты с линеаризованными моделями вентиляй показали неадекватность моделей вентиляльных преобразователей, то есть значительное расхождение результатов моделирования от процессов в реальном устройстве.

3.2. Зарядные устройства в составе автономных ФЭС

Структурная схема автономной (островной) фотоэлектрической станции представлена на рис. 3.2. Здесь нет первичных источников переменного тока. Энергию постоянного тока, вырабатываемую солнечной батареей, необходимо стабилизировать, преобразовать по уровню и передать потребителям постоянного тока. Эту важную роль исполняют импульсные преобразователи – регуляторы-стабилизаторы постоянного напряжения. Для потребителей переменного тока энергию постоянного тока, полученную от солнечной батареи, необходимо преобразовать в энергию переменного тока. Эту задачу выполняют инверторы.

Помимо перечисленных здесь функций, импульсные преобразователи постоянного напряжения (ИППН) обеспечивают решение ещё ряда важных задач. Одна из них – контроль заряда-разряда аккумуляторной батареи, то

есть недопущение перезаряда аккумулятора выше нормы, и его глубокого разряда. И то, и другое приводит к сокращению срока службы аккумулятора.

Ещё одна важная функция, выполняемая преобразователем постоянного напряжения – обеспечение отдачи максимальной мощности от солнечной батареи в нагрузку. Необходимость выполнения этой функции поясняется рисунком 3.3, на котором представлены два графика: вольт-амперная характеристика и кривая мощности солнечного модуля. Из сравнения двух графиков видно, что пик отдаваемой в нагрузку мощности имеет место не при максимальных значениях напряжения и тока солнечной батареи. Чтобы отдать потребителю максимальную мощность, необходимо специально создавать в системе определённый режим по напряжению и току.

Отсюда следует вывод, что оптимальный режим работы солнечного модуля, при котором он отдаёт максимум энергии потребителям, должен быть практически обеспечен путём реализации определённого алгоритма поиска максимума мощности и задания нужного электрического режима по току и напряжению.

В связи с выполнением преобразователем постоянного напряжения перечисленных функций он получил специфическое название контроллера заряда-разряда аккумуляторной батареи с отслеживанием точки максимальной отдачи мощности (от англ. MPPT - Maximal Power Point Tracking). Они же играют роль импульсных регуляторов-стабилизаторов постоянного напряжения.

Структурная схема ИППН вместе с системой управления представлена на рис. 3.4. Здесь показано, что режим работы силовой части преобразователя определяется методом формирования управляющего сигнала, подаваемого от СУ на вход регулирующего транзистора. На структурной схеме рис.3.4 под обозначением ИППН подразумевается силовая часть преобразователя.

Временные диаграммы, поясняющие принцип работы СУ, приведены на рис. 3.5.

Как показано на рис. 3.6, существует три типа схем силовой части импульсных регуляторов-стабилизаторов постоянного напряжения (ИР-СПН):

- а) понижающий (“chopper”),
- б) повышающий (“boost converter”),
- в) инвертирующий (“buck-boost converter”).

Благодаря совершенствованию и развитию современных технологий изготовления полупроводниковых компонентов электронных устройств в последнее время широкое применение находят аналогичные схемы импульсных преобразователей постоянного напряжения на полевых транзисторах.

Их разновидности изображены на рис. 3.7.

По итогам третьей главы можно сделать следующий вывод. Роль и место зарядных устройств определяются целым рядом важнейших функций, выполняемых ими в фотоэлектрической системе электроснабжения. Исходя из важности самих зарядных устройств и учитывая довольно сложный характер электромагнитных процессов, необходимо глубокое исследование режимов работы зарядных устройств. Это возможно только с применением современных компьютеров и программных моделирующих комплексов.

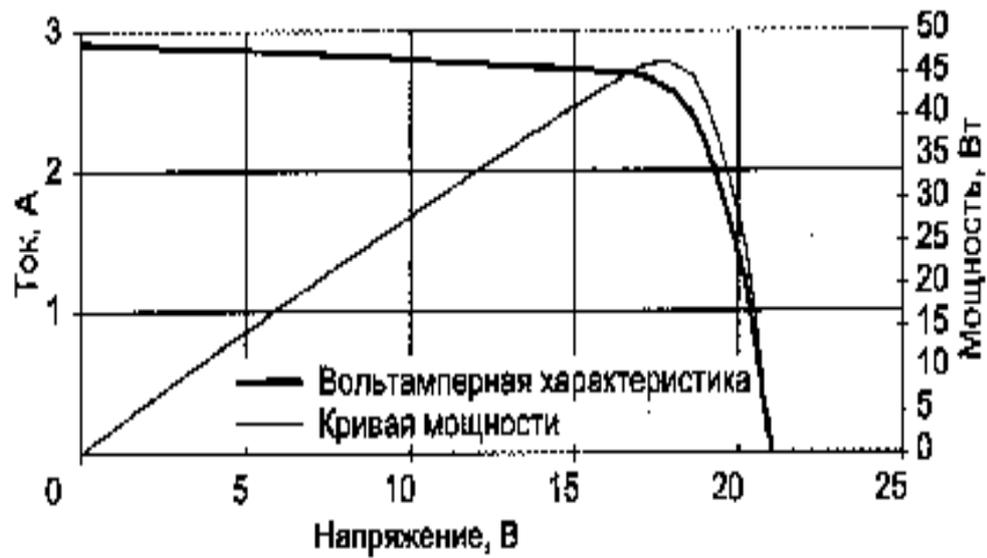
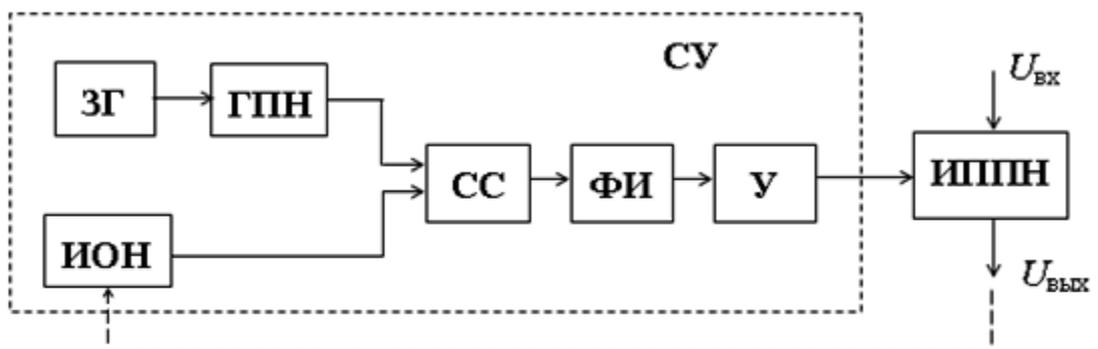


Рис. 3.3 Вольтамперная характеристика и кривая мощности
солнечного модуля

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИППН



ИППН – ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

СУ – СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

ЗГ – ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР

ГПН – ГЕНЕРАТОР ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ИОН – ИСТОЧНИК ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

СС – СХЕМА СРАВНЕНИЯ

ФИ – ФОРМИРОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ

У – УСИЛИТЕЛЬ

Рис. 3.4 Структурная схема ИППН вместе с системой управления

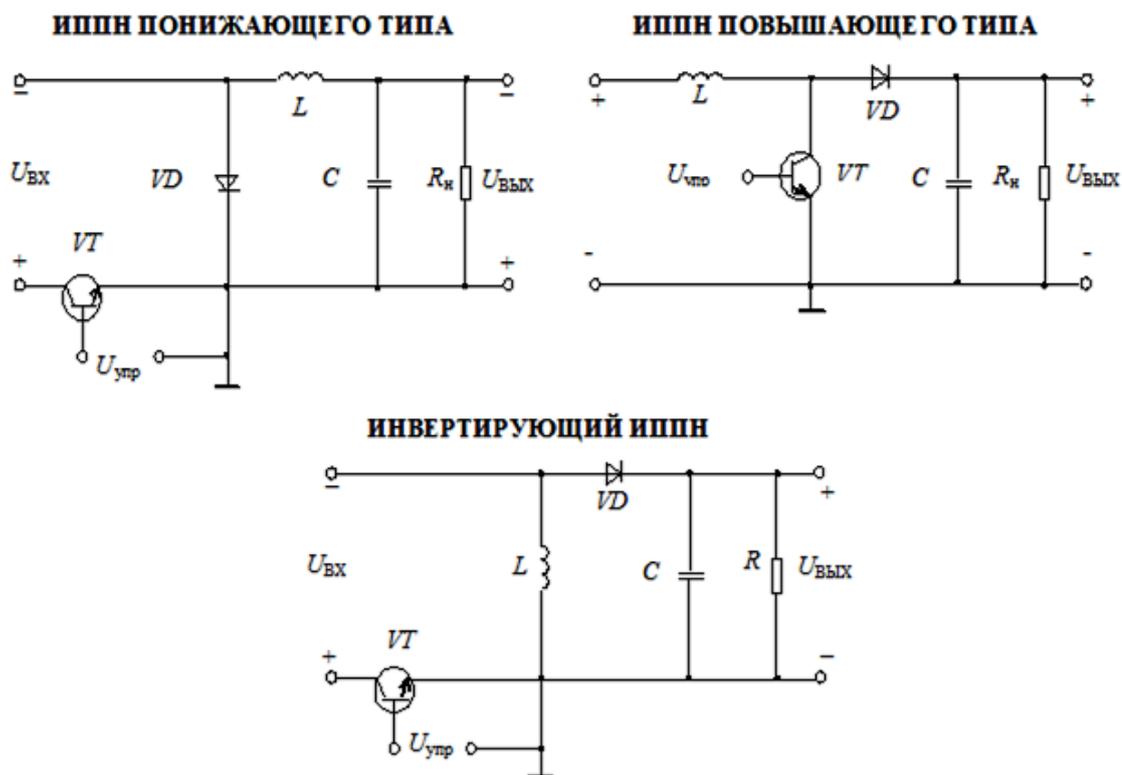


Рис. 3.6 Разновидности схем ИППН на биполярных транзисторах

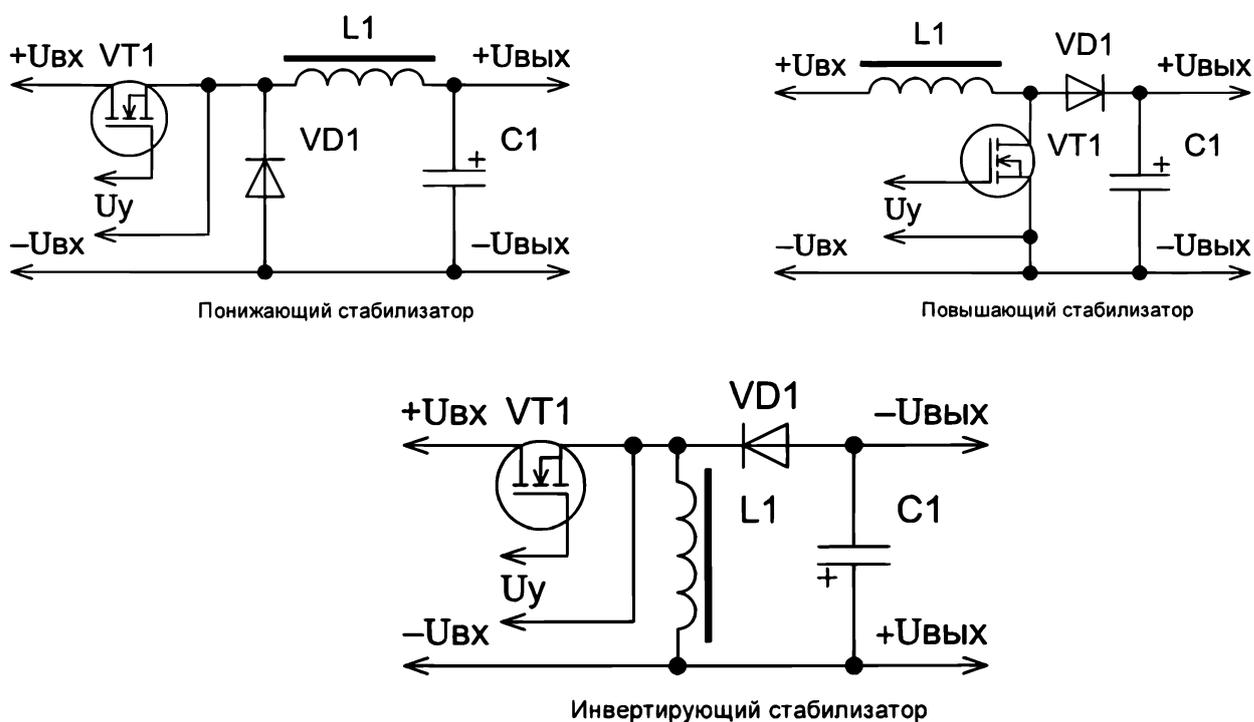


Рис. 3.7 Разновидности схем ИППН на полевых транзисторах

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЯМИ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ ФЭС. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Моделирование сетевого зарядного устройства

Данный класс зарядных устройств относится к вентильным преобразователям электроэнергии. Типичным представителем сетевых зарядных устройств является трёхфазный мостовой выпрямитель. Схема его при работе на противо-э.д.с. (аккумуляторную батарею) изображена на рис. 4.1.

Основными элементами выпрямителей являются электрические вентили [20]. Электрический вентиль хорошо проводит ток в прямом направлении, а в обратном – не проводит ток. Вентиль имеет два состояния: включенное (замкнутое) и выключенное (разомкнутое). Вентили бывают неуправляемыми и управляемыми. К неуправляемым вентилям относятся диоды. К управляемым вентилям относятся тиристоры, полевые и биполярные транзисторы, а также комбинированные полупроводниковые приборы – биполярные транзисторы с изолированным затвором. Тиристоры бывают однооперационные и двухоперационные. Однооперационные тиристоры относятся к не полностью управляемым вентилям. Их отличительной особенностью является включение импульсом управления, подаваемым на управляющий электрод, а выключение происходит при спадании тока в анодной цепи до нуля. Двухоперационные тиристоры и все виды транзисторов относятся к полностью управляемым вентилям.

Все электрические вентили являются элементами с существенно нелинейными характеристиками. В структуру любого полупроводникового прибора входит хотя бы один $p-n$ переход.

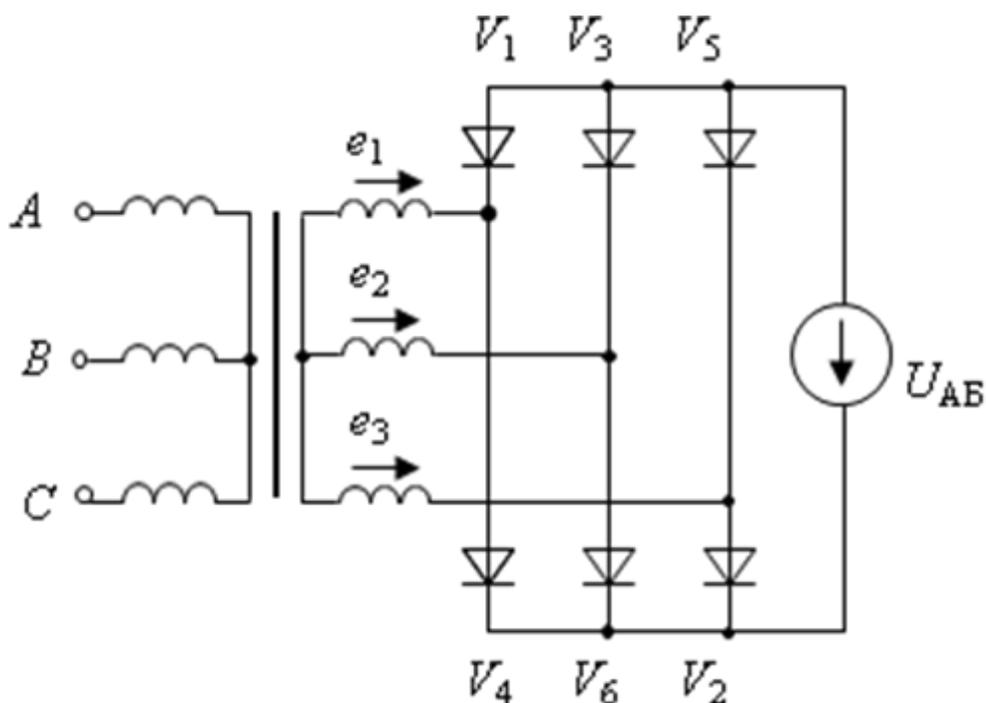


Рис. 4.1 Схема трёхфазного мостового выпрямителя при работе на аккумуляторную батарею

Например, принцип действия полупроводникового диода основан на использовании свойств $p-n$ электронно-дырочного перехода, возникающего в полупроводниковой пластине между двумя слоями с различными типами электрической проводимости.

На рис. 4.2 изображена вольт-амперная характеристика $p-n$ перехода. В ней можно выделить две ветви: прямую (A) и обратную (B). Прямая ветвь характеризуется малыми значениями прямого напряжения на $p-n$ переходе, а обратная – малыми значениями тока (называемого обратным), обусловленного неосновными носителями заряда.

Однако если обратное напряжение, приложенное к $p-n$ переходу, превысит определенное значение, то возникнет электрический пробой $p-n$ перехода, характеризующийся резким возрастанием обратного тока при незначительном изменении обратного напряжения.

Запись вольт-амперной характеристики p - n перехода в аналитической форме называется аппроксимацией. Нелинейная непрерывная аппроксимация вольт-амперной характеристики p - n перехода представляется в следующем виде:

$$I_a = I_s (e^{U / \varphi_T} - 1),$$

где I_s – ток насыщения (тепловой ток), φ_T – тепловой потенциал.

Применение непрерывной нелинейной аппроксимации характеристик полупроводниковых приборов в анализе вентильных преобразователей приводит к сильному усложнению математических выражений для напряжения, тока и других параметров схем. Поэтому применяется упрощенный подход, позволяющий во многих случаях получить достоверный результат.

В анализе электрических цепей с вентилями многие годы широко и успешно используется подход, использующий кусочно-линейную аппроксимацию (КЛА) вольт-амперных характеристик вентилях. Вся классическая литература по преобразовательной технике базируется на данном подходе.

Электрический вентиль представляется либо идеальным ключом (рис. 4.3, а), либо линейной схемой замещения (рис. 4.4, а), учитывающей сопротивление $R_{пр}$ и пороговое напряжение вентиля в прямом включении U_0 . Вольт-амперные характеристики таких кусочно-линейных моделей представлены на рис. 4.3,б и 4.4,б, соответственно. Идеальный неуправляемый вентиль (модель диода, динистора) переходит во включенное состояние в момент, когда напряжение разомкнутого ключа станет положительным (или превысит пороговое напряжение). Этот же вентиль перейдет в выключенное (разомкнутое) состояние в момент, когда ток, протекающий через него, станет равным нулю. В подавляющем большинстве случаев результаты анализа являются достоверными и позволяют получить расчетные соотношения, позволяющие правильно выбрать полупроводниковые приборы и другие элементы преобразователей.

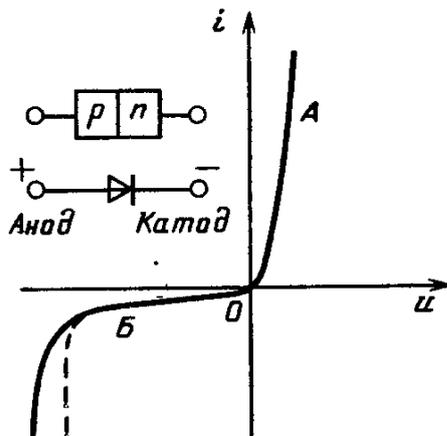


Рис. 4.2 Вольт-амперная характеристика p - n перехода

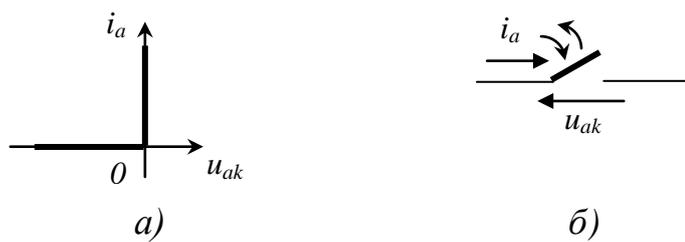


Рис.4.3 Модель идеального вентиля:
а) вольт-амперная характеристика, б) идеальный ключ

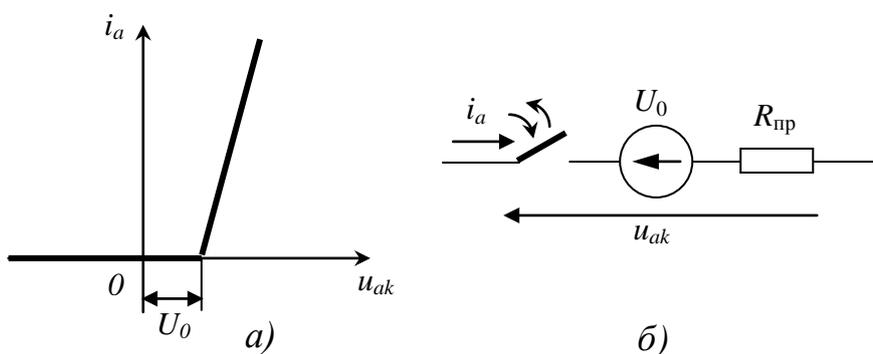


Рис.4.4 Кусочно-линейная модель вентиля:
а) вольт-амперная характеристика, б) схема замещения

Во второй половине прошлого века, с началом бурного развития электроники и вычислительной техники, стали актуальными математические модели электронных схем. Для построения цифровых компьютерных моделей вентильных схем логично взять за основу накопленный к тому времени опыт и математический аппарат с применением КЛА. Практика моделирования подтвердила возможность применения кусочно-линейного подхода к анализу большинства схем вентильных преобразователей. Однако при моделировании трехфазного мостового выпрямителя обнаружен особый режим, который приводит к принципиально неправильному результату, и причиной этого результата является именно кусочно-линейный подход [21].

Рассмотрим на примере трёхфазного мостового выпрямителя, работающего на аккумуляторную батарею, как влияет выбор модели вентиля на результаты моделирования и какая модель является оптимальной и адекватной.

Используем кусочно-линейный подход и выберем модель «идеальный вентиль», перенесенный из неавтоматизированных методов анализа в виртуальную модель.

В схеме выпрямителя, изображенной на рис. 4.1, возникает режим полностью запертого моста, когда аккумуляторная батарея зарядится и ток заряда станет равным нулю.

Типичный подход к расчету распределения напряжений на элементах разомкнутого вентильного моста – замена вентиляей одинаковыми по величине сопротивлениями.

Именно при таком подходе обнаруживаются особенности распределения напряжений между запертыми вентилями. На рис. 4.5 представлена схема замещения цепи, где вентили заменены резисторами.

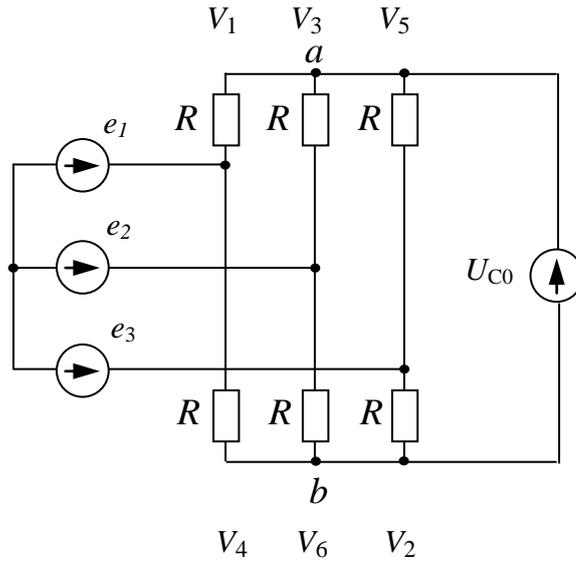


Рис. 4.5. Эквивалентная схема трехфазного выпрямителя при запертых вентилях

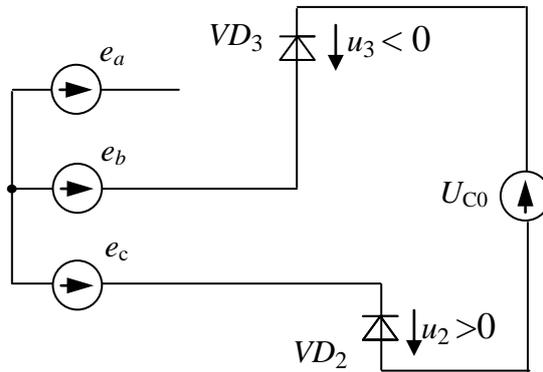


Рис. 4.6. Эквивалентная схема трехфазного выпрямителя для анализа коммутации вентилях в фазах b, c

При определенном соотношении между линейным напряжением сети и величиной противо-ЭДС U_{C0} должна включиться пара вентилях, присоединенных к разным фазам, например, V3–V4 или V3–V2. Началом интервала проводимости является момент, когда положительное напряжение возникает одновременно на вентиле катодной группы V3 и на одном из вентилях анодной группы V2, V4. Однако приводимые ниже соотношения показывают, что существуют интервалы с положительным напряжением на вентиле V2 и отрицательными напряжениями на вентилях V3 и V4. Таким образом, в эквивалентной схеме, полученной на основе кусочно-линейного подхода, происходит срыв коммутации. Под срывом коммутации мы понимаем ситуацию, когда только на одном из диодов запертого вентиляльного моста существует положительное напряжение, другие же вентили надежно заперты отрицательным напряжением. Применительно к дискретной модели цепи особый режим характеризуется тем, что процесс во времени развивается мелкими шагами, и имеют место многочисленные колебания «зависшего» вентиля с положительным напряжением. В этом и заключается особый режим рассматриваемой схемы. Причиной данной ситуации является применение кусочно-линейного подхода [7].

Определим интервал существования особого режима в схеме замещения, изображенной на рис. 4.5. Найдем аналитические выражения для напряжений на вентилях u_3 , u_4 , u_2 , учитывая, что $e_1 = e_a$, $e_2 = e_b$, $e_3 = e_c$. С этой целью запишем уравнения Кирхгофа для контуров e_2 –V3– U_{C0} –V2– e_3 и e_2 –V3– U_{C0} –V4– e_1 , а также для узлов a и b .

$$\begin{cases} e_2 - u_3 - U_{C0} - u_2 - e_3 = 0, \\ e_2 - u_3 - U_{C0} - u_4 - e_1 = 0, \\ I_1 + I_3 + I_5 = I_C, \\ I_4 + I_6 + I_2 = I_C. \end{cases} \quad (4.1)$$

Из последних двух уравнений системы (4.1) вытекает

$$I_1 + I_3 + I_5 - I_4 - I_6 - I_2 = 0$$

Используя закон Ома для резисторов, замещающих вентили запертого моста в схеме на рис. 4.5, выразим токи вентилей через напряжения:

$$\frac{1}{R}(u_1 + u_3 + u_5 - u_4 - u_6 - u_2) = 0, \quad (4.2)$$

или
$$u_1 + u_3 + u_5 - u_4 - u_6 - u_2 = 0.$$

Для исключения неизвестных u_1, u_5, u_6 используем второй закон Кирхгофа для контуров $V1-U_{C0}-V4, V3-U_{C0}-V6, V5-U_{C0}-V2$:

$$\begin{cases} u_1 + U_{C0} + u_4 = 0, \\ u_3 + U_{C0} + u_6 = 0, \\ u_5 + U_{C0} + u_2 = 0. \end{cases} \quad (4.3)$$

Выразив напряжения u_1, u_5, u_6 из (4.3) и подставив их в (4.2), имеем

$$\begin{aligned} 2u_4 + 2u_3 - 2u_2 + U_{C0} &= 0, \\ \text{или} \\ u_4 + u_3 - u_2 + \frac{1}{2}U_{C0} &= 0. \end{aligned} \quad (4.4)$$

В результате выполненных преобразований получаем расчетную систему уравнений, решаемую относительно напряжений u_2, u_3, u_4 :

$$\begin{cases} e_2 - u_3 - U_{C0} - u_2 - e_3 = 0, \\ e_2 - u_3 - U_{C0} - u_4 - e_1 = 0, \\ u_4 + u_3 - u_2 + \frac{1}{2}U_{C0} = 0. \end{cases} \quad (4.5)$$

С целью аналитического решения системы (4.5) используем метод Гаусса: сложив первое и третье уравнения (4.5), исключаем неизвестное u_2 . Полученное соотношение вместе со вторым уравнением (4.5) образует систему уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} e_2 - 2u_3 - \frac{1}{2}U_{C0} - e_3 + u_4 = 0, \\ e_2 - u_3 - U_{C0} - u_4 - e_1 = 0. \end{cases} \quad (4.5a)$$

Умножив первое уравнение системы (4.5a) на два и вычитая из него ее второе уравнение, исключаем неизвестное u_3 и определяем u_4 :

$$u_4 = -\frac{2}{3}e_1 + \frac{1}{3}e_2 + \frac{1}{3}e_3 - \frac{1}{2}U_{C0}$$

Применяя далее обратный ход Гаусса, получаем аналитическое решение для u_3, u_2 .

Таким образом, для рассматриваемой группы вентилях V3, V4, V2 расчет напряжений на них с учетом принятых обозначений приводит к следующим выражениям:

$$\begin{aligned} u_3 &= -\frac{1}{3}e_1 + \frac{2}{3}e_2 - \frac{1}{3}e_3 - \frac{1}{2}U_{C0} \\ u_4 &= -\frac{2}{3}e_1 + \frac{1}{3}e_2 + \frac{1}{3}e_3 - \frac{1}{2}U_{C0} \\ u_2 &= \frac{1}{3}e_1 + \frac{1}{3}e_2 - \frac{2}{3}e_3 - \frac{1}{2}U_{C0}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Принято, что фазные напряжения e_1, e_2, e_3 изменяются по законам

$$\begin{aligned} e_1(t) &= E_m \sin \omega t \\ e_2(t) &= E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_3(t) &= E_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Если для напряжения заряженного конденсатора принять условие $U_C = U_{C0} = \text{const}$ и рассматривать его как противо-ЭДС, то применяя к (4.7) формулы векторного сложения синусоидальных функций, выражения (4.6) для напряжений анод-катод вентилях можно представить в виде:

$$\begin{aligned} u_3(t) &= E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{2}U_{C0}, \\ u_4(t) &= -E_m \sin \omega t - \frac{1}{2}U_{C0}, \\ u_2 &= E_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) - \frac{1}{2}U_{C0}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Общеизвестен тот факт, что при $E_{\text{мн}} > U_{C0}$ периодически повторяются интервалы, на которых отпираются и проводят ток определенные пары диодов выпрямителя. Однако из соотношений (4.8) вытекает, что и при больших значениях U_{C0} для отдельных диодов существуют интервалы с положительным напряжением. Например, для u_2 из условия $u_2 = E_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) - \frac{1}{2}U_{C0} \geq 0$ следует

$$\sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) \geq 0,865U_{C0} / E_{\text{мн}},$$

а учитывая только максимум функции синуса, можно записать:

$$1,15E_{\text{мн}} \geq U_{C0}. \quad (4.9)$$

Таким образом, область режимов запертого вентиля, в которой, в соответствии с кусочно-линейным подходом, на отдельных вентилях обнаруживаются положительные напряжения, описывается неравенством

$$E_{\text{mm}} \leq U_{\text{C0}} \leq 1,15E_{\text{mm}}. \quad (4.10)$$

Рассмотрим численный пример при действующем значении фазной ЭДС $E=220$ В, когда $E_m = \sqrt{2}E = 311$ В, $E_{\text{mm}} = \sqrt{3}E_m = \sqrt{3} \cdot 311$ В = 538 В. Примем $U_{\text{C0}}=600$ В. Рассчитаем напряжения на вентилях при заданных значениях ЭДС, U_{C0} . Примем $(\omega t - \frac{\pi}{3}) = \frac{\pi}{2}$, отсюда $\omega t = \frac{5\pi}{6}$. Подставив принятые значения величин в (4.8), получаем

$$\begin{aligned} u_3(t) &= -144,5 \text{ В} < 0, \\ u_4(t) &= -455,5 \text{ В} < 0, \\ u_2 &= 11 \text{ В} > 0. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Из полученного результата анализа схемы, представленной на рис. 4.5, видно, что действительно на одном из вентилях анодной группы (VD2) напряжение положительно. В то же время напряжение на вентиле катодной группы (VD3) отрицательно, как показано в эквивалентной схеме с вентилями на рис. 4.6. Таким образом, нет проводящей пары вентилях, и условия для протекания прямого тока через вентильный мост отсутствуют.

Применив второй закон Кирхгофа к контуру, изображенному на рис. 4.6, вычисляем общее напряжение последовательно соединенных вентилях VD2, VD3

$$u_{\text{VD}} = e_b - e_c - U_{\text{C0}} = 155,5 + 311 - 600 = -133,5 \text{ В} < 0,$$

где $e_b = e_2, e_c = e_3$, взятые из (4.7) при $\omega t = \frac{5\pi}{6}$.

Аналогичный результат можно получить путем алгебраического сложения напряжений рассматриваемых вентилях, используя их значения из (4.11). Отсюда следует вывод, что при совместном рассмотрении пары вентилях VD2, VD3 на интервале особого режима общее напряжение на них отрицательно, и условия для протекания тока в контуре отсутствуют. Когда конденсатор частично разрядится до уровня, при котором условие (4.10) уже не бу-

дет соблюдаться, общее напряжение указанной пары вентилях станет положительным, и вентиляльный мост перейдет в проводящее состояние.

Однако в дискретной модели вентиляльной цепи, в которой вентили моста рассматриваются в отдельности, на интервале особого режима имеет место срыв коммутации. Контроль состояния разомкнутого вентиля проводится по напряжению. Единственный вентиль ($VD2$), на котором в результате расчета, выполненного в рамках кусочно-линейного подхода, получается положительное напряжение, включается. С этого момента контроль состояния включенного вентиля проводится по току. На следующем шаге численного расчета вентиляльной цепи выясняется, что ток контролируемого вентиля равен нулю, и вентиль выключается. Срыв коммутации заключается в многочисленных колебаниях состояния единственного («висящего») вентиля. Вычислительный процесс развивается мелкими шагами и сопровождается ложными переключениями вентиля в течение интервала, на котором выполняется условие (4.10).

Таким образом, особый режим возникает в эквивалентной линеаризованной схеме трехфазного мостового выпрямителя, который, благодаря использованию активного фильтра, приобретает свойства преобразователя напряжения повышающего типа. В таком преобразователе в течение определенных интервалов напряжение нагрузки превышает амплитуду линейной ЭДС, и режим характеризуется полным запирающим вентиляльного моста.

Для гарантированного получения верных результатов анализа электрической цепи с вентилями произвольной структуры необходимо использовать непрерывную нелинейную аппроксимацию характеристик вентилях или дополнять концепцию кусочно-линейного подхода.

В библиотеке полупроводниковых компонентов электронных схем программного комплекса VULTISIM10 диоды представлены моделью «виртуальный диод», с многоугольной кусочно-линейной аппроксимацией характеристики и многочисленными моделями с видом характеристики реального вентиля, непрерывной нелинейной моделью [19]. Поскольку в данной работе потребовалось сформировать кусочно-линейную модель трехфазного мостового выпрямителя, диоды заменены электронными ключами, управляемыми напряжением [22]. Схема с управляемыми ключами вместо диодов изображена на рис. 4.7. Управляемый ключ состоит из датчика напряжения и собственно ключа. Датчик предназначен для контроля напряжения на участке цепи с вентилем. В момент, когда контролируемое напряжение превысит заданный порог срабатывания, ключ замыкается. Когда контролируемое напряжение опускается ниже порога выключения, ключ размыкается. Таким образом реализована кусочно-линейная модель диода в EWB. Порог напряжения, при котором ключ замыкается, задан величиной 1 В. В процессе работы виртуальной модели путем изменения сопротивления потенциометра имеется возможность моделирования схемы в следующих режимах работы: 1) когда вентили проводят ток парами (временные диаграммы изображены на рис. 4.8); 2) когда вентильный мост полностью заперт, то есть на всех вентилях напряжение отрицательно. При переходе схемы в третий, особый режим, кусочно-линейная модель не работает и программа EWB выдает сообщение об ошибке. Полученный результат косвенно подтверждает, что проблема кусочно-линейного подхода существует.

Чтобы разобраться в причинах данной проблемы, заменим управляемые ключи резисторами с одинаково большим сопротивлением, как показано на рис. 4.9. Цель такой замены – получить диаграммы распределения напряжений на запертых вентилях и определить, какая пара вентиляй должна включиться при выходе из особого режима. Диаграммы приведены на рис.

4.10. Каждая диаграмма отображает состояние трёх вентилях, образующих между собой пары проводимости тока. Результат получается несколько неожиданный. На диаграммах видны интервалы, когда положительное напряжение существует только на одном из вентилях моста, в то время как на всех других вентилях напряжение отрицательно.

В этом и заключается проблема кусочно-линейного подхода. Возникает противоречие: вентиль, на котором появилось положительное напряжение, должен быть включен, но ни один из других вентилях не может составить ему пару, и пути для протекания тока нет. При нулевом токе вентиль должен быть выключен. Это означает, что в данной модели вентиль, не успев включиться, вновь должен выключиться.

Отсюда следует вывод: особый режим, возникающий в виртуальной модели трёхфазного мостового выпрямителя, порождается именно кусочно-линейным подходом и приводит к неправильному результату. Для получения достоверного результата необходимо использовать другой подход.

Другим подходом в данной работе применена модель «виртуальный диод» с многоугольной аппроксимацией характеристики (рис. 4.11), содержащийся в библиотеке MULTISIM10. Результаты представлены на рис. 4.12.

При моделировании режима запертого вентиля моста, когда аккумулятор заряжен, на диаграммах напряжений не видны участки с положительным напряжением. Однако при детальном рассмотрении процесса удаётся обнаружить незначительные положительные напряжения на непроводящем вентиле. Хотя это и противоречит физическим представлениям о работе схемы, модель даёт качественно верный результат в последовательности переключения вентилях.

Вывод: модель вентиля с многоугольной аппроксимацией характеристики можно считать условно адекватной процессам в реальной схеме.

И только третий вариант модели с применением в ней характеристики реального вентиля позволил получить полностью достоверный результат [22, 23].

Вывод. В автоматизированном моделировании наиболее оптимальной следует считать модель, характеристика которой максимально приближена к реальному вентилю. Другие модели могут привести к результатам, противоречащим физическим представлениям о работе реального исследуемого объекта.

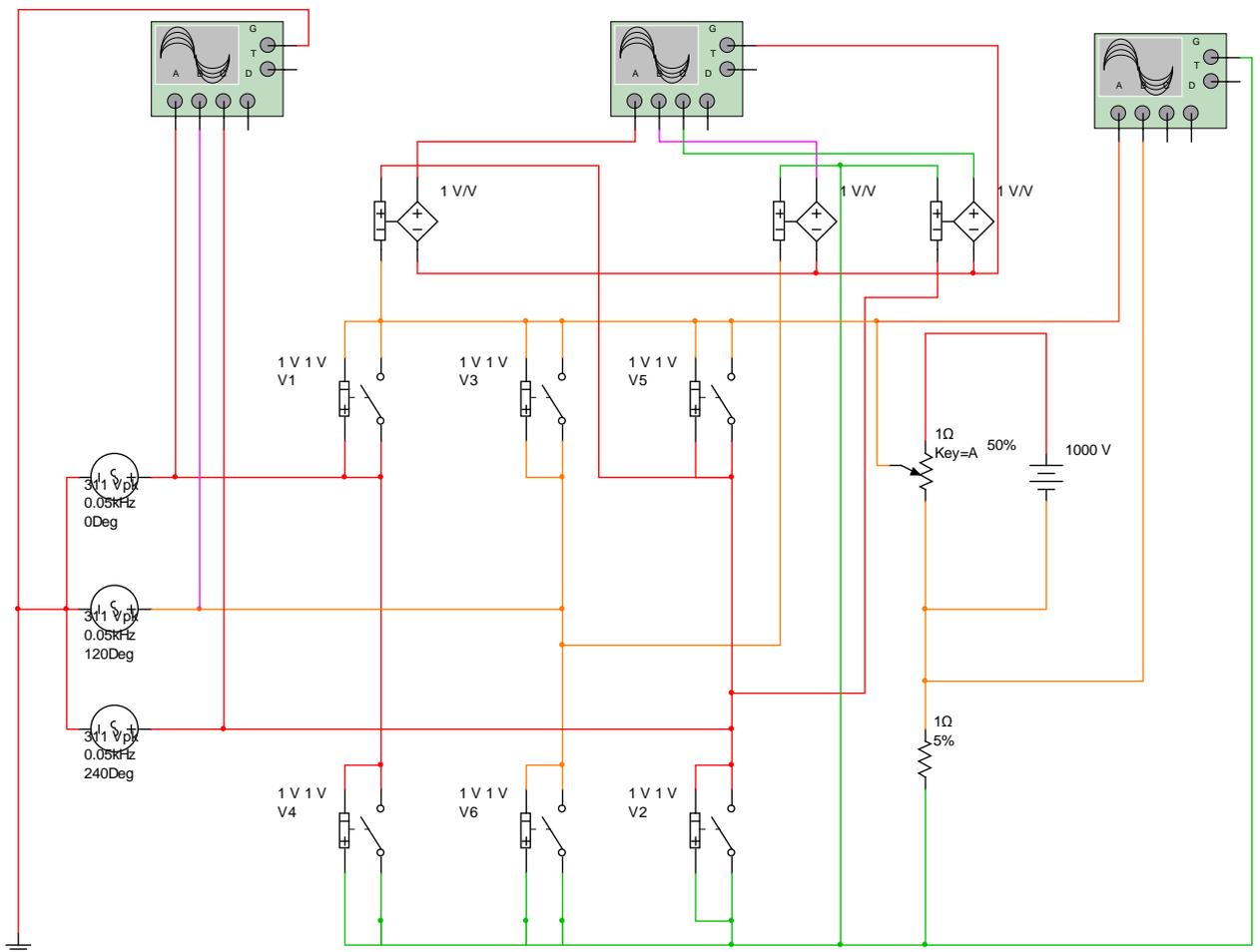


Рис. 4.7 Кусочно-линейная виртуальная модель трёхфазного мостового выпрямителя

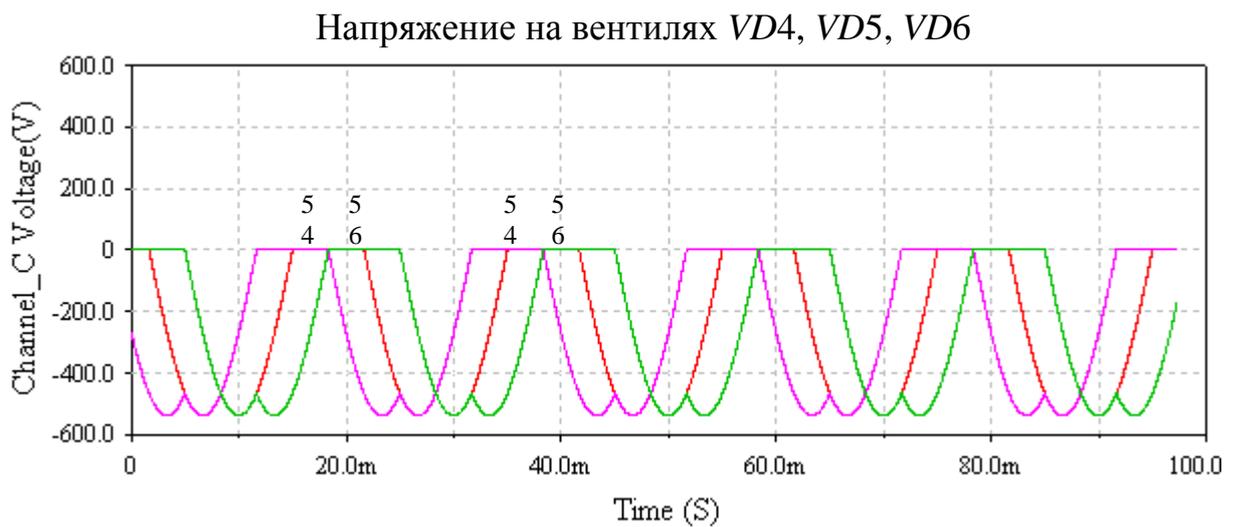
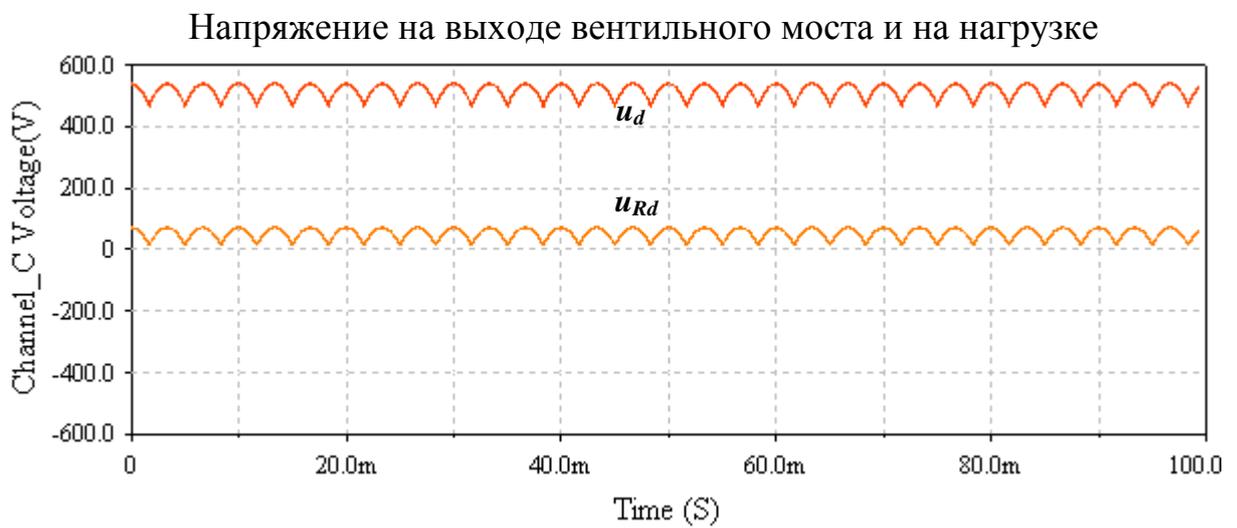
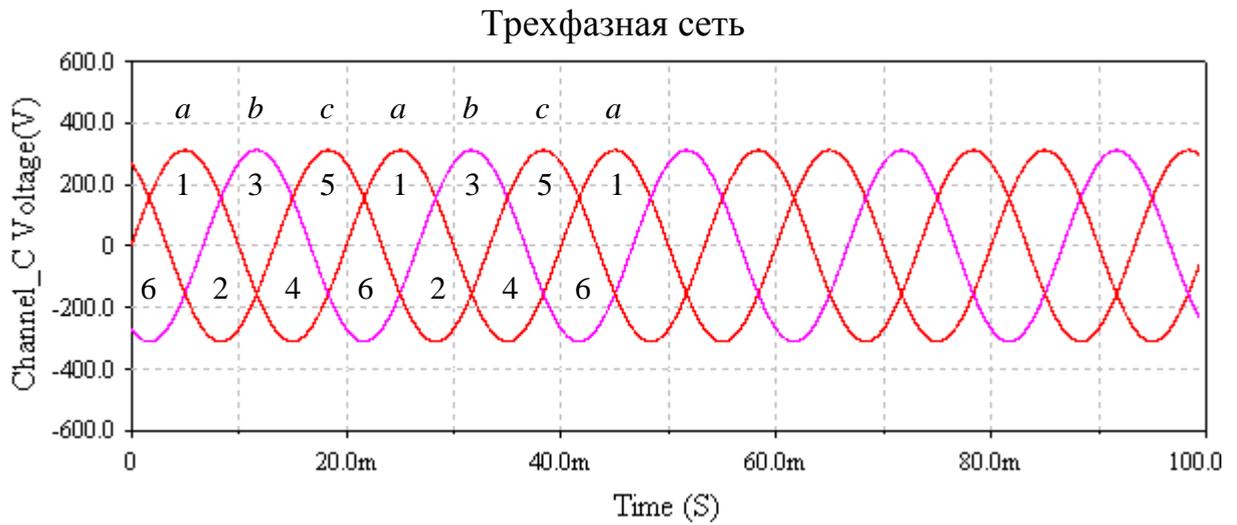


Рис. 4.8 Временные диаграммы в кусочно-линейной модели трёхфазного мостового выпрямителя в номинальном режиме

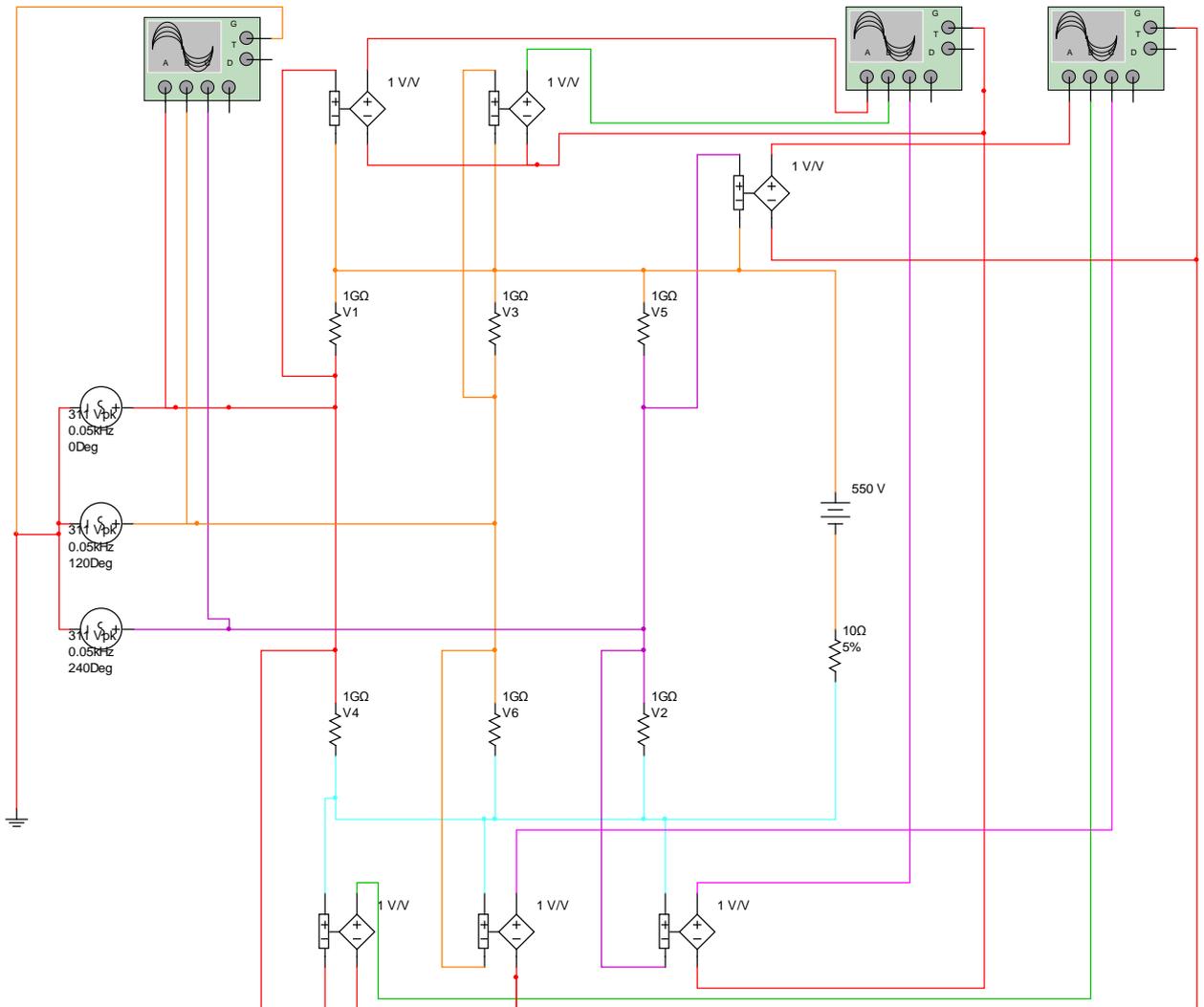


Рис. 4.9 Линеаризованная виртуальная модель трёхфазного мостового выпрямителя в особом режиме

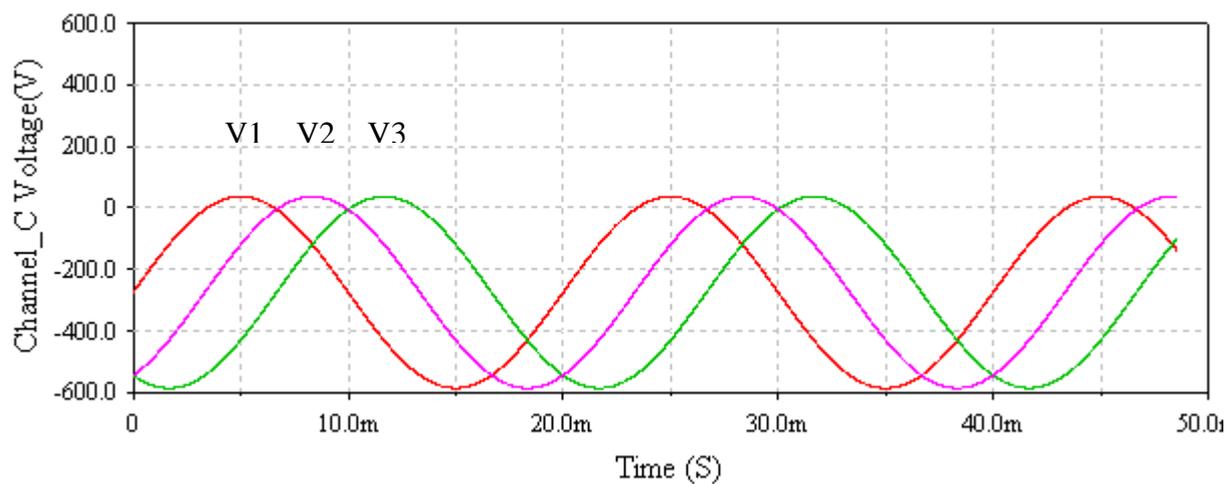
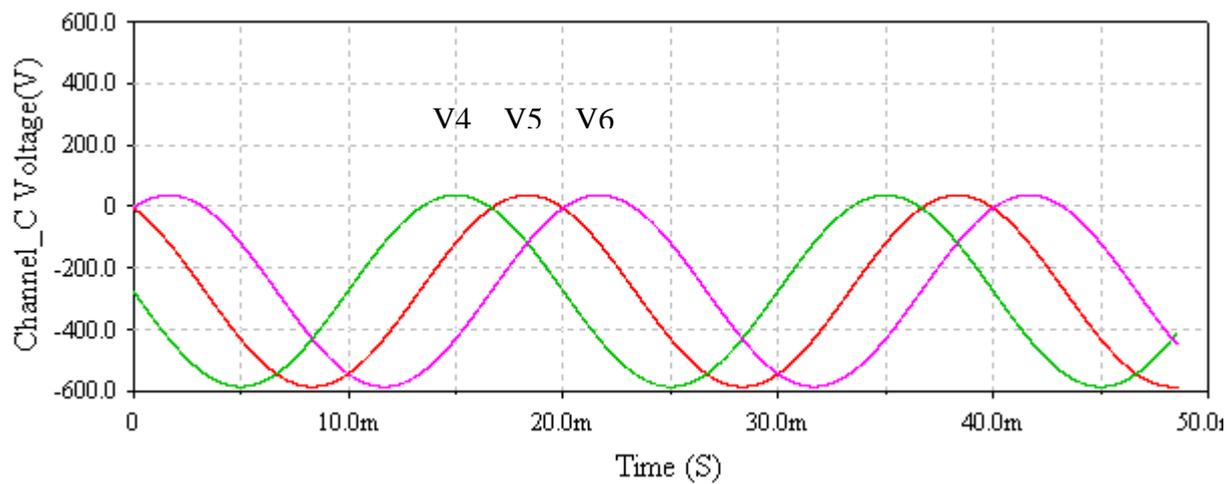


Рис. 4.10 Распределение напряжений на вентилях запертого моста
в линеаризованной виртуальной модели трёхфазного
мостового выпрямителя в особом режиме

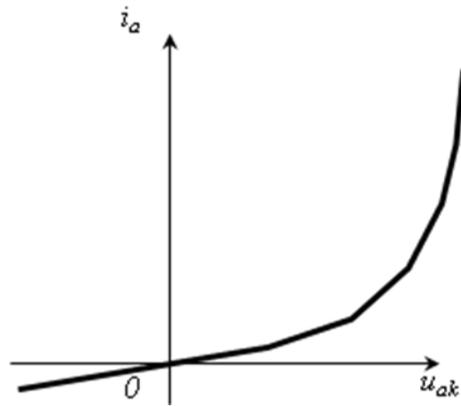


Рис. 4.11 Модель вентиля с многоугольной характеристикой («виртуальный диод»)

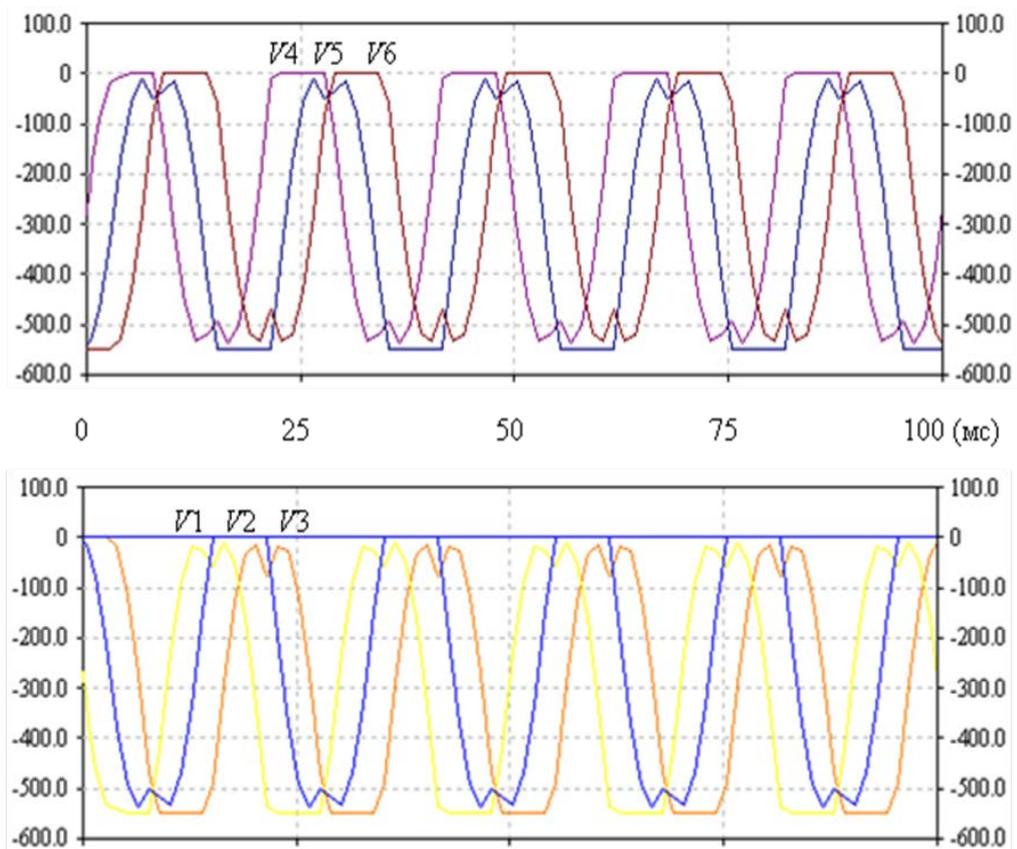


Рис. 4.12 Результаты моделирования с моделью «виртуальный диод»

4.2 Моделирование импульсного преобразователя постоянного напряжения

Рассмотрим схему инвертирующего преобразователя, изображенную на рис. 4.13, в. Данный тип преобразователя отличается от других тем, что он может работать как в режиме повышения, так и понижения напряжения. Введём параметры элементов, используемые в реальной схеме физического макета, в программу MULTISIM10, соединим их, как на рис. 4.13, в, и получим на рабочем поле программы образ виртуальной модели инвертирующего преобразователя [19]. Как показано на рис. 4.13, схема состоит из последовательно включённого регулирующего транзистора $Q1$, накопительного дросселя $L1$, высокочастотного диода $D1$, конденсатора фильтра $C1$ и нагрузки $R1$. Рассмотрим принцип работы схемы. Регулирующий транзистор $Q1$ работает в ключевом режиме. Во временном интервале, когда от системы управления на базу транзистора приходит импульс, $Q1$ находится в состоянии насыщения, через него течёт ток, и практически всё напряжение источника питания прикладывается к дросселю $L1$. Чем больше длительность управляющего импульса, тем больше магнитной энергии накапливается в дросселе. В интервале, когда управляющий импульс не подаётся, транзистор находится в состоянии отсечки, ток через него не течёт. В это время в дросселе возникает ЭДС (электродвижущая сила) самоиндукции с полярностью, противоположной напряжению источника, в результате открывается диод $D1$ и накопленная в дросселе энергия передаётся в нагрузку $R1$.

Конденсатор фильтра $C1$ подзаряжается энергией, накопленной в дросселе. Он предназначен для сглаживания пульсаций напряжения в нагрузке.

Особенностью данной схемы является возможность обеспечения напряжения нагрузки как ниже уровня источника питания, так и превышающе-

го его. Поэтому данная схема относится к понижающе-повышающему типу преобразователей. Кроме того, благодаря накопительному дросселю, полярность напряжения в нагрузке противоположна полярности источника питания. В иностранной литературе инвертирующие импульсные стабилизаторы называют “buck-boost converter”.

Величина напряжения и тока в характерных точках схемы определяется с помощью виртуальных измерительных приборов, а форма сигналов наблюдается на экранах виртуальных осциллографов.

Роль системы управления исполняет её имитатор, состоящий из набора генераторов импульсов, настроенных на частоту широтно-импульсной модуляции 10 кГц. Начальная фаза импульсов каждого генератора сдвинута на 10 мкс (десятую часть периода) относительно предыдущего.

Временные диаграммы виртуальной модели инвертирующего ИППН при разных коэффициентах заполнения импульсов приведены на рис. 4.14–4.16.

Рассмотрим схему понижающего преобразователя, изображенную на рис. 3.6. Данный тип преобразователя отличается от других тем, что он может работать только в режиме понижения напряжения. За рубежом понижающие стабилизаторы называют “chopper”.

Введём параметры элементов, используемые в реальной схеме физического макета, в программу MULTISIM10, соединим их, как на рис. 3.6, и получим на рабочем поле программы образ виртуальной модели инвертирующего преобразователя [19], как показано на рис. 4.17.

Временные диаграммы виртуальной модели понижающего ИППН приведены на рис. 4.18.

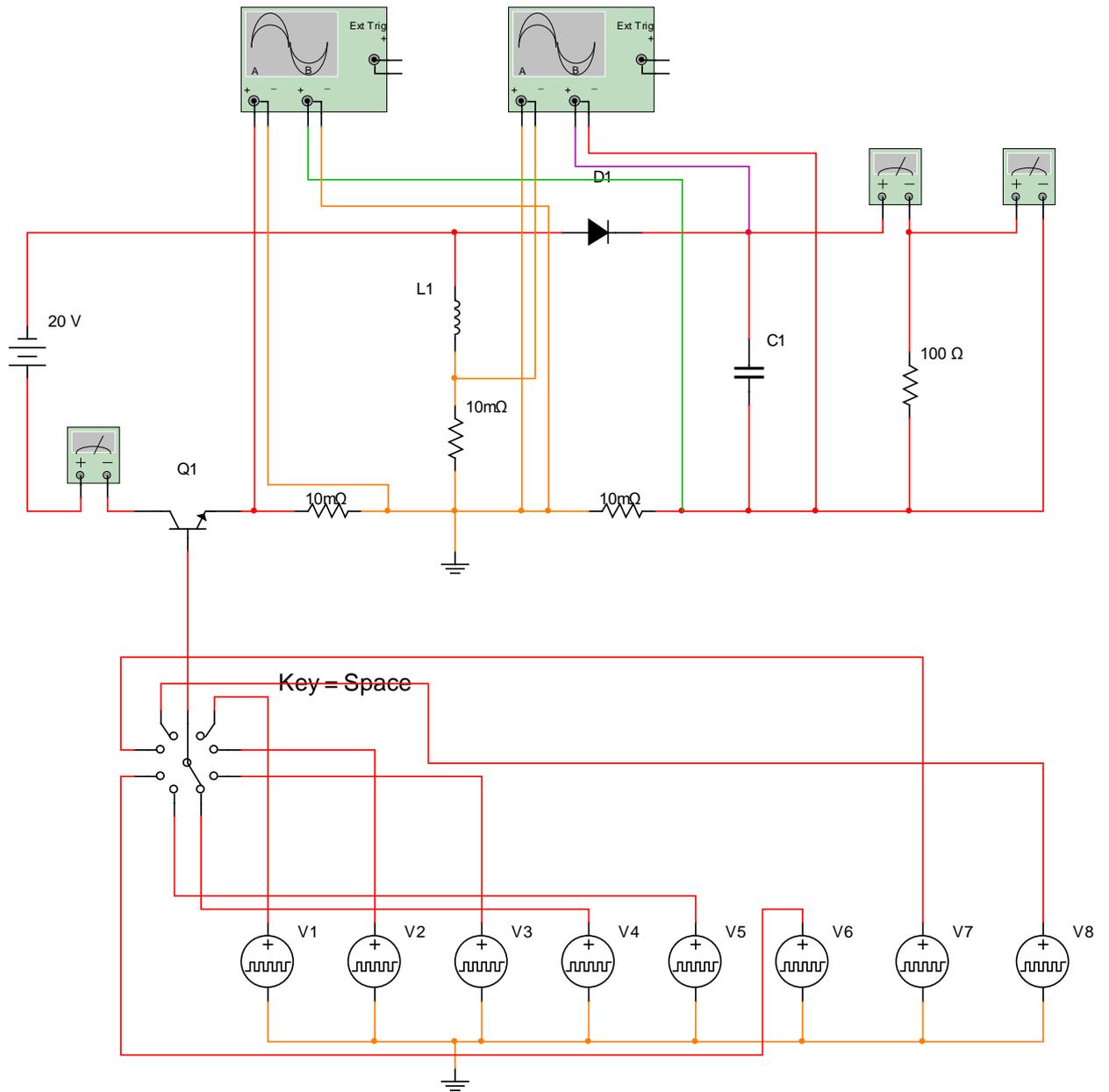


Рис. 4.13. Схема виртуальной модели инвертирующего преобразователя

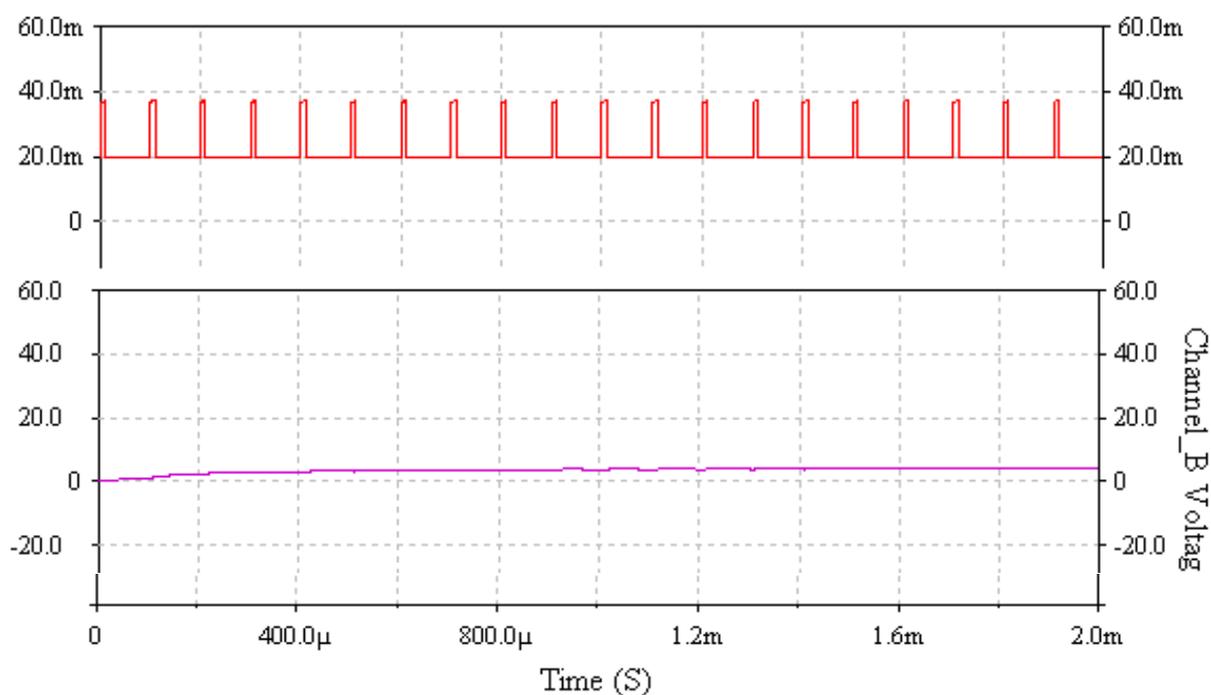


Рис. 4.14 Временные диаграммы сигнала управления и выходного напряжения инвертирующего преобразователя при коэффициенте заполнения импульсов $D = 0,1$

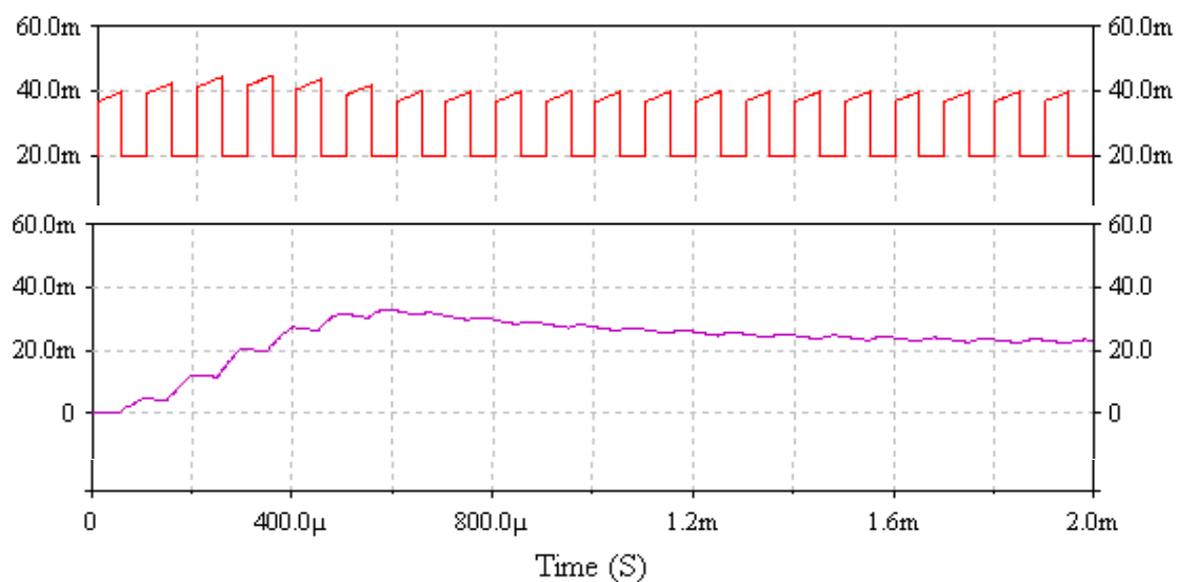


Рис. 4.15 Временные диаграммы сигнала управления и выходного напряжения инвертирующего преобразователя при коэффициенте заполнения импульсов $D = 0,5$

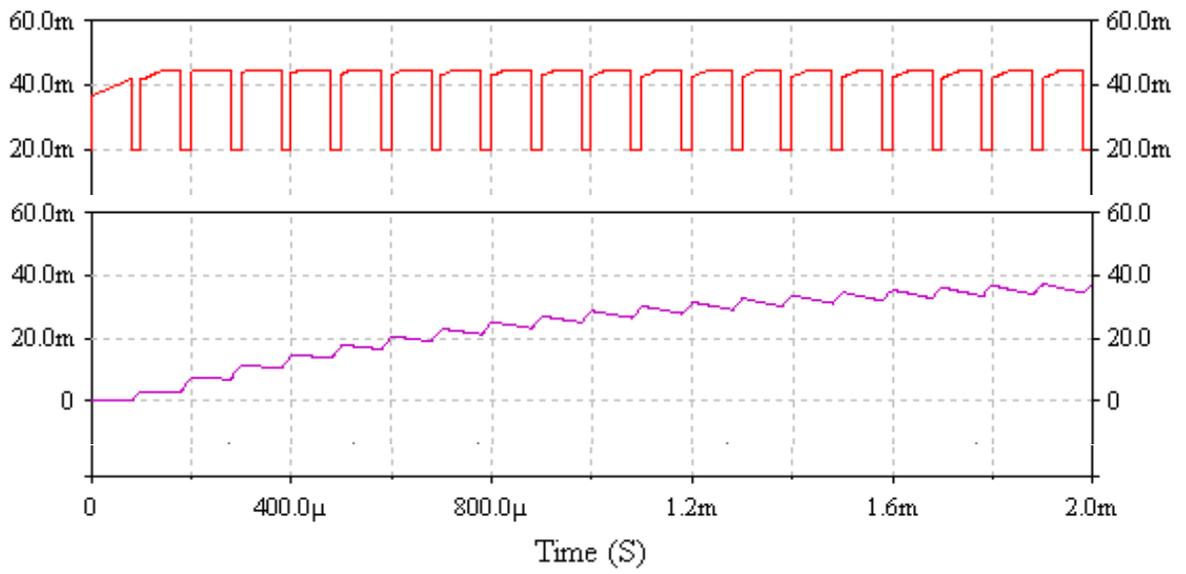


Рис. 4.16 Временные диаграммы сигнала управления и выходного напряжения инвертирующего преобразователя при коэффициенте заполнения импульсов $D = 0,8$

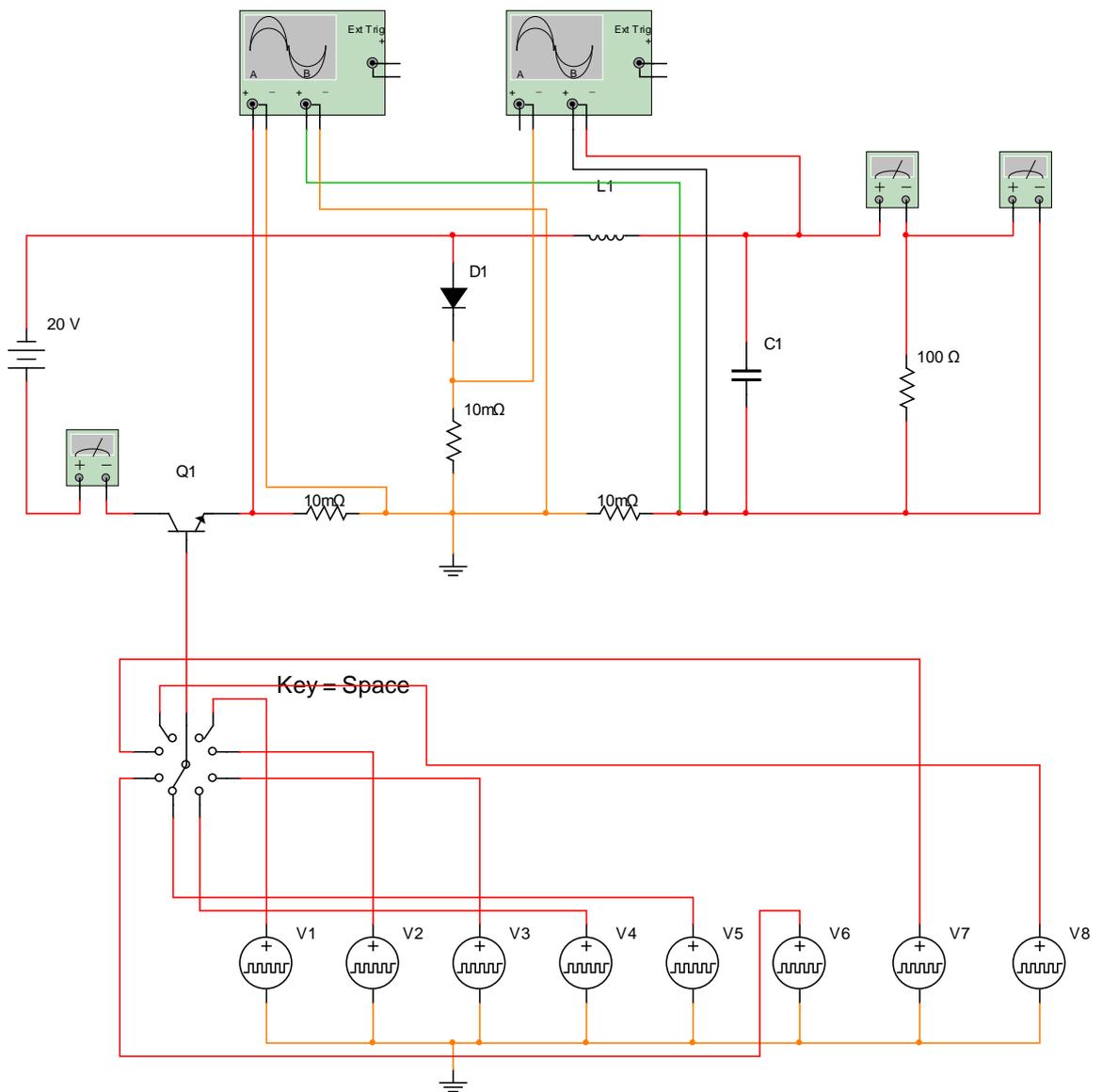


Рис. 4.17. Схема виртуальной модели понижающего преобразователя

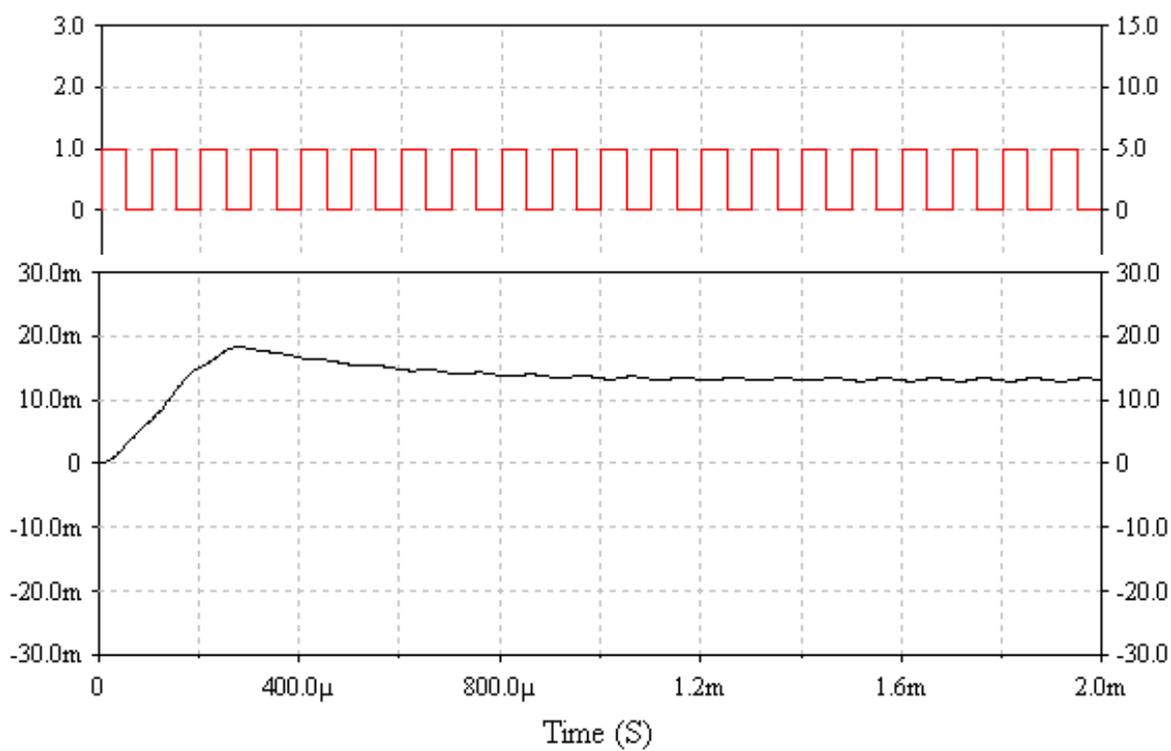
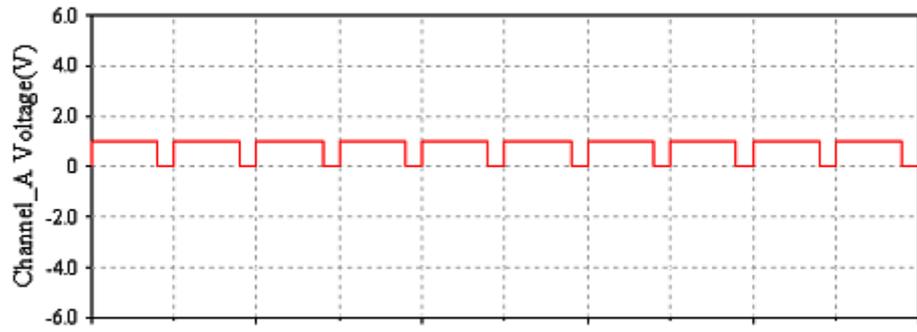


Рис. 4.18 Временные диаграммы сигнала управления и выходного напряжения понижающего преобразователя при коэффициенте заполнения импульсов $D = 0,5$

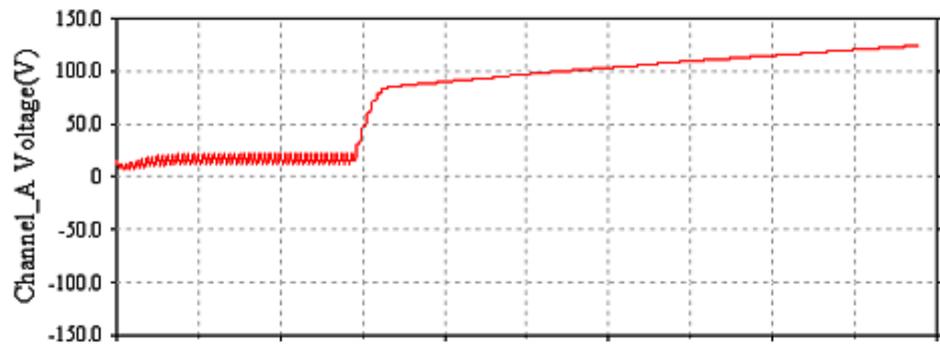
Особый интерес представляет результат, полученный при моделировании повышающего преобразователя (рис. 3.6). На диаграммах, показанных на рис. 4.19, видно, что при превышении величины коэффициента заполнения $D=\gamma=0,7$ имеет место изменение режима преобразования. Выходное напряжение его резко падает, и он становится понижающим. Данный опыт был поставлен на модели с учётом активного сопротивления обмотки дросселя r_L . В результате моделирования выявлено, что при оптимальном отношении $R_H / r_L > 3\div 5$ с увеличением коэффициента $D=\gamma$ преобразователь остается повышающим во всем диапазоне его изменения.

Диаграммы напряжений повышающего регулятора

Импульсы управления при $\gamma=0,7$



Выходное напряжение при $\gamma=0,7$



Выходное напряжение при $\gamma=0,8$

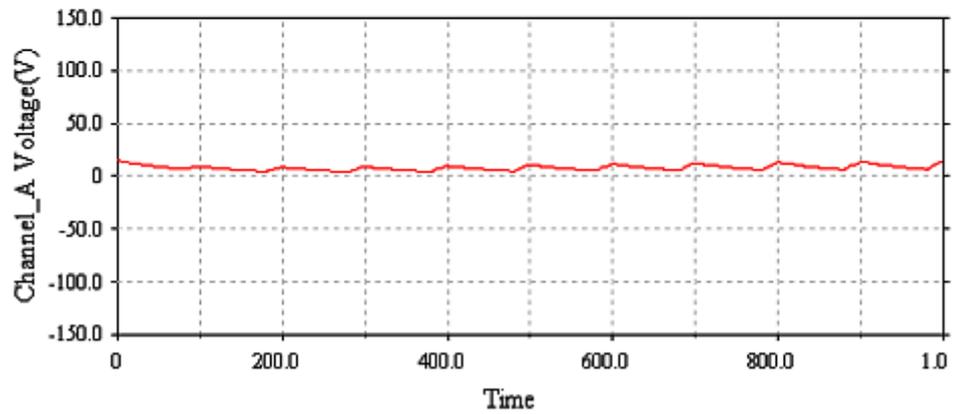


Рис. 4.19 Временные диаграммы сигнала управления и выходного напряжения повышающего преобразователя при разных значениях коэффициента заполнения импульсов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом данной диссертации являются результаты моделирования зарядных устройств фотоэлектрических станций. В работе рассмотрены и исследованы режимы и электромагнитные процессы в сетевом зарядном устройстве и импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсной модуляцией.

При моделировании сетевого зарядного устройства выявлены ограничения в применимости модели «идеального вентиля» в виртуальном моделировании вентильных преобразовательных устройств. Определено, какая модель вентиля из испытанных в работе моделей является неадекватной, условно-адекватной, а какая – полностью адекватной и оптимальной. Таким образом, выявлены принципиальные ограничения кусочно-линейного подхода к анализу нелинейных устройств и систем.

При моделировании импульсных преобразователей постоянного напряжения выяснены причины изменения режима преобразователя повышающего типа при высоком значении коэффициента заполнения широтно-модулированных импульсов. Определено оптимальное соотношение между параметрами нагрузки и активного сопротивления обмотки для увеличения диапазона изменения коэффициента заполнения.

Таким образом, все задачи, поставленные в данной работе, выполнены. Цели диссертации достигнуты.

Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе, а также при проектировании и моделировании зарядных устройств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад Президента Республики Узбекистан Ислама Каримова на заседании Кабинета Министров, посвященном итогам социально-экономического развития страны в 2012 году и важнейшим приоритетным направлениям экономической программы на 2013 год 18.01.2013 / http://www.press-service.uz/ru/#ru/news/show/dokladi/doklad_prezidenta_respubliki_uzbekist_1/
2. http://www.press-service.uz/ru/#ru/news/show/ukazyi_prezidenta/o_merakh_po_dalneyeshemu_razvitiyu_altern/
3. <http://www.solarhome.ru/biblio/pv/kuchmistr.htm>
4. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
5. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии: Учебник/ Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007.–432 с.
6. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии: Справочник-каталог. Виссарионов В.И., Белкина С.В., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. – М.: АО «Новые и возобновляемые источники энергии», 2004. – 448 с.
7. Пост С.С. Математическая модель солнечной батареи / conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/thesis_s012_s012-009.
8. Проектирование солнечной батареи / http://slavapril.narod.ru/proektirovanie_solnechnoi_batarei.html.

9. Бекиров Э.А. и др. математическая модель солнечной батареи // Строительство и техногенная безопасность, выпуск 32, 2010, с. 168-179., с. 168-179.
10. Лаврус В.С. Батарейки и аккумуляторы. – К.: Наука и техника, 1995. 48с.
11. Инструкция по эксплуатации (№ 30000-Р) стационарных свинцово-кислотных герметичных необслуживаемых в течение всего срока службы аккумуляторов Sonnenschein.— www.exide-technologies.ru
- 12.Слюсар В. Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения.-ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, № 1, с. 46-52.
- 13.Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004.-528 с.
- 14.10-Bit, 1 Giga Samples per Second (GSPS) Analog-to-Digital Converter (ADC) System TC1200. Preliminary Technical Information. – TelASIC Communications. - <http://www.telasic.com/live/products/10bit1GSPS.pdf>.
- 15.TC1410. 14-Bit, 240 MSPS Analog-to-Digital Converter. Preliminary Technical Information.- TelASIC Communications. – http://www.telasic.com/live/products/TC1410_datasheet.pdf.
- 16.TC2401. 14-Bit, 1GSPS Digital-to-Analog Converter. Preliminary Technical Information. - TelASIC Communications. – http://www.telasic.com/live/products/TC2401_datasheet.pdf. (<http://64.5.63.48/cms/>)
17. <http://www.avrdevices.ru/>
- 18.Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник - М.: Радио и связь, 1988.
- 19.www.electronicworkbench.com

20. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника.– Киев: Вища школа, 1978. – 424 с.
21. Мочалов А.И., Сапаев Х.Б. О существенных ограничениях кусочно-линейного подхода в анализе особого режима трехфазного мостового выпрямителя. Тезисы доклада. – Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики», в 2 томах. – Ташкент, ТашГТУ им. Беруни, 2011. Т1 – 246 с., с. 45–48.
22. А.И. Мочалов, А.Б. Атабаев. Сравнительное моделирование вентиляного зарядного устройства при различных аппроксимациях характеристик вентилях.–Республиканский межвузовский сборник «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук».– Ташкент: ТашХТИ, 2012, с. 309-311.
23. А.И. Мочалов, А.Б. Атабаев. Анализ особого режима зарядного устройства при многоугольной аппроксимации характеристики вентиля.– Республиканский межвузовский сборник «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук».–Ташкент: ТашХТИ, 2012, с. 311-313.