

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Алтайский государственный гуманитарно-

педагогический университет имени В.М.Шукшина»

(АГГПУ им. В.М. Шукшина)

Физико-математический факультет

Кафедра математики, физики, информатики

**Разработка лабораторных работ «Моделирование инвертора солнечной электростанции» для школьного элективного курса по физике**

Выпускная квалификационная работа

**Допустить к защите**

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_

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

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Выполнил студент

Ф-ФИ121 группы

Якушевич Сергей Андреевич  
*фамилия, имя, отчество*

\_\_\_\_\_  
*подпись*

Научный руководитель

канд.техн.наук  
*ученая степень, ученое звание*

Лопаткин Николай Николаевич  
*фамилия, имя, отчество*

\_\_\_\_\_  
*подпись*

Оценка

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

\_\_\_\_\_  
*подпись председателя ГЭК*

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Инверторы для солнечных электростанций.....	5
1.1 Виды инверторов и их особенности.....	5
1.2 Принцип работы инвертора для солнечных батарей.....	6
1.3 Подключение инвертора к солнечной электростанции.....	8
Глава 2. Программа моделирования PSIM.....	10
2.1 Назначение и функциональные возможности программы PSIM.....	10
2.2 Библиотеки основных компонентов, силовой части, схемы и системы управления.....	13
2.3 Моделирование электромагнитных процессов во временной и частотной областях.....	22
2.4 Модель солнечного модуля.....	24
2.4.1 Физическая модель.....	24
2.4.2 Функциональная модель.....	27
Глава 3. Разработка лабораторной работы для элективного курса по физике.....	29
3.1 План элективного курса «Солнечная электростанция».....	29
3.2 Место и роль лабораторных работ.....	32
3.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы «Моделирование инвертора для солнечной электростанции».....	34
3.3.1 Раздел 1 «Программа моделирования схем силовой электроники PSIM».....	34
3.3.2 Раздел 2 «Последовательное по выходу соединение трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей».....	40
3.3.3 Раздел 3 «Параллельное по выходу соединение трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей».....	45

3.3.4 Раздел 4 «Однофазный инвертор с многоуровневой широтно-импульсной модуляцией».....	50
Заключение.....	57
Список использованной литературы.....	58

## Введение

В современном мире все чаще затрагивают тему альтернативных источников электроэнергии, и с каждым годом она набирает обороты. Среди всех таких источников электроэнергии набирает популярность солнечная электростанция, ведь практически любой среднестатистический гражданин нашей необъятной страны может позволить себе иметь ее, потратившись на оборудование, затратив время на ее сборку и настройку. Установив ее на свой участок, человек получает бесплатную автономную электростанцию для обеспечения электричеством своих владений.

Неотъемлемой частью любой системы оборудования солнечной электростанции является инвертор, который, в свою очередь, служит для преобразования постоянного тока в переменный, с возможностью изменения величины напряжения[16].

Инверторы обычно представляют собой генератор периодического напряжения, по форме приближенного к синусоиде, или дискретного сигнала [9,10,11,22].

Лабораторная работа на тему «Моделирование инвертора солнечной электростанции» для школьного элективного курса по физике будет весьма занимательна для учащихся и полезна, так как каждый второй или третий из них в будущем или в настоящем сталкивается с солнечными электростанциями, а данная лабораторная работа поможет им понять, как устроен и работает инвертор, также они смогут проводить моделирование работы простейшего инвертора для системы электроснабжения.

**Целью** данной дипломной работой является разработка лабораторной работы «Моделирование инвертора солнечной электростанции» для школьного элективного курса по физике.

**Объектом исследования** выступает солнечная электростанция.

**Предметом исследования** является моделирование инвертора солнечной электростанции.

**Задачи исследования:**

1. Изучить литературу по теме исследования.
2. Изучить программу PSIM для моделирования инвертора.
3. Разработать план элективного курса «Солнечная электростанция» и методические материалы для лабораторной работы «Моделирование инвертора солнечной электростанции» для школьного элективного курса по физике.

**Методы исследования:**

1. Анализ литературы и электронные источники по теме исследования.
2. Моделирование инвертора солнечной электростанции в программе PSIM.
3. Педагогическое наблюдение, самоанализ уроков, экспертная оценка.

## Глава 1 Инверторы для солнечных электростанций

### 1.1 Виды инверторов и их особенности

Устройство для преобразования постоянного тока от солнечной батареи в переменный на 220 В называется инвертором. На инвертор поступает ток не только от солнечной батареи, но и от аккумулятора. Во время сумерек, при затенение солнечных элементов, а так же при большой мощности потребителя основным источником постоянного напряжения являются аккумуляторы [7,12,26].

Существует два вида инверторов для солнечной установки.

Инвертор работающий на сеть переменного тока, подключается между батареей солнечной установки на фотоэлементах и к сети 220 В переменного тока. Сетевые инверторы дают возможность работы отдельных бытовых приборов, которые подключены напрямую к инвертору в дневное время суток, то есть сетевые инверторы применяются только днем.

Автономные преобразователи используются в паре с аккумуляторными батареями при применении их в работе с солнечными батареями. В такой схеме инвертор используется для изменения постоянного тока аккумулятора 12 В преобразуя его в 220В, который в свою очередь получает заряд от солнечных батарей. Такие модели используются в источниках бесперебойного снабжения питанием. Таким образом, создается независимость потребления энергии от непостоянной работы энергоснабжающей системы [2,3,5,17,18].

Сигнал выходного напряжения переменного тока является основной функциональной характеристикой инвертора[15,19,20]. Выходной сигнал может иметь следующий вид:

- 1) синусоидальный;
- 2) квазисинусоидальный;

Инвертор первого вида с чисто синусоидальной формой напряжения – самый простой и оптимальный вариант с точки зрения использования, так как он создает синусоиду тока идеальной формы. Она по качеству формы выше, чем в обычной домашней сети питания. Свойства такого тока надежно предохраняют электроприборы от неисправностей, потому что приборы сильно чувствительны к нестабильному напряжению. Такие инверторы для солнечных электростанций имеют высокую стоимость и большие габариты, что в свою очередь делает их не очень удобными в плане размещения.

«Квазисинусоида» тока, получаемая инверторами второго типа, только имитирует настоящий синус, так как имеет форму треугольника или прямоугольника или, зачастую, форму трапеции [23,24,25]. Инверторы такого типа более распространены из-за их недорогой цены и из-за меньших габаритов, нежели у первого типа инверторов. Их единственным недостатком является то, что к нему нежелательно подключать электроприборы с повышенной чувствительностью к скачкам напряжения сети [13,14].

## **1.2 Принцип работы инвертора для солнечных батарей**

Работающая от солнца солнечная электростанция состоит из батареи или батарей солнечных элементов, инвертора (преобразователя напряжения), зарядного контроллера и батареи аккумуляторов или аккумулятора.

Для того чтобы солнечная электростанция работала постоянно с нормальными параметрами, все ее части нужно подобрать, учитывая технические данные каждого устройства. Такие требования тоже относятся и к инвертору, который прежде всего работает вместе с солнечными элементами [27,29].

Солнечные фотоэлементы образуют напряжения нескольких величин: 12, 24, 48 вольт постоянного тока. Электроприборы нельзя сразу подключать напрямую к солнечным батареям, так как эти приборы рассчитаны на переменное напряжение в 220 вольт [4,27,29]. Поэтому в этой системе и

используется инвертор, именно для преобразования вырабатываемой энергии солнечных батарей в обычный вид питания, подходящий для бытовых домашних электроприборов. Это основное назначение инвертора в системе солнечной электростанции [19]. Схема солнечной электростанции показана на рис. 1.

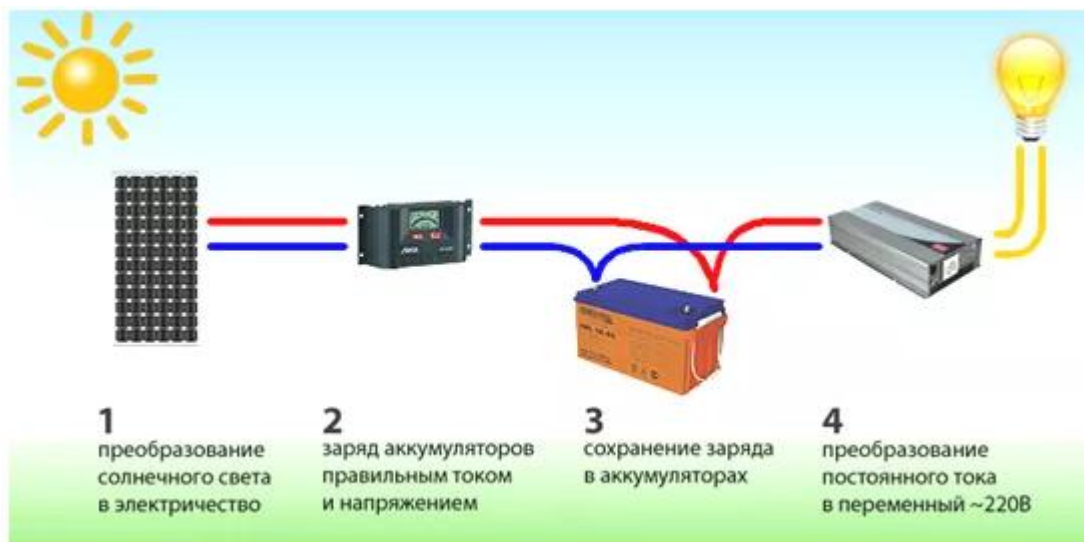


Рис.1. Схема солнечной электростанции

При выборе инвертора для солнечной электростанции нужно внимательно отнестись к некоторым свойствам устройств: потребление энергии вхолостую, рабочий интервал температур, вес, коэффициент полезного действия, максимальная и номинальная мощность[28].

Также нужно иметь ввиду, что мощность инвертора должна соотноситься с напряжением выхода батарей аккумуляторов и солнечной батареи [24]. Зависимость мощности выражается следующим образом: 12 вольт- менее 600 ватт, 24 вольта- 600-1500 ватт, 48 вольт –выше 1,5 кВт [9,10].

При покупке и эксплуатации инвертора также следует обращать внимание на наличие системы защиты от аварийных режимов, таких как короткое замыкание, выходная перегрузка, чрезмерно высокое или слишком низкое напряжение, перегрев.



Технические свойства инвертора можно определить по внешнему виду и массе прибора: 1 килограмм веса устройства соответствует мощности 100 ватт. Замена громоздкого и тяжелого трансформатора сетевой частоты 50 Гц на трансформатор повышенной частоты улучшает массогабаритные показатели инвертора при сохранении функции гальванической изоляции нагрузки от сети. Достаточно широкий интервал рабочих температур, в котором прибор работоспособен, характеризует его высокие потребительские качества.

При расчете всей схемы инвертора для солнечной электростанции следует учесть, что должна быть обеспечена выходная мощность, достаточная для одновременного питания всех вместе взятых электроприборов, которые будут подключены к энергоустановке [8,20,25]. Но нельзя забывать, что при запуске ток любого устройства превосходит номинальное значение. Сверхток возникает на несколько секунд, затем устройство работает в нормальном режиме. При выборе инвертора нужно сделать запас по мощности, именно, мощность инвертора должна превышать номинальное значение в полтора раза [13, 14].

### **1.3 Подключение инвертора к солнечной электростанции**

При подключении инвертора к солнечной электростанции нужно знать, что кабель постоянного тока должен иметь сечение, достаточное для передачи силы тока, соответствующей расчетной мощности установки. Кабель не должен быть намного длиннее, чем это нужно.

При значительной отдаленности солнечных элементов от устройств, которые потребляют получаемую энергию, наращивают кабель переменного тока на 220 вольт, а инвертор располагается возле батареи фотоэлементов. Длина кабеля от инвертора до солнечной батареи не должна быть больше трех метров.

Создаются специальные требования к мощному преобразователю, более 500 Вт. Кабель должен иметь хороший, качественный жесткий контакт на местах соединения с устройствами и клеммами аккумуляторов. При некачественном контакте возникает искрение, которое, в свою очередь, вызывает перегрев и может вызвать пожар. Применяя автономные преобразователи в системах бесперебойного питания, нужно монтировать автоматические выключатели в цепь постоянного тока для удобства и безопасности. Также рекомендуется при формировании требуемой формы сигнала выходного напряжения преобразователя учитывать возможности разных способов соединения солнечных батарей [13,14].

Бытовые устройства нормально функционируют от сети переменного тока при модифицированной форме синуса выходного сигнала. Но есть и устройства, которые требуют для работы переменный ток с чистым синусом, во избежание возникновения неисправностей. К таким потребителям можно отнести автоматику котлов, работающих на газе, насосы циркуляции с непрерывным циклом работы и так далее [29].

Также нельзя подключать к переменному току, получаемому от инверторов с квазисинусоидным током, аудио и видеоаппаратуру с высокочувствительными системами и т.п [28].

## Глава 2 Программа моделирования PSIM

### 2.1 Назначение и функциональные возможности программы PSIM

PSIM – это программа моделирования силовых преобразовательных устройств.

Одним из применений программ схемотехнического моделирования является анализ мощных преобразовательных устройств. При наличии достоверных моделей активных и пассивных элементов провести анализ электрических режимов подобных схем можно с достаточной степенью точности.

Программа PSIM специально разработана для моделирования схем силовой электроники и систем управления.

Обладая быстрым моделированием и дружественным интерфейсом, PSIM обеспечивает мощный инструмент для моделирования схем силовой электроники, аналогового и цифрового управления.

Она позволяет соединить на одной схеме источники сигнала, готовые преобразователи, силовые транзисторы, нагрузки (включая различные типы двигателей и механических нагрузок), схемы управления и контуры обратной связи, а также средства измерения. Она может быть использована для разработки и анализа широкого спектра силовых преобразователей и управляющих систем, таких как импульсные источники питания, управляемые выпрямители, однофазные, мостовые и трехфазные инверторы, источники бесперебойного питания, зарядные устройства, корректоры коэффициента мощности, активные фильтры, компенсаторы реактивной мощности, схемы частотного управления приводами.

Базовый пакет PSIM включает 3 программы:

1. PSIM Schematic – графический редактор схем с библиотекой стандартных компонентов и математических функций, позволяющий редактировать существующие модели и разрабатывать свои;

2. PSIM solver – «ядро» пакета, использующее алгоритмы моделирования, оптимизированные для импульсных систем и позволяющие минимизировать проблемы сходимости;

3. SIMVIEW Results Display – модуль, отвечающий за построение графиков, выполнение арифметических операций над выводимыми параметрами, нахождение средних, среднеарифметических, максимальных и минимальных значений [1].

PSIM представляет собой обычную программу для системы Windows (Рис.2). Она состоит из главного окна программы и нескольких дополнительных окон, которые могут появляться на экране по мере необходимости.

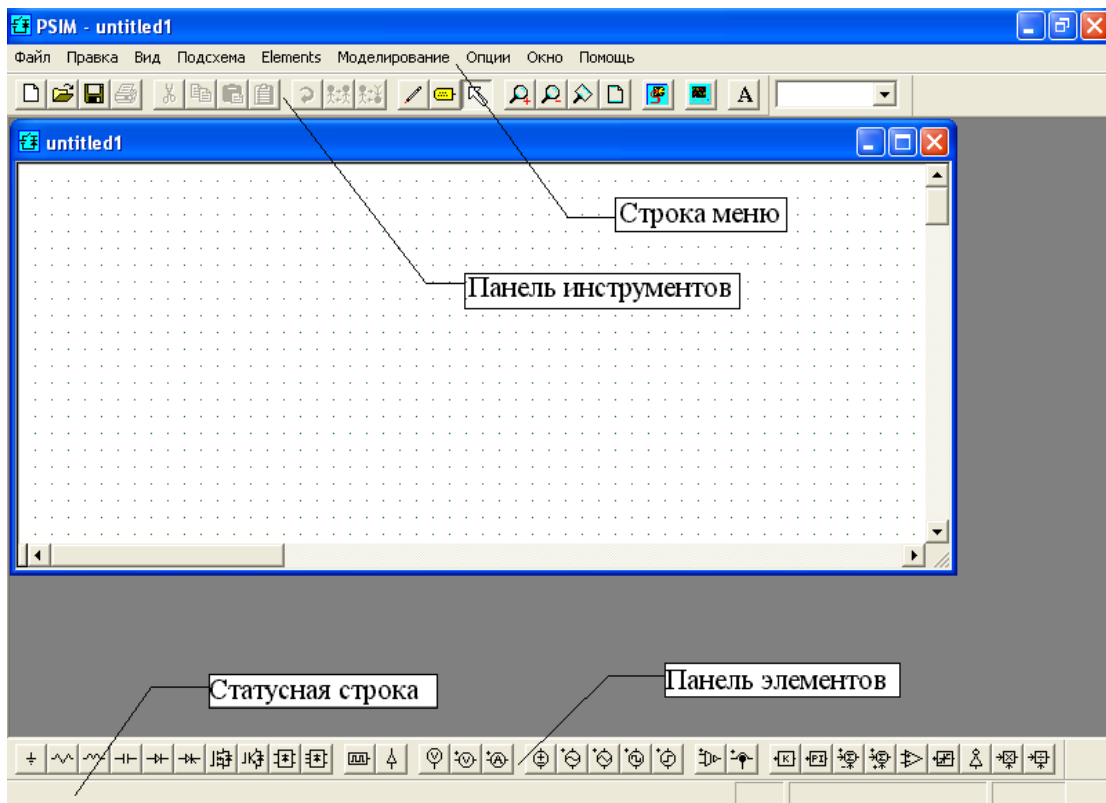


Рис.2

В верхней части главного окна находится строка меню, из которого можно вызвать большинство команд программы. Ниже находится панель инструментов, на которой помещены объекты управления, чаще всего

необходимые при работе. В нижней части программы находится панель элементов наиболее часто используемых при создании схем.

Основную часть окна занимает вид на документ, с которым вы работаете. В самом низу окна находится статусная строка, на которой появляются сообщения, показывающие состояние программы и некоторую другую информацию. Программа снабжена контекстно-зависимой подсказкой, так что при необходимости получить информацию о программе или о назначении того или иного объекта на экране можно нажать кнопку F1 или кнопку “помощь”, предварительно выделив интересующий элемент. Также подсказку имеет каждая кнопка панели инструментов и каждый элемент панели элементов, которая отображается в строке состояния, при наведении курсора на ту или иную кнопку.

На Рис.3 изображена панель инструментов программы, которая содержит несколько кнопок, исполняющих наиболее часто используемые функции.

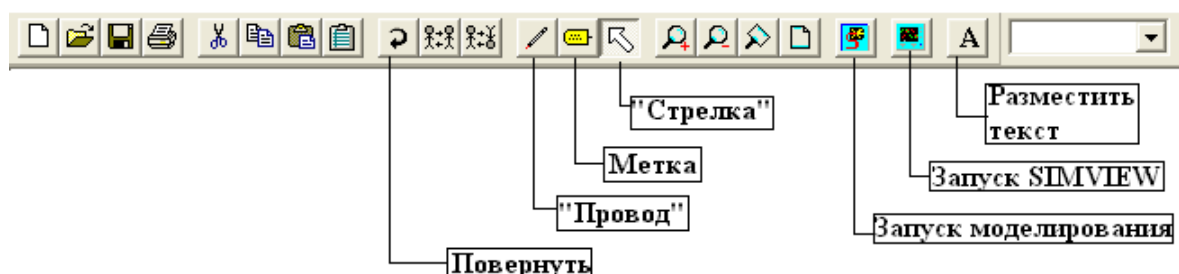


Рис.3.

## 2.2 Библиотеки основных компонентов силовой части схемы и системы управления

Программа PSIM Schematic содержит библиотеки символов широкого класса компонентов и готовых блоков, необходимых для разработки электронных устройств. Ниже мы рассмотрим только те библиотеки,

которые используются при анализе, синтезе и расчете систем инверторов напряжения. Все библиотеки расположены в меню Elements.

Элементы меню Elements обеспечивает моделирование широкого спектра энергетических систем и устройств — начиная с анализа простейших электрических цепей и кончая моделированием сложных преобразовательных устройств и даже целых электрических систем. Меню Elements представляет собой набор библиотек различных блоков (рис.4).

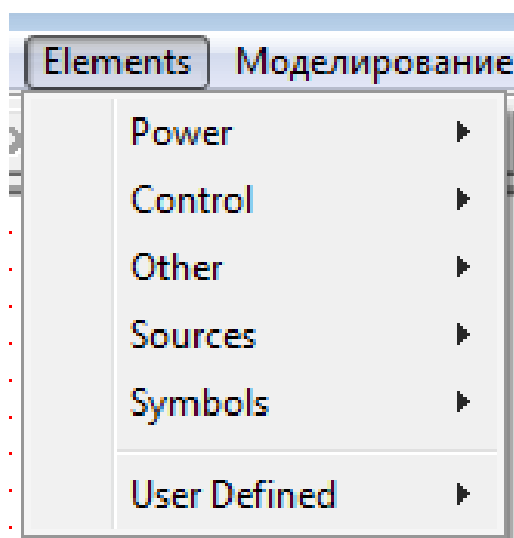


Рис.4 Меню Elements.

Sources (источники электроэнергии), данная библиотека содержит источники постоянного и переменного напряжения и тока, и источники разных сигналов для исследования электрических цепей, например, источник пилообразных сигналов (Triangular-waveVoltageSource) (Рис 5)

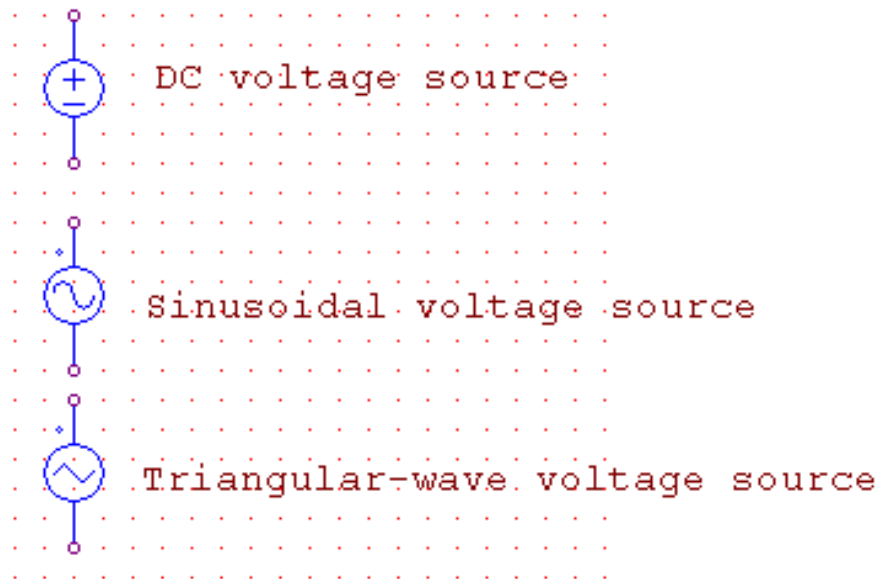


Рис.5. Библиотека sources.

В полях окна настройки параметров источника (SinusoidalVoltageSource) устанавливаются значения напряжения (PeakAmplitude), начальной фазы (PhaseAngle) и частоты (Frequency) (Рис.6), а для источника постоянного напряжения (DCVoltageSource) устанавливается значение только напряжения (Рис.7).

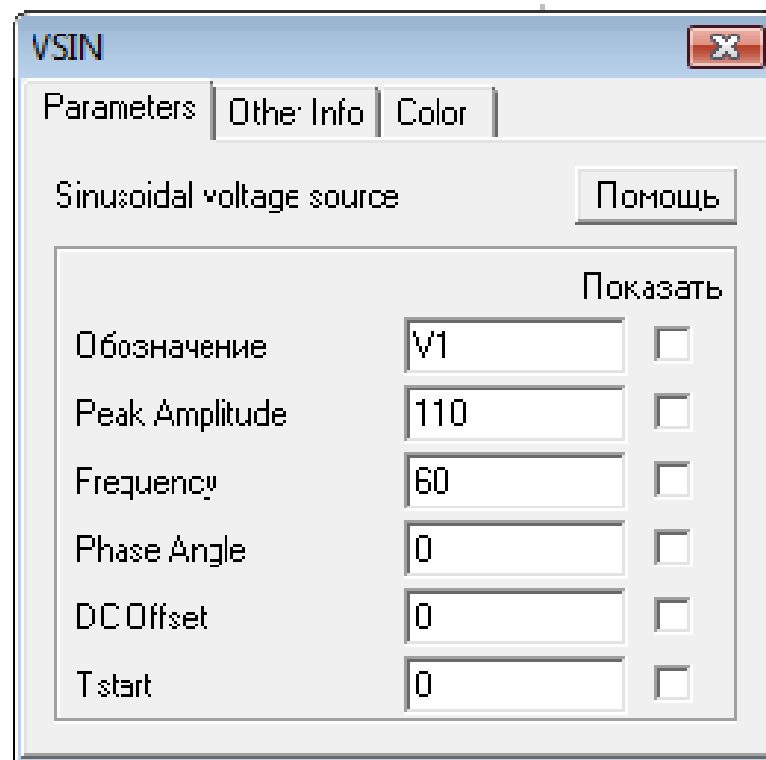


Рис.6 Блок SinusoidalVoltageSource и его окно настройки.

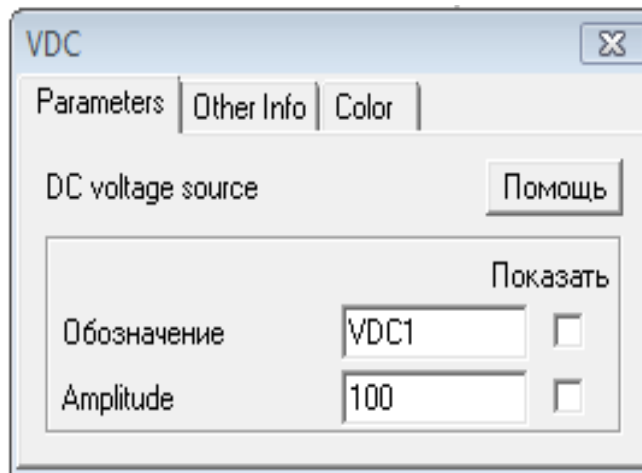
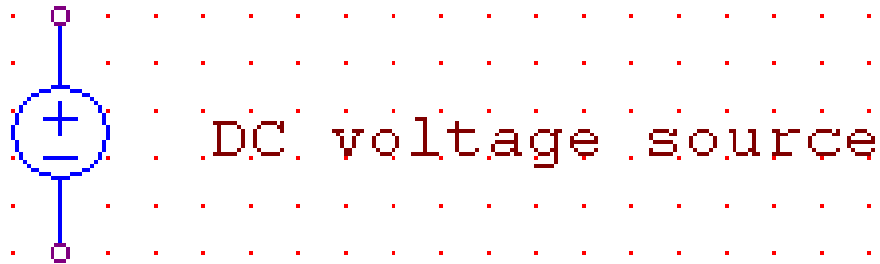


Рис.7.Блок DCVoltageSource и его окно настройки.

Источники из этой библиотеки позволяют связать структурные или функциональные схемы основных библиотек Powersim. В окне настройки блоков присутствует кнопка Help, позволяющая объяснить назначение каждого из параметров соответствующего блока.

На рис.8 представлен состав библиотеки пассивных компонентов Library Power RLC Branches Elements:

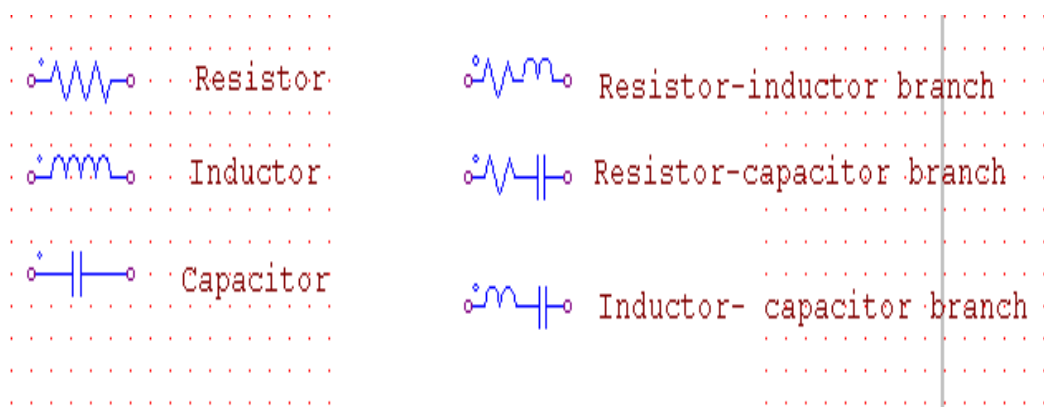


Рис.8 Элементы библиотеки пассивных компонентов.



1. Резистор (Resistor), катушка индуктивности (Inductor), конденсатор (Capacitor), реостат (Rheostat), параметры задаются в следующих единицах: Ом, Генри, Фарад;

2. Последовательно соединенные резистор и индуктивность (RL), резистор и конденсатор (RC), индуктивность и конденсатор (LC) (могут быть также заданы значения активной, реактивной индуктивной, либо реактивной емкостной мощностей (RLCLoad). Такое задание нагрузки иногда очень удобно при исследовании работы силовых полупроводниковых преобразователей.

На рис.9 в качестве примера показан блок последовательно соединенных резистора, катушки индуктивности (Resistor-inductorbranch) и его окно настройки. В окне задаются параметры - сопротивление (resistance), индуктивность (inductance), и начальные значения силы тока для индуктивности (initialcurrent).

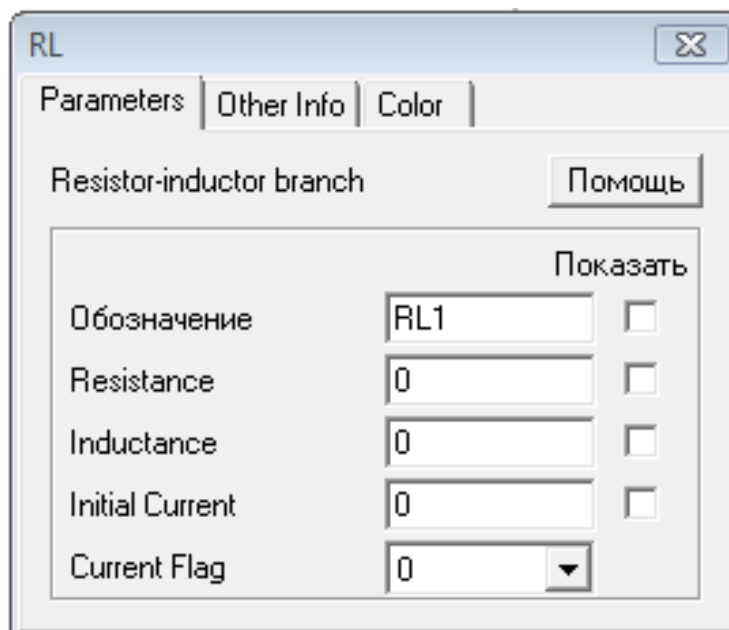
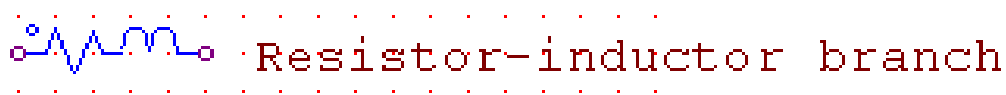


Рис.9. Блок Resistor-inductor branch и окно его настройки.

PowerSwitchesElectronics (библиотека силовых ключей полупроводниковых преобразователей), эта библиотека (Рис.10) содержит одиннадцать типов одиночных силовых элементов и модели различных полупроводниковых преобразователей, представленных разными универсальными блоками (1,3-phasediodebridge, 1,3-phasethyristorbridge).

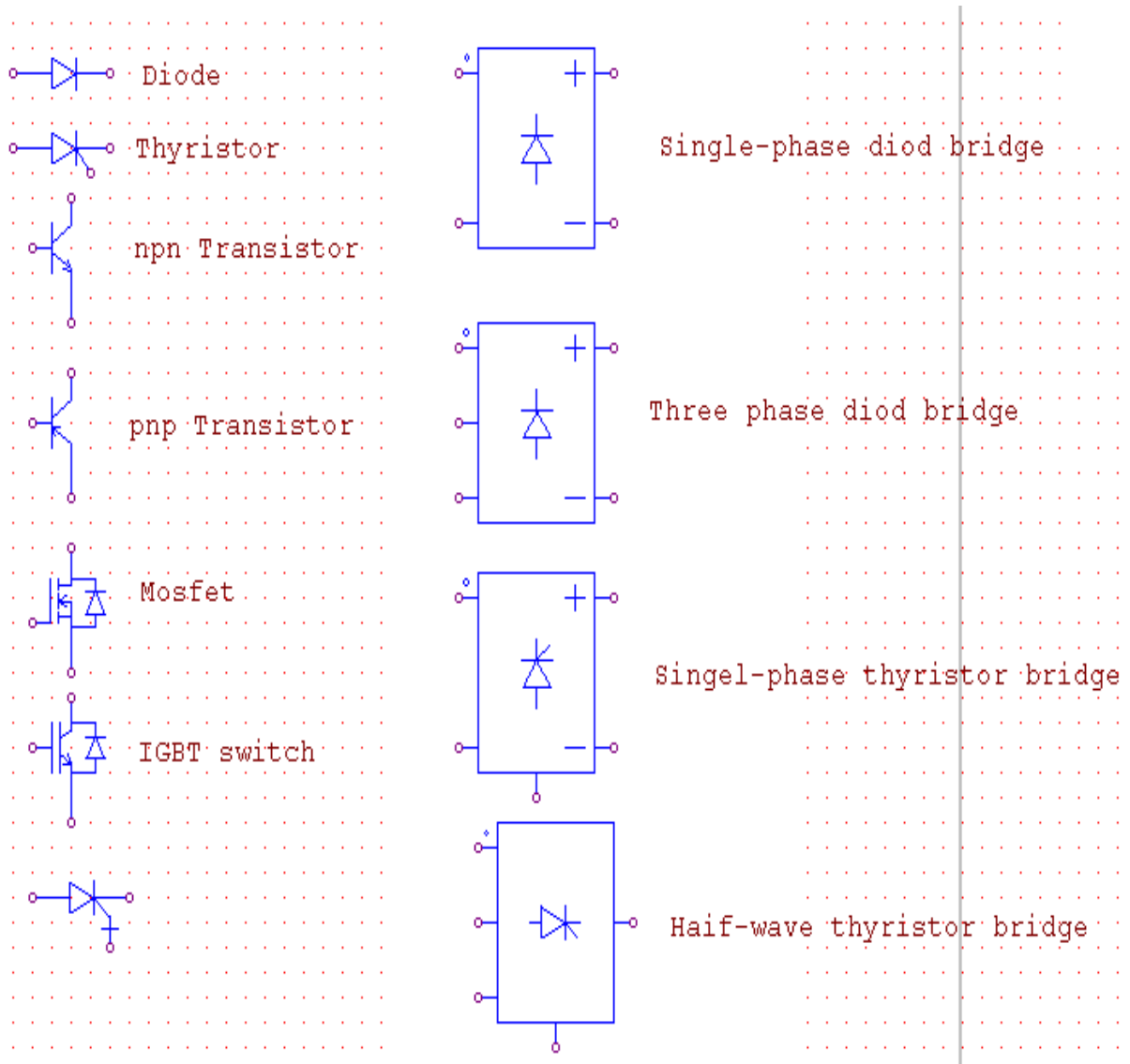


Рис.10 .Библиотека Power Switches Electronics.

Рассмотрим блок (Diode) и его окно настройки (рис.11). В полях настройки задаются:

- падение напряжения (поле Diodevoltage drop), диодное падение напряжения в проводящем состоянии обычно задается от 0,6 до 0,7 В, оно может быть выше для диодов высокой мощности;

- начальное положение (позиция) (поле InitialPosition), в поле выбирается значение (0: открыт или 1: закрыт);

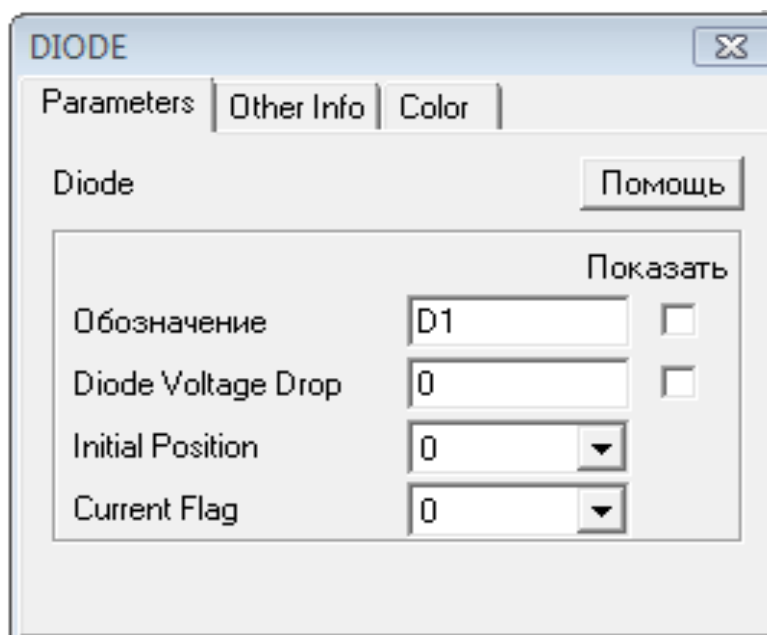
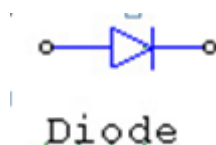


Рис.11.Блок UniversalBridge и его окно настройки.

Библиотека Sensor (Библиотека дополнительных блоков измерения) показана на рис 12. Библиотека содержит датчики напряжения и тока. Датчик тока имеет внутреннее сопротивление 0,01 Ом.

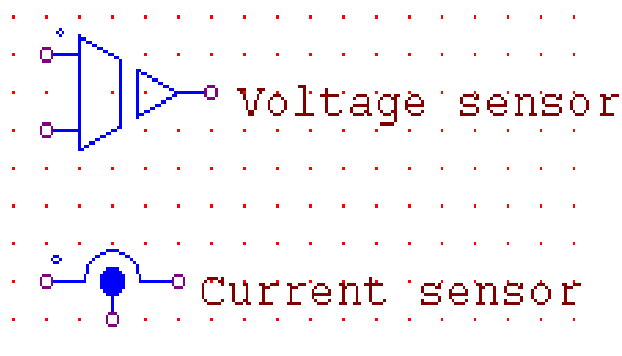
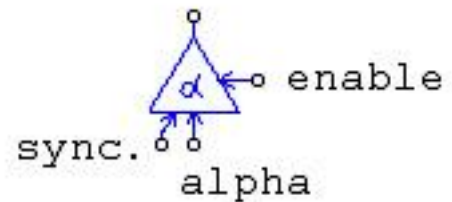


Рис.12. Библиотека Sensor.

Библиотека Switchcontrollers(Блоки для управления силовыми полупроводниковыми структурами) показана на рис.13. Она содержит три блока для управления силовыми полупроводниками. Первый блок On-offswitchcontroller, на его вход подается логический сигнал (0 или 1) от блока управления, если подан уровень сигнала 1, то например, транзистор откроется, а если 0, то закроется. On-offswitchcontroller работает, как реле.

Второй блок Delayanglealphacontroller используется для управления углом задержки тиристоров. Данный блок имеет три входа:

- alpha, задается в градусах;
- sync., сигнал синхронизации;
- enable, включить или выключить сигнал



Третий блок PWMpatterncontroller предназначен для управления инвертором синусоидальной широтно-импульсной модуляцией.

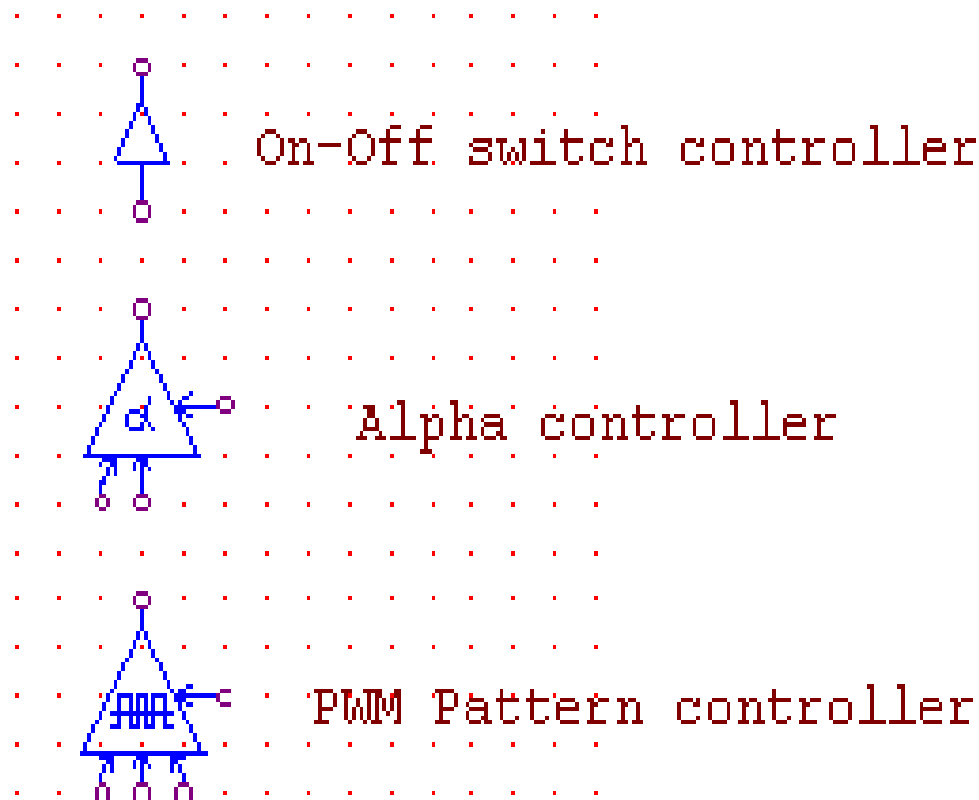


Рис.13. Библиотека Switchcontrollers.

Библиотека ProbesBlocks (блоки измерения мгновенных значений) содержит блоки измерения мгновенных значений, показанные на рис.14.

В данной библиотеке содержатся вольтметры и амперметры для измерения постоянного и переменного тока и напряжения. Также имеется два блока Voltageprobe и Currentprobe, первый предназначен для измерения напряжения между узлом и землей, второй предназначен для измерения силы тока ветви, результаты этих измерений сохраняются в файл. С помощью данных, хранящихся в файлах, можно построить графики напряжения и тока.

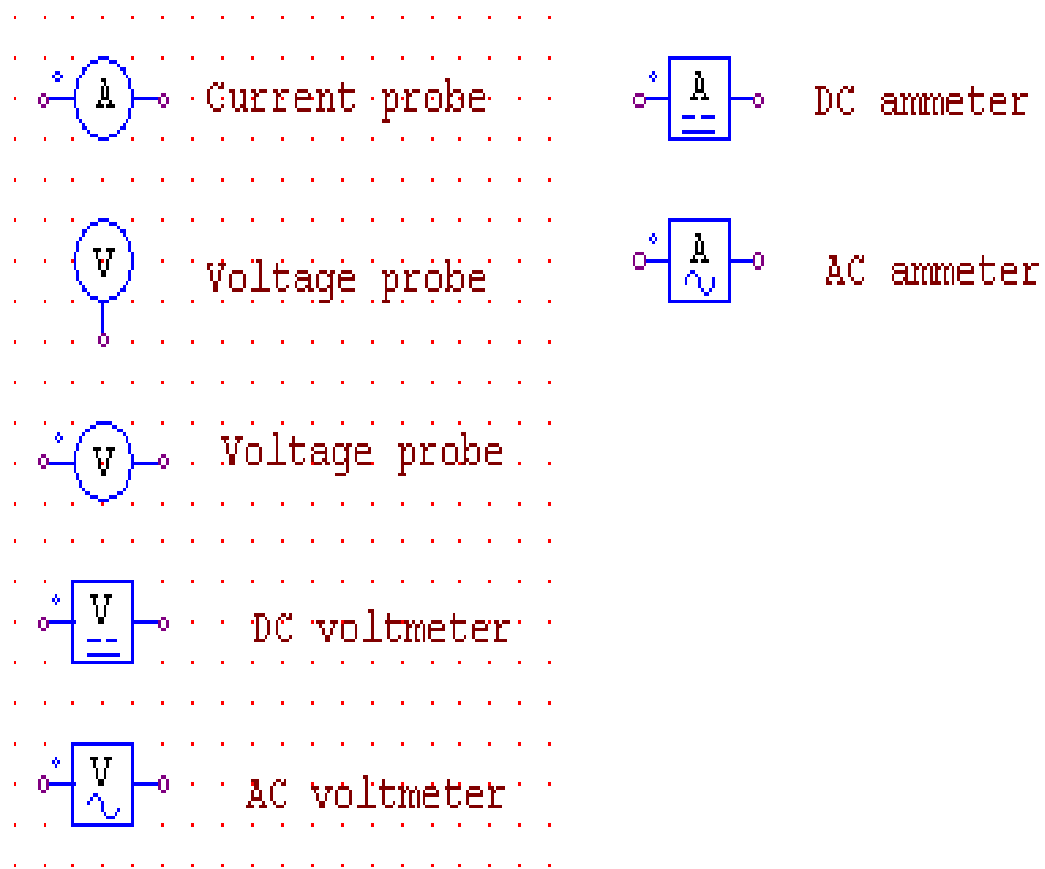


Рис.14. Библиотека Probes.

Библиотека ControlBlocks (Блоки управления) содержит блоки, предназначенные для управления дискретными системами. Кроме того, эта библиотека содержит цифровые фильтры высоких частот, полосовые фильтры, фильтр низких частот. Также в эту библиотеку входят логические элементы, вычислительные блоки (вычисление синуса, косинуса, интеграла,

логарифма и другие) (рис. 15). Блок TotalHarmonicDistortion измеряет коэффициент гармоник.

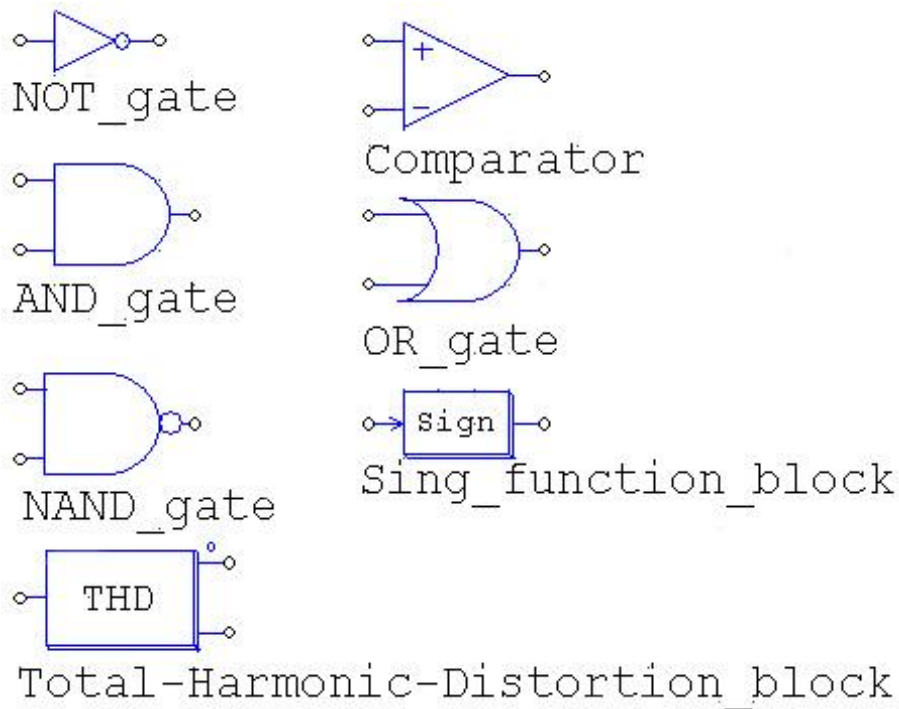


Рис.15. Библиотека ControlBlocks

### 2.3 Моделирование электромагнитных процессов во временной и частотных областях

SIMVIEW - это программа для отображения формы сигнала PSIM и ее последующей обработки. Ниже, на рис.16, показано моделирование сигналов в среде SIMVIEW.

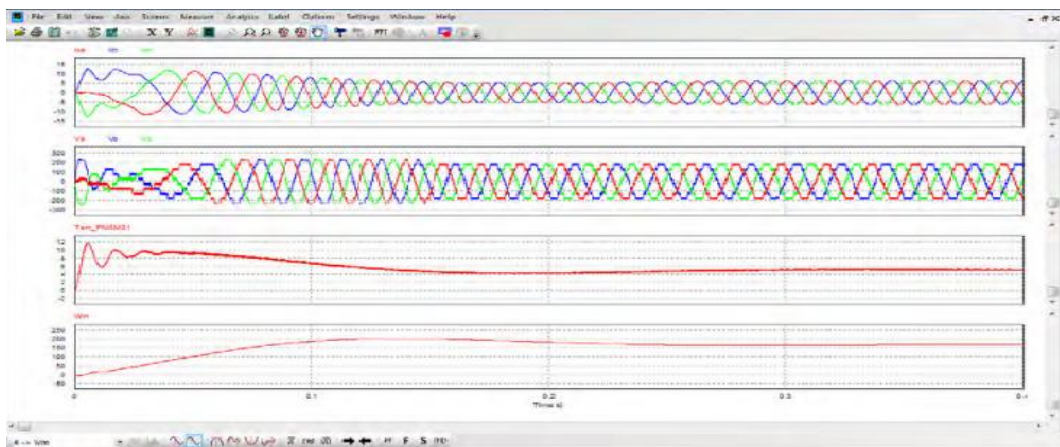


Рис.16.

SIMVIEW считывает данные в текстовом формате ASCII или в бинарном формате SIMVIEW. Ниже приведен пример

Текстовый файл данных на рис.17.

Time	Isa	Isc	Isb	Tem_IM
5.000000000E-006	0.000000000E+000	0.000000000E+000	0.000000000E+000	7.145888260E-048
1.000000000E-005	0.000000000E+000	0.000000000E+000	0.000000000E+000	1.082981714E-046
1.500000000E-005	0.000000000E+000	0.000000000E+000	0.000000000E+000	5.408644357E-046
2.000000000E-005	1.139566166E-001	-2.279132474E-001	1.139566166E-001	1.613605209E-017
2.500000000E-005	5.072914178E-001	-1.014582858E+000	5.072914178E-001	3.598226665E-015
...	...	...	...	...

Рис.17.

Пример спектрограммы напряжения показан на рис. 18.

Как во временном так и в частотном окнах имеется возможность установки пределов выводимых графиков и шага сетки, и, самое главное, нахождения максимумов соответствующих сигналов. Во временной области также можно оценить величины среднего и действующего значения сигнала.

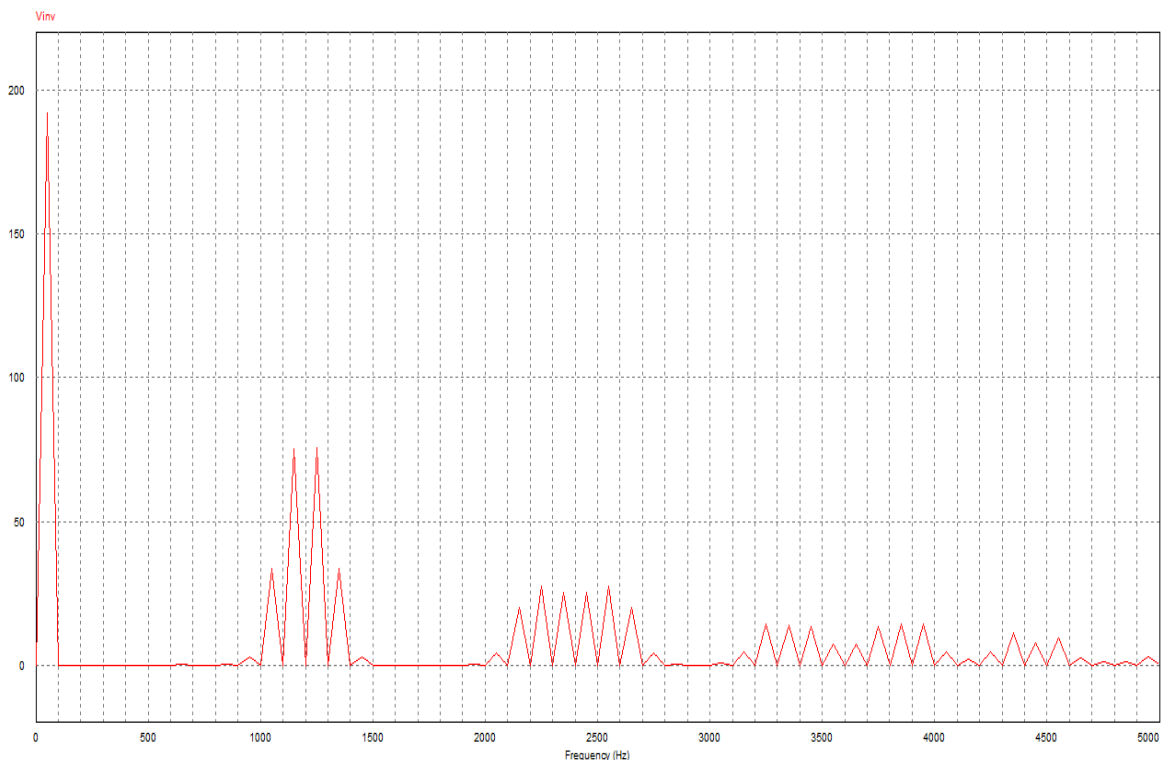


Рис.18.

## 2.4 Модель солнечного модуля

Модели солнечных панелей являются дополнением к программному обеспечению PSIM. Они позволяют пользователям моделировать системы в приложениях с солнечными элементами.

Включены следующие элементы: «Солнечная батарея (физическая модель)», «Солнечная батарея (функциональная модель)»

### 2.4.1 Физическая модель

Вид физической модели солнечного модуля показан на рис. 19.

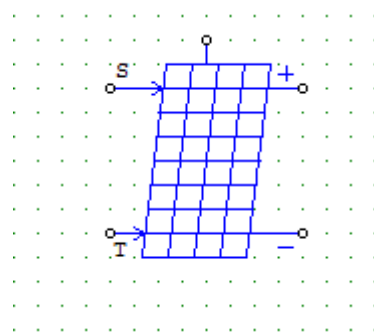


Рис.19 (физическая модель)

Параметры физической модели:

1. Количество ячеек  $N_s$ . Число ячеек задается пользователем для солнечного модуля. Солнечный модуль состоит из соединенных последовательно  $N_s$  солнечных элементов.

2. Стандартная интенсивность света  $S_0$ .

Интенсивность света  $S_0$  при стандартных условиях испытания, Вт / м<sup>2</sup>. Значение обычно составляет 1000 Вт/м<sup>2</sup>, приводится в техническом описании производителя.

3. Заданная температура  $T_{ref}$ . Температура  $T_{ref}$  при стандартных условиях испытаний, в °С.



4. Последовательное сопротивление  $R_s$ . Заданное сопротивление  $R_s$  каждого солнечного элемента, в Ом.
5. Параллельное сопротивление  $R_{sh}$ . Параллельное сопротивление  $R_{sh}$  каждого солнечного элемента, в Ом.
6. Ток короткого замыкания  $I_{sc0}$ . Ток короткого замыкания  $I_{sc0}$  каждого солнечного элемента при заданной температуре  $T_{ref}$ , в А.
7. Ток насыщения  $I_{s0}$ . Ток насыщения диода  $I_{s0}$  каждого солнечного элемента при заданной температуре  $T_{ref}$ , в А.
8. Ширина запрещенной зоны  $E_g$ . Ширина запрещенной зоны каждого солнечного элемента, в эВ - это около 1,12 для кристаллического кремния и около 1,75 для аморфного кремния.
9. Коэффициент идеальности  $A$ . Коэффициент идеальности  $A$  каждого солнечного элемента, также называемый коэффициентом эмиссии. Это около 2 для кристаллического кремния, и меньше 2 для аморфного кремния.
10. Температурный коэффициент  $C_t$ . Температурный коэффициент  $C_t$ , в А/С или А/К.
11. Коэффициент  $K_s$ . Коэффициент  $K_s$ , который определяет, как интенсивность света влияет на температуру солнечных элементов.

На изображении (рис.15) узлы с знаками «+» и «-» являются положительными и отрицательными выводами. Узел с буквой «S» относится к входу интенсивности света (в Вт / м<sup>2</sup>), а узел с буквой «T» относится к входному сигналу температуры окружающей среды (в °С). Узел сверху - теоретическая максимальная мощность, дающая рабочие условия. В то время как положительные и отрицательные конечные узлы являются узлами силовой цепи, остальные узлы являются узлами схемы управления.

Уравнения, описывающие физическую модель солнечного элемента:

$$\begin{aligned}
 i &= i_{ph} - i_d - i_r \\
 i_{ph} &= I_{sc0} \cdot \frac{S}{S_0} + C_t \cdot (T - T_{ref}) \\
 i_d &= I_0 \cdot (e^{\frac{qV_d}{AKT}} - 1) \\
 I_0 &= I_{s0} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \\
 i_r &= \frac{V_d}{R_{sh}} \\
 T &= T_a + k_s \cdot S
 \end{aligned}$$

здесь  $q$  - заряд электрона ( $q = 1,6 \times 10^{-19}$ );  $K$  - постоянная Больцмана ( $k = 1,3806505 \cdot 10^{-23}$ );  $S$  - вход интенсивности света;  $T_a$  - вход температуры окружающей среды;  $V_d = v / N_s + i \cdot R_s$ ,  $v$  - конечное напряжение на солнечном модуле;  $i$  - ток, текущий из положительной клеммы солнечного модуля.

Чтобы упростить пользователям определение параметров для конкретного солнечного модуля, в меню «Утилита» PSIM предоставляется утилита «Солнечный модуль» (физическая модель). Подробное объяснение того, как использовать этот инструмент, можно найти в документе «Учебник - Модуль солнечной батареи (физическая модель) .pdf» в папке учебника.

#### 2.4.2 Функциональная модель

Вид функциональной модели солнечного модуля показан на рис. 20.

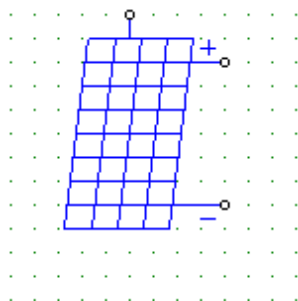


Рис.20

Параметры физического модуля:

1. Напряжение холостого хода  $V_{oc}$ . Напряжение, измеренное, когда контакты солнечных элементов разомкнуты, в В.
2. Ток короткого замыкания  $I_{sc}$ . Ток, измеренный при коротком замыкании контактов солнечных элементов, в А.
3. Максимальное напряжение питания  $V_m$ . Напряжение на клеммах солнечных батарей, когда выходная мощность находится на максимуме, в В.
4. Максимальный ток питания  $I_m$ . Ток клеммы солнечной батареи, когда выходная мощность максимальна, в А.

На изображении (рис.17) узлы с символами «+» и «-» являются положительными и отрицательными терминалами. Узел наверху предназначен для теоретической максимальной мощности, дающей рабочие условия. Хотя положительные и отрицательные конечные узлы являются узлами цепи питания, максимальный выходной узел является узлом цепи управления.

Используя четыре входных параметра, функциональная модель создаст  $i-v$  кривую солнечного элемента. На приведенном ниже рисунке (рис.21) показана кривая  $i-v$  типичного солнечного элемента. Ось  $x$  - это напряжение. Верхний график - это выходной ток, а нижний - выходная мощность.

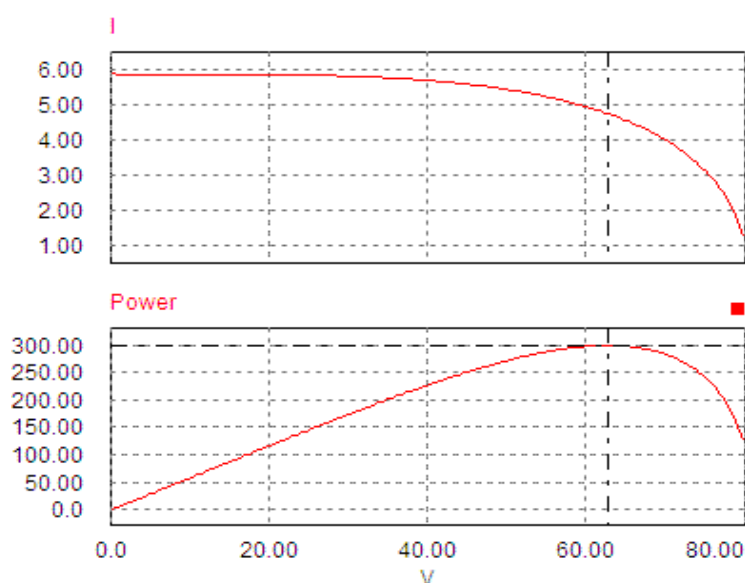


Рис.21

Кривая показывает, что выходная мощность солнечного элемента достигает максимума при определенном уровне напряжения. В литературе было предложено множество схем управления для отслеживания этой максимальной точки питания (так называемое отслеживание максимальной точки мощности или МРРТ), так что выходная мощность солнечного элемента максимальна.

## **Глава 3. Разработка лабораторной работы для элективного курса по физике**

### **3.1 План элективного курса «Солнечная электростанция»**

#### Пояснительная записка

План элективного курса «Солнечная электростанция» в объеме 18 часов рассчитан на возрастную категорию учащихся 10, 11 классов. Элективный курс включает в себя теоретическую часть, которая состоит из 10 часов и практическую, рассчитанную на 8 часов. Количество часов в неделю, отведенное элективному курсу, составляет 2 часа.

#### **Цели элективного курса:**

1. Вызвать интерес к альтернативным источникам электроэнергии.
2. Дать представление о том, как устроена солнечная электростанция, и о принципах ее работы.
3. Рассказать учащимся, что такое инвертор, как он устроен и какое место он занимает в системе солнечной электростанции.
4. Познакомить с программой PSIM для моделирования схем силовой электроники.

#### Средства обучения

Для проведения элективного курса «Солнечная электростанция» используются следующие средства обучения:

1. Методические материалы, включая методическое пособие по выполнению лабораторной работы по моделированию инвертора в программе PSIM.
2. Компьютерная модель инвертора, питаемого от солнечных модулей, разработанная в программе PSIM.

## Содержание элективного курса

### Теоретическая часть

#### 1. Общая структура солнечной электростанции.

Дается общее понятие о работе солнечной электростанции, для чего она служит, как устроенная.

#### 2. Принцип работы солнечного элемента.

Из чего состоит солнечный элемент, виды солнечных элементов и их принцип работы.

#### 3. Принцип организации солнечного модуля (солнечной панели).

В этой теме оговаривается, как выбирается схема соединения отдельных элементов в зависимости от их характеристик, требований нагрузки и условия эксплуатации солнечного модуля. Принцип отбора максимальной мощности.

#### 4. Инверторы солнечных электростанций.

Описаны виды инверторов (различные схемотехнические решения) для солнечных электростанций. Основные параметры, устройство, работа автономных и сетевых инверторов.

#### 5. Устройство инвертора на мостовых ячейках.

Показан принцип формирования выходного напряжения инвертора на современной элементной базе (силовые транзисторы), включая формирование многоуровневого однофазного напряжения.

### Лабораторный практикум

Разработана лабораторная работа «Моделирование инвертора солнечной электростанции». Моделирование силовой схемы инвертора

производится в программе PSIM для моделирования схем силовой электроники.

Лабораторная работа разбита на 4 части по 2 часа.

1. Программа моделирования схем силовой электроники PSIM.
2. Последовательное по выходу соединение трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей.
3. Параллельное по выходу соединение трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей.
4. Формирование многоуровневого выходного переменного напряжения путем сочетания амплитудной модуляции и широтно-импульсной модуляции.

Таблица 1.

Календарно- тематическое планирование

№	Тема курса	Кол- во часов	Вид контроля	Дата план	Дата факт
1	Общая структура солнечной электростанции.	1			
2		1			
3	Принцип работы солнечного элемента	1			
4		1			
5	Принцип организации солнечного модуля.	1			
6		1			

7	Инверторы солнечных электростанций.	1			
8		1			
9	Устройство инвертора на мостовых ячейках.	1			
10		1			
11	Программа моделирования схем силовой электроники PSIM.	1			
12		1			
13	Последовательное по выходу соединения трех мостовых ячеек питающихся от солнечных модулей.	1	Лабораторная работа		
14		1	Лабораторная работа		
15	Параллельное по выходу соединения трех мостовых ячеек питающихся от солнечных модулей.	1	Лабораторная работа		
16		1	Лабораторная работа		
17	Однофазный инвертор с многоуровневой широтно-импульсной модуляцией	1	Лабораторная работа		
18		1	Лабораторная работа		

### 3.2 Место и роль лабораторных работ



В школе, при организации проведения элективного курса, лабораторные работы могут выполняться как после прохождения всего теоретического курса, так и одновременно с его чтением. Последовательный вариант организационно более удобен и имеет несомненное преимущество в том отношении, что учащиеся приходят в лабораторию лучше подготовленными, знают весь круг вопросов и выполняют работы более уверенно, что способствует лучшему пониманию данного материала.

Параллельный метод значительно выгоднее в другом отношении. Выполняя лабораторные работы и параллельно слушая теоретическую часть, ученики могут конкретизировать данную теорию, улучшать ее понимание.

Лабораторная работа позволяет преподавателю контролировать и оценивать самостоятельную работу студентов. По всем изложенным соображениям надо считать более рациональным параллельный метод проведения лабораторных занятий. При этом оптимальным является фронтальный метод, когда все выполняют первую работу, после того как материал по ней изложен на лекциях, затем вторую и т. д. Очевидно, что этот метод требует наличия в лаборатории большого числа однородных работ.

Там, где фронтальный метод невозможен, целесообразно применить компромиссный параллельно-последовательный, т. е. цикловой метод. Работы в лаборатории разбиваются на несколько циклов; первый цикл начинается после того, как учителем прочитан необходимый материал; в течение выполнения работ первого цикла продолжается чтение лекций и учащиеся получают сведения, необходимые для работ второго цикла и т. д. При этом в каждом последующем цикле целесообразно работы несколько усложнить, а в последний раздел теоретического курса включить, по возможности, материал, не освещаемый в лаборатории.

Однако цикловой метод сохраняет некоторые недостатки последовательного метода:

- 1) учащиеся работают по одной теме, изучают другую;
- 2) каждый цикл теоретического курса испытывает благотворное влияние практики с некоторым опозданием.

### **3.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы «Моделирование инвертора для солнечной электростанции»**

#### **Раздел 1 «Программа моделирования схем силовой электроники PSIM»**

Цель работы: Ознакомиться с программой PSIM, промоделировать работу мостового однофазного инвертора питаемого от источника постоянного напряжения.

#### **Описание работы программы PSIM**

PSIM является ведущим программным обеспечением для моделирования и проектирования силовой электроники, двигателей и динамического моделирования системы. Благодаря быстрому имитационному и удобному интерфейсу PSIM обеспечивает мощную и эффективную среду [1].

PSIM представляет собой обычную программу для системы Windows (Рис.22). Она состоит из главного окна программы и нескольких дополнительных окон, которые могут появляться на экране по мере необходимости.

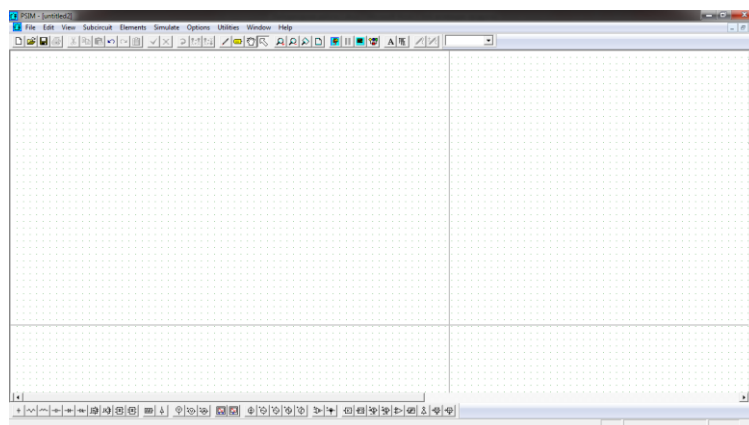


Рис.22.

В верхней части главного окна находится строка меню, из которого можно вызвать большинство команд программы. Ниже находится панель инструментов, на которой помещены объекты управления, чаще всего необходимые при работе. В нижней части программы находится панель элементов наиболее часто используемых при создании схем.

Основную часть окна занимает вид на документ, с которым вы работаете. В самом низу окна находится статусная строка, на которой появляются сообщения, показывающие состояние программы и некоторую другую информацию. Программа снабжена контекстно-зависимой подсказкой, так что при необходимости получить информацию о программе или о назначении того или иного объекта на экране можно нажать кнопку F1 или кнопку “помощь”, предварительно выделив интересующий элемент.

Для того чтобы ввести схему в компьютер, необходимо выполнить следующие действия:

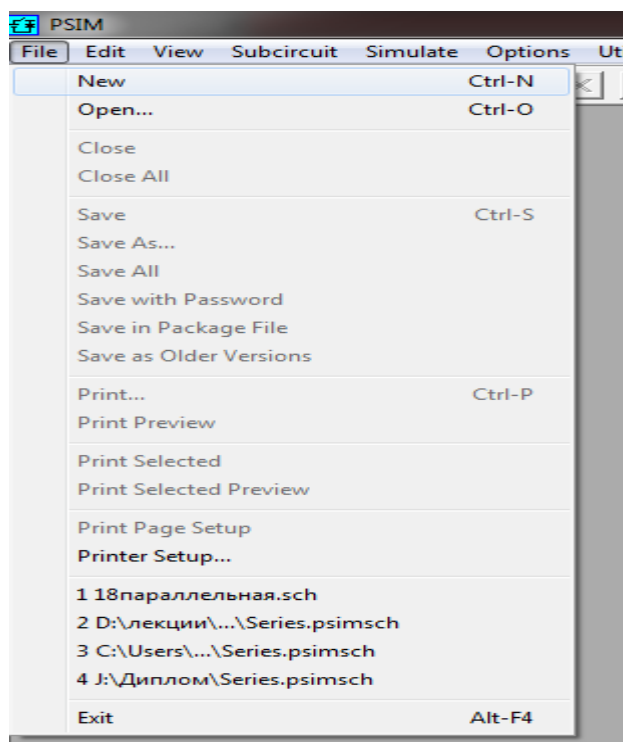


Рис.23.

В меню “Файл” выбрать команду “Новый” (Если необходимо открыть существующий файл, выбирается команда “Открыть...”)

Программа PSIM Schematic содержит библиотеки символов широкого класса компонентов и готовых блоков, необходимых для разработки электронных устройств. Все библиотеки расположены в меню Elements.

Для выбора элементов, которые будут использоваться в схеме, открывают меню “Elements”, после этого на экране появится меню списка элементов, а так же элементы расположены на нижней строке окна PSIM(Рис.24).

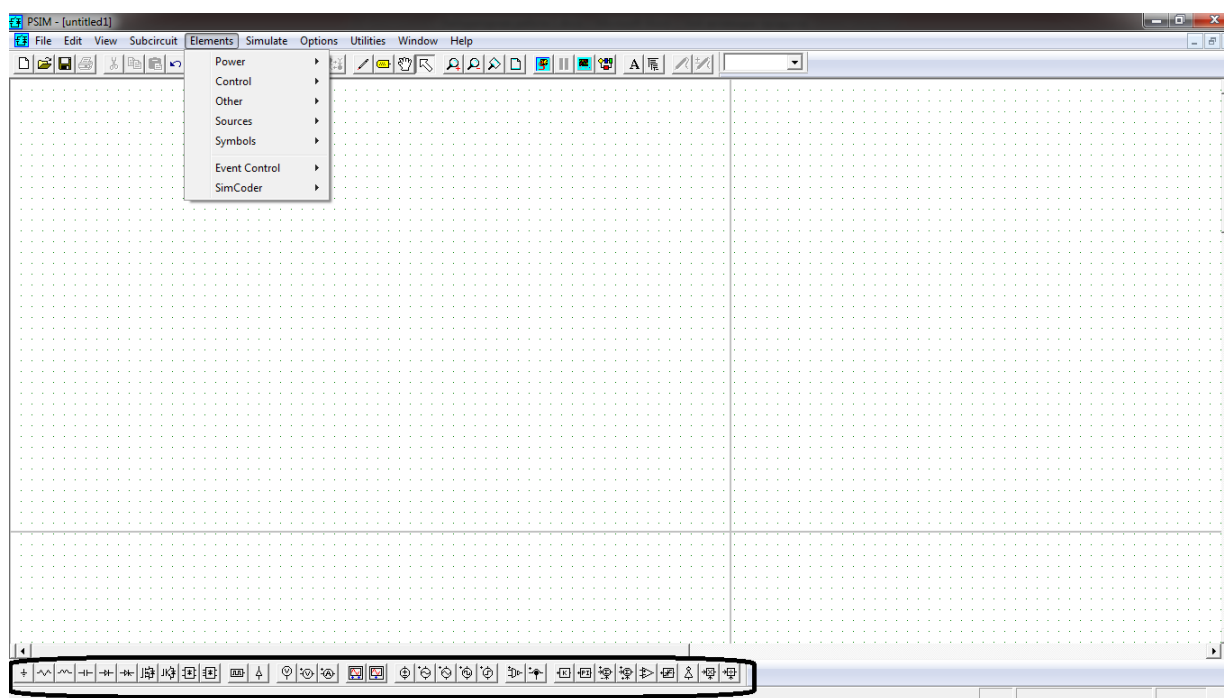


Рис.24.

Для помещения элементов схемы на лист необходимо выбрать нужный элемент, щелкнув на нем левой кнопкой мыши, затем расположить его в нужное место на схеме. После этого с помощью мыши можно перемещать элемент по листу, поворачивать его (правой кнопкой мыши) для более точной установки в нужное положение.

## Задание на лабораторную работу

1. Соберите модель схемы однофазного мостового инвертора, изображенную на рис.25

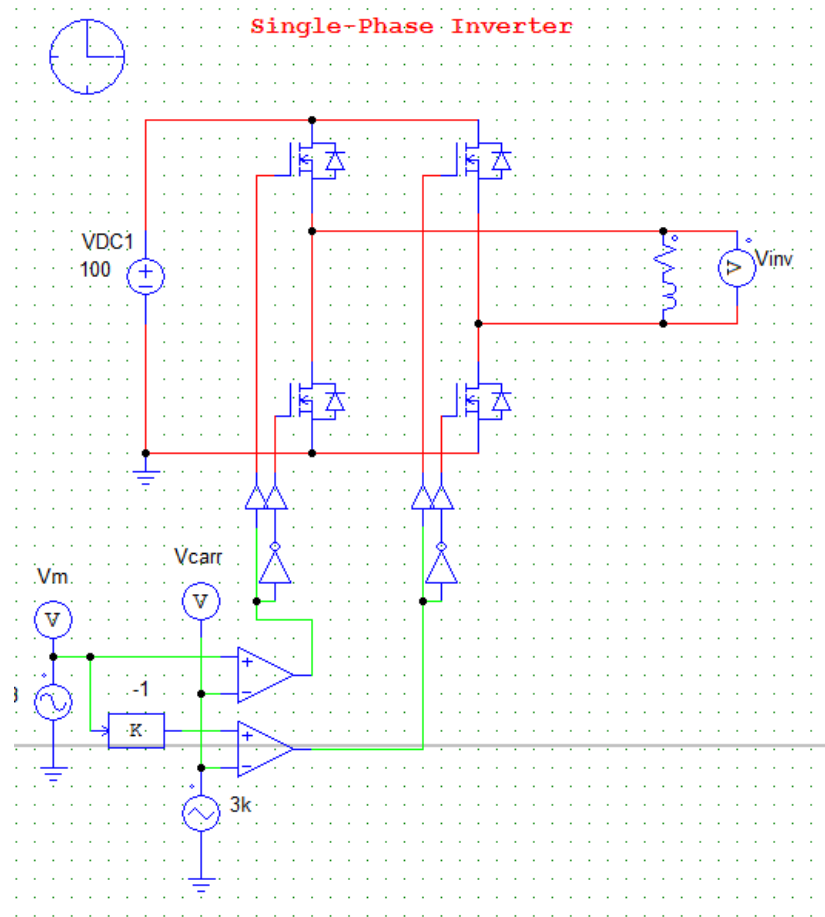


Рис.25.

Схема работает следующим образом. Сигнал модулирующей синусоиды сравнивается с опорным треугольным сигналом. Когда модулирующий сигнал превышает значение опорного сигнала, соответствующий компаратор выдает единичный уровень сигнала. При формировании положительной полуволны в этом случае замкнуты ключи MOS1, MOS4, а при формировании отрицательной полуволны - MOS2, MOS3.

В результате на нагрузке формируется последовательность прямоугольных импульсов, модулированных по ширине, то есть осуществляется так называемая широтно-импульсная модуляция. Данный

вид модуляции способствует снижению содержания высших гармоник в выходном напряжении.

Почти все элементы силовой схемы и управления можно взять на нижней панели компонентов.

Прямоугольный компонент с индексом К (Proportional) находится по пути Elementes-Control-Proportinal, а компонент управление моделированием(SimulationControl), задающий шаг и длительность моделирования расположен по пути Simulate-SimulationControl.

2. Установите следующие параметры для элементов.

Источник напряжения синусоидальной формы (Sinusoidal voltage source): Peak Amplitude (амплитуда) 0,8; Frequency (частота следования импульсов) 50 Гц; PhaseAngle (начальная фаза) 0; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) 0.

Источник напряжения треугольной волны (Triangular-wave voltage source): Vpeak-peak (размах колебаний) 2 В; Frequency (частота следования импульсов) 600 Гц; Duty Cycle (коэффициент заполнения импульсной последовательности) 0,5; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) - 1 В; PhaseDelay(задержка по фазе) 0.

Резистивно-индуктивная ветвь (Resistor-inductorbranch): Resistance (сопротивление) 1; Inductance (индуктивность) 1m; InitialCurrent (начальный ток) 0; CurrentFlag (флаг отображения тока) 1.

Пропорциональный блок (Proportional block): Gain (усиление) -1.

У остальных элементов оставить параметры по умолчанию.

Установить параметры блока управления моделированием (Simulation control): Time Step (Шаг моделирования) $1 \cdot 10^{-6}$  с.; Total Time (Время моделирования) 0,04с.

3. Проведите моделирование при различных значениях глубины модуляции (различных величинах амплитуды синусоидального сигнала). Понаблюдать как изменяются импульсы выходного напряжения инвертора, открыв окно подпрограммы Simview в режиме временной диаграммы (Time).

Устанавливаем границу временного окна 0,02с. (один период выходного напряжения). Измерьте действующее значение выходного напряжения, для этого нажмите кнопку RMS расположенную на панели инструментов в нижней части окна.

Для каждого значения глубины модуляции также изучить спектрограмму (кнопка меню FFT- быстрое преобразование Фурье). Заметьте, на каких частотах гармоники имеют наибольшие амплитуды. Для этого в окне Simview, на панели инструментов, нажмите на X и установите верхнюю границу отображаемого частотного диапазона 5000 Гц и число делений 50 (100 Гц на 1 деление), предварительно убрав галочку Auto-Grid.

Контрольные вопросы:

1. Для чего предназначена программа PSIM?
2. Как создать новое рабочее поле?
3. Опишите работу схемы однофазного мостового инвертора
4. Как устанавливаются параметры моделирования схемы?
5. Как оценить действующее и амплитудное значения сигнала?

## **Раздел 2 «Последовательное по выходу соединение трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей»**

Цель работы: Оценить параметры выходного напряжения инвертора с последовательным соединением ячеек, построить его внешнюю (нагрузочную) характеристику.

### **Описание работы модели PSIM**

При последовательном соединении солнечных модулей выходное напряжение системы в целом возрастает во столько раз, сколько подключено модулей, при этом выходной ток соответствует току одиночного модуля [21,30]. Все мосты инвертора управляются одинаково, поэтому система управления простая и является системой управления одиночного моста (см. описание раздела 1 лабораторной работы). Однако это не приводит к улучшению качества выходного напряжения.

### **Задание на лабораторную работу**

1. Соберите модель схемы последовательного по выходу соединения трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей, изображенную на рис.25.

Почти все элементы силовой схемы и управления можно взять на нижней панели компонентов.

Солнечный модуль (функциональная модель) расположен Elementes-Power-RenewableEnergy-SolarModule(functionalmodel), прямоугольный компонент с индексом К (Proportional) находится по пути Elementes-Control-Proportinal, а компонент управление моделированием(SimulationControl), задающий шаг и длительность моделирования расположен по пути Simulate-SimulationControl, резисторная индукторная ветвь Elementes-Power-RLCBranches-RL.

2. Установите следующие параметры для элементов.



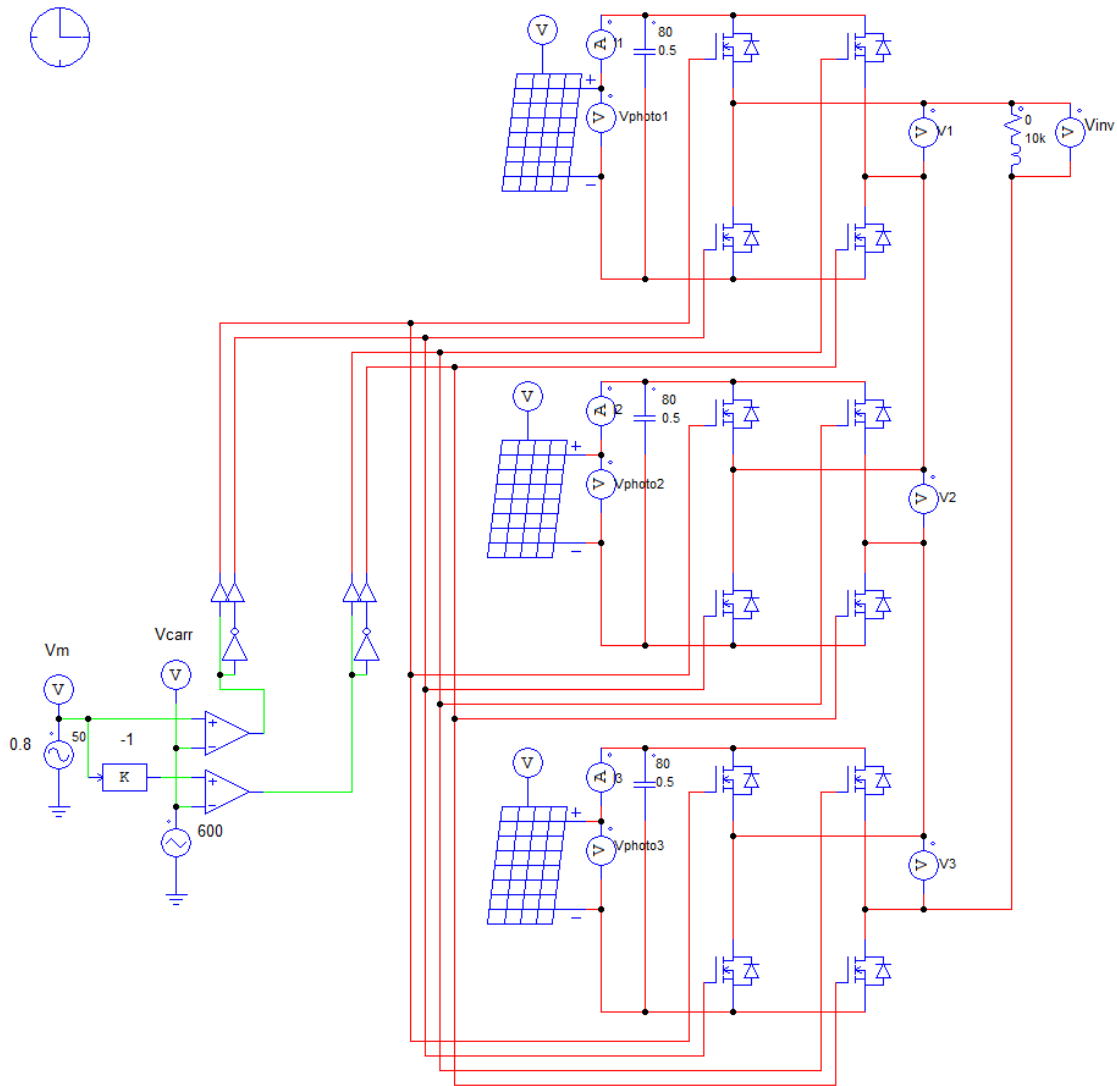


Рис.25.

Источник напряжения синусоидальной формы (Sinusoidal voltage source): Peak Amplitude (амплитуда) 0,8; Frequency (частота следования импульсов) 50 Гц; PhaseAngle (начальная фаза) 0; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) 0.

Источник напряжения треугольной волны (Triangular-wave voltage source): Vpeak-peak (размах колебаний) 2 В; Frequency (частота следования импульсов) 600 Гц; Duty Cycle (коэффициент заполнения импульсной последовательности) 0,5; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) -1 В; PhaseDelay (задержка по фазе) 0.

Резистивно-индуктивная ветвь (Resistor-inductorbranch): Resistance (сопротивление) 10k; Inductance (индуктивность) 0; InitialCurrent (начальный ток) 0; CurrentFlag (флаг отображения тока) 1.

Пропорциональный блок (Proportional block): Gain (усиление) -1.

Конденсатор (Capacitor): Capacitance 0,5; Init.Cap.Voltage 80; Current flag 0.

У остальных элементов оставить параметры по умолчанию.

Установить параметры блока управления моделированием (Simulation control): Time Step (Шаг моделирования)  $1 \cdot 10^{-6}$  с.; Total Time (Время моделирования) 0,02с.

3. Для заданного преподавателем значения сопротивления нагрузки  $R$  произвести измерение следующих величин: выходной ток  $I_{\text{мод}}$  и выходное напряжение  $U_{\text{мод}}$  солнечного модуля, выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  и выходной ток  $I_{\text{вых}}$  инвертора в целом, амплитуда первой гармоники выходного напряжения  $U_{(1)m}$ . Во временном окне (соответствующем одному периоду выходного напряжения) определяются ток и напряжение модуля - нажатием кнопки  $\bar{x}$  (среднее значение) и выходные ток и напряжение – нажатием кнопки rms (действующее значение). Амплитуда первой гармоники выходного напряжения находится в частотном окне (FFT), нажатием кнопки  $\uparrow$  (глобальный максимум). Убедитесь, что максимум соответствует выходной частоте 50 Гц.

4. Рассчитайте значения выходных мощностей одного модуля и инвертора в целом по формулам  $P_{\text{мод}} = U_{\text{мод}} \cdot I_{\text{мод}}$ ,  $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}}$ .

5. Рассчитайте значение коэффициента гармоник выходного напряжения по формуле,

$$K_{\Gamma} = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{U}{U_{m1}} \right)^2 - 1}$$

$$K_{\Gamma} = \frac{U_{вг}}{U_1}$$

которая получается из более общей формулы

6. Заполните следующую таблицу, произведя ряд дополнительных вычислений,

Таблица 1.

Результаты моделирования.

I мод, А	U мод, В	U вых, В	I вых, А	$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{мод}}}$	$\frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{мод}}}$	$U_{(1)m}$	$U_{(1)}$	$U_{(вг)}$	$K_{\Gamma}$	P мод, Вт	P вых, Вт	$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{мод}}}$

7. Изменяя значение сопротивления нагрузки в широком диапазоне (от режима, близкого к холостому ходу, до режима, близкого к режиму короткого замыкания), заполните следующую таблицу и постройте внешние характеристики одиночного модуля и инвертора в целом, т.е. зависимости  $U_{\text{мод}}(I_{\text{мод}})$  и  $U_{\text{вых}}(I_{\text{вых}})$ .

Таблица 2.

Результаты для внешней характеристики.

R	I <sub>вых</sub>	U <sub>вых</sub>	I <sub>мод</sub>	U <sub>мод</sub>

8. Сделайте выводы по работе.

Контрольные вопросы:

- 1) Что дает последовательное соединение мостовых ячеек инвертора?
- 2) Что характеризует коэффициент гармоник напряжения?
- 3) Что можно сказать о качестве выходного напряжения при простом управлении мостовыми ячейками?
- 4) Что называется внешней характеристикой источника питания ?
- 5) Почему выходное напряжение инвертора снижается с ростом потребляемого от него тока?

### **Раздел 3 «Параллельное по выходу соединение трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей»**

Цель работы: Оценить параметры выходного напряжения инвертора с параллельным соединением ячеек, построить его внешнюю (нагрузочную) характеристику.

#### **Описание работы модели PSIM**

При последовательном соединении солнечных модулей выходное напряжение системы соответствует уровню одного модуля, при этом выходной ток увеличивается [21,30]. Все мосты инвертора управляются одинаково, поэтому система управления простая и является системой управления одиночного моста (см. описание раздела 1 лабораторной работы). Однако это так же не приводит к улучшению качества выходного напряжения.

#### **Задание на лабораторную работу**

1. Соберите модель схемы параллельного по выходу соединения трех мостовых ячеек, питающихся от солнечных модулей, изображенную на рис.26.

Почти все элементы силовой схемы и управления можно взять на нижней панели компонентов.

Солнечный модуль (функциональная модель) расположен Elementes-Power-RenewableEnergy-SolarModule(functionalmodel), прямоугольный компонент с индексом К (Proportional) находится по пути Elementes-Control-Proportinal, а компонент управление моделированием(SimulationControl), задающий шаг и длительность моделирования расположен по пути Simulate-SimulationControl, резисторная индукторная ветвь Elementes-Power-RLCBranches-RL.

2. Установите следующие параметры для элементов.

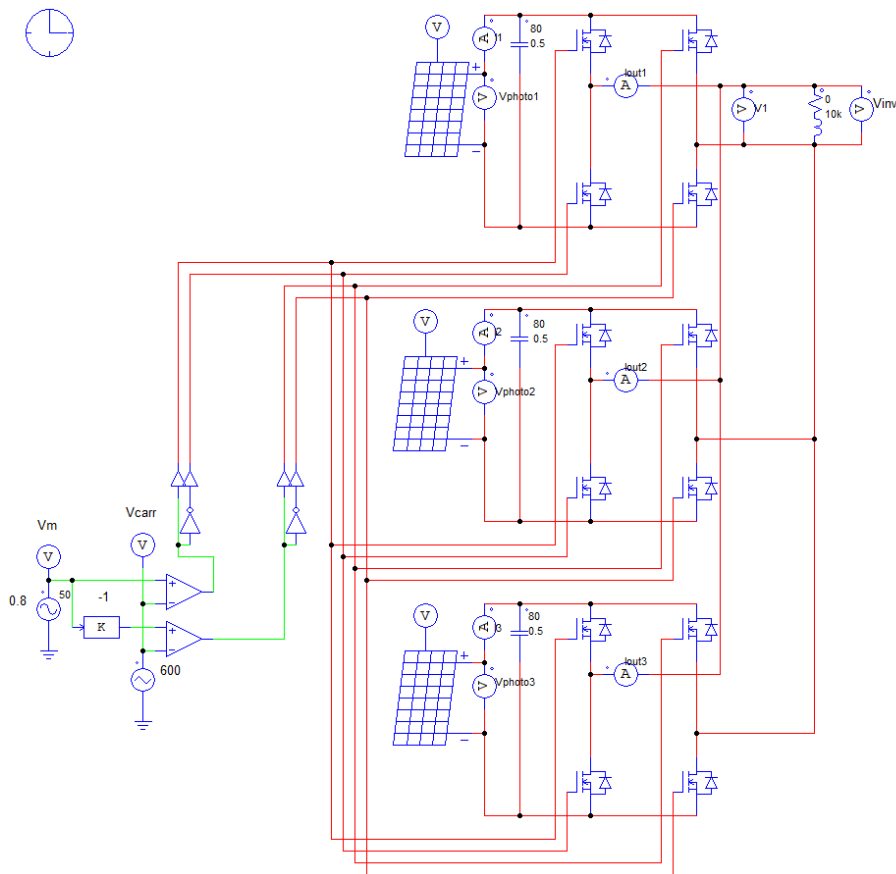


Рис. 26

Источник напряжения синусоидальной формы (Sinusoidal voltage source): Peak Amplitude (амплитуда) 0,8; Frequency (частота следования импульсов) 50 Гц; PhaseAngle (начальная фаза) 0; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) 0.

Источник напряжения треугольной волны (Triangular-wave voltage source): Vpeak-peak (размах колебаний) 2 В; Frequency (частота следования импульсов) 600 Гц; Duty Cycle (коэффициент заполнения импульсной последовательности) 0,5; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) - 1 В; PhaseDelay (задержка по фазе) 0.

Резистивно-индуктивная ветвь (Resistor-inductorbranch): Resistance (сопротивление) 10k; Inductance (индуктивность) 0; InitialCurrent (начальный ток) 0; CurrentFlag (флаг отображения тока) 1.

Пропорциональный блок (Proportional block): Gain (усиление) -1.

Конденсатор (Capacitor): Capacitance 0,5; Init.Cap.Voltage 80; Current flag 0.

У остальных элементов оставить параметры по умолчанию.

Установить параметры блока управления моделированием (Simulation control): Time Step (Шаг моделирования)  $1 \cdot 10^{-6}$  с.; Total Time (Время моделирования) 0,02с.

3. Для заданного преподавателем значения сопротивления нагрузки  $R$  произвести измерение следующих величин: выходной ток  $I_{\text{мод}}$  и выходное напряжение  $U_{\text{мод}}$  солнечного модуля, выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  и выходной ток  $I_{\text{вых}}$  инвертора в целом, амплитуда первой гармоники выходного напряжения  $U(1)m$ . Во временном окне (соответствующем одному периоду выходного напряжения) определяются ток и напряжение модуля -нажатием кнопки  $\bar{x}$  (среднее значение) и выходные ток и напряжение – нажатием кнопки rms (действующее значение). Амплитуда первой гармоники выходного напряжения находится в частотном окне (FFT), нажатием кнопки  $\uparrow$  (глобальный максимум). Убедитесь, что максимум соответствует выходной частоте 50 Гц.

4. Рассчитайте значения выходных мощностей одного модуля и инвертора в целом по формулам  $P_{\text{мод}} = U_{\text{мод}} \cdot I_{\text{мод}}$ ,  $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}}$ .

5. Рассчитайте значение коэффициента гармоник выходного напряжения по формуле,

$$K_{\Gamma} = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{U}{U_{m1}} \right)^2 - 1}$$

которая получается из более общей формулы  $K_{\Gamma} = \frac{U_{\text{вг}}}{U_1}$ .

6. Заполните следующую таблицу, произведя ряд дополнительных вычислений,

Таблица 2.

## Результаты моделирования.

$I_{\text{МОД}}$ , А	$U_{\text{МОД}}$ , В	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$I_{\text{ВЫХ}}$ , А	$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{МОД}}}$	$\frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{МОД}}}$	$U_{(1)}$ п	$U_{(1)}$ )	$U_{(вг)}$ )	К Г	Р МОД , Вт	Р ВЫХ , Вт	$\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{МОД}}}$

7. Изменяя значение сопротивления нагрузки в широком диапазоне (от режима, близкого к холостому ходу, до режима, близкого к режиму короткого замыкания), заполните следующую таблицу и постройте внешние характеристики одиночного модуля и инвертора в целом, т.е. зависимости  $U_{\text{МОД}}(I_{\text{МОД}})$  и  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$ .

Таблица 2.

## Результаты для внешней характеристики.

R	$I_{\text{ВЫХ}}$	$U_{\text{ВЫХ}}$	$I_{\text{МОД}}$	$U_{\text{МОД}}$

8. Сделайте выводы по работе.

Контрольные вопросы:

- 1) Что дает параллельное соединение мостовых ячеек инвертора?
- 2) Как и почему соотносятся токи системы в целом и отдельных модулей?
- 3) Как и почему соотносятся напряжение системы в целом и отдельных модулей?



- 4) Насколько сильно отличается качество выходного напряжения ( величины коэффициента гармоник и коэффициента искажения) для случаев последовательного и параллельного соединения ячеек?
- 5) Как производят управление ключами мостов в данной модели?

## Раздел 4 «Однофазный инвертор с многоуровневой широтно-импульсной модуляцией»

Цель работы: Оценить параметры выходного напряжения инвертора с многоуровневой широтно-импульсной модуляцией, построить его внешнюю (нагрузочную) характеристику.

### Описание работы модели PSIM

Широтно-импульсная модуляция как метод регулирования первоначально использовалась при построении мощных усилителей, работающих в ключевом режиме (до появления более эффективных способов усиления).

В нашей модели используется синусоидальный модулирующий сигнал и три несущих пила, сдвинутых по уровню друг относительно друга на одну треть максимально амплитуды моделирующего сигнала (см. рис. 27). Таким образом, к амплитудной модуляции (ступенчатое изменение напряжения) добавляется широтно-импульсная (переход к более высокому уровню, если модулирующий сигнал превышает несущий данного уровня).

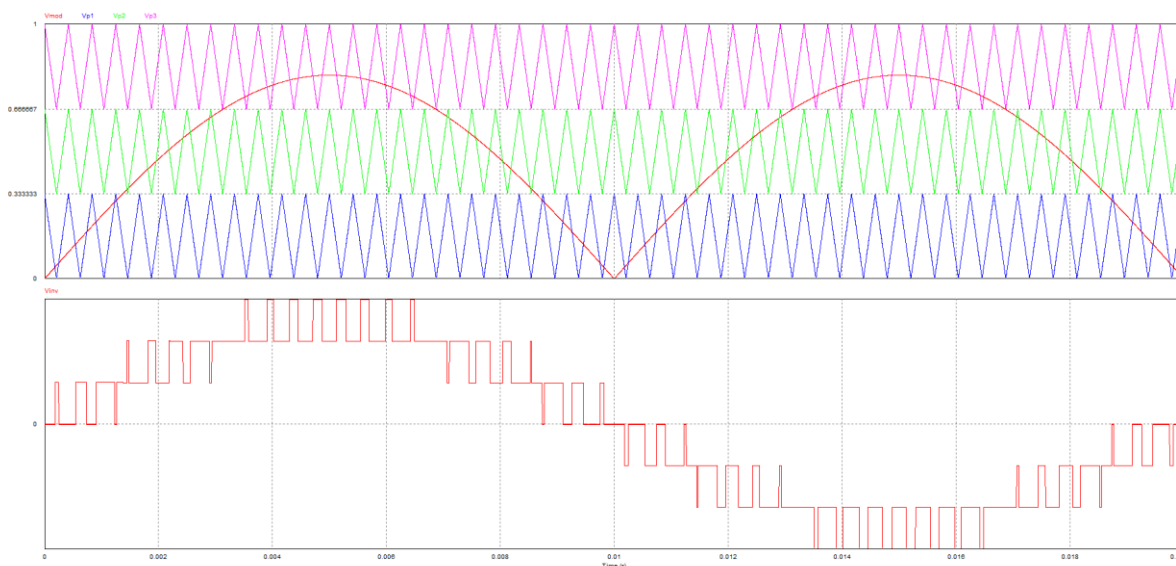


Рис. 27

Сигналы управления силовыми ключами (рис. 28) показаны в таблице 1. Здесь  $C_0=1$  соответствует формированию положительной полуволны выходного напряжения.

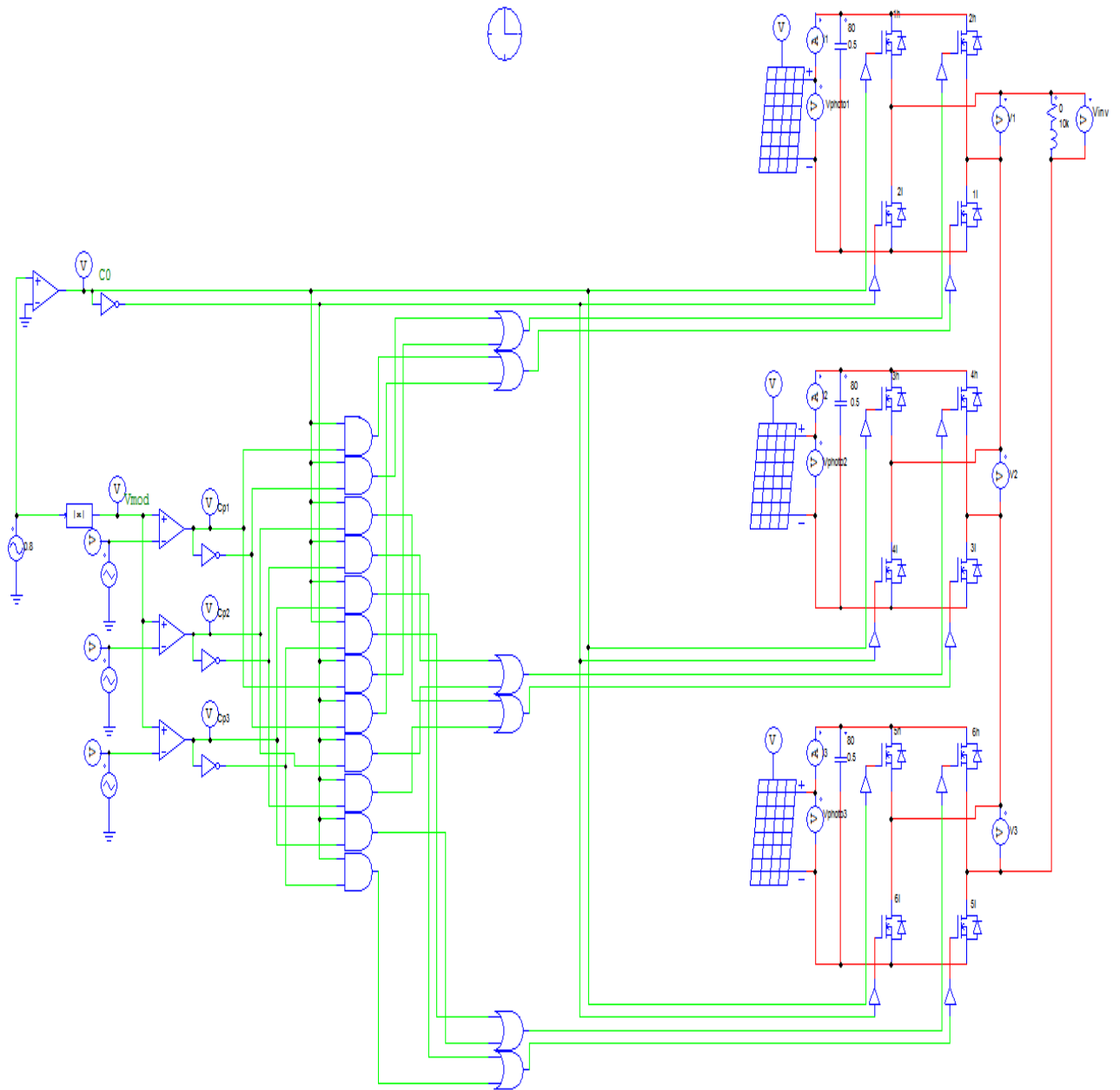


Рис. 28

## Состояние ключей

$C_0$	$U_0$	1h	1l	2h	2l	3h	3l	4h	4l	5h	5l	6h	6l
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	+1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	+2	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0
	+3	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	-1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	-2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
	-3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1

$$1e = (C_0 \cap Cp_1) \cup (C_0 \cap Cp_1)$$

$$2h = (C_0 \cap Cp_1) \cup (C_0 \cap Cp_1)$$

$$3e = (C_0 \cap Cp_2) \cup (C_0 \cap Cp_2)$$

$$4h = (C_0 \cap Cp_2) \cup (C_0 \cap Cp_2)$$

$$5e = (C_0 \cap Cp_3) \cup (C_0 \cap Cp_3)$$

$$6h = (C_0 \cap Cp_3) \cup (C_0 \cap Cp_3)$$

### Задание на лабораторную работу

1. Соберите модель схемы однофазного инвертор с многоуровневой широтно-импульсной модуляцией, питающихся от солнечных модулей, изображенную на рис.28.

Почти все элементы силовой схемы и управления можно взять на нижней панели компонентов.

Солнечный модуль (функциональная модель) расположен Elementes-Power-RenewableEnergy-SolarModule(functionalmodel), прямоугольный компонент с индексом К (Proportional) находится по пути Elementes-Control-Proportinal, а компонент управление моделированием(SimulationControl), задающий шаг и длительность моделирования расположен по пути Simulate-SimulationControl, резисторная индукторная ветвь Elementes-Power-RLCBranches-RL, элемент ORGate расположен Elementes-Control-LogicElementes-ORGate, элемент ANDGate расположен Elementes-Control-LogicElementes-ANDGate, элемент On-Off Controller находится Elementes-Other-SwitchControllers- On-Off Controller, элемент Absolute Value расположен по пути Elementes-Control-ComputationalBlocks- Absolute Value.

2. Установите следующие параметры для элементов.

Источник напряжения синусоидальной формы (Sinusoidal voltage source): Peak Amplitude (амплитуда) 0,8; Frequency (частота следования импульсов) 50 Гц; PhaseAngle (начальная фаза) 0; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) 0.

Источник напряжения треугольной волны (Triangular-wave voltage source): Vpeak-peak (размах колебаний) 1/3 В; Frequency (частота следования импульсов) 2400 Гц; Duty Cycle (коэффициент заполнения импульсной последовательности) 0,5; DCoffset (смещение по постоянной составляющей) для первого 0, для второго 1/3, для третьего 2/3; PhaseDelay (задержка по фазе) 0.

Резистивно-индуктивная ветвь (Resistor-inductorbranch): Resistance (сопротивление) 10k; Inductance (индуктивность) 0; InitialCurrent (начальный ток) 0; CurrentFlag (флаг отображения тока) 1.

Конденсатор (Capacitor): Capacitance 0,5; Init.Cap.Voltage 80; Current flag 0.

У остальных элементов оставить параметры по умолчанию.

Установить параметры блока управления моделированием (Simulation control): Time Step (Шаг моделирования)  $1 \cdot 10^{-6}$  с.; Total Time (Время моделирования) 0,02с.

3. Для заданного преподавателем значения сопротивления нагрузки  $R$  произвести измерение следующих величин: выходной ток  $I_{\text{мод}}$  и выходное напряжение  $U_{\text{мод}}$  солнечного модуля, выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  и выходной ток  $I_{\text{вых}}$  инвертора в целом, амплитуда первой гармоники выходного напряжения  $U(1)m$ . Во временном окне (соответствующем одному периоду выходного напряжения) определяются ток и напряжение модуля -нажатием кнопки  $\bar{x}$  (среднее значение) и выходные ток и напряжение – нажатием кнопки rms (действующее значение). Амплитуда первой гармоники выходного напряжения находится в частотном окне (FFT), нажатием кнопки  $\uparrow$  (глобальный максимум). Убедитесь, что максимум соответствует выходной частоте 50 Гц.

4. Рассчитайте значения выходных мощностей одного модуля и инвертора в целом по формулам  $P_{\text{мод}} = U_{\text{мод}} \cdot I_{\text{мод}}$ ,  $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}}$ .

5. Рассчитайте значение коэффициента гармоник выходного напряжения по формуле,

$$K_{\Gamma} = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{U}{U_{m1}} \right)^2 - 1}$$

$$K_{\Gamma} = \frac{U_{\text{вг}}}{U_1}$$

которая получается из более общей формулы

6. Заполните следующую таблицу, произведя ряд дополнительных вычислений,

Таблица 3.

Результаты моделирования.

I мод , А	U мод , В	U вых , В	I вых , А	$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{мод}}}$	$\frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{мод}}}$	U <sub>(1)</sub> m	U <sub>(1)</sub> )	U <sub>(вг)</sub> )	K Г	P мод , Вт	P вых , Вт	$\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{мод}}}$

7. Изменяя значение сопротивления нагрузки в широком диапазоне (от режима, близкого к холостому ходу, до режима, близкого к режиму короткого замыкания), заполните следующую таблицу и постройте внешние характеристики одиночного модуля и инвертора в целом, т.е. зависимости U<sub>мод</sub>(I<sub>мод</sub>) и U<sub>вых</sub>(I<sub>вых</sub>).

Таблица 2.

Результаты для внешней характеристики.

R	I <sub>вых</sub>	U <sub>вых</sub>	I <sub>мод</sub>	U <sub>мод</sub>

8. Сделайте выводы по работе. Сравните качество выходного напряжения с результатами лабораторных работ Раздела 2 и Раздела 3 для частоты несущих пил f=2400 Гц

Контрольные вопросы:

- 1) Что такое широтно-импульсная модуляция?
- 2) Как реализуется многоуровневая ШИМ с несколькими несущими сигналами?
- 3) В чем преимущество многоуровневой ШИМ перед двух уровневой?
- 4) Как соединены ячейки инвертора по выходу?
- 5) Что можно сказать о качестве выходного напряжения при многоуровневой ШИМ по сравнению с двух уровневой на той же несущей частоте?



## Заключение

Разработана лабораторная работа «Моделирование инвертора солнечной электростанции» в объеме 8 академических часов для школьного элективного курса по физике, которые можно проводить в общеобразовательных школах.

Для достижения поставленной цели, были решены следующие задачи:

1. Изучена литература по теме исследования.
2. Изучена программа для моделирования PSIM
3. Разработан план элективного курса «Солнечная электростанция» и методические материалы для лабораторной работы «Моделирование инвертора солнечной электростанции» для школьного элективного курса по физике.

В выпускной квалификационной работе проведена разработка лабораторной работы для элективного курса, которая вполне подходит для самостоятельного изучения с помощью разработанных и представленных методических материалов. Разработаны и отлажены модели инвертора при разных схемах соединения и разных законов управления.

### Библиографический список

1. PSIM 9 x32/64 [Электронный ресурс].- Все для студента.- Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/270005/>.
2. *Амброзяк А.* Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов [Текст]/ А. Амброзяк к Пер. с польского, под ред. Б.Т. Коломийца. - М.: Советское радио, 1970. – 392 с.
3. *Бедфорд Б.* Теория автономных инверторов [Текст]/Перевод с английского под редакцией И.В.Антика.-М: Издательство "Энергия", 1957 год.
4. *Васильев А.М.* Полупроводниковые фотопреобразователи [Текст]/А.М. Васильева, А.П. Ландсман. – М.: Сов. радио, 1971. – 248 с.
5. Выбор инвертора для солнечной электростанции [Электронный ресурс].- SOLNECHNYE.RU. Солнечные батареи в каждый дом!.- Режим доступа <http://www.solnechnye.ru/inventory-220v/vybor-invertora.htm>.
6. Герман – Галкин, С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК [Текст] / С.Г. Герман – Галкин– СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002. – 304 с.
7. *Готтлиб И.М.* Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы[Текст]/ И.М. Готтлиб. - М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.
8. *Де Роза А.* Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы[Текст]: Учебн. пособие/ Пер. с англ. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект»; М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 704 с.
9. *Забродин Ю. С.* Промышленная электроника [Текст]: Учебник для вузов/ Ю.С. Забродин.— М.: Высш. школа, 1982. — 496 с.
10. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники [Текст]/ Г.С. Зиновьев; НГТУ- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
11. *Зиновьев, С. И.* Лекции в советской высшей школе [Текст]/ С.И. Зиновьев – М., 1962 – 136с.

12. Инвертор (электротехника) [Электронный ресурс].- Википедия. Свободная энциклопедия.- Режим доступа [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BE%D1%80\\_\(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BE%D1%80_(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0)).
13. Инвертор для солнечных батарей [Электронный ресурс].- Солнечная энергия/ фотовольтаика.- Режим доступа <http://solarsoul.net/invertor-dlya-solnechnyx-batarej>.
14. Инверторы для солнечных батарей. Виды и особенности. Принцип действия[Электронный ресурс].- Электросам.ру. Электроника и электрооборудование, электротехника и электроника-информация!.- Режим доступа <http://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/inventory-dlia-solnechnykh-batarei/>.
15. *Кашкаров А.П.* Оригинальные конструкции источников питания[Текст]/ А. П. Кашкаров, А. С. Колдунов - М.: ДМК Пресс, 2010. - 160 с.
16. *Китунович Ф.Г.* Электротехника [Текст]:Учеб./Ф.Г. Китунович. - Минск: Высшая.шк., 1999. – 400 с.
17. *Кулик В.Д.* Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи [Текст]: учебное пособие/ В.Д. Кулик; ГОУВПО.- СПб. СПбГТУРП, 2010.- 90с.
18. *Кулик В.Д.* Силовая электротехника. Автономные инверторы, активные преобразователи[Текст]:Учебн. пособие/В.Д. Кулик.-СПб.:СПбГТУРП, 2010.-90с.
19. *Лачин В. И.* Электроника [Текст]: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений./ В. И. Лачин, Н.С. Савелов,— Ростов-на Дону. 2007.
20. *Моин В.С.* Стабилизированные транзисторные преобразователи[Текст]/ В.С. Моин. – М.:Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.

21. Патент на изобретение РФ RU 2393619 C1. Многоуровневый автономный инвертор напряжения [Текст] / Г.С. Зиновьев, Н.Н. Лопаткин / Изобретения. Полезные модели. – 2010. – № 18.
22. *Размадзе Ш.М.* Преобразовательные схемы и системы [Текст]/Ш.М. Размадзе.- М.: Высшая школа, 1967. - 528 с.
23. *Розанов Ю. К.* Основы силовой электроники [Текст]/Ю. К. Розанов.- М.: Энергоатомиздат, 1992. - 296 с.
24. *Розанов Ю.К.* Основы силовой преобразовательной техники [Текст]: Учебник для техникумов/ Ю.К. Розанов. - М.: Энергия, 1979. - 392 с.
25. *Руденко В. С.* Основы преобразовательной техники [Текст]: Учебник для вузов/ В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М.Чиженко.- М.: Высш. школа, 1980. - 424 с.
26. Силовая электроника [Текст] / Коллектив авторов / ТИИЭР. – Т. 76. – 1988. – № 4. - 256 с.
27. Солнечная энергетика. Методы расчетов [Текст]/ В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К.Малинин.- М: "Солнечная энергетика" МЭИ, 2008. – 317 с.
28. Солнечные электростанции - автономное электроснабжение загородного дома от солнечных батарей [Электронный ресурс].- Солнечные батареи - основа автономной электростанции.- Режим доступа <http://www.solarroof.ru/systems/41/95/>.
29. *Харченко Н.В.* «Индивидуальные солнечные установки» [Текст]/Н.В. Харченко.-М: Изд. Энергоатомиздат, 1991 г. — 208 с.,
30. *Четти П.* Проектирование ключевых источников электропитания [Текст] / П.Четти. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.