

Реферат

Выпускная квалификационная работа 81с., 17 рис., 16 табл.

Ключевые слова: солнечная энергетика, солнечные элементы, фотоэлектрическая станция, энергосистема, аккумулятор, инвертор, нагрузка, алгоритм заряда/разряда.

Объектом исследования является автономная система электропитания на солнечных батареях.

Целью дипломной работы является разработка оптимальной схемы и алгоритма для обеспечения быстрого, качественного и безопасного перезаряда аккумуляторных батарей, работающих в системах солнечной энергетики.

В процессе исследования произведен выбор аккумулятора с максимально возможным числом циклов перезаряда, выбор и модернизация схемы подключения аккумуляторных батарей к компонентам солнечной электростанции, разработка алгоритма заряда аккумуляторных батарей.

В результате исследования был разработан алгоритм перезаряда аккумуляторов и создание программного обеспечения для программируемого логического контроллера с целью управления процессом заряда/разряда

Область применения: Область применения аккумуляторов в технике чрезвычайно разнообразна. Свинцовые аккумуляторы используются в автомобилях из-за простоты в эксплуатации. Так же медицинское оборудование всегда нуждается в надежном источнике электропитания. Перебои в подаче электроэнергии могут привести к неполадкам медицинского оборудования и таким образом подвергнуть жизнь человека опасности. Свинцово-кислотные аккумуляторы помогут стабилизировать постоянно колеблющееся напряжение. Они подавляют электрические шумы, что способствует его безопасной работе.

Введение

По сравнению с другими энергоносителями и источниками энергии солнечная энергия обладает рядом несомненных преимуществ. В первую очередь, энергия Солнца является экологически чистой, т.к. при работе солнечная электростанция не выделяет в окружающую среду вредных веществ. Вторым преимуществом является высокая ресурсоемкость солнечной энергии, обусловленная большим ее количеством, получаемой Землей от Солнца. В-третьих, особенность реализация систем солнечной энергии позволяет масштабировать их и изготавливать такие системы массово, в том числе для автономного использования. В конечном счете, принципиальная схема солнечной электростанции довольно проста и может быть воспроизведена и собрана даже неспециалистом в области альтернативных источников энергии.

Солнечная электростанция состоит из ряда функциональных частей, которыми являются фотогальванические элементы, аккумуляторы, инверторы и контроллеры заряда. В то же время одним из ключевых звеньев всей системы является именно аккумуляторная батарея, т.к. чаще всего она имеет самый низкий срок эксплуатации. Эта батарея быстрее, чем другие компоненты, приходит в негодность, а также весьма требовательна к условиям эксплуатации. Для обеспечения бесперебойной работы аккумуляторов, совместно с другими компонентами, помимо обеспечения необходимых эксплуатационных условий необходимо также обеспечить оптимальный режим его заряда и разряда. От правильного выбранной емкости аккумуляторных батарей, тока заряда, а также параметров переключения заряжаемого аккумулятора на питание потребителей зависит окончательный срок службы аккумуляторов и эффективность всей системы в целом. В свете этого актуальной задачей является выбор или разработка оптимального алгоритма заряда и разряда аккумуляторов в системах альтернативной энергетики. В данной работе разрабатывается алгоритм перезаряда аккумуляторных батарей, работающих в автономных электростанциях на солнечных батареях.

Объектом исследования является автономная система электропитания на солнечных батареях. Предметом исследования является процесс перезаряда аккумуляторных батарей в автономной системе электропитания на фотогальванических элементах.

Целью дипломной работы является разработка оптимальной схемы и алгоритма для обеспечения быстрого, качественного и безопасного перезаряда аккумуляторных батарей, работающих в системах солнечной энергетики. Для решения в работе поставлены следующие задачи:

- выбор аккумулятора с максимально возможным числом циклов перезаряда, удовлетворяющий эксплуатационным требованиям;
- выбор прочих электронных компонентов солнечной электростанции для последующего сопряжения с аккумуляторами;
- модернизация схемы соединения аккумуляторных батарей с нагрузкой и фотогальваническими элементами;
- разработка алгоритма перезаряда аккумуляторов и создание программного обеспечения для программируемого логического контроллера с целью управления процессом заряда/разряда.

Основными методами исследования в данной работе являются анализ литературы по данной тематике, сравнение разрабатываемого решения с уже существующими, а также расчетно-аналитический метод подбора параметров выбираемых компонентов.

Практическая значимость дипломной работы определяется востребованностью программного обеспечения для управления системами альтернативной энергетики. Разработка оптимального алгоритма перезаряда аккумуляторов позволит повысить энергоэффективность электростанции, снизить потери из-за падения емкости батарей, а также добиться увеличения срока эксплуатации всей системы в целом.

1 Постановка проблемы

Солнце – неисчерпаемый, экологически безопасный и дешевый источник энергии. По заверениям экспертов количество солнечной энергии, которая поступает на поверхность Земли в течение недели, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, урана и угля. По мнению академика Ж.И. Алферова, «человечество имеет надежный естественный термоядерный реактор – Солнце. Солнечная энергетика является «чистой» и не оказывает отрицательного влияния на экологию планеты [1].

Немаловажным моментом является тот факт, что сырьем для изготовления фотогальванических элементов является один из самых часто встречающихся элементов – кремний. В составе земной коры кремний является вторым элементом после кислорода (29,5% по массе). По мнению многих ученых, кремний - это «нефть двадцать первого века», т.к. в течение 30 лет один килограмм кремния в фотоэлектрической станции вырабатывает столько электричества, сколько 75 тонн нефти на тепловой электростанции.

Однако некоторые эксперты полагают, что солнечную энергетику нельзя назвать экологически безопасной ввиду того, что производство чистого кремния для фотогальванических элементов является весьма «грязным» и очень энергоемким производством. Наряду с этим, строительство солнечных электростанций требует отведения большого количества земель, сравнимых по площади с водохранилищами ГЭС. Еще одним недостатком солнечной энергетики, по мнению специалистов, является высокая волатильность, т.е. вариация как технических параметров фотоэлементов, так и ценовых характеристик. Обеспечение эффективной работы энергосистемы, элементами которых являются солнечные электростанции, возможно при условии:

- наличия значительных резервных мощностей, использующих традиционные энергоносители, которые можно подключить ночью или в пасмурные дни;

- проведения масштабной и дорогостоящей модернизации электросетей[2].

Несмотря на указанный недостаток, солнечная энергетика продолжает свое развитие в мире. Прежде всего, ввиду того, что лучистая энергия будет дешеветь и уже через несколько лет составит весомую конкуренцию нефти и газу.

В настоящий момент в мире существуют фотоэлектрические установки, преобразующие солнечную энергию в электрическую на основе метода прямого преобразования, и термодинамические установки, в которых солнечная энергия сначала преобразуется в тепло, затем в термодинамическом цикле тепловой машины преобразуется в механическую энергию, а в генераторе преобразуется в электрическую.

Солнечные элементы как источник энергии могут применяться:

- в промышленности (авиапромышленность, автомобилестроение и т.п.);
- в сельском хозяйстве;
- в бытовой сфере;
- в строительной сфере (например, эко-дома);
- на солнечных электростанциях;
- в автономных системах видеонаблюдения;
- в автономных системах освещения;
- в космической отрасли.

По данным Института Энергетической стратегии [3], теоретический потенциал солнечной энергетики в России составляет более 2300 млрд. тонн условного топлива, экономический потенциал – 12,5 млн. т.у.т. Потенциал солнечной энергии, поступающей на территорию России в течение трех дней, превышает энергию всего годового производства электроэнергии в нашей стране.

Ввиду расположения России (между 41 и 82 градусами северной широты) уровень солнечной радиации существенно варьируется: от 810 кВт-час/м² в год в отдаленных северных районах до 1400 кВт-час/м² в год в южных районах. На

уровень солнечной радиации оказывают влияние и большие сезонные колебания: на ширине 55 градусов солнечная радиация в январе составляет 1,69 кВт-час/м², а в июле – 11,41 кВт-час/м² в день.

В настоящее время Россия обладает передовыми технологиями по преобразованию солнечной энергии в электрическую. Есть ряд предприятий и организаций, которые разработали и совершенствуют технологии фотоэлектрических преобразователей: как на кремниевых, так и на многопереходных структурах. Есть ряд разработок использования концентрирующих систем для солнечных электростанций.

Законодательная база в сфере поддержки развития солнечной энергетики в России находится в зачаточном состоянии. Однако первые шаги уже сделаны:

- 3 июля 2008г.: Постановление Правительства №426 «О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии»;

- 8 января 2009г.: Распоряжение Правительства РФ N 1-р «Об Основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.»

Были утверждены целевые показатели по увеличению к 2015 и 2020 годам доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общем уровне российского энергобаланса до 2,5% и 4,5% соответственно[4].

По разным оценкам, на данный момент в России суммарный объем введенных мощностей солнечной генерации составляет не более 5 МВт, большая часть из которых приходится на домохозяйства. Самым крупным промышленным объектом в российской солнечной энергетике является введенная в 2010 году солнечная электростанция в Белгородской области мощностью 100 кВт (для сравнения, самая крупнейшая солнечная электростанция в мире располагается в Канаде мощностью 80000 кВт).

Помимо наличия глобальных проблем, связанных с развитием альтернативной энергетики, как отдельного отраслевого направления,

существуют также и частные проблемы, вызванные практикой применения фотогальванических систем. Для анализа конкретной проблематики систем солнечной энергетики рассмотрим принципиальную схему солнечной электростанции (рис. 1).



Рисунок 1 – Принципиальная схема солнечной электростанции

Непосредственная техническая реализация отдельных модулей и подсистем солнечной электростанции может варьироваться, однако их функциональное назначение, как правило, остается неизменным. Солнечная электростанция состоит из нескольких обязательных элементов:

- солнечная панель – ключевой элемент, отличающий солнечную электростанцию от других видов систем ВИЭ. Служит первичным преобразователем световой энергии Солнца в электрическую. Материал, типы, размеры и количество солнечных панелей в одной электростанции могут варьироваться, причем нередко оптимальное проектное решение связано с комбинацией различных солнечных панелей в одной станции.

- аккумуляторы – устройства, необходимые для накопления электрической энергии от солнечных панелей. В силу ряда причин солнечные панели далеко не всегда могут выдавать стабильные выходные характеристики, что обуславливает использование аккумуляторных батарей в любых системах ВИЭ. Более того, в темное или сумрачное время суток использование фотогальванических элементов не представляется возможным, поэтому

потребители должны получать заранее запасенную в светлое время суток электрическую энергию.

- регулятор заряда – основное контролирующее устройство, необходимое для управления режимом работы фотогальванических элементов, заряда и разряда аккумуляторов, поддержания заданного уровня выходного напряжения и прочих функций. От выбора алгоритма управления и контроля зависит эффективность всей фотоэлектрической системы в целом.

- инвертор – устройство, преобразующее постоянный ток фотоэлементов в переменный. Т.к. основная нагрузка большинства потребителей рассчитана на 220 В переменного напряжения, инвертор практически всегда является обязательным элементом любой солнечной электростанции. В отдельных случаях, если имеется нагрузка, рассчитанная на постоянное напряжения, то электрическая схема проектируется с учетом отдельной ветви, рассчитанной на питание DC-потребителей.

- нагрузка – собственно, потребители электрической энергии.

Проблема выбора оборудования, обеспечивающего максимальное использование солнечной энергии и функцию автоматического ввода резерва, часто возникает в процессе разработки автономных систем электропитания, построенных на базе солнечных батарей. Решение данной проблемы особо актуально для районов Российской Федерации, где центральное снабжение электроэнергией невозможно или неоправданно дорого, а потому нуждающихся в маломощных автономных системах. К таким территориям можно отнести небольшие населенные пункты Якутии, Бурятии, а также территории иностранных государств (Монголия и др. страны), где количество солнечных дней преобладает как в зимние, так и в летние периоды времени.

Что касается проблем выбора оборудования, то здесь важной особенностью фотогальванических систем является тот факт, что солнечная энергия должна не только эффективно преобразовываться в электрическую и предоставляться потребителям, но в том числе необходимо обеспечить эффективное сохранение и аккумуляцию электрической энергии. Поэтому

аккумулятор – один из самых важных звеньев всей фотогальванической системы. Без своевременного и эффективного накопления электрического заряда, генерируемого фотоэлементами, круг применения последних был бы весьма ограничен. Однако использование аккумуляторных батарей ставит две основополагающие технические задачи, требующие решения:

- разработка оптимального алгоритма выбора аккумуляторных батарей для нужд фотогальванических станций;

- разработка одного или нескольких адаптивных алгоритмов заряда/разряда аккумуляторных батарей с целью обеспечения их эффективной работы.

Очевидно, что в силу ограниченного числа циклов перезаряда аккумуляторов, обусловленных особенностями технической реализации отдельных их типов, остро стоит задача выбора такого алгоритма заряда и разряда, чтобы число этих циклов было минимальным. Отсюда выходит два основных направления решения выше обозначенных проблем, которые подробно рассмотрены и исследованы в настоящей работе, а именно:

- выбор аккумуляторов с максимально возможным числом циклов перезаряда, удовлетворяющего всем техническим и экономическим показателям используемой фотогальванической системы, включая разработку алгоритма, осуществляющего этот выбор;

- выбор и модернизация схемы подключения аккумуляторных батарей к другим компонентам солнечной электростанции в соответствии с поставленными проектными задачами;

- разработка или усовершенствование алгоритма заряда аккумуляторных батарей для программируемого логического контроллера (ПЛК), обеспечивающего минимальное число циклов перезаряда.

Таким образом, в данной работе разрабатываются схема и алгоритм заряда свинцово-кислотных аккумуляторов различных типов для фотоэлектрических станций. Разрабатываемая солнечная электростанция в последствии может использоваться как для систем резервного

энергоснабжения, так и в автономных системах альтернативной энергетики самого различного назначения.

2 Обзор существующих решений

Существует несколько способов заряда аккумуляторных батарей. Выбор способа зависит от условий работы аккумулятора, требуемого числа циклов перезаряда, мощности, температуры среды и многих других параметров. Самый простой и безопасный метод зарядки аккумулятора - это метод I-U (иначе называемые, как метод тока - напряжения). Для зарядки аккумулятора этим способом изначально его заряжают постоянным током, а после достижения определенного значения напряжения, заряжают аккумулятор, поддерживая на нем постоянное напряжение.

При этом начальный ток заряда выбирают, ориентируясь на емкость аккумулятора, по следующему правилу: значение тока заряда рекомендуется устанавливать около 10% от численного значения емкости аккумулятора в ампер-часах. При более высоких значениях тока (особенно при значении свыше 30%) возможно повреждение аккумулятора из-за нагрева электролита. Максимальное значение тока заряда, обычно устанавливаемое производителем, составляет 20% или 30% от номинального значения емкости в ампер-часах.

Например, рассмотрим параметры гелевой аккумуляторной батареи Delta GX 12-200 емкостью 200 А·ч. Характеристики аккумулятора представлены в таблице 1.

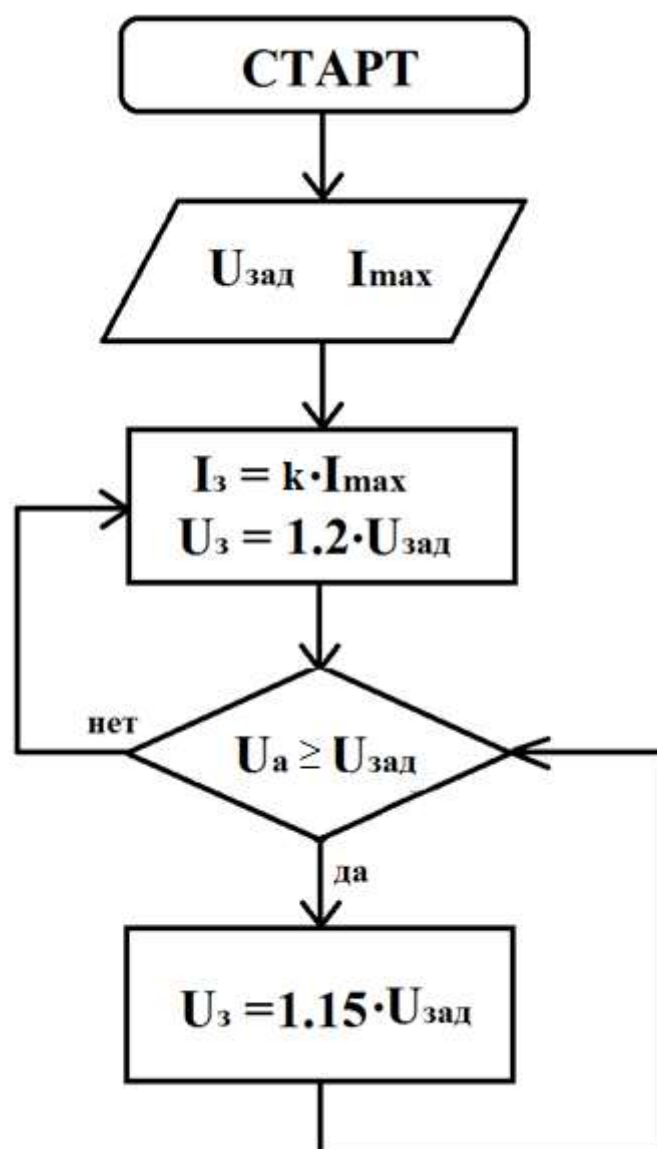
Таблица 1 – Параметры аккумулятора GX 12-200

Параметр	Значение параметра
Тип аккумулятора	GEL (гелевый)
Номинальное напряжение, В	12
Номинальная емкость (10-и часовой разряд А·ч	200

Срок службы, лет	10
Количество циклов при разряде на 30%	1400
Количество циклов при разряде на 100%	330
Внутреннее сопротивление, мОм	3.6
Саморазряд (при 20°C)	3% в месяц
Рекомендуемый ток заряда, А	20
Максимальный ток заряда, А	60
Максимальный ток разряда (пусковой), А	1000
Температурная компенсация зарядного напряжения	-30 мВ/°C
Рабочий температурный диапазон, °C	-20 ... +60
Размеры (Д x Ш x В), мм	522 x 238 x 218
Вес, кг	65
Тип клемм	болты М8

Из таблицы 1 видно, что производителем Delta указывается рекомендуемое значение тока заряда, равное 10% от емкости батареи, а максимальное значение тока заряда – 30% от емкости.

Несмотря на все преимущества метод заряда I-U подходит далеко не для всех сценариев работы батареи. Здесь и далее примем, что сценарий работы – это последовательность операций заряда и разряда аккумуляторной батареи, характеризующиеся определенной длительностью, частотой повторений и глубиной разряда батареи. Для сценариев работы, связанных с автономными или резервными источниками питания, где важной особенностью является большое количество циклов заряда-разряда, более подходящим является режим быстрой зарядки аккумулятора, блок-схема алгоритма работы которого показана на рис. 1.



$I_{\max}$ – максимальный ток заряда; $U_{\text{зад}}$ – заданное значение напряжения аккумуляторной батареи; U_a – напряжение на клеммах аккумулятора; I_z , U_z – ток и напряжение заряда, соответственно, k – коэффициент отстройки тока ($0,33 \leq k \leq 1$)

Рисунок 1 – Блок-схема режима быстрой зарядки аккумулятора

Сценарий работы аккумулятора в режиме быстрого заряда можно описать следующим образом. Изначально аккумулятор заряжается некоторым значением тока I_z , значение которого меньше либо равно максимальному значению тока заряда $I_{\max}$, установленного производителем. Отношение текущего тока заряда к максимальному значению тока будем называть коэффициентом отстройки тока k . При значении k , примерно равному 0,33, ток

заряда составляет около 10% от емкости батареи в ампер-часах, то есть является рекомендуемым значением тока заряда. Увеличение коэффициента k , соответствующее увеличению зарядного тока до значений, близких к максимальному, уменьшает время заряда батареи. Значение напряжения заряда обычно выбирается на 20% больше, чем номинальное напряжение аккумулятора. Когда аккумулятор зарядится до этого значения напряжения, то зарядное устройство отключается или переводится в режим поддержания заряда. В режиме поддержания заряда значение напряжения обычно устанавливается на 10-15%, чем номинальное напряжение аккумуляторной батареи. На рис. 1 показан сценарий работы аккумуляторной батареи с режимом поддержания заряда, при котором напряжение заряда устанавливается равным на 15% больше номинального.

Например, в случае с вышеуказанным аккумулятором Delta GX 12-200 в режиме быстрого заряда начальное напряжение следует установить равным около 14.5 В при номинальном напряжении аккумулятора 12 В. В режиме поддержания заряда напряжение по алгоритму рис. 1 будет равно 13.8 В.

Описанный выше сценарий работы батареи подразумевает два основных режима – заряд и поддержание заряда. Для перехода из одного режима в другой используется автоматическое устройство, называемое контроллером заряда. Однако опыт эксплуатации аккумуляторных батарей в фотогальванических системах показал, что подобный сценарий отрицательно сказывается на сроке службы аккумуляторов. В связи с этим в контроллерах заряда, используемых в системах солнечной энергетики, реализуются иные алгоритмы заряда, основанные на применении технологии широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Использование ШИМ позволяет увеличить ресурс работы аккумуляторных батарей за счет более плавного регулирования тока заряда.

Контроллер технологии ШИМ отключает зарядку, не замыкая цепь солнечных модулей. При его использовании можно достичь 100% уровня зарядки аккумуляторной батареи. Этот процесс осуществляется в 4 этапа,

которые выполняются в зависимости от уровня заряда аккумуляторной батареи в автоматическом режиме (рис. 2):



Рисунок 2 – Заряд аккумулятора по алгоритму ШИМ

1) Основной заряд (Накопление, Bulk) – АКБ получает весь ток солнечной батареи в полном объеме;

2) Поглощающий заряд (Насыщение, Absorbtion, ШИМ заряд) – после достижения определенного уровня напряжения на аккумуляторе, контроллер поддерживает постоянное напряжение за счет тока заряда, модулированного по алгоритму ШИМ. Благодаря этому удастся избежать перегрева и газообразования в батареях. По мере заряда аккумулятора ток уменьшается;

3) Поддерживающий заряд (Равновесие, Float) – после полной зарядки аккумуляторной батареи, для предотвращения дальнейшего нагрева или газообразования в ней, зарядное напряжение уменьшается. Аккумулятор поддерживается в заряженном состоянии;

4) Уравновешивающий заряд (Выравнивание, equalization) – используется только для аккумуляторных батарей открытого типа. Работа многих батарей подобного типа улучшается при периодическом заряде до газообразования, при

этом происходит выравнивание напряжений на отдельных банках АКБ, а также очищаются их пластины и перемешивается электролит. Эта стадия заряда полностью обеспечивает восстановление емкости аккумуляторов, т.к. способствует перемешиванию электролита и восстанавливает те зоны пластин, которые не используются. Этот процесс сопровождается обильное газовыделение - образуются газообразные водород и кислород. Для предотвращения взрыва необходима достаточная вентиляция и устранение всех источников зажигания.

ШИМ-контроллеры обычно применяют в небольших системах от 100 Вт до 1 кВт, где используется немного модулей и нужна зарядка АКБ небольшой емкости.

Технические характеристики ШИМ-контроллера на примере одного из лучших контролеров Steca PR3030:

Таблица 2 – Параметры ШИМ-контроллера Steca PR3030.

Параметр	Значение
Напряжение, В	12/24
Максимальный входной ток, А	30
Максимальный ток нагрузки, А	30
Максимальное собственное потребление, мА	12
Напряжение ударного заряда, В	14.4/28.8
Напряжение поддержки, В	13.9/27.8 (для герметичных АКБ) 14.1/28.2 (для АКБ с жидким электролитом)
Напряжение выравнивания (для АКБ с жидким электролитом), В	14.7/29.4
Напряжение защитного отключения нагрузки (SOC, 30%), В	11.1/22.2
Напряжение повторного подключение	12.6/25.2

нагрузки (SOC, >50%), В	
Интервал рабочих температур, °С	-10 ... +50
Размер терминалов, мм ²	16/25
Класс защиты	IP22
Габаритные размеры, мм	187x96x44
Вес, г	350

По достижении определенного значения напряжения на аккумуляторной батарее, контроллер ШИМ начинает постепенно снижать ток заряда, чтобы предотвратить перегрев, вздувание или закипание аккумуляторов, в то время как заряд батареи продолжается для достижения максимального заряда. К тому же время заряда сокращается. Результат - КПД процесса заряда увеличивается, более полно и быстро заряженная батарея. Аккумуляторы, заряжаемые с использованием алгоритма ШИМ, в дальнейшем поддерживаются при довольно высоком среднем уровне заряженности. Срок службы батарей может быть значительно увеличен. При использовании данных контроллеров становится возможным выравнивание элементов и при более низких напряжениях. Такой заряд может обеспечить поддержание отдельных элементов аккумуляторной батареи в более уравновешенном состоянии. Это является очень важным при использовании герметичных аккумуляторов, не допускающих газовыделения. Кроме того, это полезно при заряде таких батарей от солнечных элементов, так как на практике в солнечных электросистемах весьма редко удастся поддержать высокое напряжение на аккумуляторах в течение продолжительного времени. Специальные исследования контроллеров с ШИМ доказали, что данные контроллеры повышают восприимчивость батареи к заряду именно благодаря использованию широтно-импульсной модуляции тока заряда. По сравнению с контроллерами, постоянно поддерживающими высокое напряжение на аккумуляторных батареях, ШИМ-контроллеры позволяют увеличить эффективность заряда этих батарей на 2-8% . Таким образом, ШИМ-контроллер

позволяет аккумуляторам принять энергии от солнечных батарей на 20%-30% больше, чем контроллер «on-off».

Помимо более простых схем управления с использованием ШИМ на практике отлично себя зарекомендовал алгоритм, основанный на отслеживании так называемой точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Дело в том, что в системах альтернативной энергетики выходная вольт-амперная характеристика (ВАХ) первичного преобразователя (в нашем случае, фотоэлемента) является сложной нелинейной зависимостью. Для того, чтобы фотоэлементы отдавали в сеть максимальную мощность требуется точное согласование нагрузки с ВАХ фотоэлементов. Таким образом, за счет прецизионного подбора параметров нагрузки преобразователь работает в какой-то определенной рабочей точке ВАХ, в которой он отдает максимальную мощность в сеть. Эта точка и называется точкой максимальной мощности. Алгоритм MPPT реализуется в преобразователе электрической энергии и может быть различным. Наиболее распространенными разновидностями алгоритма MPPT являются следующие:

- возмущение и наблюдение;
- метод постоянного тока и напряжения;
- метод пробной ячейки;
- метод возрастающей проводимости;
- метод паразитической емкости и др.

Рассмотрим указанные выше разновидности MPPT алгоритмов более подробно.

Алгоритм возмущения и наблюдения (ВиН) является наиболее широко используемым на практике из-за легкости его реализации. В самых общих чертах алгоритм ВиН работает следующим образом. Рассмотрим рис. 3, отображающий семейство кривых зависимости мощности набора фотогальванических элементов от напряжения (кривые P-V), при различных уровнях освещенности (G), при стандартном уровне освещенности и постоянной температуре. Эти кривые имеют глобальный максимум в точке

максимальной мощности (ТММ). Предположим, что массив фотогальванических батарей (МФБ) работает в точке А, которая, как видно из рис. 3, далека от ТММ. В алгоритме ВиН рабочее напряжение МФБ изменяется на небольшое значение и измеряется результирующее приращение мощности ΔP . Если ΔP положительное, то изменение рабочего напряжения позволило сдвинуть рабочую точку МФБ ближе к ТММ. Как следствие, дальнейшее изменение напряжения в том же направлении (имеется в виду, изменение с тем же алгебраическим знаком) должно сдвинуть рабочую точку еще ближе к ТММ. Если же ΔP отрицательное, то рабочая точка системы была сдвинута в противоположную сторону от ТММ, и знак приращения должен быть изменен на противоположный для того, чтобы сдвинуть рабочую точку ближе к ТММ.

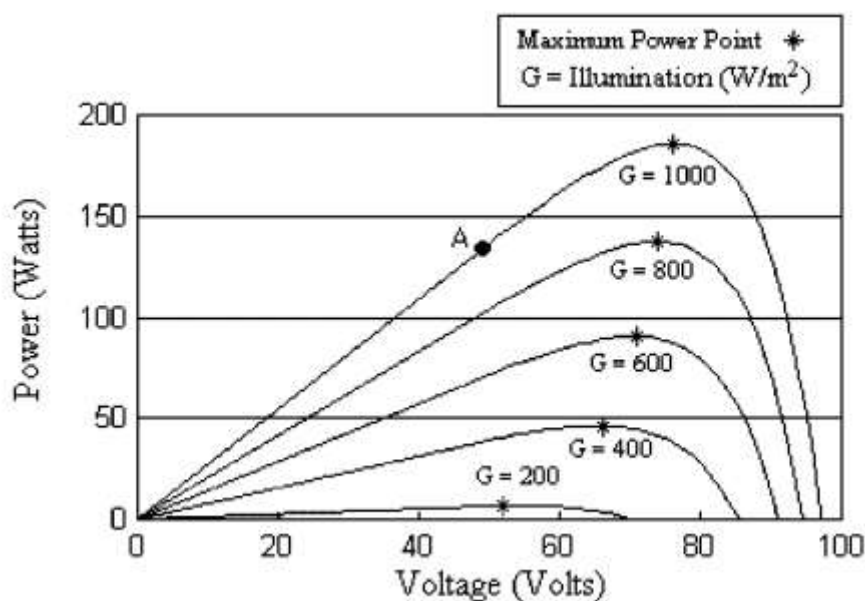


Рисунок 3 – Зависимость кривых мощности фотогальванической системы от напряжения

Преимуществами этого алгоритма, как было указано ранее, являются простота и легкость реализации. Однако алгоритм ВиН имеет ряд ограничений, которые снижают эффективность МРРТ. Одним из таких ограничений является сглаживание P - V характеристики в периоды уменьшения солнечной активности, что показано на рис. 3. Это усложняет задачу определения

положения ТММ для алгоритма МРРТ, что связано с небольшим изменением мощности по отношению к колебаниям напряжения. Другим принципиальным препятствием является невозможность определения того момента, когда система действительно достигла ТММ. Вместо этого система колеблется около ТММ, изменяя знак возмущения ΔP после каждого измерения. Также, как было выяснено[8], алгоритм ВиН может вести себя непредсказуемо в условиях быстро изменяющегося уровня освещенности. На рис. 4 изображены точные PV-характеристики массива фотогальванических элементов возле ТММ. Рассмотрим случай, при котором уровень освещенности соответствует PV-кривой 1 рис. 4. МРРТ в этом случае колеблется около ТММ из точки В в точку А, в точку С, затем снова в точку А и т.д. Затем предположим, что уровень освещенности увеличился, и PV-кривая МФБ сдвинулась вверх, совпав с траекторией кривой 2. Если в течение быстрого увеличения солнечной активности и выходной мощности МРРТ сдвигало рабочую точку из А в В, то в таком случае МРРТ сдвинет точку А в точку D. Как показано на рис. 4, это приводит к положительному приращению мощности ΔP , и МРРТ продолжит изменение рабочей точки в том же направлении, т.е. в сторону точки F. Если солнечная активность продолжает расти, то кривая мощности PV будет проходить через точку G кривой 3 вместо точки F кривой 2. И снова МРРТ учтет положительное значение приращения ΔP и будет думать, что он движется в сторону ТММ, продолжая движение к точке I. Начиная с точки А и двигаясь к D, затем к G и к I, МРРТ тем самым уверенно движется от точки максимальной мощности, тем самым сводя на нет эффективность алгоритма ВиН. Такая ситуация может случиться в дни с переменной облачностью, когда осуществление МРРТ затруднено из-за частого смещения ТММ.

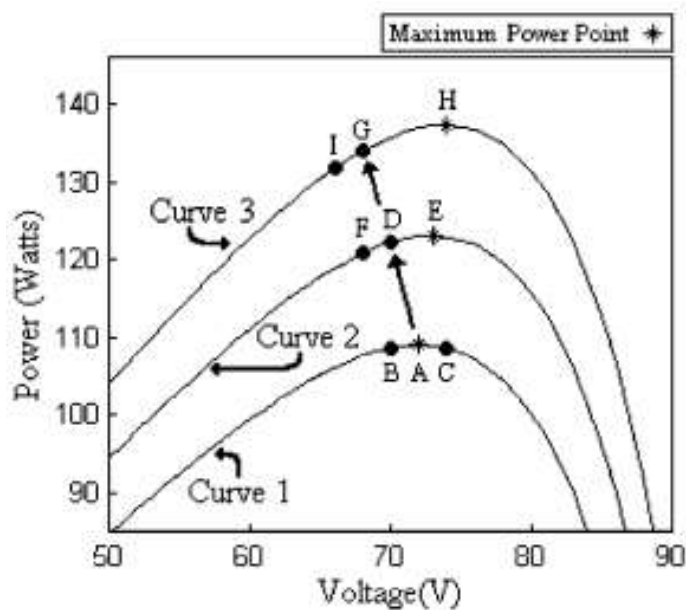


Рисунок 4 – Иллюстрация непредсказуемого поведения алгоритма ВиН в условиях быстро увеличивающейся освещенности

Некоторые улучшения алгоритма ВиН предлагаются в [9]. Одна из очевидных модернизаций алгоритма связана с добавлением «ждущей» функции, которая мгновенно приостанавливает изменения рабочей точки, если знак приращения мощности поменялся несколько раз подряд, что свидетельствует о достижении ТММ. Это уменьшает колебания около ТММ в установившемся режиме и улучшает эффективность алгоритма в условиях неизменной освещенности. Однако в то же время это делает алгоритм МРРТ более медленным по реакции на изменяющиеся атмосферные условия, усугубляя тем самым непредсказуемое поведение в дни с переменной облачностью.

Другое направление улучшения алгоритма ВиН связано с измерением набора напряжений P_1 при наборе напряжений V_1 , дальнейшим изменением напряжения, новым измерением мощности P_2 и напряжения V_2 и затем возвратом напряжения к первоначальным значениям V_1 с обязательным переизмерением мощностей P_1' . Из двух разных процедур измерения при одном и том же наборе напряжений V_1 алгоритм может определить, изменились ли условия освещенности. И так же, как и в предыдущем случае, увеличение числа показаний мощности замедляет работу алгоритма. Также возможно

использовать две процедуры измерения при одних и тех же значениях напряжения V_1 для того, чтобы оценить, насколько уровень освещенности изменился между периодами измерений, и чтобы использовать эту оценку для решения вопроса о направлении смещения рабочей точки. Это, как и следует ожидать, увеличивает сложность алгоритма и также замедляет процедуру МРРТ.

Другой разновидностью алгоритма МРРТ является алгоритм постоянного напряжения и тока. Его ключевой идеей является рассмотрение вольт-амперных характеристик (ВАХ) с тем условием, чтобы отношение максимального напряжения набора фотоэлементов V_{MPP} к напряжению холостого хода V_{OC} было приблизительно постоянным. Иными словами:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cong K < 1 \quad (2)$$

Алгоритм постоянного напряжения может быть реализован с помощью блок-схемы, показанной на рис. 5. Набор фотоэлементов временно отключается от устройства МРРТ, и производится измерение V_{OC} . Далее МРРТ производит расчет нужной рабочей точки с использованием выражения (2) и предустановленное значение K , и подстраивает значение напряжения фотоэлементов до тех пор, пока не будет достигнуто значение V_{MPP} . Эта операция повторяется периодически для отслеживания позиции ТММ.

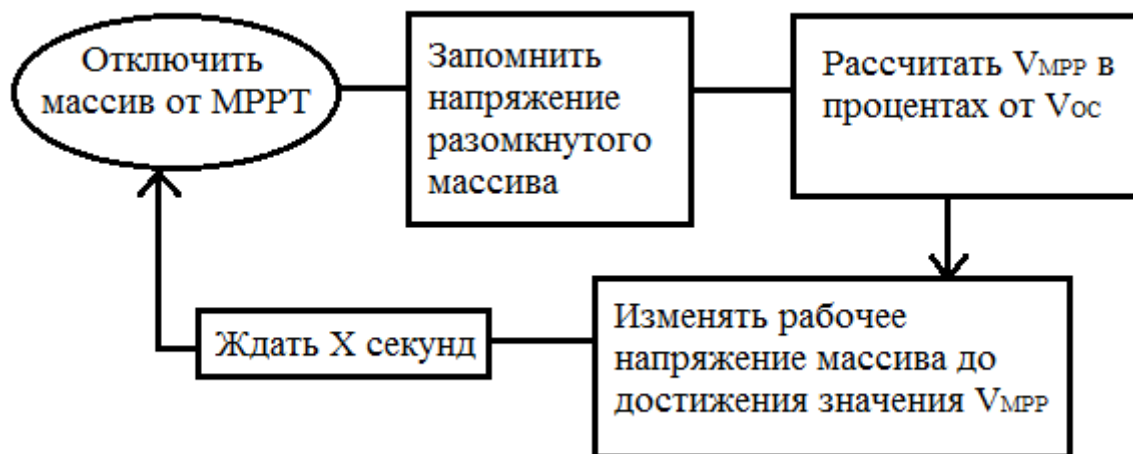


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма постоянного напряжения

Хотя метод кажется предельно простым, его сложность заключается в оптимальном выборе константы K . В литературе указывается подходящее значение K в диапазоне от 73% до 80% [10-12]. На рисунке 6 показаны значения коэффициента K , необходимые для работы с фотогальваническим массивом в диапазоне температур от 0 до 60°C и интенсивности освещения от 200 до 1000 Вт/м². Эти кривые рассчитаны с использованием ВАХ фотогальванических ячеек по уравнениям (3), (4) и (5).

$$I = I_L - I_{OS} \left[\exp \frac{q}{A k_B T} \{V + IR\} - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_{OS} = I_{OR} \left(\frac{T}{T_R} \right) \exp \left[\frac{q E_G}{A k_B} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

$$I_L = \left(\frac{G}{1000} \right) [I_{SC} + K_{T,1} (T - T_R)] \quad (5)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение Шокли для освещенного р-п перехода. A – коэффициент идеальности (эмиссии) диода, q – заряд электрона, R – сопротивление последовательно соединенных фотогальванических ячеек. (Сопротивление шунта предполагается достаточно большим, чтобы принять его равным бесконечности при расчетах). Уравнение (4) вычисляет зависимость

температуры от обратного тока насыщения I_{OS} . I_{OS} является функцией обратного тока насыщения I_{OS} при стандартных параметрах: температуре T_R (25 °C), E_G , установленной запрещенной зоне полупроводника, измеренной температуре ячеек $T(^{\circ}C)$, константе Больцмана k_B и заряде электрона q . Уравнение (5) рассчитывает ток, генерируемый светом, I_L , как функцию освещенности $G(\text{Вт/м}^2)$, ток короткого замыкания фотогальванического массива при стандартных условиях I_{SC} , температурный коэффициент тока массива $K_{T,1}$ (A/°C) (который, как правило, очень мал) и температура массива $T(^{\circ}C)$. Рисунок 6 показывает, что коэффициент K не постоянен, фактически зависит от температуры и освещенности и изменяется как максимум на 8% за пределами диапазона стандартных условий.

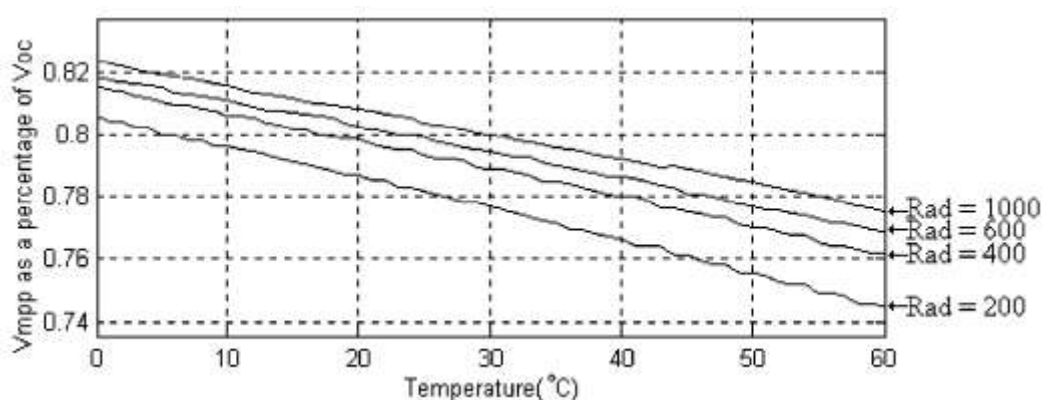


Рисунок 6 – V_{TMM} в процентах от V_{OC} как функция температуры и освещенности

Постоянное управление напряжением может быть легко реализовано с помощью аналоговых схем. Однако эффективность MPPT будет низкой по сравнению с другими алгоритмами. Причина тому заключается в вышеуказанной погрешности величины K и в том, что измерение напряжение разомкнутого фотогальванического массива требует быстрого и недолгого его отключения. Возможно динамически подстраивать значение K , но это требует разработки поискового алгоритма и в конечном счете приводит к классической схеме алгоритма возмущения и наблюдения.

Также представляется возможным использовать алгоритм MPPT по постоянному току, который примерно равен току ТММ, составляющему определенную долю от тока короткого замыкания [13]. Для реализации этого алгоритма переключатель подключается к входным клеммам преобразователя и срабатывает через некоторые моменты времени. Ток короткого замыкания измеряется, рассчитывается ток ТММ, а затем выходной ток массива фотогальванических элементов настраивается MPPT до тех пор, пока вычисленное значение тока ТММ не будет достигнуто. Эта операция периодически повторяется. Однако, управление постоянным напряжением обычно легко реализуемо из-за относительной простоты измерения напряжений и потому что размыкание массива легко выполнить технически, но практически невозможно замкнуть массив накоротко (т.е. получить нулевое сопротивление между клеммами массива) и выполнить замер тока.

Следующим распространенным алгоритмом MPPT является алгоритм пробной (пилотной) ячейки. В этой реализации также используется постоянное значение тока или напряжения, но напряжение разомкнутой цепи и ток короткозамкнутой цепи создаются только для маленькой солнечной ячейки-фотоэлемента, называемой пилотной или пробной ячейкой, которая имеет такие же характеристики, как и другие ячейки фотогальванического массива [13]. Измерения пробной ячейки могут быть использованы для MPPT для работы всего массива и его рабочей точки, уменьшая тем самым потери мощности при измерении V_{OC} и I_{SC} . Однако, проблем отсутствия постоянного значения K всё еще присутствует. Также данный метод имеет вычислительный недостаток, связанный с тем, что все параметры пробной ячейки должны быть тщательно сопоставлены с соответствующими параметрами всего массива. Следовательно, каждая пара пробная ячейка – массив фотоэлементов калиброваться, что увеличивает энергозатраты в системе.

В свою очередь, алгоритм возрастающей проводимости выводится путем дифференцирования мощности фотогальванического массива по напряжению и

приравниванием получившегося выражения к нулю [6]. Это показано в выражении (6):

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \text{ в ТММ} \quad (6)$$

Перегруппировка выражения (6) дает:

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (7)$$

Заметим, что левая часть выражения (7) отображает мгновенную проводимость фотогальванического массива в то время, как правая часть выражения отображает его дифференциальную проводимость. Следовательно, в точке максимальной мощности эти два выражения должны быть равны по амплитуде, но противоположны по знаку. Если рабочая точка находится вне ТММ, из выражения (7) можно вывести ряд неравенств, которые покажут, насколько больше или меньше текущее напряжение по отношению к напряжению в ТММ. Эти соотношения [6] собраны воедино в виде следующих выражений (8а, б, в).

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}; \left(\frac{dP}{dV} = 0 \right) \quad (8a)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}; \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right) \quad (8б)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}; \left(\frac{dP}{dV} < 0 \right) \quad (8в)$$

Выражение (8а) повторяет выражение 7, и указано здесь для удобства. Выражения (8б) и (8в) используются для определения направления, в котором следует выполнять изменение параметров для сдвига рабочей точки в сторону ТММ, и это возмущение повторяется до тех пор, пока не будет выполняться

равенство (8a). Достигнув ТММ один раз, МРРТ продолжает работать в достигнутой рабочей точке до тех пор, пока не будет зафиксировано изменение тока. Изменение тока в массиве всегда связано с изменением в освещенности. Как показано на рис. 3 с возрастанием освещенности на массиве, ТММ двигается вправо по отношению к напряжению массива. Для компенсации этого движения ТММ алгоритм МРРТ должен увеличить рабочее напряжение массива. В противоположном случае, вызванном уменьшением освещенности, происходят обратные действия.

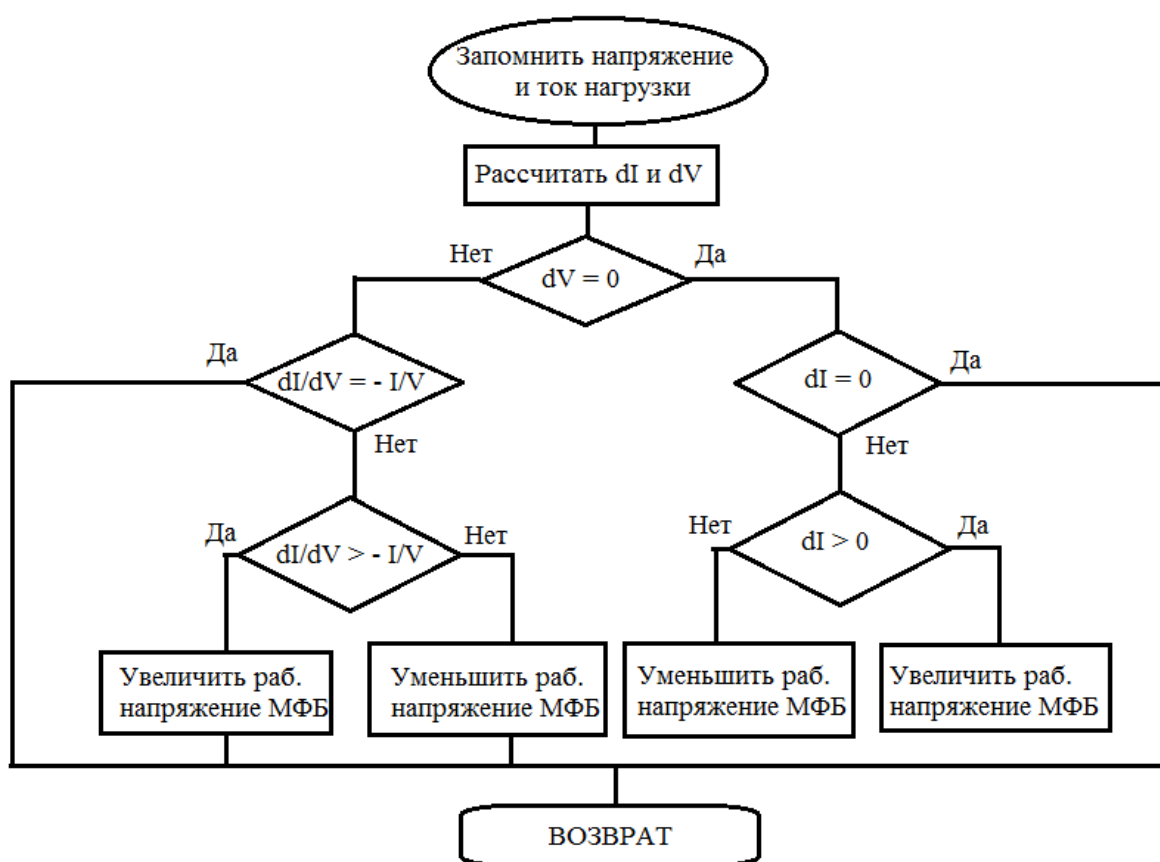


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма возрастающей проводимости

Рисунок 7 показывает блок-схему алгоритма возрастающей проводимости [6]. Текущее и предыдущее значения напряжения и тока солнечного массива используются для подсчета значений dI и dV . Если $dV = 0$ и $dI = 0$, то атмосферные условия не изменились и МРРТ всё ещё работает в точке максимальной мощности. Если $dV = 0$ и $dI > 0$, то общая интенсивность солнечного света выросла, увеличив напряжение ТММ. В таком случае, от

MPPT требуется увеличить рабочее напряжение фотогальванического массива для отслеживания ТММ. И напротив, если $dI < 0$, то общая интенсивность солнечного света уменьшилась, понизив напряжение ТММ и требуя от MPPT уменьшения рабочего напряжения фотогальванических элементов. Если изменения в обоих неравенствах для тока и напряжения не равны нулю, то соотношения (8б, в) могут быть использованы для определения направления, в котором требуется сместить напряжение рабочей точки для достижения ТММ. Если $dI/dV > -I/V$, тогда $dP/dV > 0$ и рабочая точка фотогальванического массива лежит левее от ТММ по кривой P-V. И как следствие, напряжение МФБ должно быть увеличено для достижения ТММ. Аналогично, если $dI/dV < -I/V$, то $dP/dV < 0$ и рабочая точка МФБ лежит справа от ТММ на P-V-кривой, и значит, что напряжение должно быть уменьшено для достижения ТММ. В этом заключается основное преимущество алгоритма возрастающей проводимости по сравнению с алгоритмом ВиН: дифференциальная проводимость позволяет рассчитать направление, куда требуется сместить рабочую точку для достижения ТММ, а также позволяет дать точный критерий достижимости ТММ. Следовательно, при быстро меняющихся условиях алгоритм не поведет рабочую точку в неправильном направлении, как, допустим, ВиН, и в то же время не будет колебаться около точки максимальной мощности после её достижения.

Другим важным примером является алгоритм паразитной ёмкости. Этот алгоритм во многом аналогичен алгоритму возрастающей проводимости за одним исключением: в нём учитывается эффект паразитной емкости C_p p-n перехода солнечных элементов, который моделирует сохранение заряда в полупроводниковом переходе солнечной батареи. Путем добавления этой емкости в уравнения для фотодиода можно представить уравнение (3), учитывая, что $i(t) = C_p dv/dt$:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_p + R_s I}{a}\right) - 1 \right] + C_p \frac{dv_p}{dt} = F(v_p) + C_p \frac{dv_p}{dt} \quad (9)$$

В последней правой части уравнения (9) выражение переписано для четкого обозначения того факта, что ток I состоит из двух компонент: функции напряжения $F(v_p)$ и тока в паразитной емкости. С использованием этой нотации дифференциальная проводимость массива g_p может быть определена, как $dF(v_p)/dv_p$, а постоянная проводимость массива g_L может быть определена, как $-F(v_p)/v_p$. ТММ находится в точке, где $dP/dv_p = 0$. Умножив уравнение (9) на напряжение массива v_p для получения мощности массива и продифференцировав результат, имеем уравнение для мощности массива в ТММ:

$$\frac{dF(v_p)}{dv_p} + C_p \left(\frac{\dot{V}}{V} + \frac{\ddot{V}}{\dot{V}} \right) + \frac{F(v_p)}{v_p} = 0 \quad (10)$$

Эти три слагаемых в выражении (10) обозначают постоянную проводимость, дифференциальную (возрастающую) проводимость и индуцированные помехи, вызванные паразитной емкостью. Первый и второй компоненты напряжения массива учитывают колебания переменного напряжения, генерируемого преобразователем. Стоит отметить, что если в выражении (10) приравнять C_p к нулю, то уравнение значительно упрощается и сводится к тому, которое использовалось в алгоритме возрастающей проводимости. Т.к. паразитная емкость моделируется, как конденсатор, соединенный параллельно с отдельным солнечным элементом, соединение в параллельную цепь фотоэлементов увеличит эффективное значение емкости, наблюдаемое при MPPT. Отсюда следует, что отличие в эффективности MPPT между алгоритмами возрастающей проводимости и паразитной емкости будет наблюдаться в солнечных батареях высокой мощности с параллельным соединением модулей.

Проводимость массива легко рассчитывается, т.к. представляет собой просто отношение установившегося тока массива к его установившемуся

напряжению. Вычисление дифференциальной проводимости является более сложной процедурой, но также может быть выполнено [14] с помощью уравнения (11):

$$g_p = \frac{P_{GP}}{V_O^2} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n^i a_n^v + b_n^i b_n^v]}{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [(a_n^v)^2 + (b_n^v)^2]} \quad (11)$$

где P_{GP} – средняя мощность колебаний, V_O – амплитуда колебаний напряжения, а a_n^i , a_n^v , b_n^i , b_n^v – коэффициенты ряда Фурье колебаний тока и напряжения фотогальванического массива.

Значения P_{GP} и V_O^2 могут быть получены из конфигурации цепи [14] такой, как, например, на рис. 8. Входы цепи подключены к массиву для измерения тока и напряжения. Фильтр высоких частот (HP) устраняет постоянную составляющую напряжения V_{PV} . Два умножающих элемента рассчитывают квадрат переменного напряжения V_O^2 и мощность P_{GP} , которые затем фильтруются фильтрами низких частот (LP), оставляя постоянные составляющие V_O^2 и P_{GP} . Из уравнения (11) следует, что отношение этих двух величин равно проводимости массива, которая затем может быть использована в связке с уравнением (8) до тех пор, пока дифференциальная проводимость массива и измеренная проводимость не будут равными.

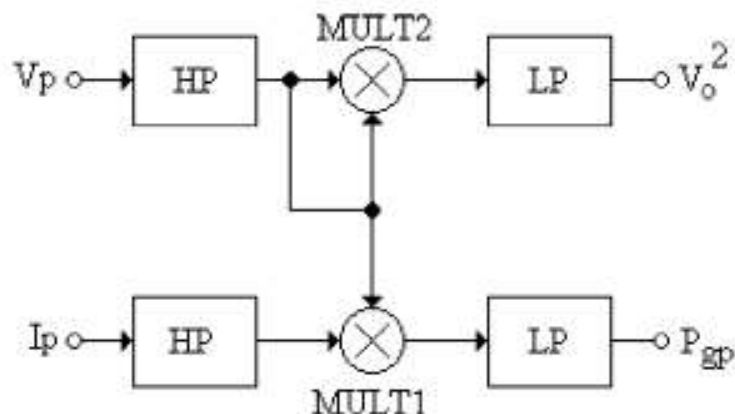


Рисунок 8 – Схема для реализации метода паразитной емкости

Реализация систем солнечной энергетики невозможна без надлежащего выбора подходящего аккумулятора или набора аккумуляторных батарей для долгой и бесперебойной работы фотогальванической системы в целом.

Для аккумуляторов, работающих совместно с инверторами в фотоэлектрических системах, наиболее важным параметром является число циклов перезаряда. Так, например, автомобильные свинцово-кислотные аккумуляторы не подходят для использования в системах солнечной энергетики из-за относительно небольшого числа циклов перезаряда. В современных фотогальванических системах широкое применение находят батареи двух типов – AGM и GEL. Они представляют собой по принципу действия те же свинцово-кислотные аккумуляторы, но с целым рядом технических усовершенствований, позволяющих значительно повысить их эффективность и характеристики.

AGM расшифровывается, как абсорбирующие стеклянные маты. Представляет собой обыкновенную стеклоткань, расположенную между положительными и отрицательными свинцовыми пластинами. В стеклоткани находится электролит в связанном состоянии. Благодаря тому, что электролит находится в этом состоянии, эксплуатация батареи возможна в любом положении (например, на боку).

AGM аккумуляторы являются самыми дешевыми (за исключением автомобильных) с типичным сроком службы – 5 лет. Однако существуют модели и с 10-летним сроком службы. Типичная модель способна выдерживать до 200 циклов разряда с глубиной 100%, до 350 – с глубиной 50% и до 800 – с глубиной 30%.

Применять AGM аккумуляторы целесообразно в системах резервного питания, т.е. там, где циклирование (разряды) будет достаточно редким. При условии соблюдения оптимального температурного режима (15-25 градусов

Цельсия) и если не оставлять батарею в разряженном состоянии, AGM модель прослужит заявленный производителем срок службы.

Следующим типом аккумуляторов являются GEL-батареи. GEL расшифровывается, как гель, а не гелий, что иногда встречается. В гелевых аккумуляторах в качестве сепаратора между свинцовыми пластинами применяется силикагель, которым заливается пространство между пластинами в процессе производства. Силикагель после застывания представляет собой твердое вещество с огромным количеством пор, в которых удерживается электролит. Благодаря тому, что силикагель полностью занимает пространство между пластинами, в гелевых аккумуляторных батареях практически невозможно осыпание свинцовых пластин и как следствие, закорачивание и выход из строя.

Кроме того, такая конструкция позволила улучшить качественные характеристики гелевых аккумуляторов, а именно, число циклов разряда и устойчивость к глубоким (100%-ным) разрядам. И если их номинальный срок службы не отличается от срока службы аккумуляторных батарей технологии AGM и здесь также существуют модели с 5- и 10-летним сроком, то количество циклов типичной гелевой батареи в среднем на 50% выше. Типичная модель технологии GEL способна выдерживать до 350 циклов разряда с глубиной 100%, до 550 — с глубиной 50% и до 1200 — с глубиной 30%.

Таким образом, установка более дорогих гелевых аккумуляторов будет более экономичным решением в автономной системе электроснабжения, поскольку в ней реальный срок службы аккумуляторных батарей определяется максимальным числом циклов заряда/разряда и очень редко достигает до номинального срока в 5-10 лет.

Т.к. задача проектирования заключается в разработке автономной фотогальванической системы, то остановим выбор на гелевых аккумуляторах.

Итак, алгоритм выбора аккумуляторной батареи состоит из следующих шагов:

- выбор типа аккумуляторной батареи;

- выбор рабочего напряжения;
- предварительный выбор емкости;
- расчет емкости аккумуляторной батареи;
- окончательный выбор емкости с учетом токов заряда и разряда.

Наиболее распространенным значением рабочего напряжения является 12 В. Аккумуляторы с рабочим напряжением 12 В являются оптимальным вариантом по следующим причинам:

- большинство контроллеров заряда и типовых инверторов рассчитаны на это значение напряжения;
- при необходимости получения другого значения 12-вольтовые аккумуляторы можно комбинировать для получения произвольного значения напряжения. Например, в соответствии с техническим заданием для получения требуемого напряжения 48 В необходимо соединить 4 12-вольтовые аккумуляторные батареи последовательно для получения требуемого значения.

После выбора рабочего напряжения аккумуляторных батарей необходимо определиться с общей энергоёмкостью блока аккумуляторов. В большинстве случаев можно сказать, что рабочий энергетический запас такого блока следует выбирать примерно равным расчётному среднесуточному потреблению в минимально приемлемом режиме. Например, для аварийного режима это будет 2 кВт·ч, для базового – 4 кВт·ч, для умеренного – 5 кВт·ч. По заданию среднесуточное энергопотребление составляет около 2 кВт·ч, поэтому при дальнейших расчетах ориентируемся на это значение.

Суммарный ток зарядки, равный максимальному току солнечной батареи, не должен превышать указанный производителем максимально допустимый ток заряда аккумулятора, умноженный на число параллельных сборок (именно сборки, а не отдельных аккумуляторов). Это условие может быть нарушено, если солнечная батарея мощная, а блок аккумуляторов слишком слабый. И тогда возможен не только быстрый выход аккумуляторов из строя, но даже их взрыв и возгорание.

С другой стороны, слишком малый ток заряда не сможет полностью зарядить аккумуляторы. Это происходит тогда, когда ёмкость блока аккумуляторов слишком высока, а солнечная батарея имеет небольшую мощность. При недолгой эксплуатации это приведёт лишь к сокращению запаса энергии в аккумуляторах, однако постоянный недозаряд снижает ёмкость аккумуляторов и сокращает срок их службы.

Наконец, ток, потребляемый инвертором в режиме максимальной мощности, не должен превышать предельно допустимый ток разряда аккумуляторов, умноженный на число их параллельных сборок. Для обеспечения более комфортных условий работы и хорошей энергоотдачи аккумуляторов желательно, чтобы ток разряда в длительном режиме не превышал половину, а лучше - пятую часть максимально допустимого значения.

Точные значения токов для выбора ёмкости следует взять в документации на конкретную модель аккумулятора, однако для предварительных прикидок можно принять следующие величины этих токов в амперах относительно ёмкости в ампер-часах:

- максимальный ток разряда численно равен ёмкости и допустим только в кратковременном режиме - меньше минуты;
- оптимальный ток разряда не превышает 20% ёмкости;
- оптимальный ток заряда составляет 5 .. 10% от ёмкости;
- максимальный ток заряда не превышает 20% от ёмкости (иногда - до 30%).

Основным критерием выбора ёмкости аккумуляторов является ток заряда, так как именно он оказывает главное влияние на долговечность и безопасность их эксплуатации. Исходя из вышеприведённых цифр, суммарная ёмкость сборок аккумуляторов в ампер-часах должна в 5...10 раз превышать максимальный суммарный ток сборок фотоэлектрических панелей в амперах (не отдельных аккумуляторов и панелей, а именно их сборок на номинальное низковольтное напряжение системы). А уже в этих пределах можно

ориентироваться на необходимый запас энергии. Некоторые модели аккумуляторов позволяют расширить границы допустимого диапазона емкостей блока до 3 .. 20 раз от максимального вырабатываемого тока панелей.

Таким образом, в соответствии с техническим заданием при наличии двух наборов аккумуляторных батарей, соединенных параллельно, необходимым требованием является соблюдение оптимального режима заряда, который позволил бы минимизировать число циклов перезаряда, тем самым продлив срок службы аккумуляторных батарей. Одним из видимых решений при такой конфигурации является использование аккумуляторных батарей поочередно. С учетом требований к процессу заряда/разряда алгоритм сценария работы системы можно представить, как на рис. 9.

Данный алгоритм основан на измерении напряжения на аккумуляторных батареях. Если напряжение падает ниже некоторого значения, то это свидетельствует о снижении заряда на соответствующей аккумуляторной батарее. Алгоритм рисунка 9 работает следующим образом. Контроллер производит замер напряжения первой аккумуляторной батареи. Если напряжение на первой батарее выше некоторого максимального значения, то это свидетельствует о большом заряде батареи, следовательно, она может использоваться работы и питания инвертора, и система переключается на первую батарею. В противном случае, если напряжение первой батареи ниже некоторого порогового значения, то она остается на подзарядке, а на второй аккумуляторной батарее производится измерения напряжения. Аналогично, если напряжение на втором аккумуляторе больше порогового значения, то ПЛК переключает инвертор на питание от него. В противном случае, алгоритм переходит к циклическому повторению, начиная с замера напряжения на первом аккумуляторе и т.д.

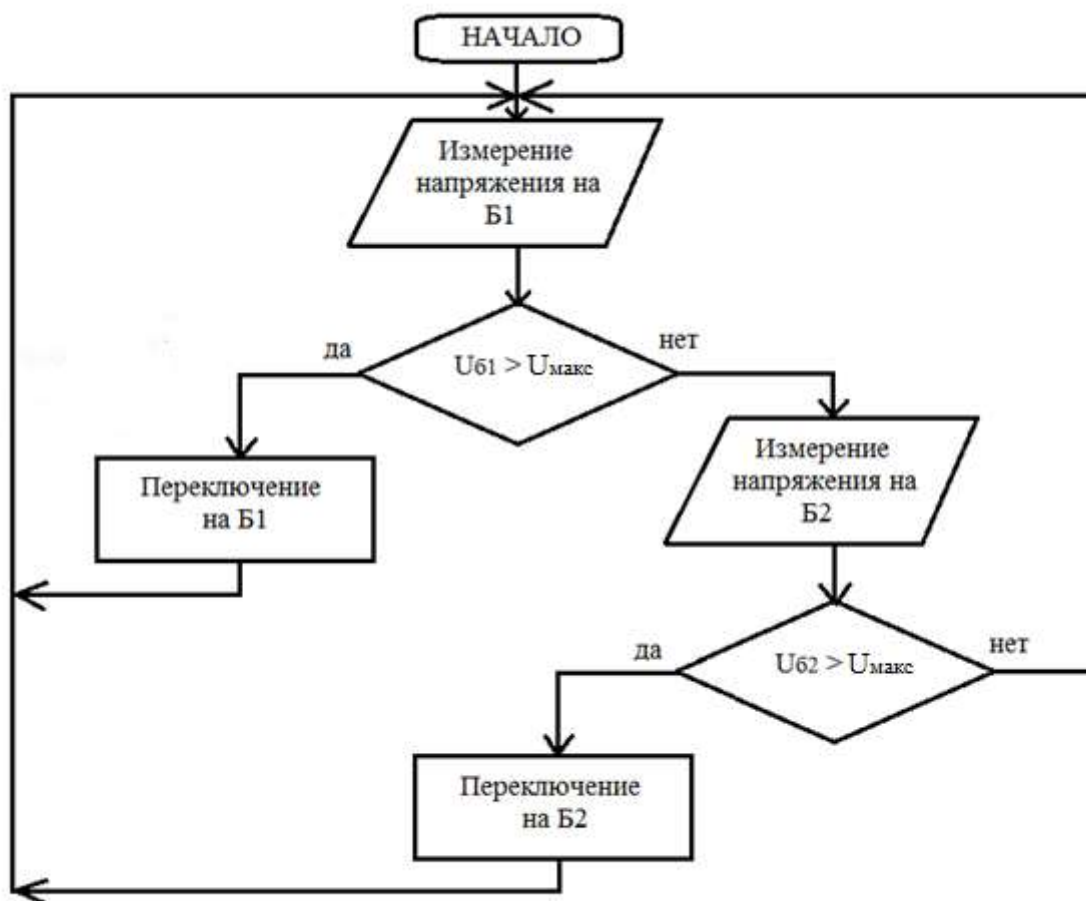
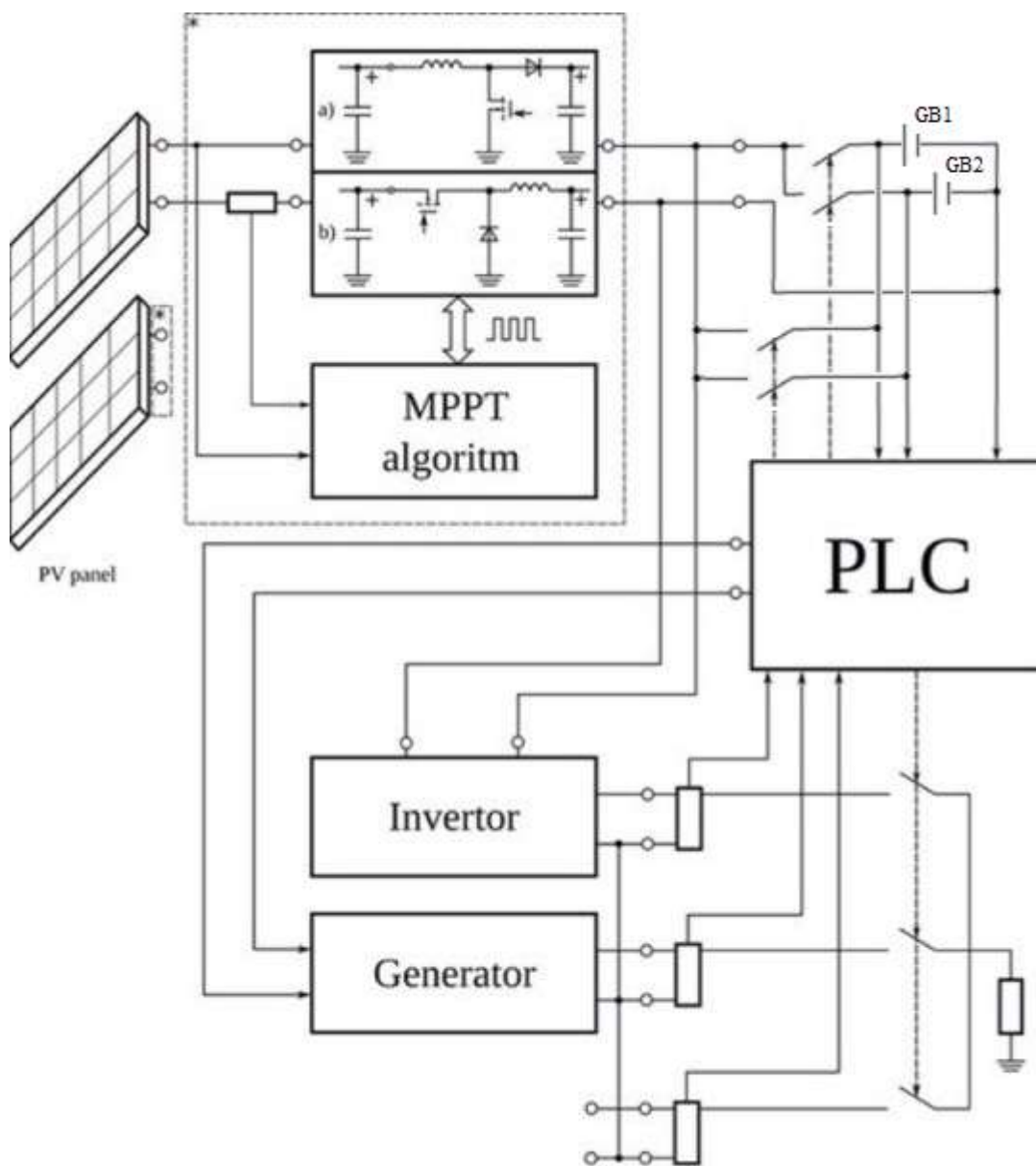


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма заряда/разряда аккумуляторных батарей

Указанная схема перезаряда аккумуляторных батарей позволяет избежать глубокого разряда свинцово-кислотных аккумуляторов, тем самым повышая срок службы аккумуляторных батарей. Усовершенствованная схема подключения самих батарей показана на рис. 10. Она включает в себя две аккумуляторные батареи и несколько переключателей, что позволяет осуществлять гибкое управление процессами заряда и разряда гальванических элементов. В частности, две пары переключателей соединяют плюсы аккумуляторных батарей с фотогальваническими модулями и с инвертором, соответственно. Переключатели управляются контроллером по заранее заданному алгоритму. Также для измерения напряжений гальванические батареи соединяются с аналоговыми входами ПЛК.



*- блок дублируется так же для второй PV-панели

Рисунок 10 – Усовершенствованная принципиальная схема подключения аккумуляторных батарей в системе солнечной электростанции

Следует отметить, что данный алгоритм переключения справедлив лишь для свинцово-кислотных аккумуляторов. Для сравнения никель-кадмиевые аккумуляторы необходимо подвергать глубокому (практически полному) разряду, т.к. в противном случае они теряют часть емкости [5]. Это связано с наличием т.н. «эффекта памяти» никель-кадмиевых батарей, вызванным процессом кристаллизации химических веществ в никель-кадмиевых батареях. Кристаллизация уменьшает активную площадь пластин

аккумулятора, что эквивалентно уменьшению емкости. Эффект памяти присущ в равной степени, как никель-кадмиевым, так и никель-металлгидридным батареям, но в значительно меньшей степени для последних, что позволяет производителям в рекламных целях утверждать, что такие батареи этого недостатка лишены. Такие батареи лучше хранить в заряженном состоянии неподключенными к потребителю, если требуется их долгое хранение. Указанный недостаток, однако, не свойственен аккумулятором литий-ионного типа, которые в настоящее время находят своё применение во многих практических схемах и устройствах.

3 Выбранная техническая реализация

Для реализации системы управления солнечной электростанцией необходимо в первую очередь определить, какое оборудование будет использоваться на ней. Прежде всего, определившись с режимом заряда свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, рассчитаем необходимую емкость. По заданию мы берем аккумуляторы с номинальной запасаемой энергией 2 кВт·ч. Для получения емкости батареи необходимо это значение поделить на номинальное напряжение батареи. Чаще всего, как было неоднократно рассмотрено выше, используются аккумуляторные батареи с номинальным напряжением 12 В. Как известно, емкость аккумуляторной батареи может быть вычислена по формуле:

$$C_{\text{ак}} = \frac{P}{U} \quad (12)$$

Таким образом, требуемая емкость получается равной $2000 / 12 = 166 \text{ А} \cdot \text{ч}$. В целом, емкость одного выбираемого аккумулятора должна несколько превышать это значение. Наиболее оптимальным выбором будут АКБ с емкостью 170 – 200 А·ч. Также в соответствии с рекомендациями из [5, 6] для

автономных систем энергоснабжения предпочтительнее использовать свинцово-кислотные аккумуляторы гелевого типа. Остановимся на гелевых аккумуляторах фирмы Delta, из которых наиболее подходящим по емкости аккумулятором является Delta GX 12-200, рассмотренный в разделе 2.

Что касается программируемого логического контроллера (ПЛК), то здесь мы имеем весьма широкий спектр подходящих устройств. Одной из наиболее зарекомендовавших себя фирм на российском рынке является компания ОВЕН с серией программируемых логических контроллеров ПЛК1хх, предназначенных для малых систем автоматизации. Необходимо Контроллеры ПЛК1хх (ПЛК100/ПЛК150/ПЛК154) – линейка компактных моноблочных контроллеров с входами/выходами на борту. Сфера применения этих контроллеров весьма широка и включает в себя:

- производство и модернизация автоматики котельных;
- климатическое оборудование;
- торговое оборудование;
- пищеперерабатывающие и упаковочные аппараты;
- системы HVAC, водоканалы, ИТП, ЦТП;
- строительное производство;
- системы сбора данных и диспетчеризации.

По сравнению с ПЛК других фирм и других контроллеров фирмы ОВЕН контроллеры семейства ПЛК1хх имеют ряд преимуществ:

- контроллеры выполнены в компактных DIN-реечных корпусах;
- дискретные и аналоговые входы/выходы на борту;
- наличие последовательных портов (RS-485, RS-232) и Ethernet;
- расширение количества точек ввода/вывода осуществляется путем подключения внешних модулей ввода/вывода по любому из встроенных интерфейсов;
- наличие встроенных часов, что позволяет создавать системы управления с учетом времени.

Выбор конкретного контроллера из трёх (ПЛК100, ПЛК150 и ПЛК154) уже необходимо осуществлять на основе поставленных задач. В схеме разрабатываемой солнечной электростанции контроллер должен выполнять следующие функции:

- реализация алгоритма MPPT через аналоговые выходы ШИМ;
- контроль напряжения на аккумуляторах;
- осуществление переключения в цепи аккумуляторных батарей;
- управление режимом подключения нагрузки конечных потребителей;
- возможность питания от резервного генератора переменного напряжения.

В таблице 3 показаны модификации контроллеров серии ПЛК1хх для сравнительного анализа и сопоставления:

Таблица 3 – Сравнительная характеристика контроллеров ПЛК1хх

	DI	DO	AI	AO	RS- 232 Debug	RS- 232	RS- 485	Eth	USB	DC 24 В	AC 220 В
ПЛК100	8	6 реле / 12 тр.	0	0	1	1	1	1	1	есть	да
ПЛК150	6	6 реле	4	2		0			0	нет	
ПЛК154	4	4 реле	4	4		0			0	нет	

Из табл. 3 видно, что ПЛК100 имеет вход питания по постоянному току 24 В помимо стандартного 220 В по переменному току. Также в дополнение к интерфейсам связи с пультом оператора или персональным компьютером RS-485 и Ethernet он поддерживает протоколы RS-232 и USB. Однако в силу полного отсутствия аналоговых входов/выходов, необходимых для измерения

токов и напряжений в цепи, данный контроллер не подходит для использования в системе солнечной электростанции. В то же время ПЛК154 имеет по 4 аналоговых входа и выхода, что достаточно для проектных требований, поэтому остановимся на выборе контроллера ПЛК154. Его функциональная схема показана на рис. 11.

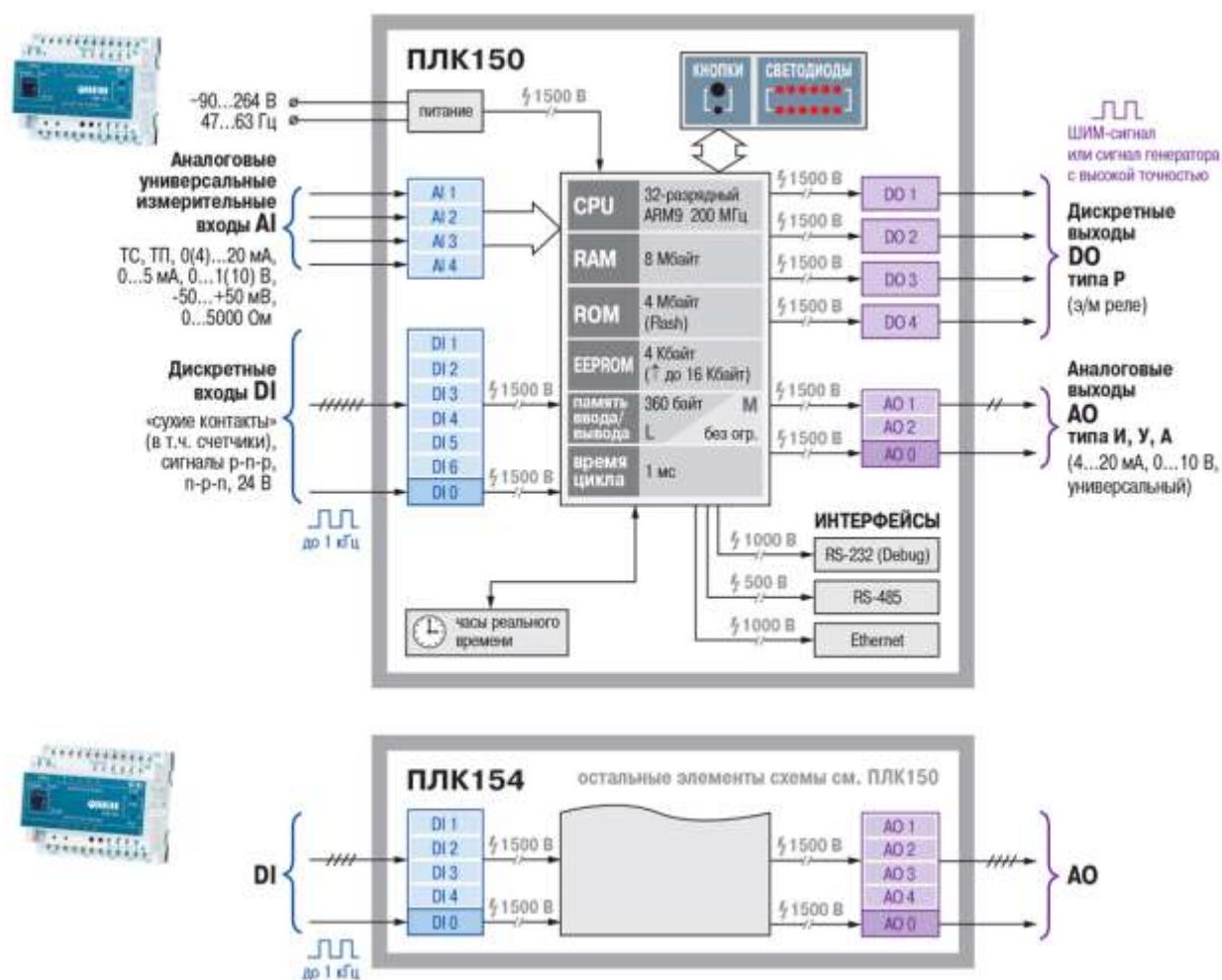


Рисунок 11 – Функциональная схема контроллера ОВЕН ПЛК150 и ПЛК154

В системе рис. 10 данный ПЛК будет соединяться по протоколу Ethernet с компьютером (на схеме не показан) для разработки программы под него и последующей записи программы в память контроллера. Соединение с ПК не должно поддерживаться постоянно и может быть использовано только одновременно для прошивки ПЛК. Для разработки программного обеспечения и последующей прошивки контроллера была выбрана среда CoDeSys, как

универсальная среда разработки программ для ПЛК, которая помимо прочего поддерживается производителем ПЛК154 – компанией OBEH. Помимо CoDeSys компания OBEH предлагает также утилиты собственной разработки EasyWorksPLC и PLC_IO, работающие без CoDeSys, и позволяющие изменять значения ряда параметров без вмешательства в программный код ПЛК.

Следующим шагом будет выбор инвертора. Исходя из требуемой мощности по заданию (250 Вт), а также следуя рекомендациям из [15], необходимо выбрать инвертор, преобразующий 48 В постоянного напряжения, в 220 В переменного. Для этих целей подойдет относительно любой инвертор с мощностью до 1500 Вт (рекомендуемое значение при 48 В постоянного тока). В ходе анализа предложений различных фирм-производителей было решено остановиться на инверторе PS1800-48 производства компании TBS Electronics.

Инвертор PS1800-48 подходит для широкого спектра приложений небольшой мощности, например для эксплуатации в передвижных домах, автомобилях, в передвижной лаборатории или в небольшой системе с солнечными батареями (для питания освещения, телевизора, DVD, ноутбука, зарядных устройств и т.п.). В отличие от многих других инверторов других линеек той же компании, серия Powersine имеет на выходе очень чистую синусоиду без помех, что обеспечивает правильную эксплуатацию чувствительного оборудования, такого как дисплеи, измерительные приборы и пр. Кроме того, данная модель отличается абсолютно бесшумной работой при мощности нагрузки до 200 Вт.

Серия инверторов Powersine отличается очень надежной электронной и механической конструкцией, что позволяет использовать его в условиях высокой вибрации. В сочетании с защитой от коротких замыканий, перегрузок и высоких температур, преобразователь Powersine обеспечит бесперебойную работу в течение многих лет.

Применение новейших технологий обеспечивает чрезвычайно эффективную работу с очень низким потреблением в режиме холостого хода. А в сочетании с функцией автоматического режима ожидания, инвертор PS1800-

48 потребляет без нагрузки всего лишь 4,7 Вт, что считается относительно неплохим показателем.

Внешний вид инвертора PS1800-48 показан на рис. 12



Рисунок 12 – Внешний вид инвертора TBS Powersine PS1800-48

Таким образом, были выбраны ключевые элементы системы управления фотогальваническими элементами, включая непосредственно контроллер (ОВЕН ПЛК154), аккумуляторные батареи (Delta GX 12-200) и инвертор (TBS Powersine PS1800-48).

4 Реализация системы (программа на ПЛК)

После завершения подбора ключевого оборудования необходимо выбрать окончательный алгоритм управления схемой заряда и разряда аккумуляторных батарей. На рис. 13 показана блок-схема осуществления заряда аккумуляторов.

На схеме приняты следующие условные обозначения для команд переключения:

- $s = 0$ – ничего не переключать;
- $s = 1$ – подключение к фотогальваническим преобразователям 1-ой батареи и отключение 2-ой;
- $s = 2$ – подключение к фотогальваническим преобразователям 2-ой батареи и отключение 1-ой;
- s_3 – переменная для выбора аккумуляторных батарей;
- $s_1 = 1$ – отключение от цепи заряда первого аккумулятора и подключение его к цепи инвертора;
- $s_2 = 2$ – отключение от цепи заряда второго аккумулятора и подключение его к цепи инвертора.

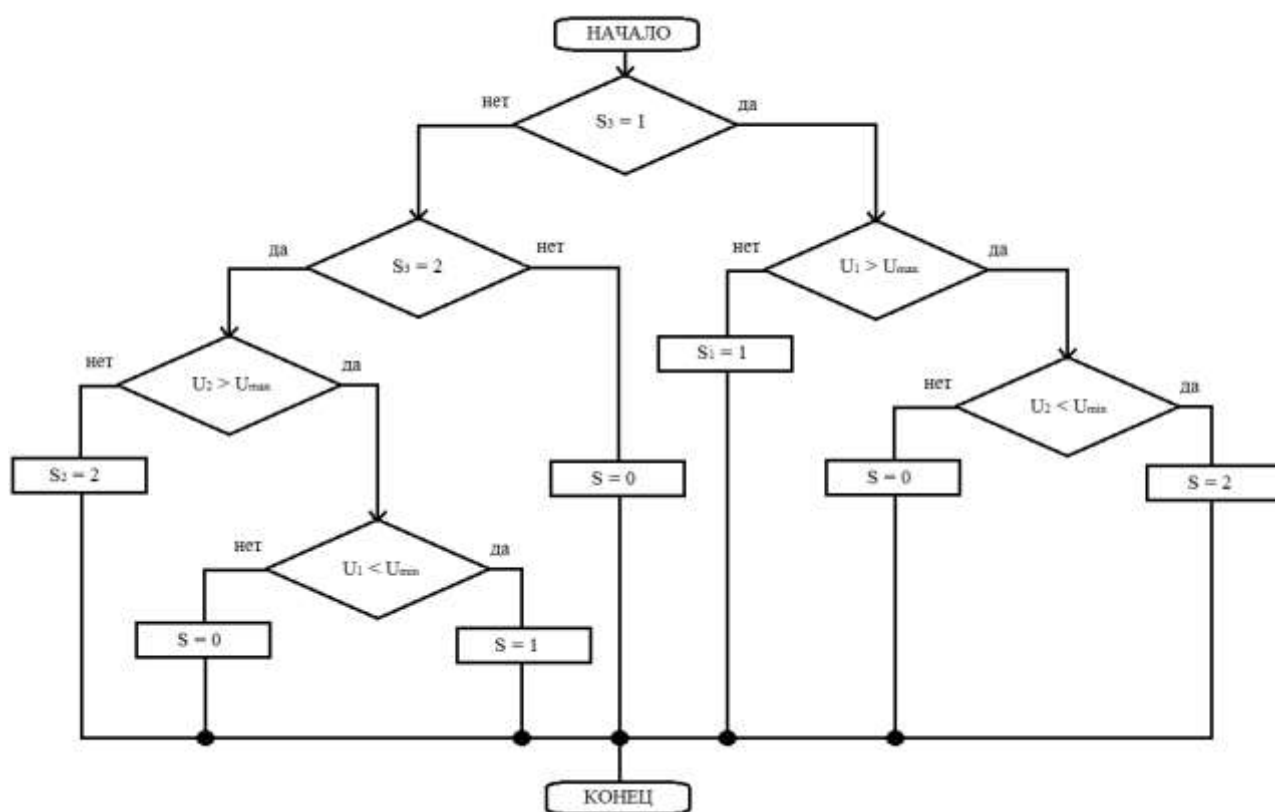


Рисунок 13 – Блок-схема алгоритма заряда

Блок-схема реализует следующий алгоритм заряда аккумуляторов. Переменной S_3 устанавливается аккумуляторная батарея, которая будет

подключена к инвертору. Если S_3 принимает значение, равное единице, то на первом аккумуляторе проверяется выходное напряжение. Если оно больше некоторого максимального значения, что свидетельствует о полном заряде аккумуляторной батареи, то первый аккумулятор отключается от цепи заряда. Для этого в переменную S_1 записывается число 1, которое передается на инверсный дискретный выход ПЛК. Если же напряжение на первом аккумуляторе меньше максимального значения, то проверяется степень разряда второго аккумулятора. Если второй аккумулятор разряжен, то он подключается к схеме заряда, и ПЛК переходит на следующий цикл работы. В противном случае, никаких изменений в схемах переключения не происходит.

Другая ветвь алгоритма работает в случае, если переменной S_3 в программе PLC_PRG присвоено значение 2. В противном случае, если переменная S_3 имеет какое-либо другое значение, то никаких изменений в схемах переключения не происходит.

Далее проверяется уровень заряда второго аккумулятора. При достаточном уровне заряда производится отключение аккумулятора №2 от цепи фотогальванических элементов. Далее, если напряжение первого аккумулятора ниже некоторого предопределенного минимального значения, что говорит о его разряде, то он подключается к схеме заряда от солнечных батарей. В противном случае, если заряд этого аккумулятора достаточен, то никаких переключений не происходит.

За непосредственное подключение аккумуляторных батарей к цепи инвертора отвечает другая пара контактов, управление которыми по разработанному алгоритму показано на блок-схеме рис. 14.

Так же, как и в предыдущей схеме, переменная S_3 определяет аккумулятор, подключаемые к цепи нагрузки. Если она принимает значение, равное единице, то алгоритм проверяет напряжение на втором аккумуляторе. Если оно превышает минимально допустимое значение напряжения, то контакт, соединяющий второй аккумулятор с инвертором, замыкается. В противном

случае, если его напряжение имеет слишком низкое значение, то он, напротив, отключается от нагрузки.

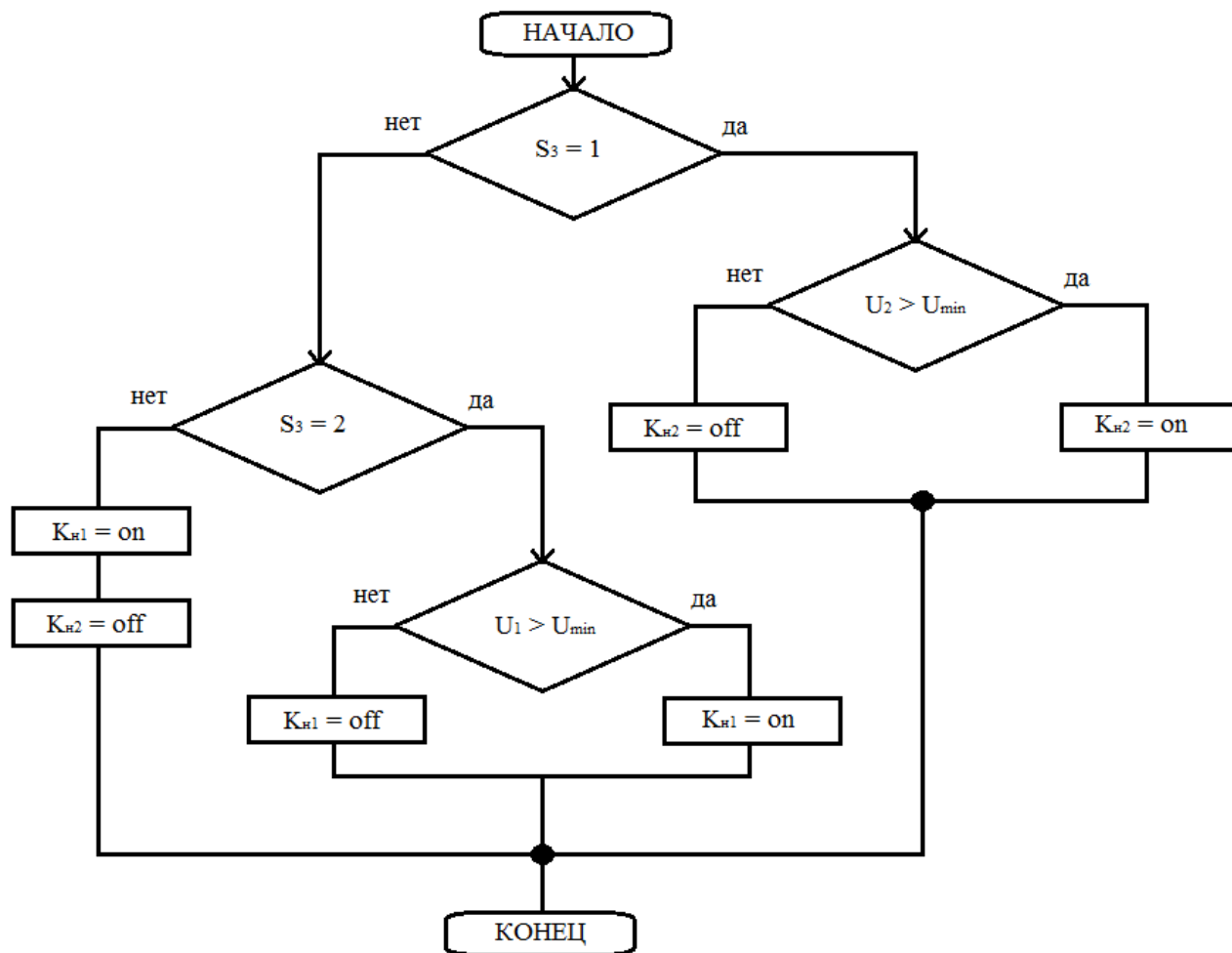


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма подключения нагрузки

В случае, если S_3 равен двойке, то аналогичным образом проверяется напряжение первого аккумулятора. При допустимом его уровне замыкается контакт, соединяющий первый аккумулятор с нагрузкой, в противном же случае соответствующий контакт размыкается.

Если же переменная S_3 имеет значение, которое отличается от единицы и двойки, то происходит переключение аккумуляторных батарей. Контакт первой батареи замыкается, а контакт второй батареи размыкается. Рассмотренные блок-схемы управления переключателями позволяют эффективно использовать ресурс аккумуляторных батарей и минимизировать число циклов перезаряда.

Они могут быть применены для написания программы для выбранного ПЛК в среде CoDeSys.

Настройка конфигурации ПЛК для последующего написания программы осуществляется уже непосредственно в самой среде разработки CoDeSys (рис. 15).

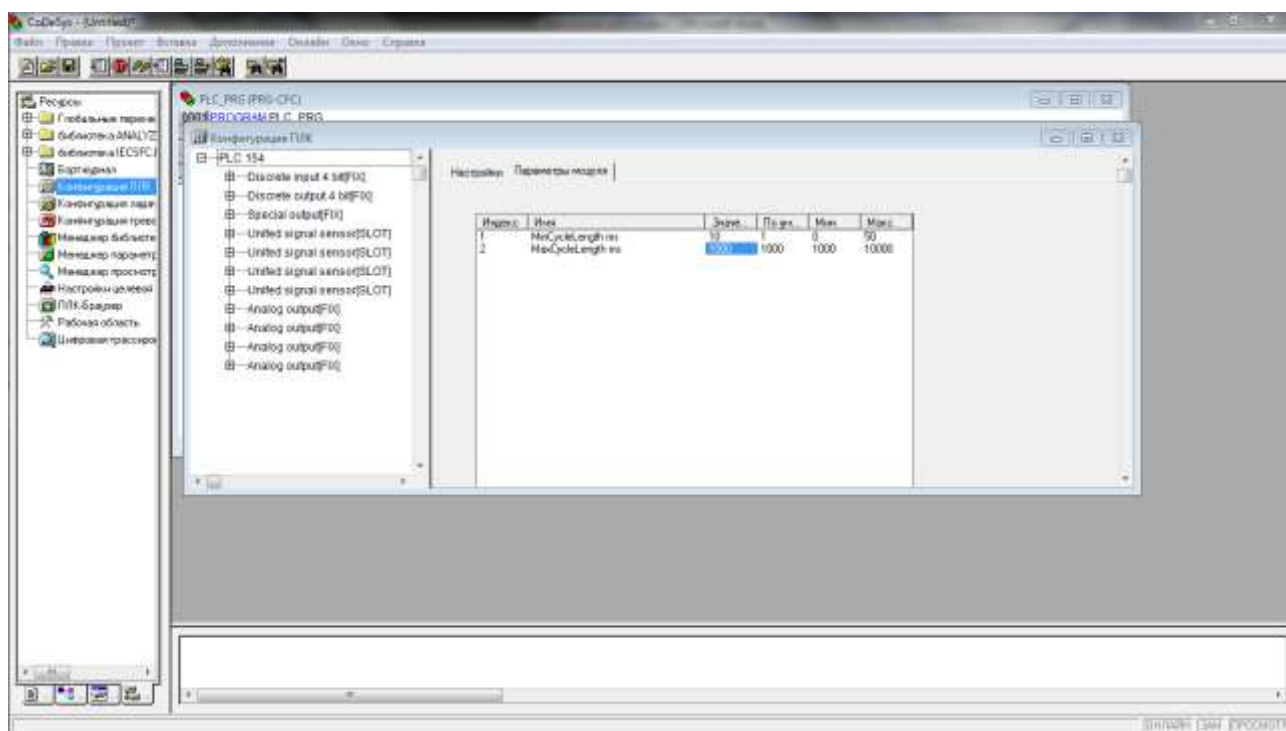


Рисунок 15 – Конфигурирование ПЛК154 для последующей работы

Для успешного функционирования программы в окне «Конфигурация ПЛК» выполняются следующие действия:

- установка минимального времени длительности цикла работы программы для ПЛК154;
- присвоение аналоговым входам и дискретным выходам программируемого логического контроллера соответствующих имен;
- определение глобальных переменных среды проекта;
- установка параметров аналоговых входов для приема сигналов DC0...10V.

Программа переключения схемы заряда аккумуляторных батарей для ПЛК154 на языке CRC показана на рисунке 16. Программа для управления подключения аккумуляторов к инвертору приведена на рисунке 17.

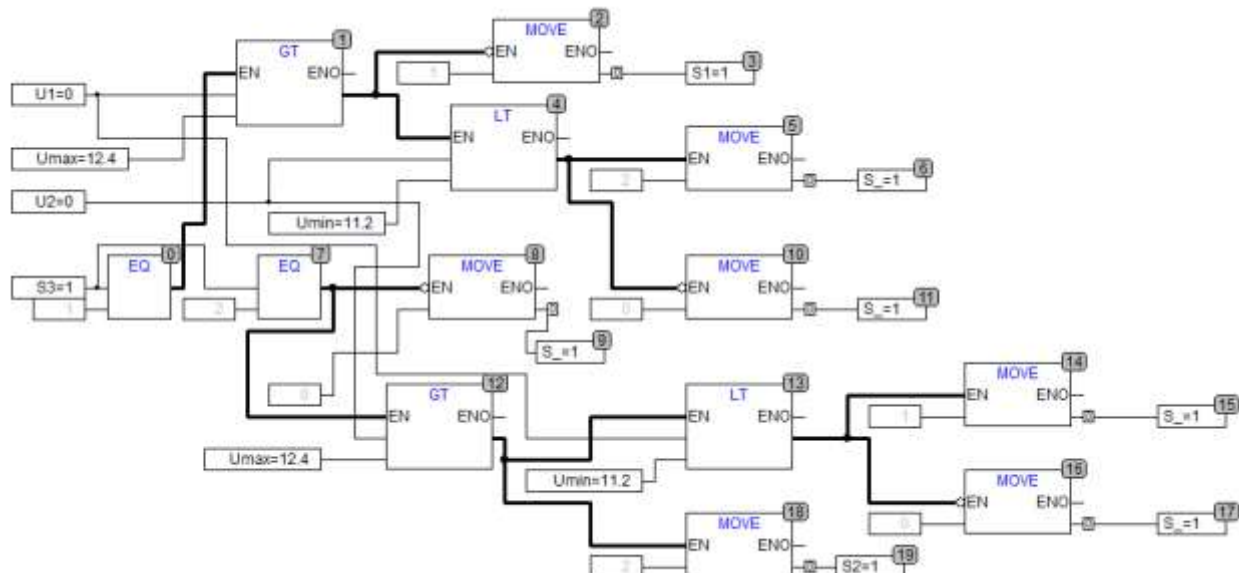


Рисунок 16 – CRC-программа для заряда аккумуляторных батарей

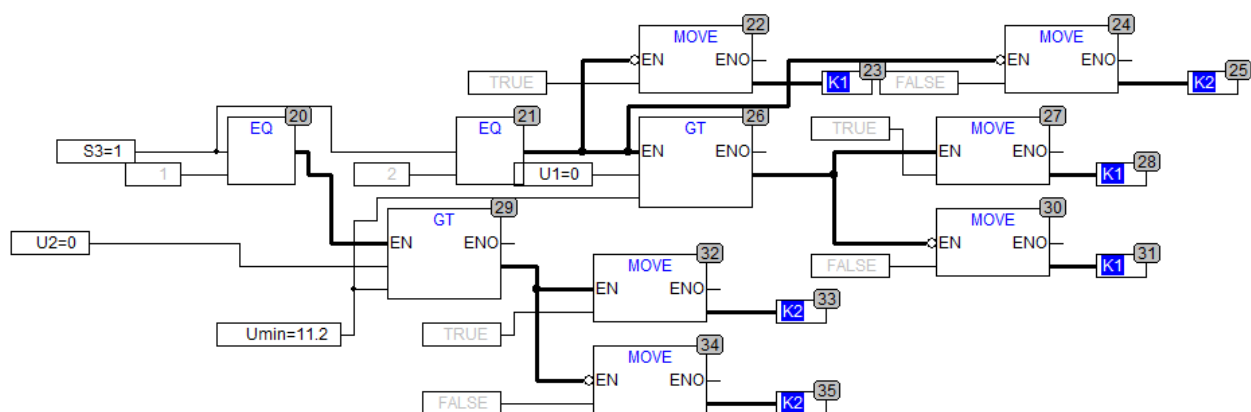


Рисунок 17 – CRC-программа для управления подключением АБ к нагрузке

Для написания программы на языке CRC были использованы следующие операторы:

- EQ – оператор проверки равенства входящих операндов. Возвращает логическую единицу, если операнды равны друг другу;

- GT – оператор сравнения двух операндов. Возвращает единицу, если первый операнд больше, чем второй;
- LT – оператор сравнения двух операндов. Возвращает единицу, если первый операнд меньше, чем второй;
- MOVE – оператор присваивания. Присваивает входное значение выходной переменной.

Для реализации условных переходов использовались входы EN/ENO, позволяющие активировать определенные операторы в зависимости от заданного условия по блок-схеме.

Встроенный компилятор CoDeSys подтвердил отсутствие синтаксических ошибок в программе PLC_PRG. Программа была испытана в режиме эмуляции и может использоваться для дальнейшей записи на контроллер ПЛК154 с целью эксплуатации в рабочих условиях.

Заключение

В данном дипломном проекте рассматривалась разработка схемы и алгоритмов заряда свинцово-кислотных аккумуляторов от фотоэлектрических станций.

В начале работы было обозначено значение солнечной энергетики для научно-технического прогресса и перспективы ее использования. Рассмотрена типовая функциональная схема солнечной электростанции, выполнена постановка задания на дипломную работу.

Во втором разделе рассматриваются различные варианты реализации алгоритмов заряда и разряда свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Также даются различия между различными конструктивными типами аккумуляторов, производится выбор наиболее подходящего типа аккумуляторной батареи для нужд автономной солнечной электростанции.

В третьем разделе производится непосредственный выбор оборудования и алгоритма для реализации проектной задачи. Выбираются конкретные аккумуляторные батареи, инвертор и программируемый логический контроллер. Схема подключения аккумуляторных батарей модернизируется, после чего обозначаются выбранные направления программной реализации процессов заряда и разряда аккумуляторов.

В четвертом разделе разрабатывается программное обеспечение, необходимое для управления системой перезаряда аккумуляторных батарей. Была написана программа на языке CRC для управления программируемым логическим контроллером.

Список использованных источников

1. Синицына Т. Нужна ли солнечная энергетика в России? // Энергетика и промышленность России. – 2007. - № 4 (80). - URL: <http://www.eprussia.ru/epr/80/5626.htm>
2. Тарнавский В. Всемирные перспективы солнечной энергетики // URL: <http://energosber.info/articles/alternate/71797/>
3. Анастасьева А.А. Потенциал солнечной энергетики // URL: <http://eypok.ru/book/export/html/59>
4. Шуткин О.И. Проблемы использования солнца // М.: Независимая газета. – 11 окт. 2011. URL: http://www.ng.ru/energy/2011-10-11/9_sun_energy.html
5. Кашкаров А.П. Аккумуляторы: Справочное пособие. – М.: ИП РадиоСофт, 2014. – 192 с.: ил.
6. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.: ил.
7. Hohm D.P., Ropp M.E. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms // Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2003, iss. 11: p. 47-62.
8. Kawamura T, et al. Analysis of MPPT characteristics in photovoltaic power systems. Solar Energy Materials and Solar Cells, Proceedings of the 1996 9th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, PVSEC-9 1997; 47(14): 155–165.
9. Enslin JHR, Wolf M, Swiegers W. Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter // IEEE Transactions on Industrial Electronics 1997; 44(6): 769–773.
10. Andersen M, Alvsten B. 200W low cost module integrated utility interface for modular photovoltaic energy systems // IECON: Proceedings of the 1995 IEEE 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation 1995; 1(1): 572–577.

11. van der Merwe L, van der Merwe G. Maximum power point tracking—implementation strategies // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics 1998; 1(1): 214–217.
12. Abou El Ela M, Roger J. Optimization of the function of a photovoltaic array using a feedback control system // Solar Cells: Their Science, Technology, Applications and Economics 1984; 13(2): 185–195
13. Salameh Z, Dagher F, Lynch W. Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems // Solar Energy 2001; 46(5): 279–282
14. Brambilla A, et al. New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking // Proceedings of the 30th IEEE Power Electronics Conference, 1998; 632–637.
15. Выбор инвертора для солнечной электростанции. URL: <http://www.solnechnye.ru/inventory-220v/vybor-invertora.htm>
16. Минаев И.Г. Программируемые логические контроллеры: практическое руководство для начинающего инженера / И.Г. Минаев, В.В. Самойленко. – Ставрополь: АГРУС, 2009. – 100 с.
17. Парр Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера / Э. Парр; пер. 3-го англ. изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 516 с.:ил.