

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка системы автономного электроснабжения слаботочных потребителей и наружного освещения с использованием солнечной энергии»

Студент(ка)

П.В. Крюков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

А.Н. Черненко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

## Содержание

Введение	3
1 Анализ существующих решений	5
1.1 Актуальность выбора источника электроснабжения	5
1.2 Анализ климатических условий в местности планируемого применения	7
1.3 Фотоэлектрические установки освещения присутствующие на рынке	11
1.4 Выводы по первой главе	35
2 Проработка теоретических аспектов и выбор компонентной базы	37
2.1 Анализ исходных данных	38
2.2 Вертикальное расположение фотоэлектрических панелей	40
2.3 Альbedo поверхности Земли	41
2.4 Моделирование всенаправленной кубической конструкции	45
2.5 Основные элементы ФЭ установок, исследуемых в данной работе	46
2.6 Выводы по второй главе	63
3 Проектирование системы	64
3.1 Отправные данные	65
3.2 Основные элементы ФЭ установок	67
3.2.1 Солнечная панель	68
3.2.2 Контроллер заряда аккумуляторов	72
3.2.3 Аккумулятор	78
3.2.4 Термостатирование аккумуляторной сборки	81
3.2.5 Компоновка	82
3.3 Выводы по третьей главе	83
Заключение	85
Список использованных источников	90

## Введение

«В настоящее время в общественном сознании крепнет убежденность в том, что энергетика будущего должна базироваться на крупномасштабном использовании солнечной энергии, причём в самых разных её проявлениях. Солнце – это огромный, неиссякаемый, абсолютно безопасный источник энергии, в равной степени всем принадлежащий и всем доступный. Ставка на солнечную энергетику должна рассматриваться не только как беспроигрышный, но и в долговременной перспективе и как безальтернативный выбор человечества», - Жорес Иванович Алфёров, «Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики 2004 г.» [6].

Функционирование современной альтернативной энергетики в промышленном масштабе серьёзно ограничено уровнем технологий и сложившейся мировой конъюнктурой, но использование энергии солнца как источника питания систем наружного освещения и других слаботочных потребителей, это первый логичный шаг на пути к освоению возможностей солнечной энергетики и отличный пример возможности функционирования децентрализованной автономной микроэнергетики.

Одной из главных особенностей климата, мешающих круглогодичной работе и развитию солнечной энергетики в средней полосе РФ, является устойчивый снежный покров и низкие температуры в зимние месяцы. Выпавший снег приводит к необходимости очистки и дополнительного обслуживания энергетических установок, а низкая температура, в свою очередь, ограничивает типы или ухудшает характеристики используемых накопителей электрической энергии. С другой стороны, вследствие высокого значения коэффициента отражения снега (альбедо), достигающего до 85%, увеличивается сила отражённого, рассеянного света, которая увеличит отдаваемый фотоэлементами ток. В то же время высокая стоимость компонентов и низкая стоимость традиционных энергоносителей увеличивает сроки окупаемости фотоэлектрических систем, что в свою очередь требует

многократного повышения их надёжности и уровня автономности, снижения эксплуатационных затрат и исключения влияния человеческого фактора.

Одним из решений этих проблем могут стать автономные установки малой мощности, накапливающие энергию рассеянного света, с несколькими вертикально расположенными, статичными фотоэлектрическими элементами, направленными не только на южную, но и на остальные стороны света. Размещение модулей перпендикулярно земле препятствует отложению на них снега зимой, способствует возможности самоочистки и не требует дополнительного обслуживания. Это компоновочное решение позволяет использовать модули в качестве оболочки конструкции, даёт возможность разместить внутри накопители энергии и схемы управления, что снижает общую материалоемкость, уменьшает затраты на логистику.

Несколько успешных примеров серийного производства подобных установок за рубежом уже существует, что косвенно говорит об актуальности такого решения. Необходимо проведение исследований и разработка подобной системы на отечественной элементной базе.

Целью исследовательской работы является разработка малогабаритной фотоэлектрической установки с использованием отечественной компонентной базы для электроснабжения автономных объектов.

## **1 Анализ существующих решений**

### **1.1 Актуальность выбора источника электроснабжения**

В общем случае следует выбирать между традиционной и альтернативной энергетикой.

В большинстве случаев, встречаясь с традиционной энергетикой, мы имеем дело с уже сформированной и законченной инфраструктурой объектов, изменение которой потребует серьёзных материальных затрат. Первоначальные проекты часто не учитывают возможности изменений, поэтому необходимы разработки новых пакетов документации с учётом прокладки дополнительных электрических кабелей к трансформаторным подстанциям с возможной заменой или модификацией их силового электрооборудования. Также требуются прокладки новых кабельных линий. Использование воздушных линий электропередачи в некоторых случаях нежелательно из-за соображений эстетики и комфорта в городских и иных зонах. Прокладка кабеля в земле серьёзно осложнена наличием в земле различных инженерных систем. Всё это делает решение проблемы электропитания и, в частности, освещения в городах средствами традиционной энергетикой достаточно сложной, затратной и труднореализуемой задачей.

С другой стороны, можно попытаться решить эту проблему путём использования возможностей альтернативной энергетикой. В настоящее время всё большее распространение получают автономные малые энергетические установки, накапливающие энергию возобновляемых ресурсов планеты. В нашем случае для полностью автономного освещения мы способны использовать энергию ветра, солнца или комбинировать их вместе.

Энергия ветра может быть получена и преобразована в электрическую при помощи маломощных ветрогенераторов, но их использование в городе может приводить к нежелательным последствиям. Ветрогенераторы изымают часть кинетической энергии движущихся воздушных масс, что приводит к снижению скорости их движения. При массовом использовании ветряков это

замедление теоретически может оказывать заметное влияние на локальные (и даже глобальные) климатические условия местности. В частности, снижение средней скорости ветров способно сделать климат региона чуть более континентальным за счет того, что медленно движущиеся воздушные массы успевают сильнее нагреться летом и охлаждаться зимой. Также отбор энергии у ветра может способствовать изменению влажностного режима прилегающей территории. Ветроэнергетические установки являются источниками механического аэродинамического шума и являются потенциальной угрозой для птиц и животных, что крайне нежелательно в условиях рекреационной зоны набережной. Наличие механических и подвижных элементов в конструкции ветряных электрогенераторов снижает общий уровень надёжности подобных устройств по сравнению с установками солнечной энергетики. В совокупности характеристик принято решение отказаться от применения ветроэнергетики и сосредоточиться на использовании солнечной энергии в данном исследовании.

Полупроводниковая солнечная энергетика – один из самых безопасных видов альтернативной энергетики, хотя существует вероятность того, что повсеместное внедрение солнечной энергетики может изменить альбедо (характеристику отражательной (рассеивающей) способности) земной поверхности и привести к изменению климата (однако при современном уровне потребления энергии это крайне маловероятно). Это позволяет неограниченно использовать её возможности в городских условиях.

Общие требования к автономным уличным энергоустановкам и фонарям:

1. Автономность для снижения затрат в инфраструктуру и обслуживание;
2. Работоспособность в местных климатических условиях;
3. Оптимальное соотношение цены и качества, обеспечивающее меньший срок окупаемости;
4. Длительный срок службы;

5. Эстетичный внешний вид, минимально вмешивающийся в окружающую обстановку, что имеет особое значение в условиях природных рекреационных зон;

6. Экологичность и безвредность для окружающей среды.

Таким образом, всем вышеназванным требованиям соответствуют именно фотоэлектрические установки солнечной энергетики, которые принимаются к установке в проекте.

## **1.2 Анализ климатических условий в местности планируемого применения**

Для получения адекватных результатов исследования необходимо обозначить условия и географические границы возможного применения анализируемых фотоэлектрических установок. За эталон принимаем климатические и географические условия города Тольятти Самарской области, находящегося в средней полосе России.

Фотоэлектрические установки, в том числе аккумуляторы чувствительны к перепадам температуры. Для определения целесообразности использования солнечных батарей в Самарской области нужно знать:

- Температурный режим, а именно определение средних минимумов и абсолютного минимума;
- Количество солнечного излучения.

В Тольятти континентальный климат с жарким летом и холодной зимой. Однако он заметно смягчается Куйбышевским водохранилищем, непосредственно влияющим на территории на расстоянии 1-3 км (Комсомольский и Автозаводский районы города, Центральный район только в районе Портпосёлка). Значительно влияют на климат особенности планировки города, состоящего из обособленных районов, разделённых лесными массивами. Влияние рельефа на микроклимат незначительное из-за его слабой выраженности.[24]

Средняя температура января  $-10,6$  °С, средняя температура июля  $+20,9$  °С. Абсолютный максимум температуры зафиксирован 2 августа 2010 г. и равнялся  $+40,5$  °С. Предыдущий рекорд составлял  $+39$  °С (июль 1984 г.). Абсолютный минимум  $-43,4$  °С (1 января 1979 г.). Среднегодовая температура —  $+5,1$  °С. Разница между температурой в городе и на прилегающих территориях в среднем составляет  $1,2$  °С и  $4,5$  °С зимой.

Среднее количество осадков — 492 мм в год, из которых треть приходится на холодное время года. Характерны большие колебания годовых (от 355 мм в 1965 году до 615 мм в 1966 году) и месячных сумм осадков, частые засушливые периоды, случаются засухи

Количество солнечных часов (дней) в году — 2113 часов (285 дней).

На рисунке 1 представлена карта территории Российской Федерации с усредненными значениями среднемноголетней среднемесячной суммарной солнечной радиации.

Одной из главных особенностей климата, мешающих круглогодичной работе и развитию солнечной энергетики в средней полосе России это устойчивый снежный покров и низкие температуры в зимние месяцы. Выпавший снег приводит к необходимости очистки и дополнительного обслуживания энергетических установок, а низкая температура в свою очередь ограничивает типы или ухудшает характеристики используемых накопителей электрической энергии. С другой стороны, вследствие высокого значения коэффициента отражения снега (альбедо), достигающего до 85%, увеличивается сила отражённого, рассеянного света, который повысит отдачу фотоэлементов.



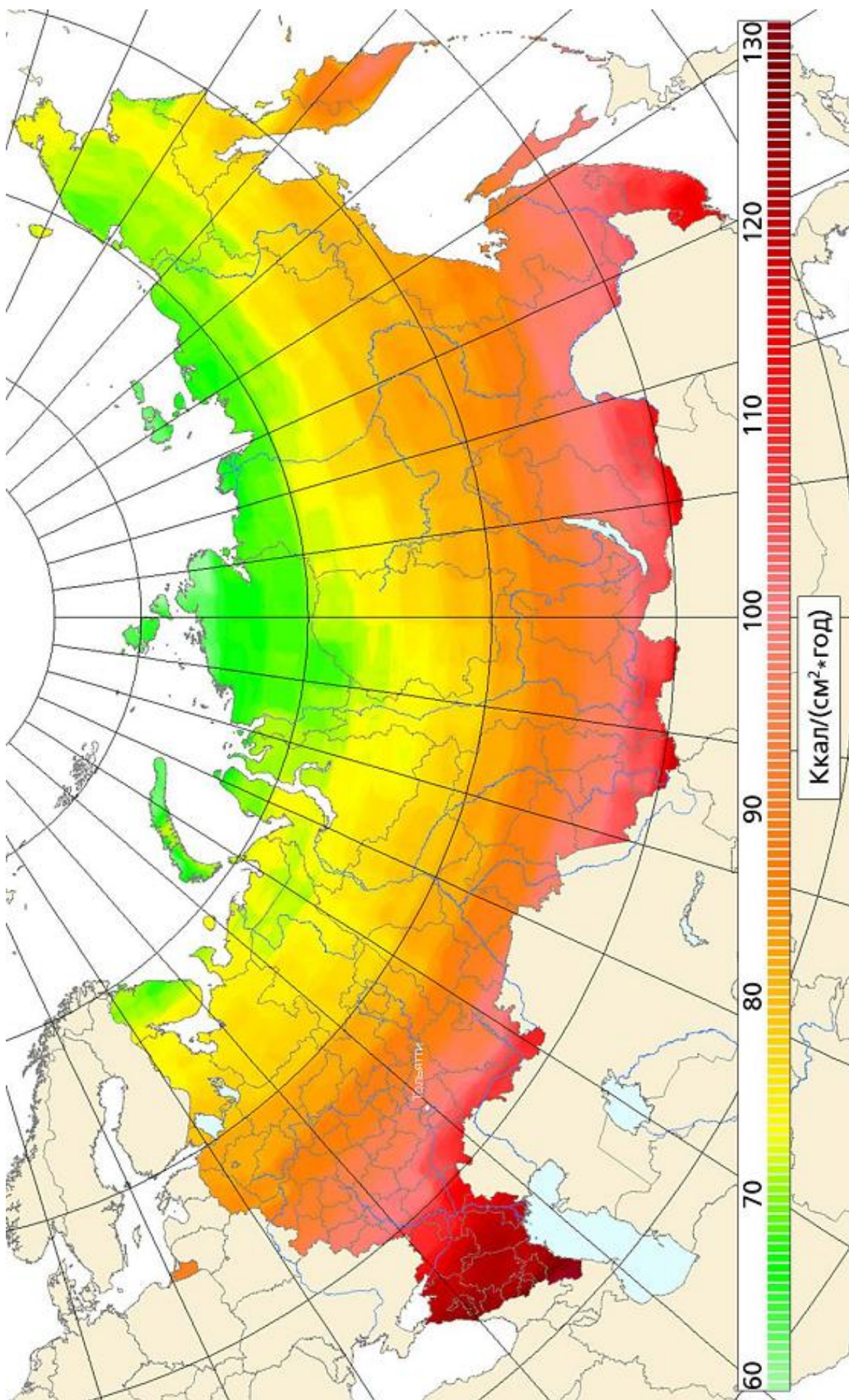


Рисунок 1 - Среденные значения среднемноголетней среднемесячной суммарной солнечной радиации РФ

### 1.3 Фотоэлектрические установки освещения присутствующие на рынке

Рассмотрим автономные фотоэлектрические осветительные установки, представленные на рынке в настоящее время:

1. Shenzhen Shinehui Technology Co., Ltd. Китай;
2. Sun Shines, г. Москва, Россия-Китай;
3. ОСО-40-12-125-100, Опти-лайт, г.Санкт-Петербург, Россия;
4. Touche 5000, Дания;
5. Towersun-128, EPS-soltec Австрия.

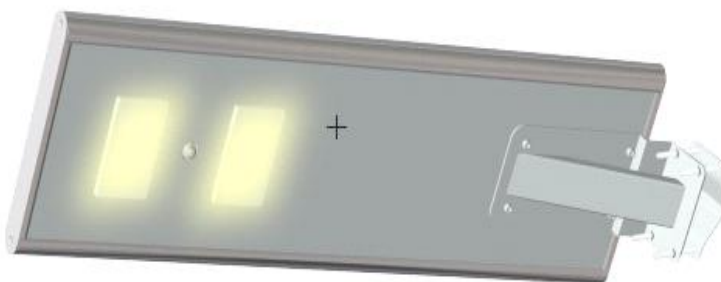
#### 1.3.1 Shenzhen Shinehui Technology Co., Ltd. Китай



а)



б)



в)

а) Панель солнечной батареи; б) Пример монтажа на опору освещения;

в) Вид снизу на светодиодные модули и датчик движения

Рисунок 2 – Интегрированный уличный фонарь на солнечной батарее

Технические характеристики интегрированного уличного фонаря на солнечной батарее представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики интегрированного фонаря производства Китай

№	Характеристика	Значение
1	Панель солнечной батареи:	Максимальная мощность 18ВТ 60W (монокристаллический кремний)
2	Аккумулятор:	Литий-ионный 12.8V
3	Светодиодная лампа:	Максимальная мощность 12V 40W, Люмен (LM) 4000- 4400lm, Угол обзора 120 Датчик движения
4	Время зарядки от солнца:	6 часов
5	Время разряда:	15 часов полной мощности, 30 часов половины мощности
6	Рабочая температура:	0 +70 °C
7	Цветовая температура:	6000k
8	Высота установки:	7-8 метров
9	Рекомендуемое расстояние между столбами:	18-20 метров

Продолжение таблицы 1

10	Материал:	алюминиевый сплав
----	-----------	-------------------

11	Степень защиты:	IP65
12	Размер изделия:	1170 * 330 * 140 мм
13	Вес изделия:	17 кг
14	Цена без опоры	25 578 к

Все функциональные элементы данного устройства расположены в одном корпусе, размещаемом на вершине опоры освещения. Применение этой модели в средней полосе России осложнено характеристиками применяемого аккумулятора. Литий-ионный аккумулятор теряет возможность получать заряд при отрицательных температурах, что приводит к полной потере работоспособности системы в зимнее время. Данный фонарь может найти своё применение в более тёплом климате на юге России или при необходимости в освещении только при положительной температуре окружающей среды.

### 1.3.2 Россия-Китай, Компания «Sun Shines» г. Москва

Внешний вид установки изображён на рисунке 3,а. На рисунке 3,б пример освещения пешеходного перехода и остановки общественного транспорта с использованием светильника «Sun Shines».

Автономная система освещения 20 Вт устанавливается на имеющиеся опоры с диаметром 76 или 89. Комплект системы предназначен для замены традиционных уличных светильников с питанием от сети, а также для освещения участков, на которых затруднен и невозможен подвод электрической энергии. Автономная система освещения незаменима для освещения дорог вне населенных пунктов, остановок общественного транспорта вне населенных пунктов, отдаленных объектов, где отсутствует электрическая сеть, а также для освещения улиц, дворовых зон, автомобильных парковок, пешеходных переходов[25].



а)



б)

а) Внешний вид установки «Sun Shines»; б) Пример освещения пешеходного перехода и остановки общественного транспорта

Рисунок 3 – Фотоэлектрическая установка «Sun Shines»

Возможно использование светильников со встроенными датчиками движения с радиусом действия 12-15 метров.

Таблица 2 – Технические характеристики фотоэлектрической системы

№	Характеристики	Значение
1	Мощность солнечной батареи	95 Вт
2	Ёмкость аккумуляторной батареи	65 А*ч
3	Напряжение холостого хода СБ	21 В
4	Напряжение СБ в точке максимальной мощности	17 В
5	Тип светильника	светодиодный
6	Мощность светильника	20 Вт
7	Световой поток светильника	2100 лм
8	Время работы без подзарядки	180-360 ч
9	Рабочее напряжение	12 В
10	Температура эксплуатации	от -40 до +85 °С
11	Стоимость без опоры	41 800 к

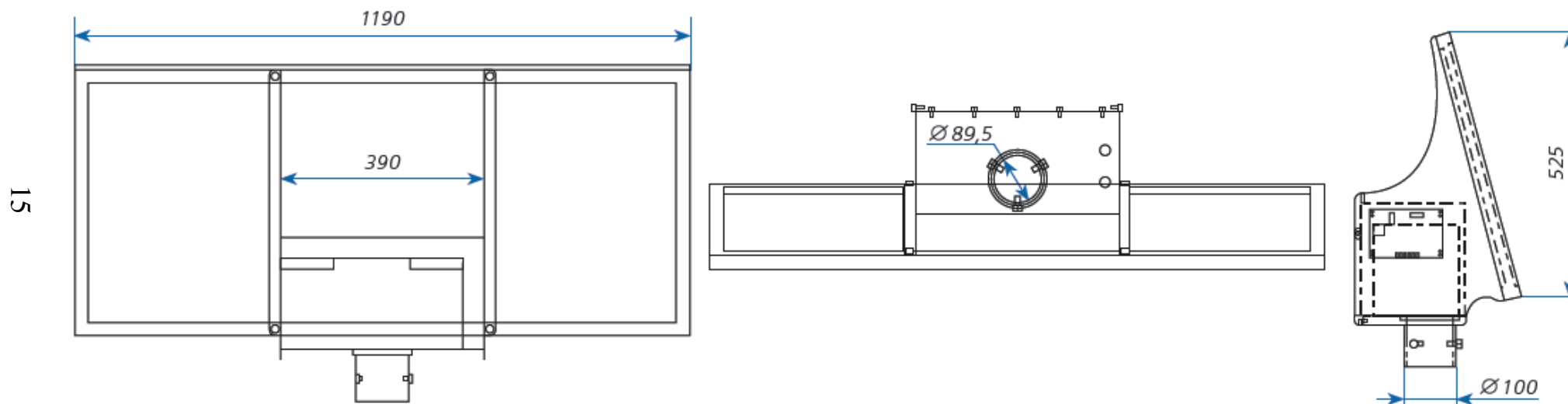


Рисунок 4 - Габаритные размеры электростанции компании «Sun Shines»

### 1.3.3 Россия, Опти-лайт г.Санкт-Петербург, модель ОСО-40-12-125-100

Внешний вид установки ОСО-40-12-125-100 представлен на рисунке 5,а. На рисунке 5,б изображён ещё один вариант установки в тандеме с ветрогенератором.



а)



б)

а) Внешний вид фонаря модели ОСО увеличенной мощности; б) Вариант фонаря в тандеме с ветрогенератором

Рисунок 5 –Фотоэлектрическая установка Опти-Лайт

В установке фирмы Опти-лайти применяются двухсторонние солнечные панели, обладающие следующими преимуществами по сравнению со стандартными односторонними: дополнительная мощность – благодаря двухсторонней чувствительности и дополнительному вкладу отраженного света.[26]. Габаритные размеры изображены на рисунке 6.

Таблица 3 – Технические характеристики модели ОСО-40-12-125-100

№	Характеристики	Значение
1	Модель солнечной панели	СБ 125
2	Мощность солнечной панели:	125 Вт фронт+тыл



Продолжение таблицы 3

3	Номинальное напряжение панели:	56 В
4	Стекло:	закаленное призматическое
5	Рабочая температура:	от -40 °С до +80 °С
6	Аккумулятор	LiFePO 3,2 В/100 Ач 4 шт.

Использована литий-ионная батарея, но в отличие от предыдущей моделей, проблема с работой при отрицательных температурах решена за счёт помещения аккумуляторов в герметичный бокс ниже уровня земли, где в холодные месяцы сохраняется положительная температура.

Применён оригинальный контроллер заряда ОЛК 12/24-50, предоставляющий функции удалённого управления по каналам беспроводной сотовой связи.

Контроллер выпускается по технологиям разработанными компанией ОптиЛайт и является запатентованным устройством.

Стоимость с опорой 205 000 к;

С ветрогенератором – от 419 000 к.

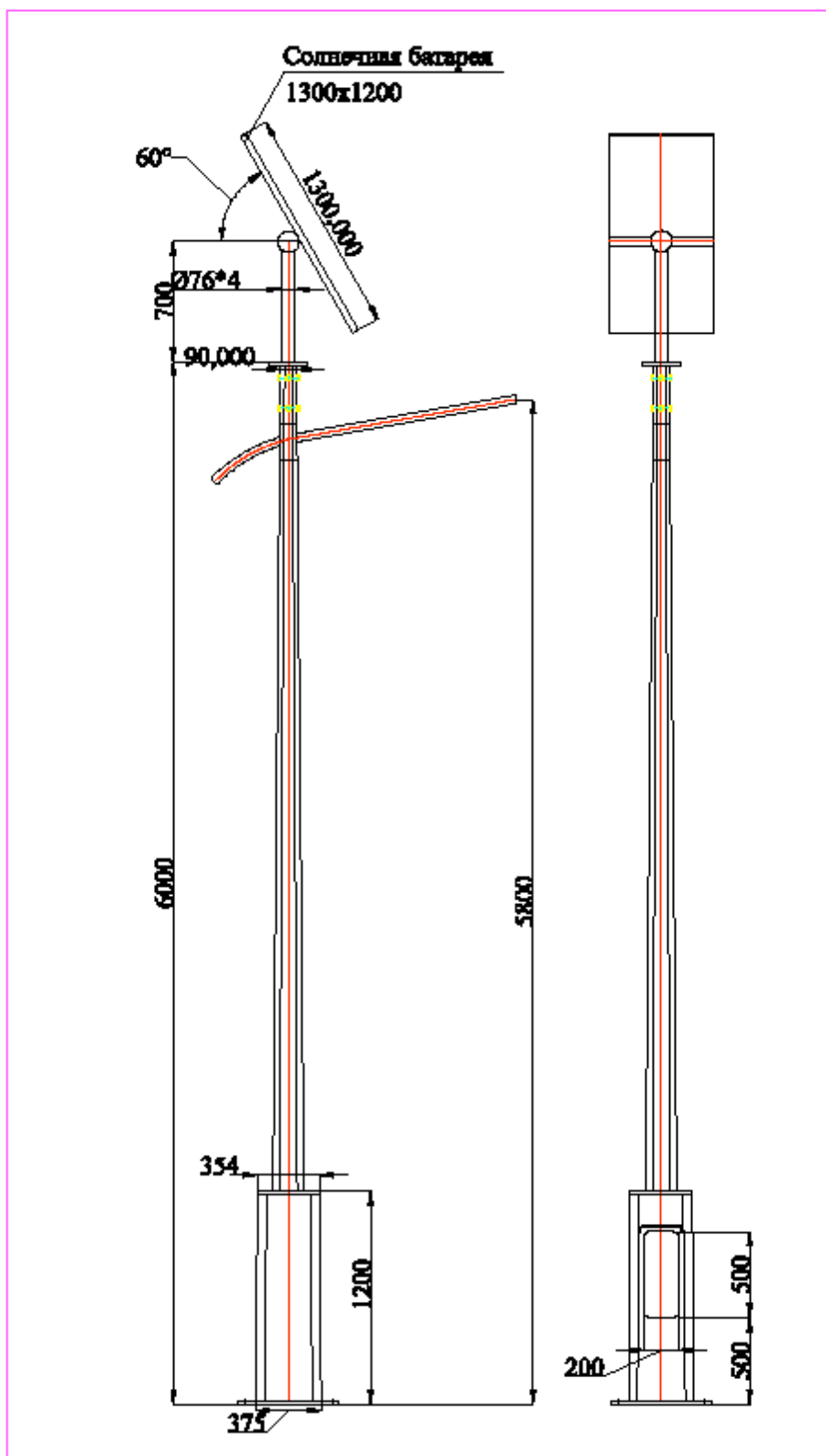


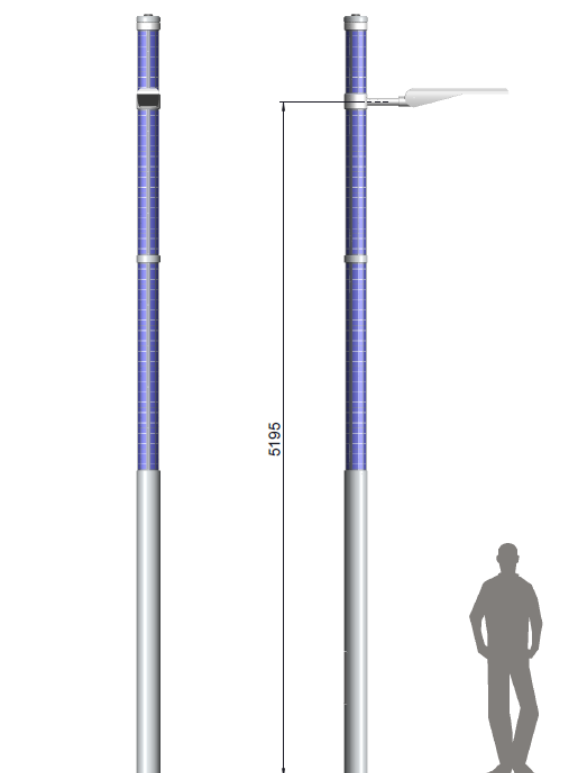
Рисунок 6 - Габаритные размеры установки ОСО-40-12-125-100

### 1.3.4 Touche 5000, Дания

Внешний вид фотоэлектрической колонны освещения Touche представлен на рисунке 7, а. Габариты установки изображены на рисунке 7,б.



а)



б)

а) Внешний вид Touche; б) Габаритные размеры Touche

Рисунок 7 – Фотоэлектрическая колонна Touche

Колонна Touche спроектирована для широт средней части Европы и стран Скандинавии, где свет солнца ограничен в течение зимы. Это означает большее число фотоэлементов с максимальным эффектом, развернутых вертикально, чтобы использовать большую часть солнечного света. Данная установка является примером сложной интегрированной системы. Светильник не является частью системы и поставляется отдельно от стороннего производителя. Возможно применение разных типов аккумуляторов, которые также как и в предыдущем случае располагаются ниже уровня земли в железобетонном основании опоры освещения. Основной особенностью колонны Touche является расположение фотоэлементов практически по всей поверхности колонны. Защита цилиндрической солнечной панели осуществляется при помощи светопрозрачного поликарбоната, материала имеющего ударную прочность металла, что обеспечивает антивандальную стойкость[27].

Управление освещением и диммирование возможно как при помощи беспроводных технологий, так и на основе встроенных датчиков или астрономических часов.

Концепция Touche предусматривает 3 режима функционирования:

1. Автономная работа Plug & Play

Plug & Play является бескабельным автономным решением, которое не требует ничего, кроме специального фундамента со встроенным батарейным отсеком. Интегрированные солнечные батареи заряжают батарею в течение дня и расходуют в течение вечера и ночи, когда освещение необходимо (рисунок 8). Система управления освещением может также приглушить свет до желаемого уровня, чтобы максимизировать емкость батареи.



Рисунок 8 – Автономная работа, режим Plug & Play

## 2. Безопасный Safe

Безопасный режим опирается на аккумулятор в качестве основного источника энергии, а дополняется подключения к сети. В случае низкого заряда батареи встроенный контроллер автоматически переключается в сеть, чтобы предотвратить любое отключение – независимо от погоды. Как только батарея заряжается, контроллер автоматически переключается на режим работы от батареи (рисунок 9). Безопасный режим имеет те же функции диммирования, как и автономный режим.



Рисунок 9 – Безопасное, бесперебойное функционирование, режим Safe

### 3. Активный Active

Работа в активном режиме происходит при прямом подключении к энергосети. Избытки электроэнергии могут быть проданы энергосетевой компании через инвертор, что делает решение оптимальным, независимым от любого сбоя (рисунок 10). На данный момент работа в этом режиме невозможна на территории РФ из-за отсутствия законодательной базы в области использования ресурсов малой возобновляемой энергетики.

Технические характеристики колонны Touche, производство Дания представлены в таблице 4.

Стоимость одной колонны Touche без учёта доставки и стоимости фундамента – 268 590 к (2013г.)



Рисунок 10 – Активный режим Active, подключение к сети через инвертор

Таблица 4 – Технические характеристики колонны Touche, Дания

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Высота установки светильника	2,5 m-12,0 m
2	Диаметр	Ø180
3	Установка	Плита основания и фундамент
4	Материал	Сталь, Алюминий, Поликарбонат
5	Аккумулятор	
6	Тип	AGM Gel, 12 В, 100 АН. VRLA
7	Ожидаемый срок службы/Гарантия г.	5/4
8	Глубина разряда	максимум 25% на цикл
9	Опционально	Li-on, Li-fi, AGM, Lead-Acid, Lead-gel, Ni-Mh.
10	Автономность	3-10 дней

Продолжение таблицы 4

11	Контроль и управление питанием	
12	Режим работы	Автономный, Безопасный или Активный
13	Диммирование	0-100%
14	Поддерживаемое напряжение аккумулятора	10,8 – 14 В., отсечка 10.8 В
15	Рабочая температура	-40°C - + 85°C
16	LED драйвер:	Встроенный для 12 В. светодиодных светильников
17	Максимальный выходной ток	200-350-500 mA DC
18	Максимальная подключаемая мощность	65 Вт
19	Степень защиты	IP66
20	GPRS WEB подключение	850/900/1800/1900 MHz
21	Управление светом	Астрономические часы, 365 дней
22	Фотоэлементы	
23	Солнечные модули на одну колонну	1-6
24	Размеры солнечного модуля	1700 mm / 1000 mm / 700mm
25	Технология фотоэлементов	Поликристаллические, КПД 18 %
26	Пиковая выходная мощность	95 W
27	Срок службы	20 лет (80% мощности)
28	Защита солнечных панелей	PC/PMMA (UV-resistant)
29	Рабочая температура	-40 C - + 85 C
30	Фундамент	
31	Вес	650 kg.
32	Размер	500 x 600 x 1000 mm
33	Материал	Железобетон
34	Дополнительно	
35	Удалённый WEB-доступ к управлению системой	
36	Датчики движения	
37	Ветрогенератор	



### 1.3.5 Towersun-128, EPS-soltec Австрия

Внешний вид фотоэлектрической установки Towersun-128, EPS-soltec представлен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Фотоэлектрическая установка Towersun-128, внешний вид

Светильники семейства TOWERSUN являются надежными светодиодными светильниками с использованием солнечной энергии для тех случаев, когда электроэнергия из сети не используется. Благодаря использованию восьми солнечных модулей, размещаемых друг над другом, даже при рассеянном свете можно добиться высокой эффективности солнечного светильника. Идеальные места использования светильников TOWERSUN – жилые улицы, тротуары, автостоянки и т.д.

TOWERSUN – это уличная светодиодная лампа на солнечных батареях, которая может устанавливаться в любом месте, где отсутствуют источники электричества и требуется надежная работа даже в условиях плохой освещенности. Благодаря кубической алюминиевой конструкции с 2x4 фотоэлектрическими модулями, можно получать достаточно энергии от рассеянного света, особенно в районах с плохими погодными условиями. Перпендикулярное размещение модулей препятствует отложению снега зимой. Уникальные функции энергосбережения обеспечивают надежную работу в течение нескольких ночей даже в плохую погоду[28]. В соответствии с европейским стандартом DIN EN13201, благодаря показателям освещенности, лампы TOWERSUN рекомендуется устанавливать на улицах жилых районов, на второстепенных дорогах, парковках и т.п.

Функционирование. Встроенный аккумулятор заряжается в течение дня с помощью 8 фотоэлектрических модулей, а при наступлении темного времени суток эта энергия используется для питания светодиодной лампы.

Габаритные размеры Towersun-128 отображены на рисунке 12.

Технические характеристики установки Towersun-128 представлены в таблице 5, 6.

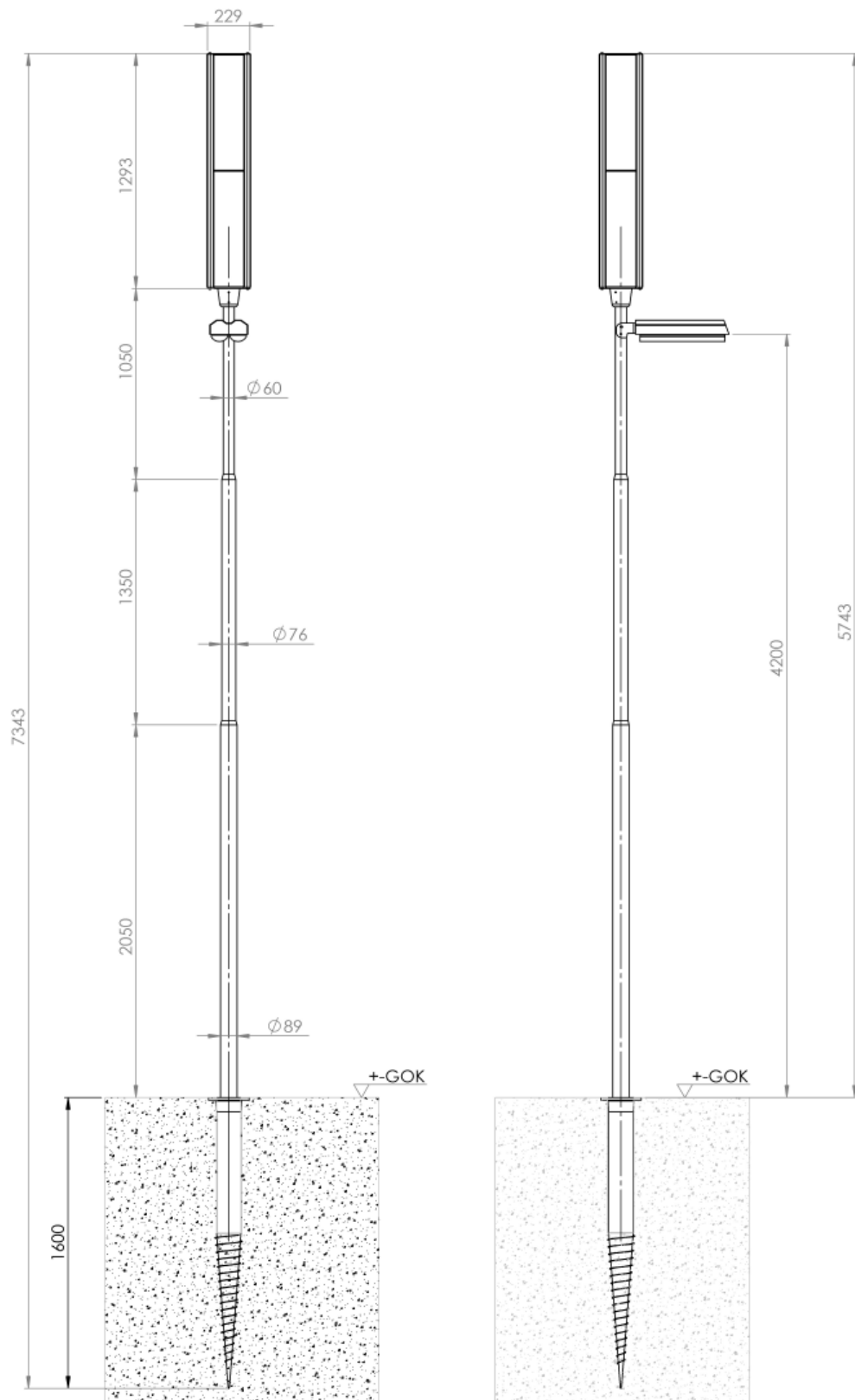


Рисунок 12 – Габаритные размеры для примера установки с использованием винтовых свай компании Krinner

Таблица 5 – Технические характеристики установки Towersun-128

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Солнечные модули	8 элементов, монокристаллические кремниевые ячейки
2	Выходная мощность (макс.)	128 Вт (8 модулей) Модули заряжаются также при рассеянном свете (от 8% до 15% от нормы)
3	Аккумулятор	1х 36 ампер-час
4	Рабочая температура	-20°C – 50°C
5	Срок эксплуатации аккумулятора	Прибл. 5-6 лет (зависит от температуры)
6	Гарантия	2 года
7	Размеры установки	237 мм x 237 мм x 1310 мм
8	Тип защиты	IP65
9	КПД солн. панелей	18%
10	Осветительный блок	
11	Кол-во светодиодов	16 элементов
12	Световой поток (макс.)	1360 лм
13	Цветовая температура	6500К, холодный белый
14	Срок эксплуатации светодиодного элемента	> 50000 часов

Продолжение таблицы 5

15	Современные светодиоды	Свет не привлекает насекомых
16	Размеры	
17	Общая высота от уровня земли	5743 мм
18	Высота лампы от уровня земли	4200 мм
19	Общая длина опоры	5500 мм
20	Глубина установки опоры в землю	750 мм
21	Материалы	Сталь с порошковым покрытием / черный
22	Периоды технического обслуживания / гарантия	
23	Рекомендуемая замена аккумулятора / светодиодного	после 6 лет / после 12 лет
24	Гарантия	2 года (включая аккумулятор)
25	Гарантия (гарантийный срок начинается с даты производства)	3 года, 100-процентная гарантия на продукт 5 лет, гарантия минимальной производительности 90%

Таблица 6 – Управление энергопотреблением и временем

№	Функционирование	Яркость	Время
1	Уменьшение яркости	50%	24:00-5:00
2	Выключено	0%	24:00-5:00
3	Постоянное освещение (с управлением энергопотреблением)	100%	Светит всю ночь
4	Оптимизация расхода энергии		см.

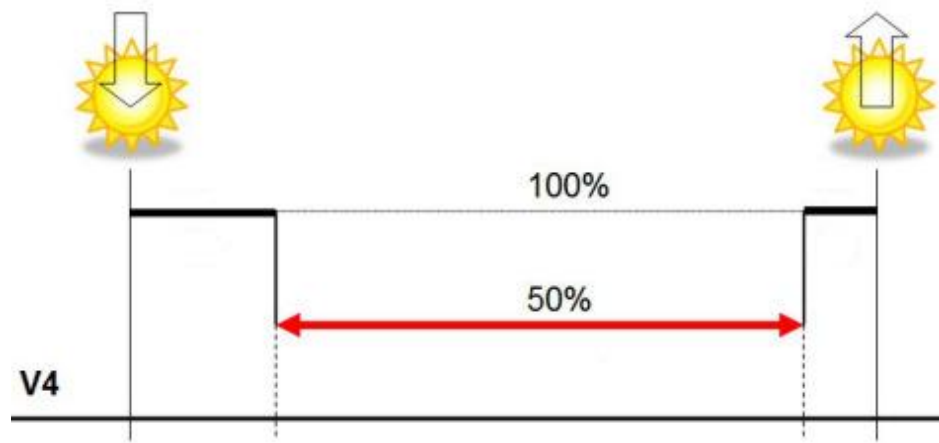


Рисунок 13 – Опция оптимизации расхода энергии, график

Кривые распределения света светильника, установленного в Towersun-128 представлены на рисунке 14.

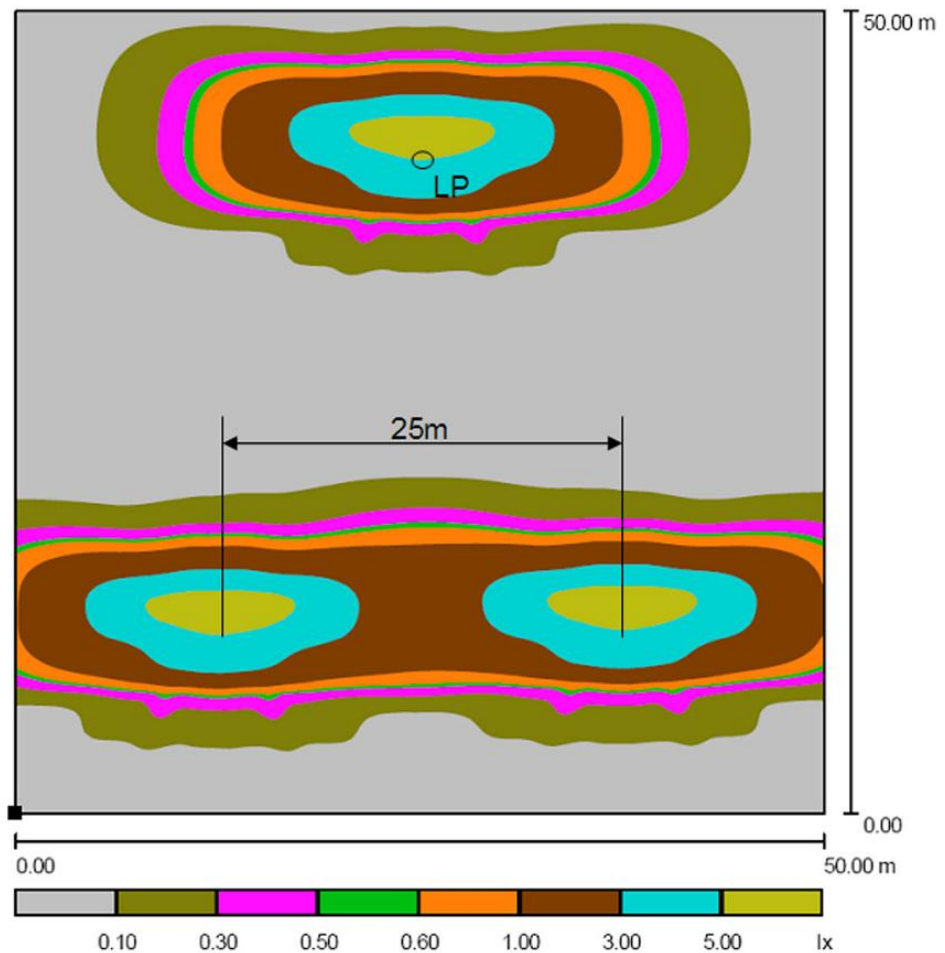


Рисунок 14 – Кривая распределения интенсивности света DIALux, одна и две лампы TowerSun

Помимо крупных моделей TOWERSUN 128 имеются также модели, расширяющие область применения светильников семейства TOWERSUN: TOWERSUN 64 с пониженной светоотдачей, младшая модель TOWER-LIGHT с дополнительной функцией направления света в варианте для пешеходных зон и площадей и STATIONSUN, предназначенный для остановок общественного транспорта.

Рекомендуемая стоимость TowerSun-128 в комплекте с опорой 125 000 к(2013г.).

Сведем данные по всем рассматриваемым светильникам в таблицу 7.

Таблица 7 – Сводная таблица характеристик фотоэлектрических установок (2014 г)

№ п	Название	Страна произ-ва	Фотоэлементы	Контроллер заряда	Аккумулятор	Светильник	Управление световым потоком	Опора в комплекте	Серийное произ-во	Пример установок в РФ	Срок службы/ Гарантия	Цена в РФ, 2013г руб.
1	Shenzhen Technology	Китай	60Вт (моно)	ШИМ	Li-on 12.8В	LED 40Вт, 4000лм	Датчик движения	Нет	Да	Нет данных	Нет данных	25 578
2	Sun Shines	Россия-Китай	95 Вт (моно)	ШИМ	12 В, 65 А*ч	LED 20Вт, 2100лм	Датчик движения	Да, 6 м.	Да	Казань	- / 3 года	67 000
3	ОСО-40-12-125-100 Опти-лайт	Россия	125 Вт (моно) двухсторонние	MPPT	3,2 В 100 Ач*4 Li-on	LED 40Вт, 3600 лм, 5000К	Удалённое управление	Да, 6 м.	Нет	Санкт-Петербург, Москва	25 /1год	205 500
4	Touche 5000	Дания	190 Вт (поли)	MPPT	AGM Gel, 12В, 100 А*ч VRLA	Siteco SL10 Micro 19Вт 1229 лм. Германия	Программное, астр. часы. Удалённое управление	Да, 5 м.	Нет	нет	20 лет	268 590
5	TowerSun-128	Австрия	128 Вт (моно)	MPPT	AGM Gel, 12В, 36А*ч VRLA	Hella Eco Streetline 10Вт 1360 лм	Программное, астр. часы	Да, 4,2 м.	Да	Липецк, Москва, Санкт-Петербург, Белгород	25/2года	125 000

32



Все вышеприведённые фотоэлектрические установки функциональны и разнообразны по своим техническим характеристикам, имеют свои плюсы и минусы. Они могут найти себе полноценное применение в тех условиях, для которых они разрабатывались.

В ходе сравнительного анализа тщательно рассмотрены все предлагаемые варианты. Первый вариант исключён по причине невозможности его нормального функционирования в местных климатических условиях. Третий и четвёртый варианты являются пока ещё несерийной продукцией и обладают относительной высокой стоимостью, что делает их применение неоправданным. Выбор остаётся между вторым и пятым вариантом, продукцией фирмы SunShines и моделью TowerSun фирмы EPS-soltec. Несмотря на более высокую стоимость модель TowerSun-128, в отличие от SunShines максимально полно удовлетворяет всем предъявляемым требованиям. Помимо автономности, она обладает следующими преимуществами:

- наиболее оптимальная конструкция фотоэлектрических панелей, которые расположены вертикально, что препятствует отложению на них осадков и снега в зимние месяцы;
- кубическая конструкция фотоэлектрической установки более компактная, она меньше других перекрывает поле зрения пешеходов, что делает её оптимальным решением с эстетической точки зрения, что особенно важно в рекреационных зонах отдыха;
- эффективнее за счёт использования современного контроллера с функцией слежения за точкой максимальной мощности и светодиодного светильника с высокой световой отдачей;
- в перспективе, масштабируя данную систему мы достигнем концепции автономных фотоэлектрических колонн-накопителей энергии.

Установка фотоэлектрических систем позволяет не только экономить электроэнергию в сети, но также уменьшает стоимости инфраструктуры ввиду отсутствия необходимости в подстанциях, трансформаторах, распределительных будках и щитах.

Срок окупаемости проектов с учётом отсутствия энергопотребления от сети и снижения затрат на обслуживание может достигать 20 лет, что не превышает предполагаемый производителем ресурс в 25 лет. Традиционная сырьевая энергетика обречена на постоянное потребление ресурсов планеты.

Подобные малые фотоэлектрические установки имеют большой потенциал для своего развития и найдут применение в городской инфраструктуре или в труднодоступных местностях, в освещении остановочных пунктов общественного транспорта и временном освещении, а также в множестве других задач, требующих автономной работы и малой потребляемой мощности, таких как энергоснабжение средств связи, видеонаблюдения, информационных средств городской инфраструктуры и пр.

Малое применение фотоэлектрических установок освещения обусловлено их высокой ценой и высокими первоначальными капитальными затратами, снизить до приемлемого уровня которые сможет только локализация производства или выпуск подобной продукции на территории РФ, не уступающей по своим характеристикам импортной.

Технологии, используемые в устройствах солнечной энергетики, имеют явную тенденцию к усовершенствованию и удешевлению, что в конечном итоге ускорит распространение и сделает их применение более массовым.

## 1.4 Выводы по первой главе

Функционирование современной альтернативной энергетики в промышленном масштабе серьёзно ограничено уровнем технологий и сложившейся мировой конъюнктурой, но использование энергии солнца как источника питания систем наружного освещения и слаботоочных потребителей, это первый логичный шаг на пути к освоению возможностей солнечной энергетики и отличный пример возможности функционирования децентрализованной автономной микроэнергетики.

Одной из главных особенностей климата, мешающих круглогодичной работе и развитию солнечной энергетики в средней полосе РФ, является устойчивый снежный покров и низкие температуры в зимние месяцы. Выпавший снег приводит к необходимости очистки и дополнительного обслуживания энергетических установок, а низкая температура, в свою очередь, ограничивает типы или ухудшает характеристики используемых накопителей электрической энергии. С другой стороны, вследствие высокого значения коэффициента отражения снега (альбедо), достигающего до 85%, увеличивается сила отражённого, рассеянного света, которая увеличит отдаваемый фотоэлементами ток. В то же время высокая стоимость компонентов и низкая стоимость традиционных энергоносителей увеличивает сроки окупаемости фотоэлектрических систем, что в свою очередь требует многократного повышения их надёжности и уровня автономности, снижения эксплуатационных затрат и исключения влияния человеческого фактора.

Одним из решений этих проблем могут стать автономные установки малой мощности, накапливающие в том числе и энергию рассеянного света, с несколькими вертикально расположенными, статичными фотоэлектрическими элементами, направленными не только на южную, но и на остальные стороны света. Размещение модулей перпендикулярно земле препятствует отложению на них снега зимой и не требует дополнительного обслуживания и очистки. Это компоновочное решение позволяет использовать модули в качестве оболочки

конструкции, даёт возможность разместить внутри накопители энергии и схемы управления, что снижает общую материалоемкость.

Несколько успешных примеров серийного производства подобных установок за рубежом уже существует. Необходимо проведение исследований и разработка подобной системы на отечественной элементной базе.

## **2 Проработка теоретических аспектов и выбор компонентной базы**

Во второй части работы стоят задачи по исследованию основных теоретических аспектов работы автономных фотоэлектрических установок с вертикальным расположением солнечных панелей, ориентированных не только на южную сторону, но и остальные стороны света. Эта конфигурация мало изучена и требует детального исследования, имитационного и натурного моделирования, для выявления основных закономерностей и зависимостей величин, требуемых для последующего проектирования автономных установок электропитания на источниках возобновляемой энергии. Необходимо учитывать климатические условия места предполагаемого использования.

В выборе компонентной базы принято решение использовать преимущественно отечественные изделия в целях локализации и удешевления стоимости возможного производства, что накладывает дополнительные трудности. Производственная база элементов для фотоэлектрических установок в гражданском секторе РФ развита достаточно слабо, несмотря на выдающиеся успехи в области космической техники.

Целью исследовательской работы является проработка теоретических аспектов применения и выбор компонентной базы для проектирования автономных фотоэлектрических установок.

## 2.1 Анализ исходных данных

Изучение фотоэлектрических (ФЭ) установок трудно себе представить без расчётов и моделирования их работы в условиях, приближенных к реальным. Имитационное моделирование пространственных солнечных конструкций с учётом реальных климатических условий привычными ручными методами особенно затруднено в силу присутствия множества дополнительных факторов влияния, которые необходимо учитывать. В этом случае на помощь нам приходят специализированные программные продукты, чья задачей является максимально точное прогнозирование и моделирование работы солнечных систем энергоснабжения.

Для получения информации и моделирования процессов работы фотоэлектрических установок на данном этапе исследования использована программная среда Pvsyst©. Pvsyst по многим оценкам стала стандартом индустрий в области программного симулирования объектов полупроводниковой солнечной энергетики и солнечных коллекторов. Данный комплекс учитывает как географические параметры, положение солнца, так и метеоданные, полученные в ходе длительных наблюдений и космической фотосъёмки (облачные структуры, альbedo поверхности, водяной пар и т.д).

PVsyst использует принцип транспозиции – расчет освещенности наклонной плоскости, по данным горизонтальной освещенности, и предлагает две модели транспозиции:

Модель Хэя (Hay's model), классическая и надежная модель, которая дает хорошие результаты, даже если информация о диффузном рассеивании не является особо точной;

Модель Переса (Perez-Ineichen model) является более сложной моделью требует хороших (тщательно измеренных) данные горизонтальной освещённости.

Средняя полоса РФ географически находится значительно севернее зон, где наиболее выгодно круглогодичное использования солнечной энергии (как правило до ~ 45' северной широты). График солнечной инсоляции для

солнечных панелей, установленные под углом 38° и направленные строго на Юг, в Самарской области в годовом исчислении согласно Pvsyst© рассмотрим на рисунке 15.

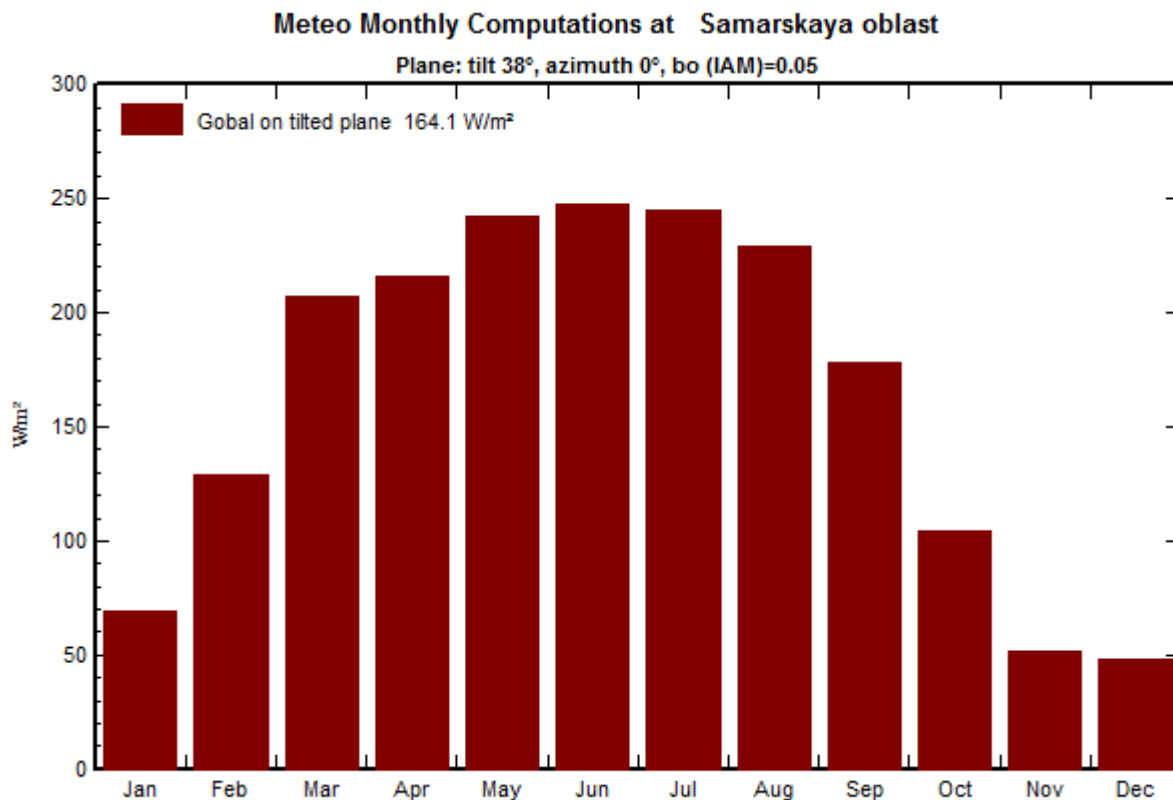


Рисунок 15 – Годовая выработка энергии, панель под углом 38°

Такое расположение солнечных панелей (на 15° меньше географической широты в средней полосе РФ) обеспечивает максимальную годовую выработку энергии, её традиционно считают оптимальным. Солнечные лучи, падающие под прямым углом в тёплое время года, обеспечивает наибольший годовой приход солнечной энергии в идеальных условиях. Как можно заметить по графику, присутствует яркая сезонная выраженность, летние максимумыкратно, до 5-ти раз превосходят выработку энергии в зимние месяцы, минимум в декабре. Для получения более сбалансированной системы, способной функционировать круглогодично, необходимо уменьшить соотношение между

минимумами и максимумами, а также сосредоточиться на увеличении выработки энергии в зимние месяцы, а именно в декабре.

## **2.2 Вертикальное расположение фотоэлектрических панелей**

Вертикальное, относительно поверхности Земли, расположение фотоэлектрических панелей, ориентированных на юг, обладает своими плюсами и минусами в сравнении с традиционным расположением под оптимальным углом.

Недостатки:

- меньшая (до 25%) выработка энергии в годовом исчислении;
- большая парусность конструкции;
- увеличение общей стоимости конструкции.

Преимущества:

- сглаженный график солнечной генерации, меньшее соотношение между максимумами и минимумами (до 3 крат);
- большая выработка энергии в зимние месяцы;
- возможность более эффективно использовать энергию отражённого от поверхности Земли рассеянного света в зимние месяцы;
- способствует дополнительному охлаждению панелей за счёт лучших условий для конвективного движения воздуха;
- препятствует откладыванию снега на поверхности солнечных панелей в зимние месяцы.

Основной недостаток это уменьшенная выработка энергии в годовом исчислении и, соответственно, увеличение необходимой площади солнечных панелей и общей стоимости конструкции для получения соизмеримого результата. Однако, в нашем случае, когда мы хотим добиться круглогодичного



использования в климатических условиях средней полосы РФ, решающим фактором в выборе становится более уверенная работа установки в зимние месяцы. Из-за того, что в зимние месяцы солнце поднимается на горизонте максимально низко (до  $12^\circ$ ) и высокого значения непрямого рассеянного света, именно вертикально-ориентированные панели могут обеспечить устойчивую выработку энергии.

### **2.3 Альbedo поверхности Земли**

Большинство фотоэлектрических элементов получают излучение не только непосредственно от солнечного диска (прямое излучение), но также из большого участка неба (диффузное излучение).

Коэффициент альbedo – числовая характеристика диффузной отражательной способности поверхности предмета, доля (от 0 до 1) глобального излучения, отраженного от земли на наклонную плоскость.

Его влияние имеет место в процессе вычисления транспозиции горизонтального облучения на наклонную плоскость, для горизонтальной плоскости оно почти нулевое, и увеличивается с наклоном.

Вклад альbedo пропорционален  $(1 - \cos \alpha) / 2$ , где  $\alpha$  – угол наклона плоскости (см *Hay's model*). Это означает 0 для горизонтальной плоскости, для вертикальной 0,5, и 0,067 для плоскости под углом  $30^\circ$  к горизонту. Примеры значений альbedo для различных поверхностей представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Значение коэффициента альбедо различных поверхностей

Поверхность	Значение альбедо
Океан	0.07 – 0.10
Асфальт	0.12
Хвойный лес	0.09 – 0.15
Лиственный лес	0.15 – 0.18
Земля	0.17
Зелёная трава	0.25
Песчаная пустыня	0.40
Старый/тающий снег	0.5 – 0.7
Свежий снег	0.80 – 0.90

Серьёзным доводом за использование вертикально-установленных солнечных панелей в наших климатических условиях является максимальное использование силы рассеянного, диффузного света в зимние месяцы года, когда большая часть поверхности в рассматриваемой нами зоне применения, как правило, покрыта снегом. Этот момент наглядно продемонстрирован на снимках, сделанных с орбиты Земли в разные месяцы года.

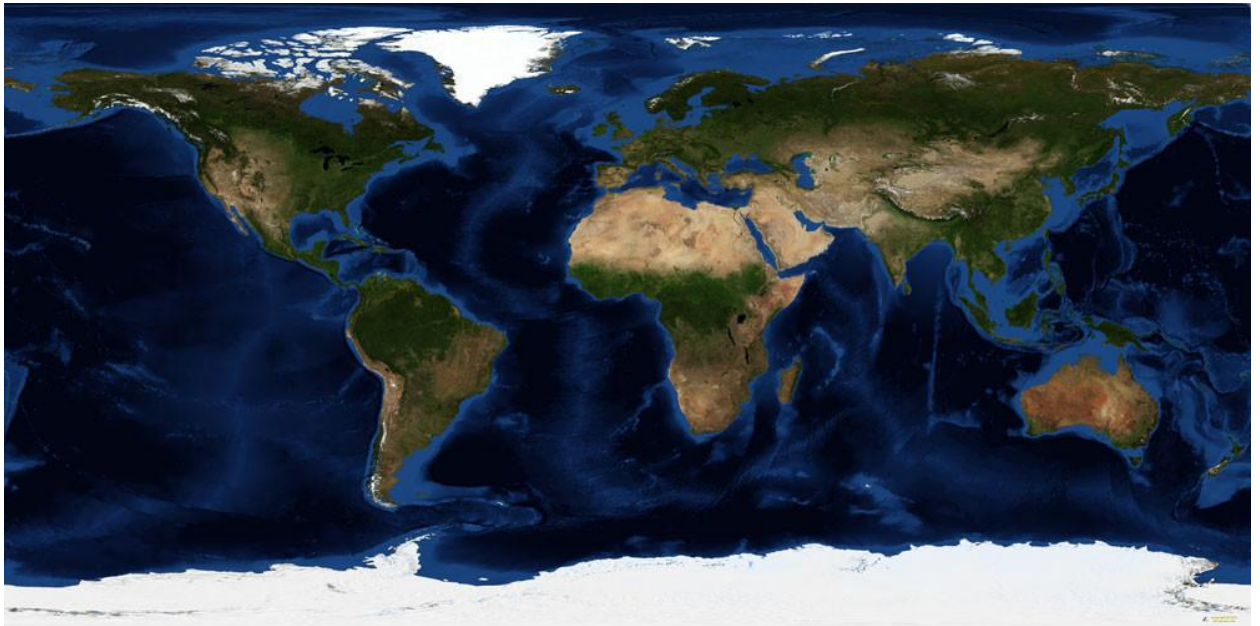


Рисунок 16 – Карта Земли из снимков с орбиты в августе

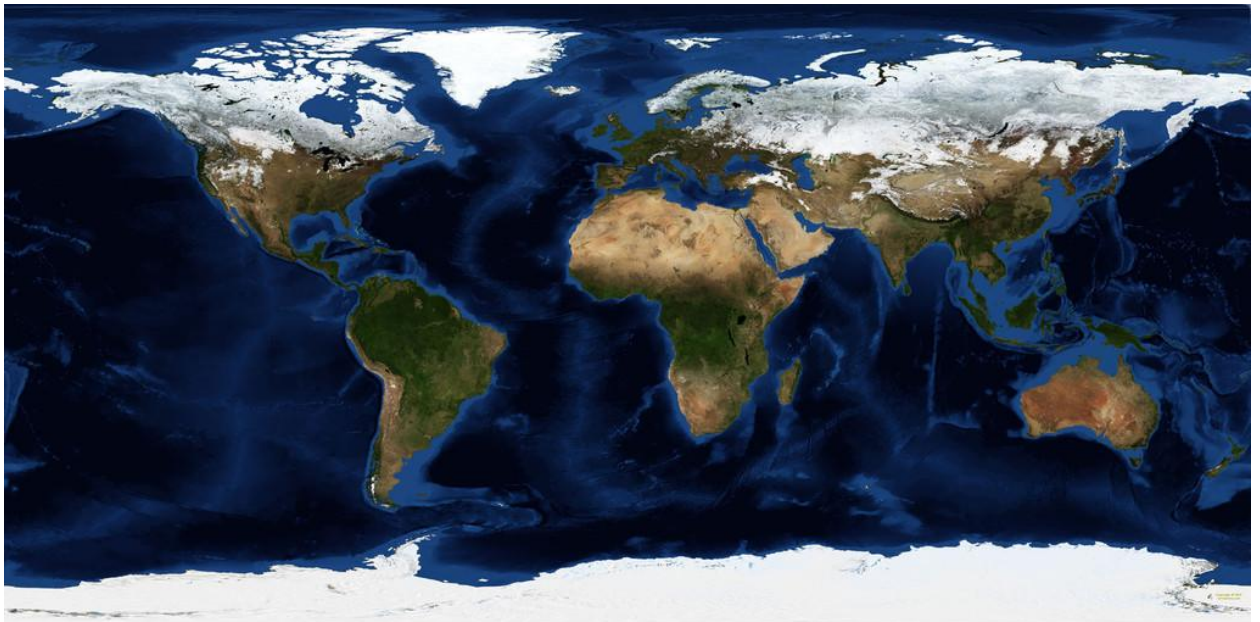


Рисунок 17 – Карта Земли из снимков с орбиты в декабре

Также этот эффект подтверждает график степени сезонного изменения коэффициента альbedo поверхности Земли в зависимости от географической широты, представленном на рисунке 18.

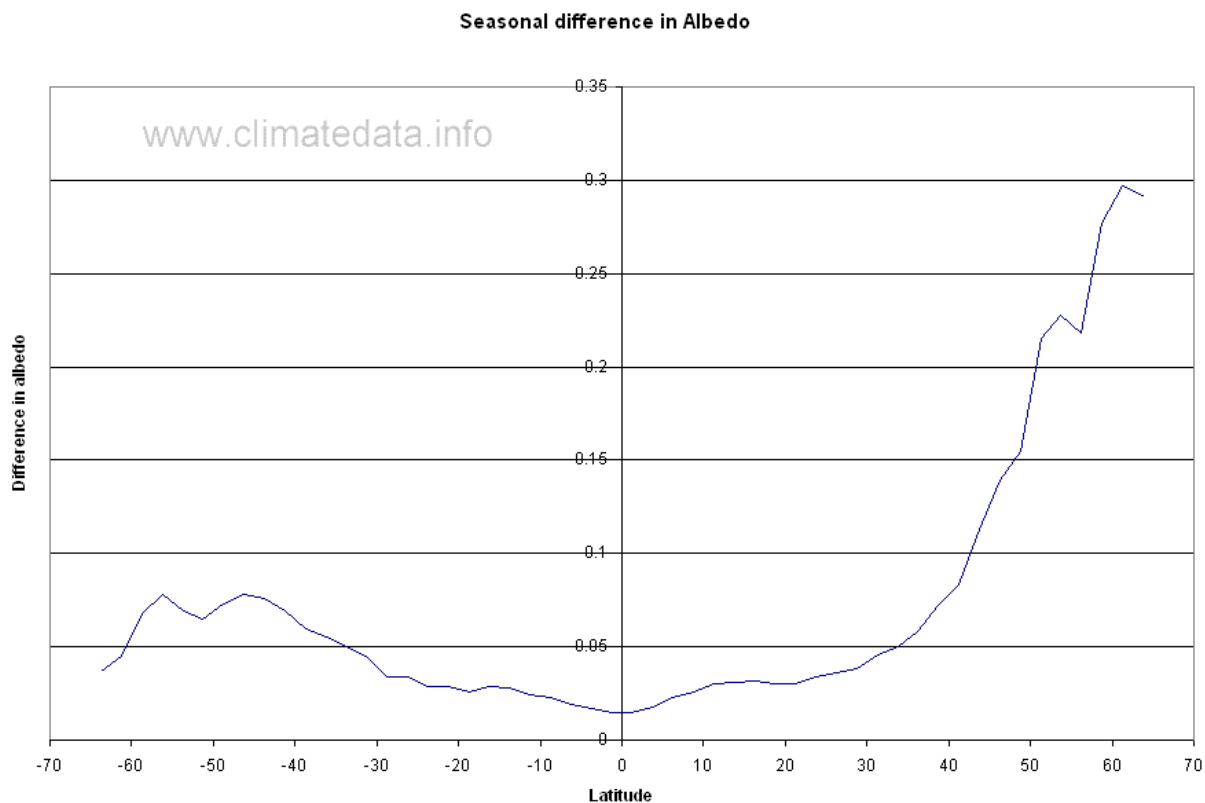


Рисунок 18 – Сезонное изменение коэффициента альbedo поверхности в зависимости от географической широты

Таким образом, смоделировав фотоэлектрическую установку с вертикальными солнечными панелями в программе Pvsyst с учётом сезонного изменения коэффициента альbedo поверхности Земли, для условий Самарской области мы получим следующий график годовой солнечной генерации на рисунке 19.

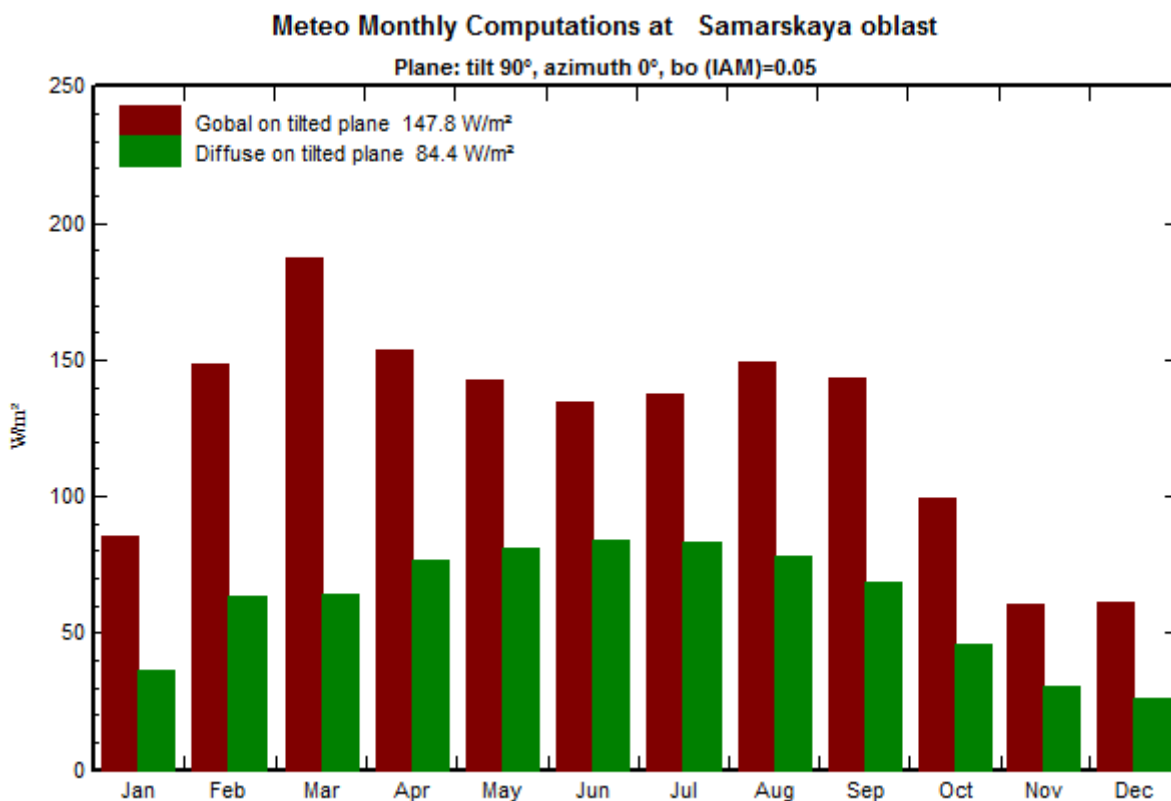
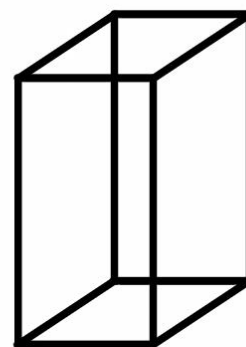
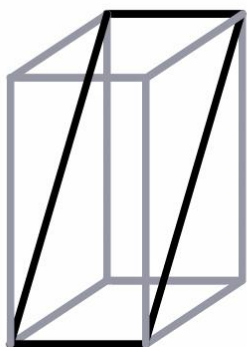


Рисунок 19 – График выработки ФЭ установки с учётом сезонного изменения коэффициента альбедо

Как видим, график стал более «сглаженным», отношение между минимумами и максимумами не превышает 2,5-3 единиц, а доля рассеянного диффузного света в выработке остаётся высокой на протяжении всего года.

## 2.4 Моделирование всенаправленной кубической конструкции

В программном продукте Pvsyst была смоделирована классическая ФЭ панель, установленная под углом к горизонту в сравнении с кубической конструкцией, состоящей из 4 ФЭ панелей, направленных на все стороны света. В результате симуляции работы обоих в условиях Самарской области в декабре месяце были получены некоторые зависимости, отражённые на рисунке 20.



$$S_1 \sim 1.18$$

$$W_1 = 100\%$$

$$S_2 = 4$$

$$W_2 = 188\%$$

Рисунок 20 – Соотношения между сравниваемыми установками

В итоге проведённого моделирования мы видим, что, при 3.4-кратном увеличении площади поверхности ФЭ панелей  $S$  (4/1,18) в «кубической» конструкции, мы получаем почти в 2 раза большую выработку энергии  $W$  (188/100) в условиях декабря, самого «сложного» месяца в году. «Кубическая» конструкция занимает при этом тот же объём, что и «классическая» панель.

С одной стороны такое увеличение площади ФЭ элементов выглядит непропорциональным и нецелесообразным. Но с другой стороны увеличение стоимости ФЭ элементов в современной автономной установке, включающей в себя накопитель энергии, контроллер заряда и управляющую электронику, не сможет серьёзно повлиять на общую себестоимость продукта, а с учётом постоянного снижения стоимости фотоэлементов в будущем может нивелироваться почти полностью.

## 2.5 Основные элементы ФЭ установок, исследуемых в данной работе

Независимо от производителя, уличные ФЭ установки, использующие энергию солнца, состоят из 5 основных элементов:

Солнечная панель, состоящая из фотоэлементов;

Контроллер заряда аккумулятора;  
Накопитель электрической энергии, аккумулятор;  
Светильник (опционально);  
Опора освещения.

В зависимости от конкретной модели оборудования, элементы конструкции могут быть разнесены в пространстве, или входить в состав компактной высокоинтегрированной системы.

2.5.1 Солнечная панель это несколько объединённых в электрическую цепь фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) — полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток.

Для производства традиционных фотоэлектрических преобразователей используется кристаллический кремний «солнечного» качества (с содержанием кремния свыше 99,99 % по весу). Различают монокристаллические и поликристаллические фотоэлементы. К монокристаллическому кремнию относятся слитки выращенные методом Чохральского из первичного сырья высокой степени очистки. Поликристаллический кремний получают из сырья с меньшей степенью очистки, а также вторичного сырья. Используются менее энергоёмкие способы получения заготовок, что снижает конечную себестоимость изделий.

В исследуемых образцах используются фотоэлементы на основе монокристаллического кремния в силу своей высокой эффективности до 20%. В то же время всё большее признание в мире получают тонкоплёночные солнечные панели, выполненных по технологии CIGS (CuInGaSe) и a-Si (аморфного кремния), стоимость которых значительно ниже моно и поликристаллических панелей. На данный момент серийный образцы тонкоплёночных панелей обладают относительно низкой эффективностью около 10-13%, поэтому их применение в компактных фотоэлектрических системах ограничено.

Как правило показатели эффективности измеряют в, так называемых, стандартных условиях тестирования (STC) при величине излучения равном  $1000\text{Вт/м}^2$  и температуре  $25^\circ\text{C}$ .

Эффективность (КПД) фотоэлементов по мере развития технологий становится всё выше, а себестоимость их производства падает. КПД преобразования солнечной энергии в электричество различными фотоэлементами серийного производства, а также теоретические максимумы и максимумы достигнутые в лабораторных условиях представлены на рисунке 21.[29]

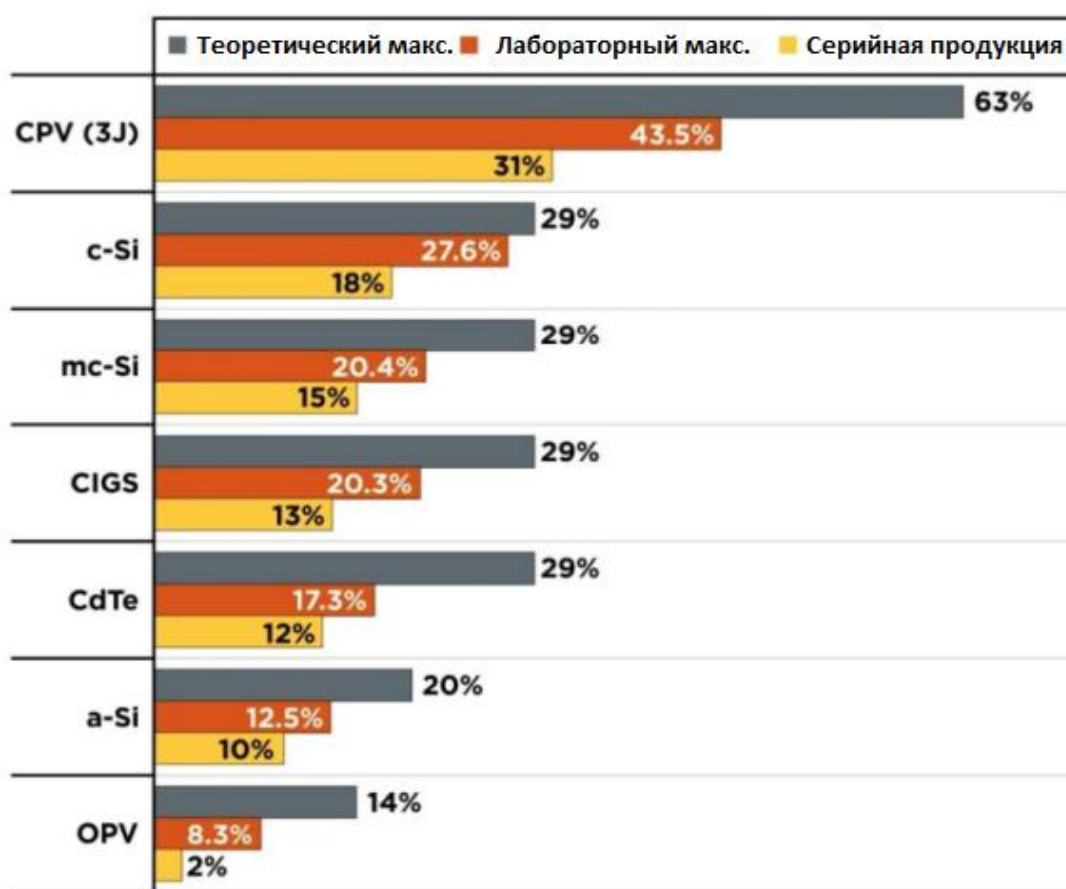


Рисунок 21 – КПД технологий преобразования солнечной энергии (2013 год)

На эффективность солнечных модулей могут влиять и другие факторы. Особенности строения фотоэлементов вызывают снижение производительности панелей с ростом температуры. Частичное затемнение панели вызывает падение выходного напряжения за счёт потерь в



неосвещённом элементе, который начинает выступать в роли паразитной нагрузки. От данного недостатка можно избавиться путём установки байпаса на каждый фотоэлемент панели.

Типичный срок службы, гарантируемый мировыми производителями кремниевых панелей составляет 10 лет на 90% и 20-25 лет на 80% от номинальной мощности полупроводниковых фотоэлементов. Предполагаемый срок службы кремниевых фотоэлементов может достигать 35 лет.

2.5.2 Контроллер заряда аккумуляторов в составе фотоэлектрической установки обеспечивает требуемый график заряда в зависимости от типа подключенного аккумулятора.

Из рабочей характеристики фотоэлектрической панели видно, что для достижения наибольшей эффективности требуется правильный подбор сопротивления нагрузки. Для этого фотоэлектрические панели не подключают напрямую к нагрузке, а используют контроллер управления фотоэлектрическими системами, обеспечивающий оптимальный режим работы панелей. Стандартно в контроллерах применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) для обеспечения полноты заряда аккумулятора.

Современные модели контроллеров используют метод слежения за точкой максимальной мощности MPPT (Maximum Power Point Tracking) солнечной батареи.

Типичный MPPT контроллер постоянно отслеживает ток и напряжение на солнечной батарее, перемножает их значения и определяет пару ток-напряжение, при которых мощность СБ будет максимальной. Встроенный процессор также следит, на какой стадии заряда находится аккумулятор (наполнение, насыщение, выравнивание, поддержка) и на основании этого определяет, какой ток должен подаваться в аккумуляторы. Одновременно процессор может давать команды на индикацию параметров на табло (при наличии), хранение данных, и т.п.

Положение точки максимальной мощности (ТММ) зависит от нескольких параметров – от освещенности модуля, температуры, разнородности используемых модулей и т.д. Контроллер периодически пытается немного «отойти» от найденной на предыдущей стадии точки в обе стороны, и если мощности при этом увеличивается, то он переходит на работу в этой точке. Теоретически, при поиске ТММ теряется немного энергии, но эта потеря очень незначительна по сравнению с той дополнительной энергией, которую обеспечивает MPPT контроллер, особенно в облачные дни. На рисунке 22 изображено смещение точки максимальной мощности в зависимости от внешних условий.[34]

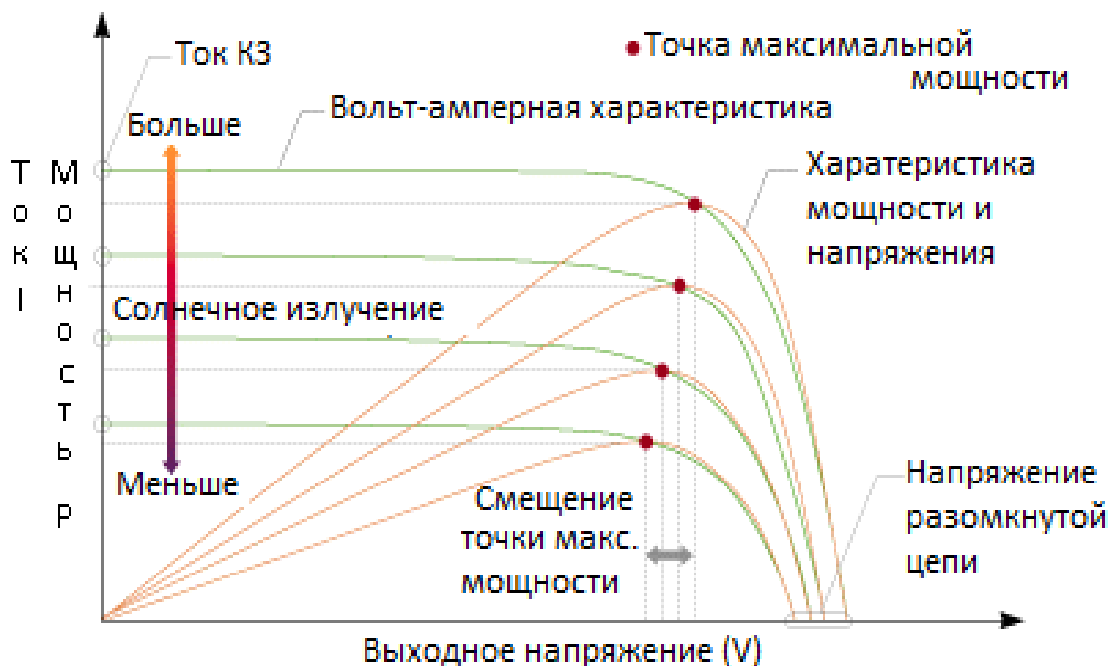


Рисунок 22 – Смещение точки максимальной мощности фотоэлемента

В настоящее время появляются решения, построенные на основе «оптимизаторов мощности» солнечных панелей (Power optimiser). Эта оригинальная идея по сути своей является методом присоединения к каждой солнечной панели индивидуальных, уменьшенных копий солнечных контроллеров заряда с MPPT за исключением функции контроля и заряда аккумулятора, которую при необходимости выполняет отдельное центральное

устройство. Оптимизаторы позволяют сократить потери энергии связанные с неодинаковостью мощностных показателей и с различной освещённостью солнечных панелей, соединённых в общую электрическую цепь, при помощи встроенного, индивидуального для каждой панели dc-dc преобразователя. Наиболее заметных успехов в этой сфере добилась израильская компания SolarEdge[36], изделия которой уже используются по всему миру.

2.5.3 Аккумулятор. Наиболее распространенным типом аккумуляторных батарей (АБ) являются свинцово-кислотные, как с жидким электролитом, так и герметизированные (VRLA). В автономных системах чаще других встречаются АБ выполненные по технологии AGM и GEL(гелевые).

AGM (Absorbent Glass Mat, абсорбирующее стекловолокно) — это технология изготовления свинцово-кислотных аккумуляторов. Отличие батарей AGM от классических в том, что в них содержится абсорбированный электролит, пропитанный жидким электролитом пористый наполнитель отсеков корпуса из стекловолокна, а не жидкий, что даёт ряд изменений в свойствах аккумулятора.[37]

Преимущества технологии AGM:

Конструкция не требующая обслуживания.

Конструкция герметична и имеет клапанную регулировку, предотвращает утечку кислоты и коррозию клемм.

Высокая устойчивость к глубоким разрядам ( $>0,5C$ )

Более безопасная работа: при правильной зарядке батарей исключается возможность выделения газов и опасность взрыва.

Герметичная конструкция позволяет устанавливать батарею почти в любом положении (однако установка вверх дном не рекомендуется).

Уверенная работа при низких температурах (ниже  $-40^{\circ}C$ ).

Повышенная виброустойчивость увеличивает срок службы.

В GEL аккумуляторе электролит загущен силикагелем. Это делает его ещё более устойчивым к глубоким разрядам, но и более дорогим.

В общем случае срок службы подобных аккумуляторов доходит до 12 лет в буферном режиме. В циклическом режиме количество гарантируемых циклов разряда в зависимости от его глубины может составлять от 500 до 3500.

Реже используются литий-ионные аккумуляторы с литий-железо-фосфатный ( $\text{LiFePO}_4$ ) катодом в конструкции, в силу высокой стоимости, проблем функционирования при отрицательных температурах и требований по их переработке. Применение щелочных NiMh аккумуляторов требует применения более сложных контроллеров заряда для компенсации «эффекта памяти», но их применение достаточно оправдано, так как они не содержат тяжёлых металлов, а значит, безвредны для окружающей среды и не требуют специальной переработки при утилизации.

В настоящее время хранение энергии одно из самых узких мест в автономных фотоэлектрических системах электроснабжения. Характеристики большинства существующих аккумуляторов ограничивают их срок службы 6-7 годами в циклическом режиме. Увеличение сроков эксплуатации элементов можно ожидать вследствие появления и возможного применения доступных ионисторов, что серьёзно повлияет на стоимость эксплуатации и окупаемость подобных устройств.

2.5.4 Источник света. Во всех рассматриваемых установках применяются светильники на твёрдотельных светодиодных источниках освещения. Они оптимальны с точки зрения эффективности, долговечности, времени включения и регулирования светового потока. Также они имеют низковольтное питание, что позволяет избежать использования инвертора в своей конструкции.

Современные светодиодные источники обладают светоотдачей более 100 лм/Вт и высоким коэффициентом цветопередачи. При оптимальной схемотехнике источников питания, применении качественных компонентов и обеспечении надлежащего теплового режима срок службы светодиодных систем освещения при сохранении приемлемых для общего освещения показателей может достигнуть 36-72 тысяч часов.

Таблица 9 – Характеристики электрохимических накопителей энергии(2013г)

№ п/п	Характеристики	NiMH	Lead Acid Кислотные	Li-ion	Li-ion polymer
1	2	3	4	5	6
1	Энергетическая плотность (W*час/кг)	60-120	30-50	110-160	100-130
2	Внутреннее сопротивление (включая внутренние схемы), мОм	200-300 при 6В	<100 при 12В	150-250 при 7.2В	200-300 при 7.2В
3	Число циклов полного заряда/разряда (при снижении до 80% от начальной емкости)	300-500	200-300	500- 1000	300-500
4	Время быстрого заряда	2-4 часа	8-16 часа	2-4 часа	2-4 часа
5	Устойчивость к перезаряду	низкая	высокая	очень низкая	низкая
6	Саморазряд / месяц (при комнатной температуре)	30%	5%	10%	~10%
7	Напряжение элемента ном.	1.25В	2В	3.6В	3.6В
8	Ток нагрузки — пиковый — оптимальный	5С 0.5С и ниже	5С 0.2С	>2С 1С и ниже	>2С 1С и ниже

Продолжение таблицы 9

9	Температура эксплуатации (только разряд)	при (только)	-20 до 60°C	-20 до 60°C	-20 до 60°C	0 до 60°C
10	Типовая (для сравнения US\$)	цена	\$60 (7.2B)	\$25 (6B)	\$100 (7.2B)	\$100 (7.2B)
11	Цена на цикл (US\$)		\$0.12	\$0.10	\$0.14	\$0.29
12	Начало коммерческого использования		1990	1970	1991	1999

2.5.5 Опоры выполняют роль крепления источника энергоснабжения или уличного освещения в воздухе, на высоте, необходимой для его нормального функционирования при условии минимального затенения. При использовании планарных, плоских солнечных панелей большой площади необходимо учитывать возрастающую несущую и ветровую нагрузку. В случаях высокоинтегрированных фотоэлектрических систем поверхность опоры освещения может покрываться фотоэлементами, а изнутри наполняться необходимой электроникой и накопителями энергии, что в перспективе приведёт к появлению понятия автономных опор электропитания и освещения.

### **Выбор фотоэлектрических элементов**

Поставив цель проектирования ФЭ энергоустановки на отечественной элементной базе мы сознательно ограничиваем себе выбор. Несмотря на несомненные достижения в использовании солнечной энергии в космической технике, гражданский сектор производства полупроводниковых фотоэлементов развит достаточно слабо. Но в самые ближайшие годы, благодаря

государственному стимулированию крупных объектов солнечной энергетики, должны появиться новые производства, локализованные в России зарубежными партнёрами.

В настоящее время мы располагаем двумя отечественными производителями солнечных панелей, компания ООО «Хевел» (г. Новочебоксарск) и ЗАО «Телеком-СТВ».

ЗАО «Телеком-СТВ» основано в 1991 году сотрудниками ведущих предприятий микроэлектроники г. Зеленограда. Основная специализация ЗАО «ТЕЛЕКОМ-СТВ» – электронное материаловедение, полупроводниковые технологии. Обладая опытом работы в научных, образовательных и промышленных предприятиях электронной промышленности, сотрудники ЗАО «ТЕЛЕКОМ-СТВ» удачно дополняют друг друга при решении различных научных, технологических и производственных проблем.

В процессе развития предприятия основной сферой деятельности стала технология изготовления высококачественных пластин кремния для микроэлектроники и солнечных элементов, а также производство солнечных панелей и оборудования для их производства.

Из широкого спектра предлагаемых солнечных панелей выбрана модель ТСМ-15 выполненная на основе традиционных фотоэлементов из монокристаллического кремния, подходящая по своим размерам для создания вертикальной кубической конструкции. Её характеристики представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Характеристики солнечной панели ТСМ-15

Модель	Мощность, Вт	U <sub>хх</sub>	U <sub>м</sub>	I <sub>м</sub>	Габариты, мм	Вес, кг	Цена, руб.
ТСМ-15	18	23	19,6	0,9	430×232×4 3	1,45	3516

где:

U<sub>хх</sub> – напряжение холостого хода;

U<sub>м</sub> – напряжение максимальной мощности;

I<sub>м</sub> – ток при напряжении максимальной мощности.

Все размеры даны с разбросом: длина ± 5мм, ширина ± 5мм, толщина ± 3мм.

Условия измерения параметров модулей – стандартные: 1000 Вт/м<sup>2</sup>, АМ 1.5, 25°С

Компания «Хевел» основана в 2009 году как первый в России производитель тонкопленочных фотопреобразовательных модулей, призванный создать полноценную высокотехнологичную отрасль солнечной энергетики как альтернативу традиционным источникам энергии. Компания «Хевел» использует тонкопленочную технологию приобретенную у компании Oerlikon Solar. Работы по совершенствованию технологии и новым разработкам ведутся в союзе с НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе г. Санкт-Петербург.

Применяемая технология: нанесение покрытий из аморфного и микроморфного кремния на базе тонкопленочной технологии. Преимуществами микроморфной тонкопленочной технологии являются низкая стоимость производства, экологичность, возможность улавливания рассеянного света, что существенно увеличивает выработку электроэнергии даже в условиях средней полосы России.

Технология производства компании базируется на применении микроморфных покрытий – «тонких пленок» на основе кремния, являющихся следующим поколением технологии, уже зарекомендовавшей себя на рынке –



фотоэлектрических модулей на основе аморфного кремния. Типичная конструкция гетероструктурного солнечного элемента на основе аморфного и микроморфного кремния отличается от технологии прошлого поколения – аморфного кремния наличием наноструктурированного «микроморфного слоя», позволяющего преобразовывать более широкий спектр длин волн излучения, падающего на фотоэлектрический модуль, увеличивая тем самым КПД модуля.



Рисунок 23 – Структура тонкоплёночных модулей на аморфном кремнии

К сожалению, на данный момент компания «Хевел» производит только один типоразмер солнечных панелей (1300x1100 мм.), что усложняет их использование в компактных фотоэлектрических установках. В ходе переписки с производителем была установлена техническая возможность производства различных типоразмеров солнечных панелей на уже существующем оборудовании при появлении явной экономической целесообразности такого варианта.

## **Выбор накопителя энергии**

В области электрохимических накопителей энергии для ФЭ энергоустановок складывается похожая ситуация. Несмотря на применение в космической технике высокотехнологичных никель-водородных аккумуляторов с чрезвычайно высокими эксплуатационными характеристиками, в России в гражданском секторе до сих пор производятся в основном жидкостные свинцово-кислотные аккумуляторы, применение которых в автономных необслуживаемых ФЭ установках экономически нецелесообразно.

В ходе исследования был найден производитель перспективных промышленных литий-железо-фосфатных ( $\text{LiFePO}_4$ ) аккумуляторов ООО «Лиотех», применение которых позволит значительно увеличить срок службы энергоустановки в целом.

Общество с ограниченной ответственностью «Литий-ионные технологии» (ООО «Лиотех») – дочернее предприятие ОАО «РОСНАНО». Компания Лиотех создана для реализации в нашей стране проекта по производству современных литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Построенный в Новосибирской области завод «Лиотех» полностью соответствует всем нормам технологической и экологической безопасности. Запуск производства был осуществлен в декабре 2011 г., мощность – более 1ГВт\*ч.

Выбрана модель LT–LYP200 с минимальной из доступных у производителя ёмкостью ячейки аккумулятора, характеристики которой представлены в таблице 11.



Рисунок 24 – Литий-железо-фосфатный аккумулятор LT-LYP200

Таблица 11 - Основные характеристики LT-LYP200

Тип ЛИА	Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, Ah	Габариты, мм			Масса , кг, не более	Цена (с учетом НДС 18%), руб.
			Длина	Ширина	Высота		
LT- LYP200	3,2	200	163	117	337	9,95	14 000
Электрические характеристики аккумуляторов LT-LYP при 25°C (*)							
Номинальная емкость, А*ч				200/240/380/770, 300			
Номинальное напряжение, В				3,2			
Удельная энергия по массе, Вт.ч/кг				105			
Рекомендованные режимы эксплуатации							
Непрерывный разряд, С				0,5			
Ток заряда, С				0,5			
Заряд при температуре, °С				от 0 до +30			
Разряд при температуре, °С				от -30 до +50			
Предельные рабочие режимы							
Непрерывный разряд, С				3			
Ток заряда, С				3			
Максимальное напряжение заряда, В				3,9			
Минимальное напряжение на аккумуляторе, В				2,5			
Заряд при температуре, °С				от -10 до +30			
Разряд при температуре, °С				от -40 до +50			
Хранение при температуре, °С				от 0 до +30			
<b>Ресурс, заряд/разряд при глубине разрядки до 80%, циклов</b>				3000			
<b>Саморазряд полностью заряженного аккумулятора при хранении (+25°C), % в месяц</b>				<3			

Стоит обратить внимание на то, что помимо несомненных преимуществ, литий-ионные аккумуляторы обладают одним существенным недостатком, если заряжать такой аккумулятор при его отрицательной температуре, он быстро

выходит из строя. В тоже время разряд аккумулятора при отрицательной температуре проблем не вызывает. Необходимо предусмотреть теплоизоляцию и подогрев литий-ионного аккумулятора для его нормального заряда в зимних условиях средней полосы РФ. Также вопросы вызывает низкое напряжение аккумулятора-ячейки в заряженном состоянии, 3,2 В. Для нормального функционирования большинства солнечных контроллеров заряда аккумуляторов необходимо комплектовать аккумуляторную сборку с напряжением стандартного ряда: 12В, 24В, 36, 48В и т.д. Особенность сформирована под влиянием типовых напряжений свинцово-кислотных аккумуляторов, широко применяемых в автономных фотоэлектрических установках в прошлом, также это обусловлено значительными омическими потерями из-за относительно большого тока, при низком напряжении.

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LFP) это лишь одна из разновидностей семейства литий-ионных накопителей. Актуальные показатели плотности энергии её представителей представлены на графике ниже.

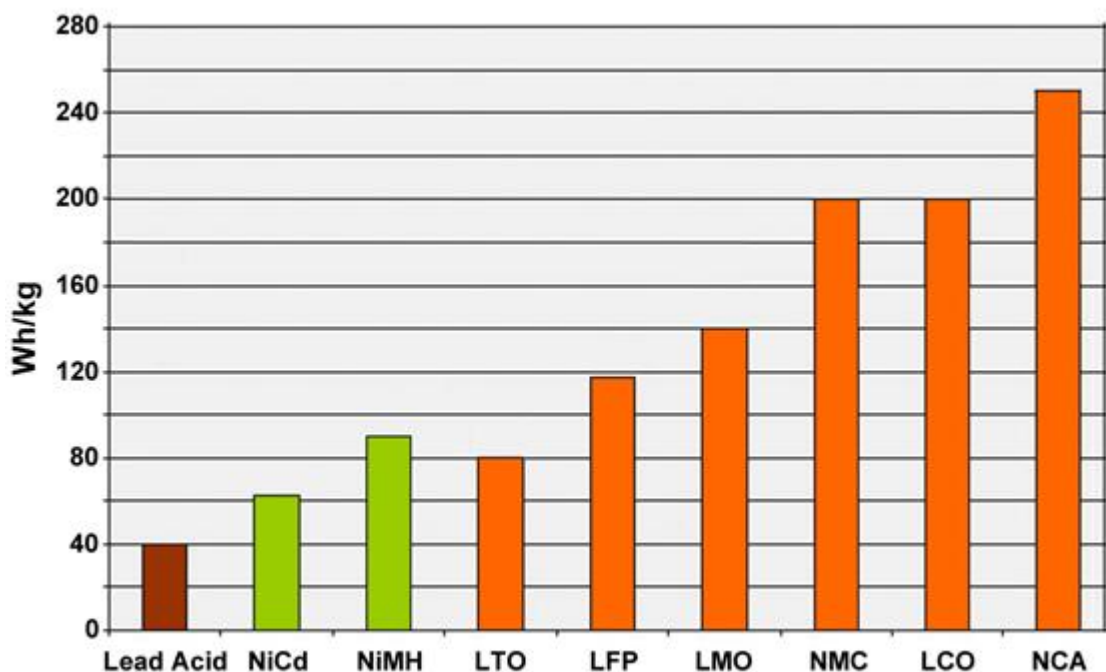


Рисунок 25 – Плотность энергии различных типов аккумуляторов

## **Выбор контроллера заряда**

Предложение на отечественном рынке контроллеров заряда для систем солнечной энергетики ограничено одним производителем с серийно выпускаемой продукцией, компанией ООО «МикроАРТ», но и её предложения с трудом можно использовать для наших целей. Солнечные контроллеры от компании «МикроАРТ» обладают высокими характеристиками, эффективно используют алгоритм слежения за точкой максимальной мощности, но в то же время имеют избыточную мощность для малогабаритных автономных источников солнечной энергии, исследуемых нами.

В апреле 2016 года был запущен в серию малогабаритный солнечный контроллер КЭС 100/20 МРРТ, который удовлетворяет всем нашим требованиям. Его особенности будут подробно рассмотрены и описаны в следующей главе.

## 2.6 Выводы по второй главе

В ходе исследования были проработаны основные теоретические аспекты работы всенаправленных кубических конструкций. Были получены зависимости и закономерности, подтверждающие возможность успешного функционирования рассматриваемых установок в климатических и географических условиях средней полосы РФ.

Рассмотрены и выбраны отечественные компоненты, применение которых может быть целесообразно для малогабаритных фотоэлектрических установок. Также выявлены проблемные места и узлы, поиск и изучение которых необходимо продолжать дальше, а именно это контроллер заряда аккумулятора и устройство термостатирования для аккумулятора.

В случае, если дальнейшие поиски подходящего оборудования не окажутся успешными, необходимо принимать решение либо о применении импортных комплектующих, либо масштабировании системы до системного напряжения в 12 В (тогда ФЭ установка перестанет быть малогабаритной, изменятся цели и способы её использования), либо о продолжении работы в текущем русле с последующим формированием технического задания на искомый компонент (контроллер заряда), с надеждой на последующее воплощение его в жизнь.

Также необходимо решить вопрос об оптимальном подключении ФЭ панелей, чтобы при работе, в разной степени освещённые солнцем, панели не оказывали паразитного воздействия друг на друга, тем самым уменьшая общую выработку энергии.

### **3 Проектирование системы**

В третьей, заключительной части работы стоит задача по проектированию и компоновке автономной фотоэлектрической установки с вертикальным расположением солнечных панелей, ориентированных не только на южную сторону, но и остальные стороны света. Эта конфигурация мало изучена и, в любом случае, требует детального исследования, имитационного и натурного моделирования, для выявления основных закономерностей и зависимостей величин, требуемых для последующего проектирования автономных установок электропитания на источниках возобновляемой энергетики. Необходимо учитывать климатические условия места предполагаемого использования.

Так как принято решение в качестве компонентной базы использовать преимущественно отечественные изделия в целях локализации и удешевления стоимости возможного производства, накладываются дополнительные трудности. Производственная база элементов для фотоэлектрических установок в гражданском секторе РФ слабо развита, но несмотря на это нам удалось выявить необходимых производителей.

Целью исследовательской работы является проектирование автономной фотоэлектрической установки.



### 3.1 Отправные данные

В идеальных условиях было бы правильным начать проектирование с определения требуемых критериев и чёткого технического задания. В данном случае за прототип взято изделие Towersun («Солнечная башня») австрийской компании EPS-soltec, ниже приведены его основные характеристики:

Таблица 12 – Характеристики Towersun-128

Характеристика	Значение
Солнечные модули	8 элементов, монокристаллические кремниевые ячейки
Выходная мощность (макс.)	128 Вт (8 модулей) Модули заряжаются также при рассеянном свете (от 8% до 15% от нормы)
Аккумулятор	1х 36 ампер-час
Рабочая температура	-20°C – 50°C
Срок эксплуатации аккумулятора	Прибл. 5-6 лет (зависит от температуры)
Размеры установки	237 мм х 237 мм х 1310 мм
КПД солн. панелей	18%
Периоды технического обслуживания / гарантия	
Рекомендуемая замена аккумулятора	после 6 лет
Гарантия (гарантийный срок начинается с даты производства)	2 года, 100-процентная гарантия на продукт 3 лет, гарантия минимальной производительности 90% 10 лет, гарантия минимальной производительности 80%

В настоящее время накопился небольшой опыт использования данных установок на территории РФ, выявлены недостатки, связанные в основном с недостаточной ёмкостью и относительно коротким сроком службы аккумулятора, необходимость замены которого регламентировано сроком в пять лет.

В нашем случае мы вынуждены отталкиваться от того, что мы имеем в качестве компонентной базы, поэтому формирование чёткого технического задания становится для нас нецелесообразным.

### **3.2 Основные элементы ФЭ установок**

Независимо от производителя, уличные ФЭ установки, использующие энергию солнца, состоят из 5 основных элементов:

- Солнечная панель, состоящая из фотоэлементов;
- Контроллер заряда аккумулятора;
- Накопитель электрической энергии, аккумулятор.

Все они войдут в состав нашей фотоэлектрической системы.

### 3.2.1 Солнечная панель

Эффективным шагом могло бы стать использование фотоэлектрических панелей на основе полиаморфных кремниевых тонкоплёночных технологий фирмы Хевел, которая обеспечивает высокое рабочее напряжение одного модуля (90-100В) при отсутствии дополнительных соединений, как в классических моно и поли-кристаллических солнечных панелях, что влияет на общую надёжность всей установки в целом.

Таблица 13 - Характеристики солнечной панели Хевел

**Электрические характеристики при стандартных тестовых условиях\***

Номинальная пиковая мощность ( $\pm 3\%$ ) [Wp]	<b>120</b>	<b>125</b>
Напряжение при номинальной мощности [V]	<b>99</b>	<b>100</b>
Сила тока при номинальной мощности [A]	<b>1,22</b>	<b>1,25</b>
Напряжение открытого контура [V]	<b>130</b>	<b>131</b>
Ток короткого замыкания [A]	<b>1,44</b>	<b>1,45</b>

Применение панелей с высоким рабочим напряжением возможно только в случае применения контроллера заряда аккумулятора с функцией слежения за точкой максимальной мощности (MPPT), и позволяет более эффективно работать в условиях низкой освещённости (облачности или пасмурной погоде). В этом случае напряжение по-прежнему остаётся достаточно высоким для его эффективного (с высоким КПД) преобразования в DC-DC-конверторе MPPT-контроллера для заряда аккумулятора. Также стоит отметить невысокую стоимость таких панелей в купе с высокими прочностными качествами и лёгкостью применения тонкоплёночных панелей. Из недостатков следует отметить относительно низкий КПД преобразования около 10%.

В нашем конкретном примере применение таких панелей на данный момент невозможно из-за того, что производитель ограничивает ассортимент выпускаемой продукции одним типоразмером (1000x1300мм.). В ходе переписки выяснено, что производство других типоразмеров на том же оборудовании технологически возможно, но на данный момент нецелесообразно по экономическим соображениям. Потенциал их применения отложим на будущее.

В результате остаётся принять к применению второй вариант, в виде классических монокристаллических панелей TCM-15 компании Телеком-СТВ.

Таблица 14 – Характеристики солнечной панели TCM-15

Модель	Мощность, Вт	U <sub>хх</sub>	U <sub>м</sub>	I <sub>м</sub>	Габариты, мм	Вес, кг	Цена, руб.
ТСМ-15	18	23	19,6	0,9	430×232×4 3	1,45	3516

где:

U<sub>хх</sub> – напряжение холостого хода;

U<sub>м</sub> – напряжение максимальной мощности;

I<sub>м</sub> – ток при напряжении максимальной мощности.

Все размеры даны с разбросом: длина ± 5мм, ширина ± 5мм, толщина ± 3мм.

Условия измерения параметров модулей – стандартные: 1000 Вт/м<sup>2</sup>, АМ 1.5, 25°С

Для обеспечения требуемой мощности и габаритов выбираем 3 последовательно соединённые панели TCM-15 на одну сторону «башни», в сумме 12 панелей на одну установку. Общая мощность панелей будет достигать 216 Вт. Рабочее напряжение вдоль одной цепочки 54В.

В нашем случае выбран нетипичный способ расположения солнечных модулей вертикально с их направлением по четырём сторонам света, как в проекте «солнечной башни» (Towersun), принятого за основу. Как ни странно создатели Towersun не являются первооткрывателями этого способа компоновки солнечных панелей. Такой метод достаточно давно использовался в космической сфере при создании искусственных спутников Земли малых и сверхмалых форматов CubeSat, первое описание стандарта системы накопления энергии которого датировано 1999 годом. Схема соединения солнечных панелей в общую цепь питания хорошо описана и будет заимствована из данного источника.

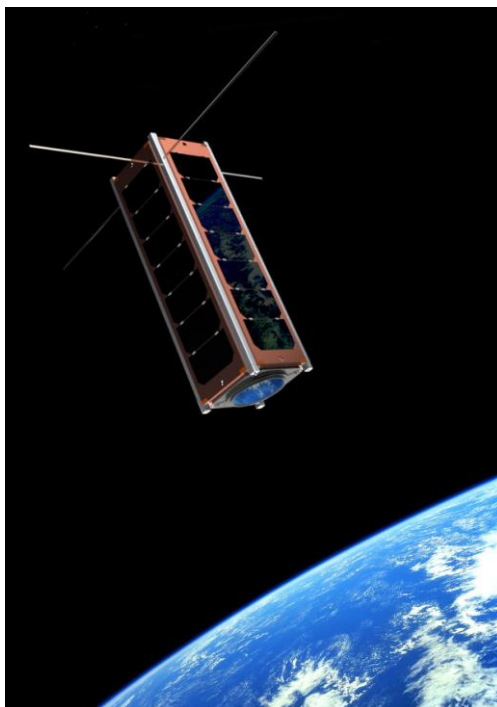


Рисунок 26 – Малый спутник стандарта CubeSat

Подключение панелей в ф/э установке «башня» в цепь последовательно-параллельное согласно схеме на рисунке 27.

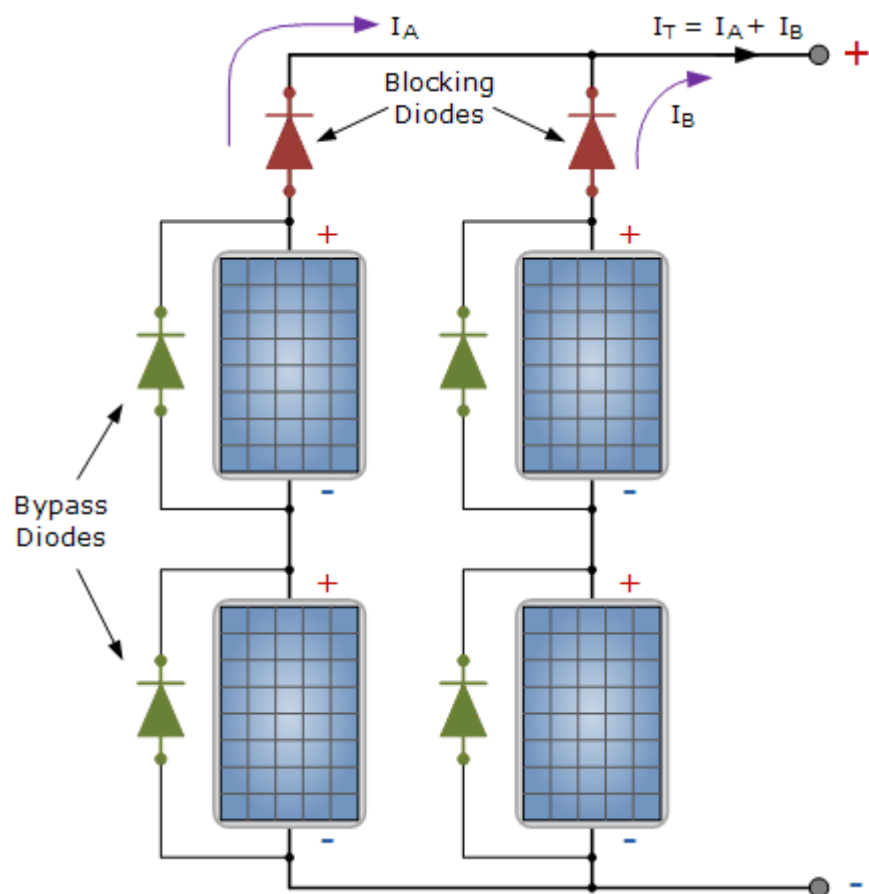


Рисунок 27 – Схема соединения солнечных панелей

В схеме применяются блокирующие и шунтирующие диоды. Каждая цепочка это 3 последовательно соединённые панели направлены на одну сторону света. Четыре стороны башни – четыре цепочки, соединённые параллельно через блокирующий диод, для уменьшения влияния по-разному освещённых цепочек друг на друга. Шунтирующие диоды применены для исключения локальной затемнённости фотоэлементов одной панели целиком и как правило уже установлены в панелях фабричного изготовления.

В качестве блокирующих и шунтирующих диодов целесообразно применение диодов Шоттки, имеющих минимальное падение напряжения в прямом включении (0,2-0,4В против 0,6-0,7В у кремниевых), что позволит получить большее количество энергии.

### 3.2.2 Контроллер заряда аккумуляторов

В составе фотоэлектрической установки обеспечивает требуемый график заряда в зависимости от типа подключенного аккумулятора.

Из рабочей характеристики фотоэлектрической панели видно, что для достижения наибольшей эффективности требуется правильный подбор сопротивления нагрузки. Для этого фотоэлектрические панели не подключают напрямую к нагрузке, а используют контроллер управления фотоэлектрическими системами, обеспечивающий оптимальный режим работы панелей. Стандартно в контроллерах применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) для обеспечения полноты заряда аккумулятора.

Современные модели контроллеров используют метод слежения за точкой максимальной мощности MPPT (Maximum Power Point Tracking) солнечной батареи. MPPT контроллер постоянно отслеживает ток и напряжение на солнечной батарее и способен изменять их соотношение, двигаясь по вольтамперной характеристике в ту, или иную сторону, перемножает их значения и определяет пару ток-напряжение, при которых мощность СБ будет максимальной. Встроенный процессор также следит, на какой стадии заряда находится аккумулятор (наполнение, насыщение, выравнивание, поддержка) и на основании этого определяет, какой ток должен подаваться в аккумуляторы. Одновременно процессор может давать команды на индикацию параметров на табло (при наличии), хранение данных, и т.п.

Положение точки максимальной мощности (ТММ) зависит от нескольких параметров – от освещенности модуля, температуры, разнородности используемых модулей и т.д. Контроллер периодически пытается немного «отойти» от найденной на предыдущей стадии точки в обе стороны, и если мощности при этом увеличивается, то он переходит на работу в этой точке. Теоретически, при поиске ТММ теряется немного энергии, но эта потеря очень незначительна по сравнению с той дополнительной энергией, которую обеспечивает MPPT контроллер, особенно в облачные дни. На рисунке



28 изображено смещение точки максимальной мощности в зависимости от внешних условий.[34]

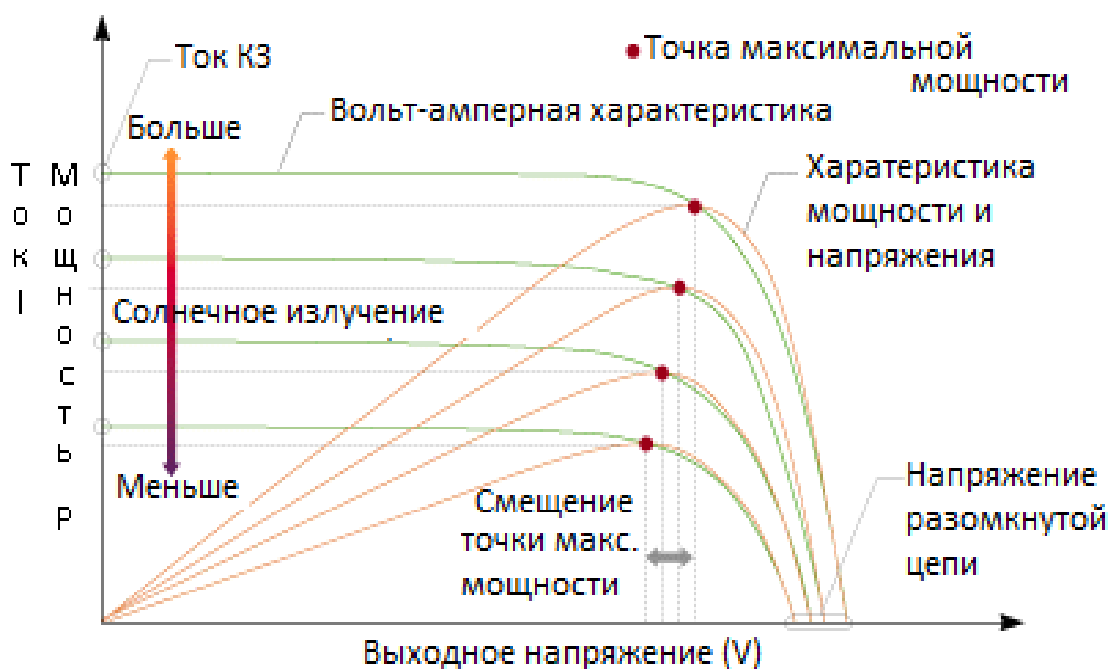


Рисунок 28 – Смещение точки максимальной мощности фотоэлемента

Для реализации поставленных задач выбран солнечный контроллер фирмы МикроАрт КЭС 100/20 MPPT. Контроллер рассчитан для работы в фотоэлектрических системах малой мощности при токе заряда до 20 А и напряжении аккумуляторов 12 или 24В (со стороны солнечных панелей напряжение может быть до 100 В). Данное изделие представляет собой контроллер заряда аккумуляторных батарей (далее «АКБ»), выполненный по технологии MPPT (Maximum Power Point Tracking).

КПД до 98% позволяет не только собирать всю солнечную энергию почти без потерь, но и даёт возможность обойтись без вентиляторов охлаждения, что в разы увеличивает надёжность прибора.

Технологии, используемые в контроллере, позволяют по максимуму использовать возможности солнечной электростанции, а широкий диапазон

входных напряжений позволяет использовать любые солнечные панели и сборки из них.

Так же, можно использовать любые типы аккумуляторов. Заряд включает в себя три стадии с буферным режимом.



Рисунок 29 – Контроллер заряда МикроАрт КЭС 100/20 МРРТ

Ключевые преимущества:

- Высокое быстродействие, а следовательно эффективность выше до 10% (по сравнению с другими МРРТ контроллерами) и до 40% по сравнению с ШИМ (PWM) контроллерами.
- КПД 98% и отсутствие вентиляторов охлаждения
- Допустимое напряжение на входе контроллера до 100 В
- Температурная компенсация и коррекция режимов заряда для продления срока службы аккумулятора

- Выход для подключения нагрузки или силового реле (электронное реле управления внешними устройствами).
- Возможность подключения литий-железо-фосфатных (LiFePO4) аккумуляторных батарей с BMS.
- Трёхстадийный заряд с буферным режимом
- Автоматическое подключение/отключение нагрузки при заряде/разряде АКБ
- Тропическое исполнение: плата контроллера защищена влагонепроницаемым покрытием (лаком), что минимизирует вредное влияние повышенной влажности и насекомых.
- Возможность обновления встроенного программного обеспечения

Защитные механизмы контроллера:

- Защита от неправильной полярности подключения СП
- Защита от короткого замыкания на входе СП
- Защита от короткого замыкания в нагрузке
- Защита от перегрева
- Отключение СП после достижения конечного напряжения заряда АКБ
- Отключение нагрузки при недопустимо низком напряжении на АКБ
- Защита от обрыва в цепи АКБ
- Предотвращение разряда АКБ через СП в ночное время
- Электронный предохранитель

Серьёзной конкуренции на российском рынке солнечных контроллеров нет, поэтому данное изделие было выбрано как единственный подходящий вариант. Его характеристики представлены ниже:

Таблица 15 – Характеристики МикроАрт КЭС 100/20 МРРТ.

Напряжение аккумуляторной батареи	12 / 18 / 24 В
Максимальный ток заряда	20А @ 40°С (технология МРРТ)
Максимальная мощность снимаемая с PV массива (мощность солнечных панелей может быть и выше)	12В: 240Вт / 18В: 360Вт / 24В: 480Вт
Максимальное напряжение разомкнутого PV массива	100В
Минимальное напряжение PV массива	0 В
Энергопотребление в режиме ожидания	Не более 0,2 Вт
Максимальный КПД	98% (АКБ 24 В, СП (PV) 90 В. Ток заряда 20А)
Тип используемых аккумуляторов	GEL, AGM, закрытые, открытые кислотные, литий-железо фосфатные
Температурный сенсор	Внешний
Температурная компенсация (по умолчанию)	-3mV / °С на 2В ячейку батареи

Продолжение таблицы 15

Защита	Защиты от перегрева и снижения мощности при высокой температуре. PV короткого замыкания и PV защита от обратной полярности.
Рабочая температура	-40 °С до 60 °С с уменьшением тока на выходе при ↑t °С внутри корпуса 65 °С
Охлаждение	Естественное/Принудительное (при необходимости можно установить вентилятор на радиатор)
Влажность (без конденсата)	95%
Макс. сечение провода	6 mm <sup>2</sup>
Материал корпуса, цвет	Алюминий / сталь
Класс защиты	IP40
Установка	Вертикальное настенное крепление
Вес, кг	1,2 кг
Размеры, мм	122x155x87 мм

### 3.2.3 Аккумулятор

В настоящее время хранение энергии одно из самых узких мест в автономных фотоэлектрических системах электроснабжения. Характеристики большинства существующих аккумуляторов ограничивают их срок службы 6-7 годами в циклическом режиме. Увеличение сроков эксплуатации элементов можно ожидать вследствие появления и возможного применения доступных ионисторов, что серьёзно повлияет на стоимость эксплуатации и окупаемость подобных устройств, но в настоящее время их стоимость высока, а характеристики несовершенны.

Для увеличения общего срока службы всего устройства в целом принято решение использовать литий-железофосфатные аккумуляторы отечественного производства ( $\text{LiFePO}_4$ ), в том числе, как единственный серийно выпускаемый в России необслуживаемый носитель энергии.

Выбрана модель LT-LYP200 компании Лиотех с минимальной из доступных аккумуляторов ёмкостью заряда, характеристики которой представлены в таблице 4. Четыре таких аккумулятора будут последовательно объединены в цепь с общим напряжением в 12,8В. Это минимальный уровень напряжения, необходимый для нормального согласования с выбранным выше контроллером заряда аккумуляторов.

Производитель рекомендует использовать систему контроля и управления процессом заряда/разряда аккумуляторов (Battery Management System, BMS). Эта система обеспечивает отслеживание и хранение многих параметров процесса заряда/разряда, а также уравнивание потенциалов на каждой отдельной ячейке, последовательно соединённой в аккумуляторную сборку. Данное требование обусловлено особенностями двухэтапного процесса зарядки литий-ионных аккумуляторов и направлено на увеличение их максимального срока службы.

Заряд литий-ионных аккумуляторов осуществляется в две стадии методом CC/CV( постоянного тока и постоянного напряжения). В начале заряд

происходит постоянным током до момента достижения ячейкой аккумулятора значения порогового напряжения, затем заряд производится с поддержанием этого постоянного напряжения и постепенным снижением тока заряда. На этапе заряда постоянным током аккумулятор заряжается до 70% от номинальной ёмкости, остальные 30% он получает на втором этапе, хотя по затрачиваемому времени первый и второй этапы приблизительно одинаковы. Заряд аккумулятора считается окончанным при снижении тока заряда до 5-10мА.

При планируемой, не более 30% глубине разряда (DoD) аккумулятора можно достичь максимального его ресурса до 7000 циклов заряда/разряда, что означает увеличение срока службы до 20 лет ежедневной круглогодичной работы.

Стоит обратить внимание на то, что помимо несомненных преимуществ, литий-ионные аккумуляторы обладают одним существенным недостатком, если заряжать такой аккумулятор при его отрицательной температуре, он быстро выходит из строя. В тоже время разряд аккумулятора при отрицательной температуре проблем не вызывает. Необходимо предусмотреть теплоизоляцию и подогрев литий-ионного аккумулятора для его нормального заряда в зимних условиях средней полосы РФ.

Таблица 16 – Основные характеристики LT-LYP200

Тип ЛИА	Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, Ah	Габариты, мм			Масса , кг, не более	Цена (с учетом НДС 18%), руб.
			Длина	Ширина	Высота		
LT- LYP200	3,2	200	163	117	337	9,95	14 000
Электрические характеристики аккумуляторов LT-LYP при 25°C (*)							
Номинальная емкость, А*ч			200/240/380/770, 300				
Номинальное напряжение, В			3,2				
Удельная энергия по массе, Вт.ч/кг			105				
Рекомендованные режимы эксплуатации							
Непрерывный разряд, С			0,5				
Ток заряда, С			0,5				
Заряд при температуре, °С			от 0 до +30				
Разряд при температуре, °С			от -30 до +50				
Предельные рабочие режимы							
Непрерывный разряд, С			3				
Ток заряда, С			3				
Максимальное напряжение заряда, В			3,9				
Минимальное напряжение на аккумуляторе, В			2,5				
Заряд при температуре, °С			от -10 до +30				
Разряд при температуре, °С			от -40 до +50				
Хранение при температуре, °С			от 0 до +30				
Ресурс, заряд/разряд при глубине разрядки до 80%, циклов			3000				
Саморазряд полностью заряженного аккумулятора при хранении (+25°C), % в месяц			<3				



### 3.2.4 Термостатирование аккумуляторной сборки

Учитывая указанную выше особенность аккумуляторов LiFePo<sub>4</sub> необходимо предусмотреть подогрев всей сборки аккумуляторов во время её заряда при отрицательной температуре окружающей среды. Это можно осуществить при помощи обыкновенного нагревательного элемента сопротивления, установленного внутри сборки, и подключаемого напрямую к выходу питания солнечных панелей, в момент начала солнечной генерации при отрицательной температуре аккумуляторов (аккумуляторы заряжать нельзя). После достижения нулевой температуры вся энергия снова направляется по стандартному пути для накопления её в отогретых аккумуляторах. На этой стадии температура аккумуляторов поддерживается положительной благодаря электро-химическим процессам, происходящим внутри накопителей.

С другой стороны такое решение может оказаться избыточным, поскольку повреждение LiFePo<sub>4</sub> аккумулятора во время его заряда при отрицательной температуре подтверждено при токах заряда от 0,5С и выше (С=200А). В нашем случае, заряд в холодное время года будет происходить током много меньше 0,1С. Существует гипотеза, что эта ситуация не приведёт к повреждениям внутренней структуры аккумулятора, но гипотеза требует проверки, в том числе опытным путём.

Малые искусственные спутники, нормально функционирующие на околоземной орбите Земли в условиях циклического, резкого изменения температуры при прохождении теневого и солнечного отрезка орбиты, применяют в своём составе подобные литий-ионные аккумуляторы. Системы термостатирования аккумуляторов в них, как правило, не применяются.

Вопрос выходит за рамки данного исследования и требует дальнейших разъяснений, проработки и практических экспериментов.

### 3.2.5 Компоновка

Собрав воедино все блоки и модули, мы получим конкурентное изделие, по многим показателям превосходящее фотоэлектрическую установку Towersun, взятую за прообраз. Все элементы уместятся в аналогичный объём с габаритами 840x240x240 мм. Модули послойно и компактно размещаются внутри оболочки, созданной солнечными панелями, размещёнными по периметру «башни», заполняя практически весь полезный объём внутри.

Основные характеристики сведены в сравнительную таблицу:

Таблица 17 – Основные характеристики LT–LYP200

Характеристика	Towersun	Проектируемое изделие
Мощность установленных фотоэлементов	144 Вт.	144 Вт.
Ёмкость, тип накопителя	12В 27А*ч (SLA AGM)	12,8В 200 А*ч (LiFePo4)
Срок службы	10-12 лет Аккумулятор до 5 лет	До 20 лет
Стоимость	более 200 000 руб	До 95 000 руб

### 3.3 Выводы по третьей главе

Поставив цель проектирования ФЭ энергоустановки на отечественной элементной базе мы сознательно ограничиваем себе выбор. Несмотря на несомненные достижения в использовании солнечной энергии в космической технике, гражданский сектор производства полупроводниковых фотоэлементов развит достаточно слабо.

В ходе исследования были рассмотрен мировой опыт и приняты к реализации основные решения в области проектирования всенаправленных кубических конструкций. Создана основа для создания прототипа установки и последующей его отладки и испытаний.

Выбрана схема соединения фотоэлементов, способная максимально эффективно преобразовывать солнечную энергию в ситуации разной величины освещённости и низкой освещённости при работе в пасмурную, облачную погоду.

К сожалению, устройства класса солнечные «оптимизаторы» не выпускаются на территории России. При наличии их применение в вертикальной всенаправленной фотоэлектрической установке будет в приоритете.

Применены отечественные компоненты, выбор которых может быть целесообразен для малогабаритных фотоэлектрических установок. Также выявлены проблемные места, изучение которых необходимо продолжать дальше, а именно это необходимость и само устройства термостатирования для аккумуляторной сборки из литий-железофосфатных элементов в климатических условиях средней полосы РФ.

В итоге получены высокие теоретические характеристики, во многом превышающие показатели эталонного изделия. Одно из главных преимуществ – увеличение предположительного срока службы без необходимости дополнительного обслуживания фотоэлектрической установки и снижение общей стоимости, что уменьшает срок окупаемости и увеличивает

рентабельность применения автономной фотоэлектрической установки в современных условиях, далёких от достижения сетевого паритета.

## Заключение

Мировая конъюнктура и общественное сознание, сложившиеся в последние годы относительно использования возобновляемых источников энергии, оказывает ощутимое давление на все экономики мира. С появлением амбициозных технологических проектов, увеличением доли промышленного производства оборудования, энергия солнца и ветра становится всё более доступной. Многие экономически развитые территории в силу своего географического положения и/или путём общественного договора уже достигли условий сетевого паритета, когда стоимость альтернативной энергии меньше или равна стоимости энергии, полученной традиционным путём. В России в силу геоклиматических и ментальных особенностей это явление будет иметь отложенный характер, но в условиях всеобщей глобализации влияния общемировых трендов, вероятно, избежать не получится. Чтобы не оказаться в числе отставших стран, необходимо своевременно анализировать накопленный опыт и применять его в соответствии с существующими реалиями.

В географических широтах средней полосы РФ поток солнечной энергии сильно непостоянен в течение года. Если в летние месяцы перпендикулярный поверхности Земли поток солнечного излучения может достигать мощности 1000-1200 Вт/м<sup>2</sup>, то в ноябре-декабре, вследствие наклона оси вращения нашей планеты к плоскости земной орбиты, этот поток уменьшается, рассеивается, проходя больший путь в атмосфере, продолжительность светового дня сокращается, а количество ясных, солнечных дней становится меньше. В результате зимой на одной и той же площади поверхности Земли мы можем получать в среднем в 5-6 раз меньше солнечной энергии, нежели летом, в месячном выражении.

Исходя из вышесказанного, для наибольшей выработки энергии необходимо сезонное изменение угла установки фотоэлектрических панелей. Как правило, оптимальный угол в средней полосе РФ летом равен значению

географической широты местности, уменьшенному на 10-15 градусов, а зимой наоборот, увеличенному на 10-15 градусов.

Одной из главных особенностей климата, мешающих круглогодичной работе и развитию солнечной энергетики в наших широтах, является устойчивый снежный покров и низкие температуры в зимние месяцы. Выпавший снег приводит к необходимости очистки и дополнительного обслуживания энергетических установок, а низкая температура, в свою очередь, ограничивает типы или ухудшает характеристики используемых накопителей электрической энергии там, где они применены. С другой стороны, вследствие высокого значения коэффициента отражения снега (альбедо), достигающего до 85%, возрастает сила отражённого, рассеянного света, которая увеличит отдаваемый фотоэлементами ток.

Если мы имеем дело с фотоэлектрическими установками большой мощности ( $>1\text{МВт}$ ), эксплуатационные затраты более эффективны, их доля равномерно распределяется на всю сгенерированную мощность, не оказывая чрезмерного влияния на стоимость получаемой энергии. В то же время высокая стоимость компонентов и низкая стоимость традиционных энергоносителей увеличивает сроки окупаемости фотоэлектрических систем малой ( $<100\text{кВт}$ ) и сверхмалой ( $<1\text{кВт}$ ) мощности, что, в свою очередь, требует многократного повышения их надёжности и уровня автономности, снижения эксплуатационных затрат и исключения влияния человеческого фактора.

Одним из решений может стать несколько иное расположение солнечных панелей. Установка панелей не под оптимальным углом, обеспечивающим годовой максимум выработки, относительно положения солнца над горизонтом, а вертикально, или близко к плоскости перпендикулярной поверхности земли. Такое размещение обеспечит меньшее оседание пыли и осадков в виде снега, а также достаточный поток солнечной энергии в зимнее время за счёт высокого альбедо поверхности земли и, соответственно, более высокого уровня отражённого и рассеянного света, поступающего на панели.

Из практики, солнечная панель с КПД преобразования 17% под «оптимальным» углом, после перевода её в вертикальное положение с сохранением ориентира на Юг имеет КПД преобразования в 14%, таким образом теряя лишь пятую часть энергии в условиях календарного лета. В то же время при моделировании в программной среде PvSyst вертикальной фотоэлектрической панели в зимнее время мы получим максимально возможный приход энергии в купе со способностью к самоочищению её поверхности от осадков. Вертикальное расположение уже сейчас считается одним из самых распространённых способов установки панелей в автономных фотоэлектрических установках электропитания малоэтажных домов круглогодичного проживания на территории России.

В случае автономных энергоустановок сверхмалой мощности актуальным становится построение пространственных 3D конструкций из фотоэлементов [11], принимающих солнечный свет и его отражения с разных, местами непривычных ракурсов. Вариантом пространственной конструкции является установка с несколькими вертикально расположенными, статичными фотоэлектрическими элементами, направленными не только на южную, но и на остальные стороны света, накапливающие в том числе энергию рассеянного и отражённого света в зимнее время. Размещение модулей перпендикулярно земле препятствует отложению на них снега зимой и не требует дополнительного обслуживания и очистки. Это компоновочное решение позволяет использовать модули в качестве оболочки конструкции, даёт возможность разместить внутри накопителя энергии и схемы управления, что снижает общую материалоёмкость.

Главное правило прибыльной солнечной энергетики говорит о том, что потреблять её энергию необходимо непосредственно в момент генерации. С этой целью используют не локальные накопители, а подключение к энергосистеме, которая выступает в качестве так называемого «бесконечного» накопителя. Обусловлено это длительным сроком службы и стоимостью полупроводниковых фотоэлементов, которая снижается намного быстрее

стоимости электрохимических накопителей энергии - аккумуляторов. В этой ситуации именно генерация должна управлять потреблением, а не наоборот. Для достижения этого необходимо во многом менять привычные процессы, управлять потреблением в реальном времени. Многие контроллеры уже имеют функцию управления нагрузкой, позволяющей экономить ресурс дорогостоящих накопителей. На этапе проектирования, когда нужно сделать выбор между увеличением ёмкости накопителя или мощности фотоэлементов, следует делать выбор в пользу фотоэлементов, что продиктовано теми же экономическими соображениями. В случае полностью автономных систем моментальная утилизация генерируемой энергии нагрузкой не всегда возможна. Самыми эффективными коммерческими накопителями в настоящее время являются литий-ионные аккумуляторы и их видовые разновидности. Они обеспечивают длительный срок службы, отсутствие «эффекта памяти», высокий КПД и минимальную стоимость цикла заряда-разряда, при всём при этом требуя более совершенной электроники управления зарядом и высоких первоначальных затрат. Соединение фотоэлектрических панелей следует осуществлять на максимально-возможное напряжение открытого контура, что позволит снизить омические потери, а также успешно накапливать энергию в пасмурную, облачную погоду.

Малые сроки проектирования и строительства стали залогом бурного роста полупроводниковой солнечной энергетики по всему миру. Преодоление ограничений, накладываемых особенностями местоположения густонаселённых территорий средней части РФ, займёт определённое время, но надо понимать, что развитие во многом зависит не от климатических условий, а от уровня образованности и заинтересованности общественного мнения в возобновляемой, «зелёной» энергетике, в поддержке принципов устойчивого развития. В современной экономической обстановке нет другого выхода, как максимально использовать отечественную элементную базу в построении фотоэлектрических систем, что в итоге приведёт к ужесточению местной конкуренции, так недостающей сегодня. В конечном счёте, все эти



обстоятельства обеспечат рост локальной солнечной генерации, без развития которой невозможно полноценное участие России в мире будущего.

## Список использованных источников

1. ГОСТ Р 51594-2000 Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 51597-2000 Нетрадиционная энергетика. Модули солнечные фотоэлектрические. Типы и основные параметры
3. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.
4. СП 52.13330.2011 Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
5. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года (Постановление Правительства Российской Федерации от 28.08.2003 г. №1234р).
6. Алфёров, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики. – Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, вып.8.
7. Айзенберг, Ю.Б. Справочная книга по светотехнике. М. : Энергоатомиздат, 2006. 972 с.
8. Виссарионов, В.И. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: Учебное пособие для вузов / Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.; Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - с.
9. Лукутин, Б.В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография - М.: Энергоатомиздат, 2008. - 231 с.
10. Куликова, Л.В. Основы использования возобновляемых источников энергии. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008]. –: [http://ecoclub.nsu.ru/altenergy/common/common2\\_1\\_1.shtm](http://ecoclub.nsu.ru/altenergy/common/common2_1_1.shtm).
11. Bernardi, M. Solar Energy Generation in Three Dimensions: [Электронный ресурс] Marco Bernardi, Nicola Ferralis, Jin H. Wan, Rachelle Villalon, Jeffrey C. Grossman; - <http://arxiv.org/abs/1112.3266> (дата обращения: 10.02.2014).
12. Крюченко, Ю.В. “Моделирование натуральных характеристик вертикальных тандемных солнечных элементов a-Si:H/ $\mu$ c-Si :H. 2. Анализ

результатов и сравнение с экспериментом”/ Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев, Е.И. Теруков, А.С. Абрамов, В.Н. Вербицкий, С.А. Кудряшов, К.В. Емцев, И.О. Соколовский, ФТП, 49, 707(2014).

13. Крюченко, Ю.В. Моделирование изменения характеристик солнечных элементов на основе a-Si:H в течение светового дня / Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев, И.О. Соколовский, Е.И. Теруков.. Журнал технической физики, 2013

14. Бобыль, А.В. Техничко-экономические аспекты сетевой солнечной энергетики в России. / А.В. Бобыль, С.В.Киселева, В.Д. Кочаков, Д.Л. Орехов, А.Б. Тарасенко, Е.Е. Терукова, Журнал технической физики , 2014,т.84.вып.4-с.85-92.

15. Крюченко, Ю.В. “Годовые зависимости мощности и энергии, генерируемых единицей площади солнечного элемента на основе a-Si:H (расчет)”/ Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев, И.О. Соколовский, Е.И. Теруков, В.Н. Вербицкий, Ю.А. Николаев.. Журнал технической физики, 2013

16. Antonio, L. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. /Antonio Luque. N. Y.: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 2013. p. 205 – 700.

17. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных элементов: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 2013.

18. Werner, J.H. Perspectives of Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells // Technical Digest of 13th Sunshine Workshop on Thin Film Solar Cells, NEDO, Tokyo, 2010. P. 41.

19. Saito, K. Outdoor performance of triple stacked a-Si photovoltaic module in various geographical locations and climates / K. Saito, M. Sano, K. Matzuda, et al. // Techn. Digest, 11th Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf, Tanaka Printing, Kyoto, 2009. P. 229.

20. Kolodziej A.Staebler–Wronski effect in amorphous silicon and its alloys // Opto-Electron. Rev., 12, no. 1, 2014.

21. Беляев, Ю.К. Надёжность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырёв, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Инфра-М, 2012. – 608 с.
22. Воронков, Э.Н. Учебное пособие по курсу "Полупроводниковые и микроэлектронные приборы": Надежность полупроводниковых приборов и микросхем /, Моск. энерг. ин-т (МЭИ); Ред. К. В. Шалимова . – 2006 . – 47 с.
23. Формат малых (сверхмалых) искусственных спутников Земли CubeSat: [Электронный ресурс]. - <http://www.cubesat.org/> (дата обращения: 15.01.2016).
24. Тольятти - Википедия[Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Тольятти>
25. Уличные светильники Sun Shines [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sun-shines.ru/product/street-light>
26. Осветительные установки Опти-Лайт [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://optilight.ru/fonari/osvetitelnaya-ustanovka-na-solnechnich-batareyach>
27. Световые Колонны Touche [Электронный ресурс] – Режим доступа:<http://www.priess.dk/en-GB/Priess-2010/Environmental-Lighting-Columns/Touch%C3%A9.aspx>
28. Фотоэлектрические установки EPS-Soltec [Электронный ресурс] – Режим доступа:<http://www.eps-soltec.com/en/produkte/strasen-wege-und-platzbeleuchtung/>
29. Национальная лаборатория возобновляемой энергетики США [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.nrel.gov/>
30. Система имитационного моделирования фотоэлектрических установок PvSyst [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pvsyst.com/en/>
31. Производственная компания Телеком-СТВ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.telstv.ru/>

32. Группа компаний Хевел [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.hevelsolar.com/>
33. Компания Лиотех [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.liotech.ru/>
34. Производственная компания МикроАрт [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.microart.ru/>
35. Информационный портал о мировом климате [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.climatedata.info/>
36. Компания Solaredge [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.solaredge.com/>
37. Информационный портал об аккумуляторных источниках энергии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://batteryuniversity.com/>