

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

Институт химии и энергетики

(наименование института)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Техническое и информационное обеспечение интеллектуальных систем электроснабжения

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Повышение эффективности преобразования электрической энергии солнечных батарей

Обучающийся

С.В. Безладнов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

д.т.н., профессор, П.А. Николаев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....                                | 3  |
| 1 Общие сведения об электростанциях.....     | 5  |
| 2 Конструкции солнечных батарей .....        | 29 |
| 2.1 Солнечные батареи малой мощности .....   | 30 |
| 2.2 Солнечные батареи средней мощности ..... | 34 |
| 2.3 Солнечные батареи высокой мощности ..... | 43 |
| 3 Модернизация солнечных батарей.....        | 49 |
| 3.1 Первый способ модернизации .....         | 49 |
| 3.2 Второй способ модернизации .....         | 59 |
| Заключение .....                             | 68 |
| Список используемых источников.....          | 70 |

## Введение

Что такое электроэнергетика в России? Ответ на данный вопрос находится в федеральном законе российской федерации об электроэнергетике, которой гласит, что «электроэнергетика - отрасль экономики Российской Федерации, включающая в себя комплекс экономических отношений, возникающих в процессе производства (в том числе производства в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии), передачи электрической энергии, оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике, сбыта и потребления электрической энергии с использованием производственных и иных имущественных объектов (в том числе входящих в Единую энергетическую систему России), принадлежащих на праве собственности или на ином предусмотренном федеральными законами основании субъектам электроэнергетики или иным лицам. Электроэнергетика является основой функционирования экономики и жизнеобеспечения» [7].

Что такое электроснабжение? Раздел энергетика и электрификация межгосударственный стандарта ГОСТ 19431-84 гласит, что «энергоснабжение (электроснабжение) – обеспечение потребителей энергией (электрической энергией)» [3].

Выпускная квалификационная работа будет связана с разбором известных преобразований солнечной энергии в электрическую. При изучении материала по солнечным батареям на иностранных языках были обнаружены несколько вариантов повышения коэффициента полезного действия ячеек солнечных батарей, а именно:

- разработка органических солнечных элементов на основе «Beta vulgars» [26];
- разработка нового типа солнечных ячеек для космической промышленности на основе Ga (галлий), In (индий), P (фосфор) и As (мышьяк) в различных комбинациях [30];

- увеличение охвата солнечного спектра с целью повышения коэффициента полезного действия солнечных ячеек [27];
- применение трехмерной (3D) печати для изготовления солнечных батарей [25].

После изучения данных статей был сделан вывод, что большинство исследований направлено на изменение структуры солнечных батарей, но не усовершенствование уже имеющихся солнечных батарей путем внедрения недорогостоящего оборудования.

Целью данной работы является разработка методов по повышению эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. Для достижения данной цели необходимо решить задачи:

- обеспечение поворота солнечных панелей строго за солнцем с максимальной выработкой электроэнергии;
- влияние температуры солнечной панели на выработку электроэнергии;
- предложить способы реализации поставленной цели.

## 1 Общие сведения об электростанциях

На данный момент в мире подавляющее большинство электроэнергии вырабатывается при помощи сжигания природных ископаемых, такие природный газ, уголь, нефть. При сжигании топлива, вырабатывается большое количество энергии в виде тепла. Данная энергия передается воде, в следствии чего происходит нагрев воды до высоких температур. Под воздействием высоких температур, вода превращается в высокотемпературный пар, порядка 600 градусов цельсия. Данный пар поступает на лопатки паровой турбины, в следствии чего происходит вращение крыльчатки, что приводит в движение ротор генератора [21], который соединен с паровой турбиной валом. Подобные электростанции называют тепловыми.

В России за период с 2020 по 2021 года, доля электроэнергии, выработанной теплоэлектростанциями, составила 60,7%, а конкретно «ТЭС – 676 908,0 млн кВт·ч (увеличение производства на 9,1%)» [6] от всей выработанной электроэнергии.

На втором месте следуют атомные электростанции. Принцип работы практически не отличается от теплоэлектростанций, поскольку выработка электроэнергии производится также, а именно передача энергии тепла воде. Различие лишь в том, что в теплоэлектростанциях используется энергия от сгорания природных ископаемых, а в атомных электростанциях от энергии распада радиоактивных веществ [22].

В России за период с 2020 по 2021 года, доля электроэнергии, выработанной атомными электростанциями, составила 19,9%, а конкретно «АЭС – 222 244,8 млн кВт·ч (увеличение производства на 3,0%)» [6] от всей выработанной электроэнергии.

На третьем месте находятся гидроэлектростанции. Принцип выработки электроэнергии немного отличается от предыдущих разобранных типов. На гидроэлектростанциях вода, попадая на лопасти турбины, приводит в движение ротор генератора, что вырабатывает электроэнергию. Для того,

чтобы вода создавала достаточное усилие на лопастях турбины, необходимо создать искусственно перепад высот, обычно для этих целей сооружают плотины или плотины.

В России за период с 2020 по 2021 года, доля электроэнергии, выработанной гидроэлектростанциями, составила 18,8%, а конкретно «ГЭС – 209 519,8 млн кВт·ч (увеличение производства на 1%)» [6] от всей выработанной электроэнергии.

На четвертом месте находится ветроэлектростанции. Принцип выработки электроэнергии на ветроэлектростанциях практически идентичен принципу выработки электроэнергии на гидроэлектростанциях, с одной лишь разницей в том, что выработка электроэнергии идет за счет преобразования энергии движения воздушных масс. Движение воздушных масс создает усилие на лопастях ветрогенератора, заставляя вращаться ротор генератора, точно также как и вода на гидроэлектростанции. Необходимо отметить также и то, что установка ветрогенераторов возможна только в тех местах, где имеется достаточно большое значение скорости ветра, в противном случае, данная ветроустановка будет простаивать без движения и создавать лишь убытки, поскольку данное устройство имеет достаточно большую стоимость и срок окупаемости. Также, главными минусами ветроустановок является еще и то, что во время их работы, создается некоторый шум, что негативно влияет на состояние здоровья человека, а также лопасти данных установок невозможно переработать, поскольку переработка нерентабельна, и их просто закапывают в огромных количествах в землю.

В России за период с 2020 по 2021 года, доля электроэнергии, выработанной ветроэлектростанциями, составила 0,33%, а конкретно «ВЭС – 3 621,7 млн кВт·ч (увеличение производства на 161,7%)» [6] от всей выработанной электроэнергии.

Последнее, пятое, место занимает солнечные электростанции. Как следует из названия, солнечные электростанции вырабатывают электроэнергию за счет преобразования энергии солнечных лучей в

электричество при помощи фотоэлектрических элементов. Также солнечную энергию в солнечных электростанциях могут использовать для нагрева резервуара с водой, расположенного на высоте от 18 до 24 метров

В России за период с 2020 по 2021 года, доля электроэнергии, выработанной солнечными электростанциями, составила 0,2%, а конкретно «СЭС – 2 253,8 млн кВт·ч (увеличение производства на 13,7%)» [6] от всей выработанной электроэнергии.

Для удобства восприятия числовых данных сведем все в таблицу 1.

«Таблица 1 – Баланс электроэнергии в ЕЭС с 2018 по 2021 года, млн кВт·ч

| Показатель  | 2018        | 2019        | 2020        | 2021        |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Выработка электроэнергии, всего                           | 1 070 922,4 | 1 080 555,4 | 1 047 031,5 | 1 114 548,0 |
| В т.ч.: ТЭС   | 681 829,5   | 679 881,0   | 620 566,8   | 676 908,0   |
| ГЭС   | 183 759,8   | 190 295,4   | 207 416,3   | 209 519,8   |
| АЭС   | 204 356,9   | 208 773,3   | 215 682,1   | 222 244,8   |
| ВЭС   | 217,8       | 320,8       | 1 384,1     | 3 621,7     |
| СЭС   | 758,4       | 1 284,9     | 1 982,3     | 2 253,8     |
| Потребление электроэнергии                                | 1 055 559,0 | 1 059 361,6 | 1 033 720,8 | 1 090 437,0 |
| Сальдо перетоков электроэнергии «+» – прием, «-» – выдача | -15 363,4   | -21 193,8   | -13 311,5   | -24,1       |

Информация взята с сайта министерства энергетики РФ за период с 2018 по 2021 года» [6].

Как было сказано ранее, солнечные электростанции для выработки электроэнергии используют энергию солнечных лучей. На данный момент существует несколько разновидностей типов солнечных электростанций. Рассмотрим некоторые из них ниже.

Солнечная электростанция башенного типа представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Солнечная электростанция башенного типа

Принцип работы данной электростанции достаточно прост. В центре электростанции находится башня, на вершине которой расположена емкость черного цвета, для наибольшего поглощения солнечной энергии, с водой, а вокруг расположено множество зеркал, что отражают солнечные лучи строго на резервуар. При поглощении энергии лучей, вода в резервуаре разогревается до высоких температур, которая превращается в пар под высоким давлением, что в свою очередь вращает паровую турбину. В следствии вращения турбины происходит выработка электроэнергии.

Солнечная электростанция тарельчатого типа представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Солнечная электростанция тарельчатого типа

Данная электростанция работает по схожему принципу, что и электростанция башенного типа. Различие данных электростанций заключается лишь в том, что в электростанции тарельчатого типа имеет на каждой установке приемник с рабочим телом, при испарении которого происходит вращение паровой турбины и выработка электроэнергии.

Солнечная электростанция на фотоэлектрических элементах. Данная электростанция представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Солнечная электростанция на фотоэлектрических элементах

Солнечная электростанция на фотоэлектрических элементах работает по принципу прямого преобразования энергии солнечного света в электрическую по средством физико-химических процессов.

Существует еще несколько типов солнечных электростанций, но большая их часть использует энергию света в качестве нагревателя. Однако, в данной выпускной квалификационной работе, мы остановимся на солнечной электростанции основанной на фотоэлектрических элементах

Электростанция на фотоэлектрических элементах является новейшей среди всех остальных электростанций. Первая солнечная электростанция на базе фотоэлектрических элементов была реализована компанией ARCO Solar в 1982 году мощностью 1 ГВт.

Разберем более подробно строение солнечной электростанции.

Данная электростанция состоит из:

- солнечных панелей,
- аккумуляторных батарей,
- инвертора.

Первое что мы видим при взгляде на такую электростанцию – это солнечные панели. На данный момент около 85% солнечных панелей изготавливаются из кремния. Обусловлено это тем, что разработка и обкатка данного материала являлась перспективным вложением средств, поскольку это давало дополнительные возможности в развитии микроэлектроники.

Рассмотрим атом кремния. В атоме кремния имеются 14 электронов, которые заполняют 3 энергетические орбиты атома. Электроны в атоме кремния распределены таким образом, что на первой орбите находится 2 электрона, на второй – 8 электронов и на третьей – 4 электрона. Из-за того, что электронов на внешнем слое атома кремния половина, то атом кремния «пытается» восполнить их за счет электронов других атомов кремния, в связи с чем образуется прочная кристаллическая решетка. Поскольку сам по себе чистый кремний является достаточно плохим проводником, то было решено добавлять в кремний атомы иных элементов. Наиболее подходящим элементом был обнаружен атом фосфора. Фосфор был выбран с тем условием, что на его внешней орбите находится 5 электронов. Как итог, третий энергетический слой атома кремния был заполнен полностью, а также еще оставался 1 свободный электрон. При попадании света, данные электроны получают достаточно энергии для высвобождения. Высвободившиеся электроны в большей степени становятся носителями свободного заряда. Данный полупроводник называется n-тип. Также в кремний добавляют бор. Бор на своей внешней орбите имеет 3 электрона, что недостаточно для полного заполнения внешней орбиты кремния, в следствии чего образуется положительно заряженное место, именуемое «дырка», которую стремится заполнить отрицательно заряженный электрон. Данный тип полупроводника

называется р-тип. На рисунках 4 и 5 изображены атомы кремния, фосфора и бора, соответственно.

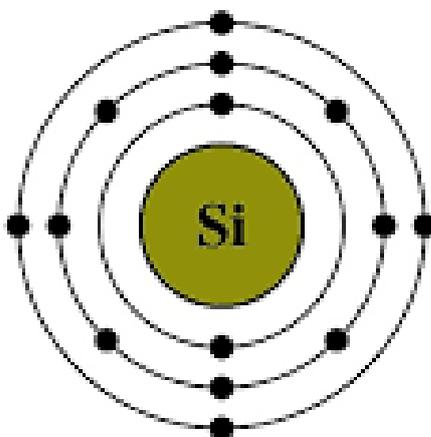


Рисунок 4 – Атом кремния

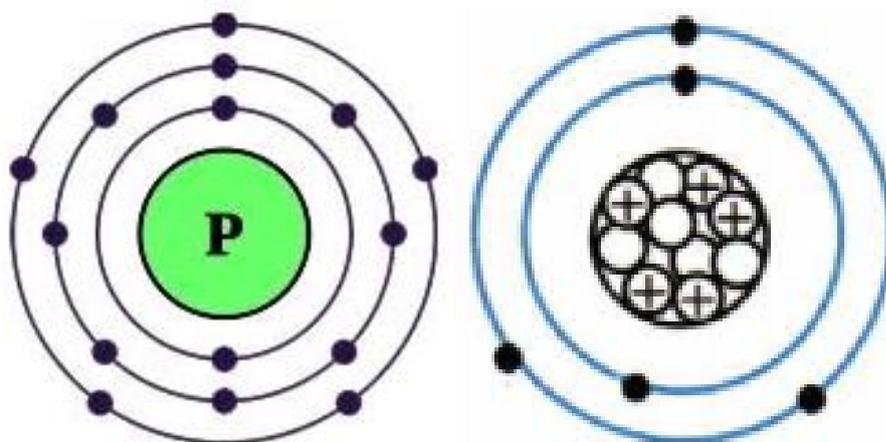


Рисунок 5 – Атомы фосфора и бора

При соединении полупроводников р-типа и n-типа получается полупроводник р-n-типа. При попадании света на полупроводник р-n-типа поступает достаточное количество энергии на высвобождении одного электрона, следовательно и на образовании одной дырки. В месте соединения р-n-типа накапливаются заряды разных знаков и с увеличением количества этих зарядов, если приложить внешнее электрическое поле, равновесие

нарушится и свободные электроны начнут заполнять свободные дырки, что есть электрический ток. Единственным минусом кремниевого полупроводника заключается в том, что кремний имеет достаточно высокий коэффициент отражения, в следствии чего, часть света будет просто отражаться. Для решения этой проблемы, фотоэлектрические поверхности покрывают специальным составом, что снижает коэффициент отражения. Также стоит отметить, что для защиты от влаги и внешнего мусора фотоэлектрические элементы дополнительно покрывают защитным стеклом. По разным данным коэффициент полезного действия данных панелей составляет от 12 до 18%, редко до 30-40%. Связано это с тем, что в основном используются две технологии по созданию солнечных батарей. В одной используется монокристаллический кремний, а в другой мультикристаллический кремний. Разница в производстве выражается в денежном эквиваленте. Стоит отметить, что у монокристаллического кремния коэффициент полезного действия выше и равняется примерно 22-26%.

Солнечная электростанция на основе фотоэлектрических элементов, как было сказано выше, была реализована в 1982 году. Фотоэлектрические элементы данной электростанции были сделаны на основе кремния, поскольку в то время активно происходила компьютеризация, технология которой пересекалась с солнечной энергетикой и странам производителям было выгодно вкладывать средства в данную отрасль.

При изучении иностранных источников были обнаружены несколько статей, которые предлагали изменить подход к изготовлению фотоэлектрических элементов.

В статье «Synthesis and performance evaluation of Beta vulgaris based dye-sensitized organic solar cell» [26], представлен новый состав для фотоэлектрического элемента, который представлен на рисунке 6.

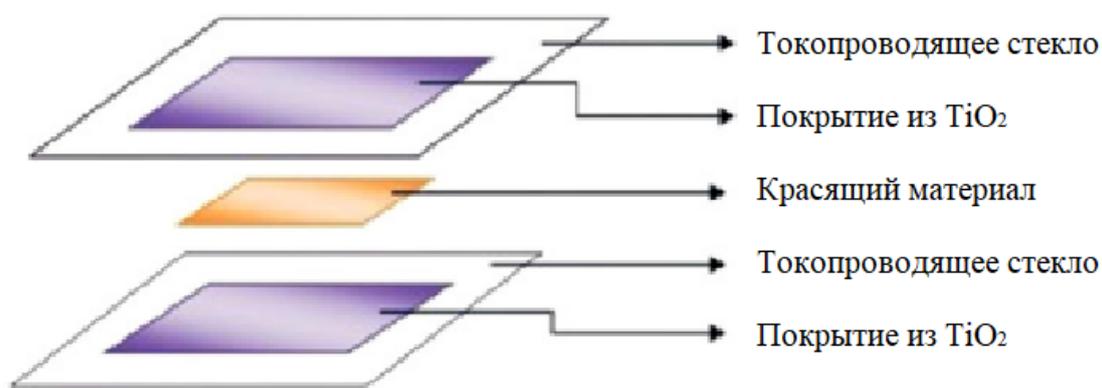


Рисунок 6 – Новый состав фотоэлектрического элемента

В таблице 2 представлены материалы для создания данного фотоэлектрического элемента.

Таблица 2 – Материалы представленного фотоэлемента

| Компонент                   | Состав                             | Количество       |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------|
| Фото анод                   | Токопроводящее стекло              | 4 (2,5 x 2,5 см) |
|                             | $TiO_2$ , порошок                  | 500 г            |
|                             | Краситель для пропитки             | 100 мл           |
| Электролит                  | Трийодид пара                      | 125 мл           |
| Катод                       | Прозрачный токопроводящий электрод | 4                |
|                             | Этанол                             | 500 мл           |
|                             | Уксусная кислота                   | 500 мл           |
|                             | Графит                             | По необходимости |
| Сенсибилизаторы             | Свекольный краситель               | 100 мл           |
| Дополнительное оборудование | Термометр                          | 1                |
|                             | Мультиметр                         | 1                |
|                             | Зажимы для проводов                | 2                |
|                             | Альбедометр                        | 1                |
|                             | Пирометр                           | 1                |

Как видно из рисунка 6 и таблицы 2 в составе действительно присутствуют органические вещества вместо привычного кремния.

После изготовления фотоэлектрического элемента по экспериментальной технологии были проведены опыты. На рисунке 7

изображен график изменения солнечного излучения в течении дня по часам, а также изменение температуры воздуха.

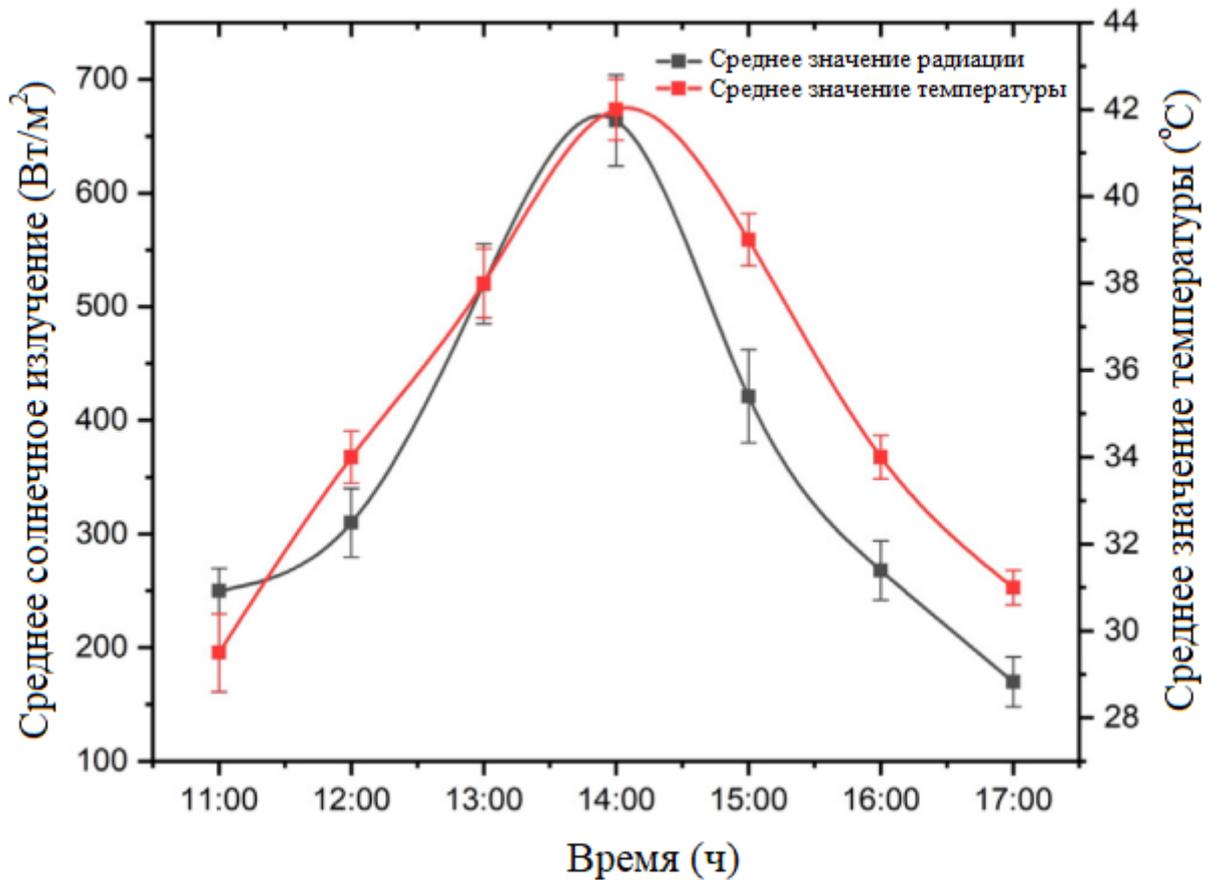


Рисунок 7 – Изменение солнечного излучения и температуры в течении дня

На рисунке 8 показано изменение напряжения и силы тока вырабатываемых экспериментальным образцом в течении дня.

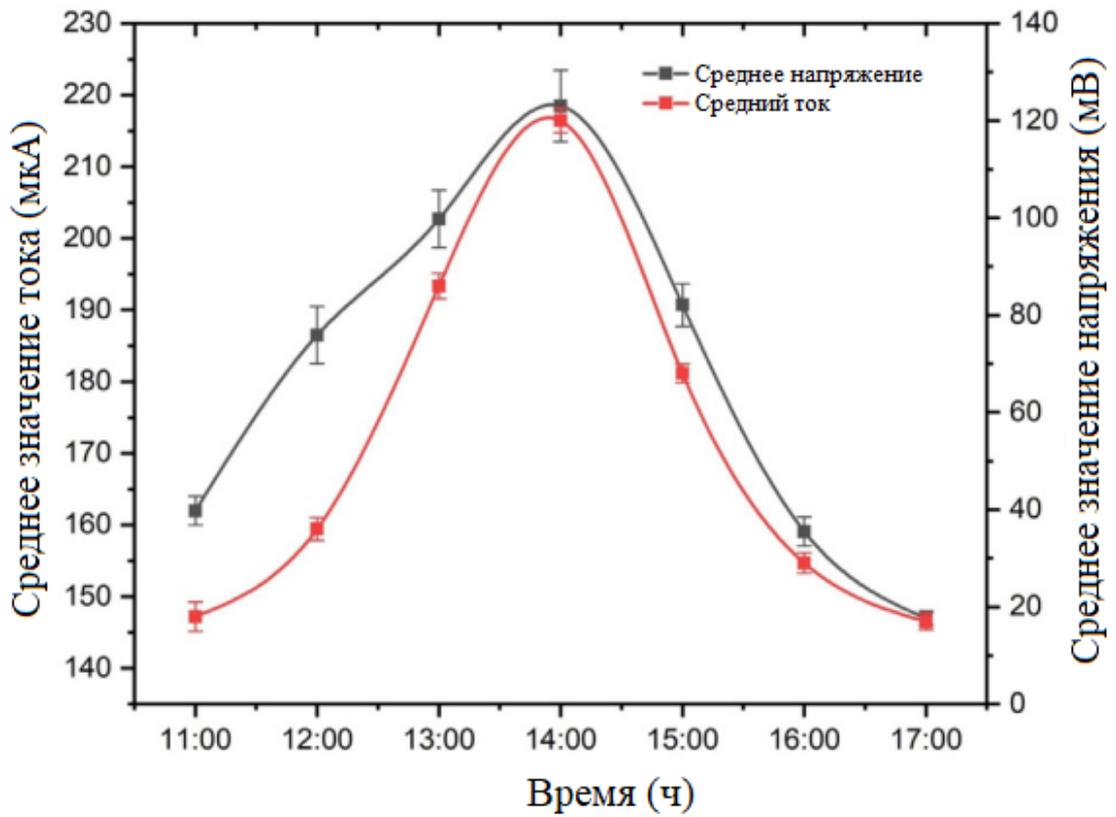


Рисунок 8 – Изменение напряжения и силы тока на образце

На рисунке 9 изображен график вырабатываемой мощности при помощи экспериментального образца.

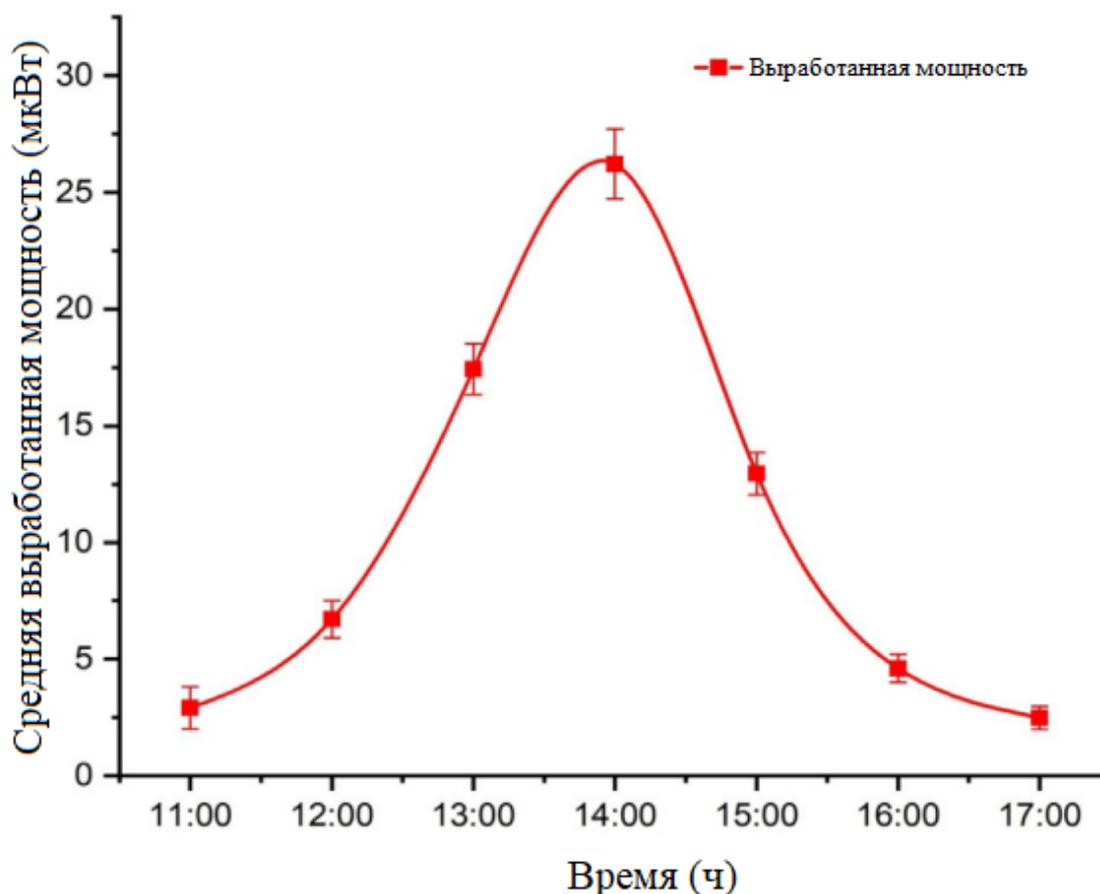


Рисунок 9 – Вырабатываемая мощность в течении дня

Как видно из графиков, значение силы тока, напряжения и вырабатываемой мощности на данный момент небольшое, поскольку данная технология является довольно новой. Стоимость данного типа солнечного фотоэлемента сведено в таблицу 3.

Таблица 3 – Стоимость изготовления органической солнечной батареи

| Материалы и компоненты                  | Цена (рупий) |
|---|--------------|
| Полупроводник ( $TiO_2$ )               | 40           |
| Субстрат (ITO)                          | 500          |
| Электролит (Трийодид пара)              | 40           |
| Сенсибилизатор (краситель Beta vulgars) | 10           |
| Нагревательная плита                    | 1200         |
| Мультиметр                              | 400          |
| Суммарная стоимость                     | 2190         |

В статье заявляется, что при благоприятном исходе срок окупаемости может составить практически 1,5 года.

В статье говорится, что к практическим применениям данного исследования можно отнести:

- органический солнечный элемент на основе Beta vulgaris, сенсibilизированный красителем, является новым и инновационным для выработки электроэнергии и лучше кремниевого неорганического солнечного элемента, поскольку кремниевые солнечные элементы обладают приличной эффективностью, но их отходы не поддаются разложению, т.е. они остаются в металлической форме и вызывают загрязнение почвы (при сбросе), загрязнение воздуха (при сжигании), загрязнение воды (при сбросе в какой-либо поток);
- это экологичный и чистый источник энергии, и потребители могут использовать его вместо традиционных источников энергии;
- эти солнечные элементы легкие, гибкие, термостойкие и имеют низкую себестоимость производства.

В статье по разработке гибких фотоэлектрических элементов для космической промышленности [26]. На рисунке 10 показаны влияния внешних квантовых эффектов от длины электромагнитной волны.

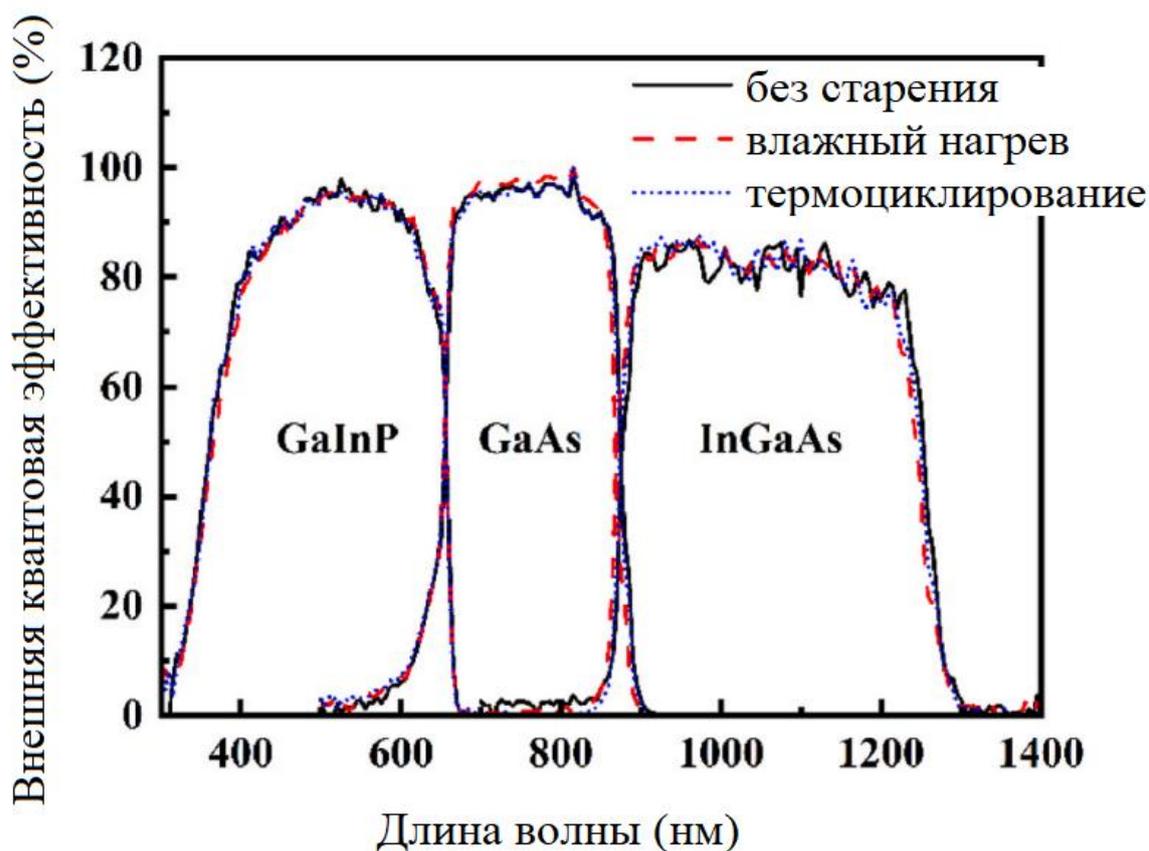


Рисунок 10 – Кривые внешней квантовой эффективности гибких солнечных элементов GaInP/GaAs/InGaAs без старения и после испытаний на влажное нагревание и термоциклирование.

Точные значения были сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Плотность тока короткого замыкания каждого элемента

| Солнечные элементы | $I_{SC-GaInP}$ (мА/см <sup>2</sup> ) | $I_{SC-GaAs}$ (мА/см <sup>2</sup> ) | $I_{SC-InGaAs}$ (мА/см <sup>2</sup> ) |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Без старения       | 14,92                                | 15,11                               | 13,98                                 |
| Влажное нагревание | 15,01                                | 15,29                               | 13,96                                 |
| Термоциклирование  | 15,01                                | 15,16                               | 13,85                                 |

Итоговыми результатами данной статьи стали такие заключения:

- производительность тонкопленочных солнечных элементов практически не снизилась после испытаний, которые показали, что

устройства обладают влагостойкостью и долговечностью при термических нагрузках;

- результаты теста внешней квантовой эффективности также показали, что испытания на старение не оказали существенного влияния на оптоэлектронные характеристики солнечных элементов
- в эксперименте существенное увеличение коэффициента идеальности, связанное с механизмом рекомбинации, продемонстрировало введение большего количества центров рекомбинации во время испытаний на старение, что привело к небольшому снижению показанию  $U_{ох}$ .

«Результаты экспериментов доказали, что неинкапсулированные гибкие солнечные элементы обладают способностью противостоят суровым условиям окружающей среды, а простой технологический процесс изготовления гибких солнечных элементов отличается исключительной надежностью. В ближайшем будущем стабильность инкапсулированного гибкого солнечного элемента может быть дополнительно изучена, чтобы проверить влияние процесса инкапсулирования на солнечные элементы в тех же суровых условиях» [26].

Поговорим о том, что запасаает выработанную электроэнергию солнечных панелей, а именно аккумуляторные батареи.

Аккумуляторные батареи можно разделить на три основных вида:

- свинцово-кислотные,
- щелочные,
- литий-ионные.

Рассмотрим каждый вид отдельно.

Наиболее старыми, по виду исполнения, были свинцово-кислотные аккумуляторы. Их первое изобретение было в 1800 году итальянским ученым Алесандро Вольта. Начиная с момента появления и до сегодняшних дней, данные аккумуляторы практически не изменились. В роли электролита в батареях используется серная кислота, а в качестве электродов – свинец и

диоксид свинца. Существуют различные типы исполнения таких батарей. На данный момент, самым распространенным типом батарей является автомобильные аккумуляторные батареи. Данные батареи отлично отдают высокие токи за короткий период времени, к минусам можно отнести то, что данный вид батарей не переносит глубоких разрядов, а также следует избегать перезаряда батареи, поскольку при перезаряде в результате физико-химической реакции образуются кислород и водород, что в больших количествах может вызвать взрыв. На рисунке 11 представлен автомобильный аккумулятор.

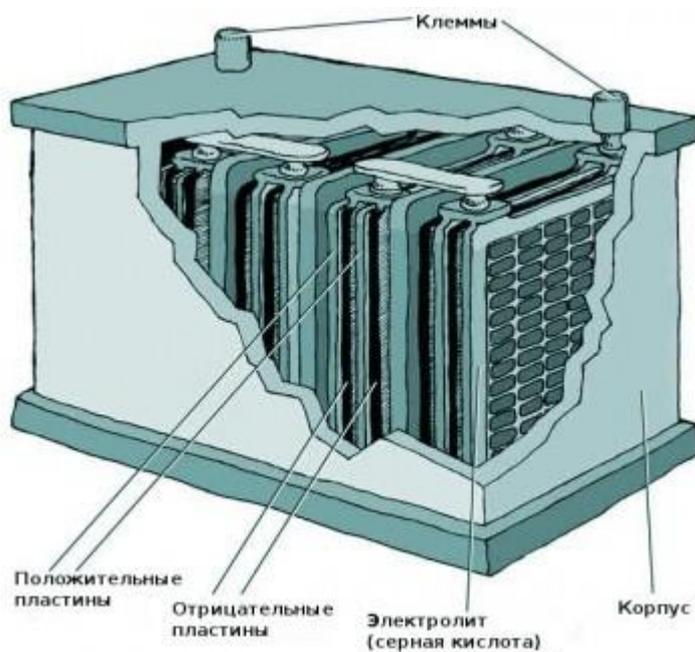


Рисунок 11 – Автомобильный аккумулятор

Развитием данного типа аккумуляторов является появление GEL-типа аккумуляторов. Основным отличием от обычных аккумуляторов является лишь то, что электролит представляет собой не жидкость, а желеобразное вещество, напоминающее гель, отсюда и название – гелиевые аккумуляторные батареи.

Существуют аккумуляторные батареи, внутри которых пространство между пластинами заполнено стекловолокном, пропитанным серной кислотой. Данные аккумуляторные батареи имеют дополнительную аббревиатуру AGM, что расшифровывается как Absorbent Glass Mat. Данный тип батарей устанавливается обычно в источниках бесперебойного питания, то есть в местах, где не требуется постоянная работа под нагрузкой. На рисунке 12 представлен AGM аккумулятор.



Рисунок 12 – AGM аккумулятор

К плюсам данного типа исполнения аккумуляторов можно отнести то, что при деформации корпуса отсутствует возможность выплескивания электролита.

Щелочные аккумуляторные батареи. По своему строению щелочные аккумуляторы практически не отличаются от свинцово-кислотных. Разница между ними лишь в том, что в щелочных аккумуляторах используются

никелевые или железные пластины, а роль электролита выполняет едкий калий или едкий натрий. Как сказано на сайте производителя «область применения аккумуляторных батарей широка и разнообразна. Он является источником энергии для работы транспорта (трамваи, троллейбусы, электрокары), различной спецтехники, погрузочного транспорта (автотележки, погрузчики, штабелеры), шахтных электрических аппаратов (тягачи, комбайны, дрезины и прочие), солнечных электростанций, бытовых устройств» [10]. К минусам щелочных аккумуляторов можно отнести то, что данные аккумуляторы невозможно заряжать токами малой мощности, также данный вид аккумуляторов нуждается в специальных зарядных устройствах, поскольку некачественные зарядные устройства могут снизить максимальное количество накапливаемого заряда.

Литий-ионные аккумуляторы. Во всех современных цифровых устройствах используются данные аккумуляторы. В основе их работы лежит литий-железно-фосфатная реакция. На рисунке 13 показан пример цилиндрического литий-ионного аккумулятора.



Рисунок 13 – Литий-ионный аккумулятор цилиндрического исполнения

Как сказано на сайте производителя «принцип действия литий-ионного аккумулятора заключается в создании необходимых условий для перемещения ионов лития между катодом и анодом:

- при подаче на электроды напряжения ионы лития отрываются от катода, переходят через сепаратор к графитовому аноду и встраиваются в его молекулярную структуру. В результате протекает реакция окисления, и аккумулятор заряжается.
- при подаче нагрузки ионы лития перемещаются обратно к катоду. Углеродистая пластинка на медной фольге становится минусом, а производные лития на алюминии – плюсом» [9].

На рисунке 14 представлено строение литий-ионного аккумулятора.

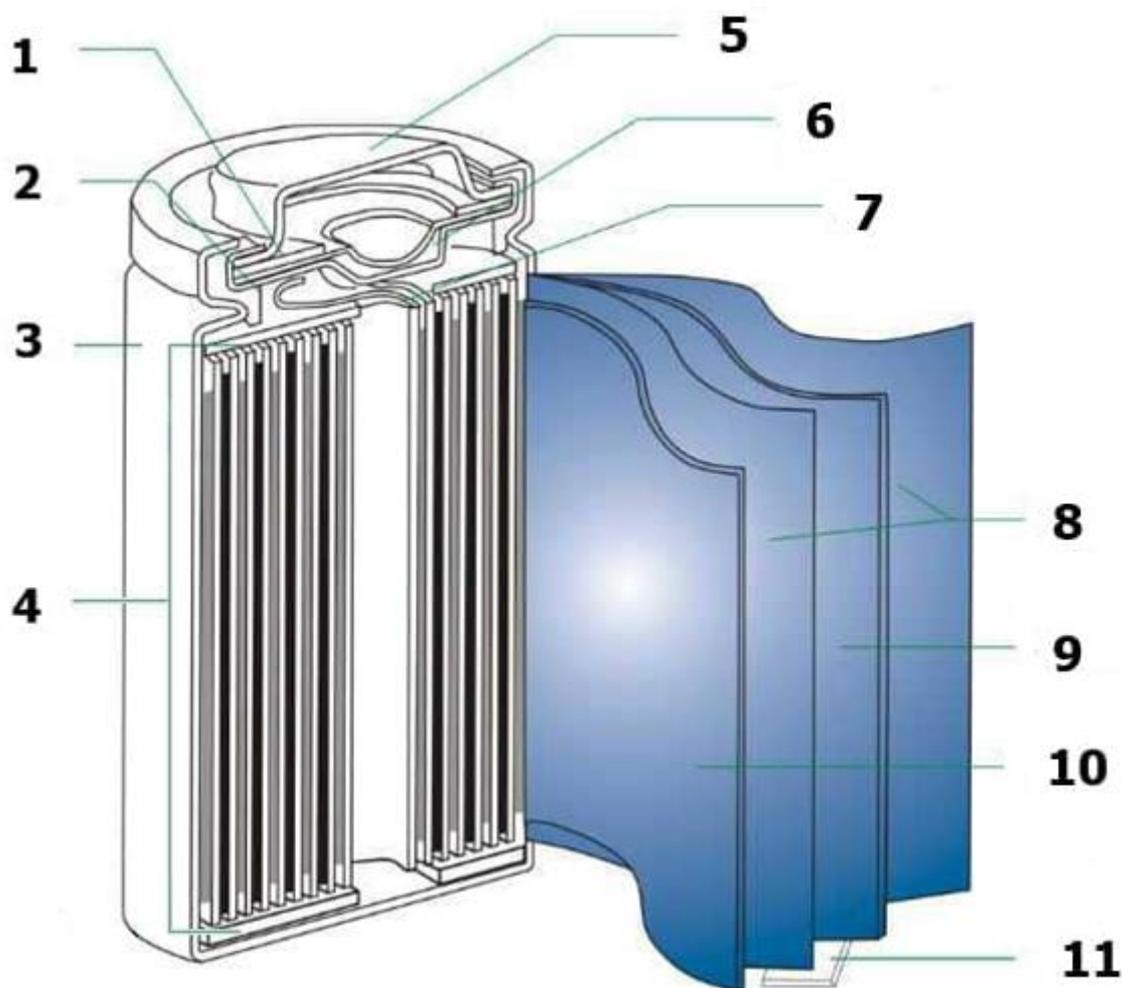


Рисунок 14 – Строение литий-ионного аккумулятора

На рисунке 14 находится:

- 1 – предохранитель,
- 2 – прокладка,
- 3 – корпус,
- 4 – изоляторы,
- 5 – положительный вывод,
- 6 – клапан аварийного сброса давления,
- 7 – токосъемник анода,
- 8 – ионопроводящий сепаратор,
- 9 – отрицательный электрод,
- 10 – положительный электрод,

– 11 – отрицательный вывод.

Минусами данных аккумуляторных батарей является их высокая стоимость, пожаро- и взрывоопасность, а также небольшой срок хранения, около трех лет.

Частота электросети России равняется 50Гц. Необходимо отметить также, что данная частота не всегда является таковой, не только из-за аварий, а также это связано с общей системой электроснабжения России, поскольку питание поступает не только в дома, но и на энергетически нагруженные предприятия, где используются разные типы преобразования энергии, что сказывается не только на напряжении, но и на частоте. Так, по ГОСТ 32144-2013 нормой отклонения частоты является «отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать  $\pm 0,2$ Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и  $\pm 0,4$ Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю» [4].

Инвертор – это устройство, которое позволяет преобразовать электрическую энергию постоянного напряжения в переменное. Всего существует два вида инверторов:

- независимые автономные инверторы (АИ),
- зависимые инверторы.

Основные различия этих видов инверторов заключается в их назначении. Как сказано в учебнике Томашевского «зависимый инвертор работает при наличии в его выходной цепи источника переменного напряжения, который задает форму, частоту и величину напряжения образованной им сети переменного напряжения» [24]. Пример использования данного вида инвертора можно увидеть при передачи электроэнергии между системами. В таком примере, переменное напряжение передающей сети выпрямляется, после по линии постоянного напряжения передается на данный инвертор, где оно преобразуется в переменное напряжение необходимой частоты. Передача производится при помощи прямого напряжения в связи с тем, что возможно падение частоты во время самой передачи и поддержание

необходимого уровня частоты будет дороже, чем передача прямого напряжения. Таким образом, зависимый инвертор увеличивает количество реактивной энергии в принимающую сеть.

Автономный инвертор в свою очередь имеет возможность преобразовывать постоянное напряжение в переменное для единичного электроприбора.

Также Томашевский указывает, что «классификация АИ производится по различным признакам, среди которых можно выделить следующие:

- по виду схем включения управляемых приборов (полумостовые, мостовые, со средней точкой трансформатора и др.);
- по принципу коммутации (выключения) управляемых приборов (индивидуальная, пофазная, групповая, общая; естественная и принудительная; параллельная, последовательная, последовательно-параллельная; при нулевом значении тока и напряжения и др.);
- по принципу управления ключами — с независимым или с самовозбуждением;
- по типу используемых приборов с полу-управляемыми приборами (ООТ); с полностью управляемыми приборами (двух-операционный тиристор (ДОТ), IGBT, MOSFET и др.);
- по характеру протекающих в них электромагнитных процессов — автономные инверторы тока; автономные инверторы напряжения, автономные резонансные инверторы;
- по виду переходного процесса в цепи нагрузки (цепи переменного тока) — апериодические и колебательные» [24].

Инверторы также позволяют соблюдать необходимую частоту.

Выводы по первому разделу.

По данным баланса электроэнергии в ЕЭС России [6] количество вырабатываемой электроэнергии при помощи солнечных электростанций постоянно повышалось, в следствии чего можно сделать вывод, что Россия

активно занимается внедрением солнечных электростанций в промышленных масштабах.

При рассмотрении статей по увеличению коэффициента полезного действия солнечных батарей, а также использование иных материалов для создания фотоэлектрических элементов было выявлено, что большинство исследований направлено не на улучшение уже выпущенных солнечных батарей, а на создание совершенно новых, которые будут обладать дополнительными возможностями.

На данный момент исследований в качестве накопителя энергии решено отказаться от использования литий-ионных аккумуляторных батарей, поскольку сегодня литий достаточно дорогой металл. Щелочные аккумуляторные батареи также не пригодны для использования. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, на данный момент, являются приоритетным выбором.

## 2 Конструкции солнечных батарей

Поскольку данная работа связана с модернизацией солнечных батарей, то необходимо рассмотреть различные конструкции уже имеющихся солнечных батарей по мощности, а именно:

- малой мощности, до 100 Вт;
- средней мощности, до 1000 Вт;
- большой мощности, свыше 1000 Вт.

На рисунке 15 изображены различные солнечные батареи и их возможные варианты использования.



Рисунок 15 – Различные солнечные батареи

Как видно на рисунке, солнечные батареи имеют различные виды исполнения в зависимости от поставленных задач. Ниже рассмотрим каждый вариант отдельно

## 2.1 Солнечные батареи малой мощности

Данный тип солнечных батарей имеется в различных вариациях по выдаваемой мощности. Для примера рассмотрим солнечные батареи на 6 и 60 Вт. На рисунке 16 представлена солнечная батарея мощностью на 6 Вт.



Рисунок 16 – Солнечная батарея мощностью 6 Вт

На рисунке 17 представлен наглядный пример сравнения размеров солнечной батареи и среднестатистического смартфона.

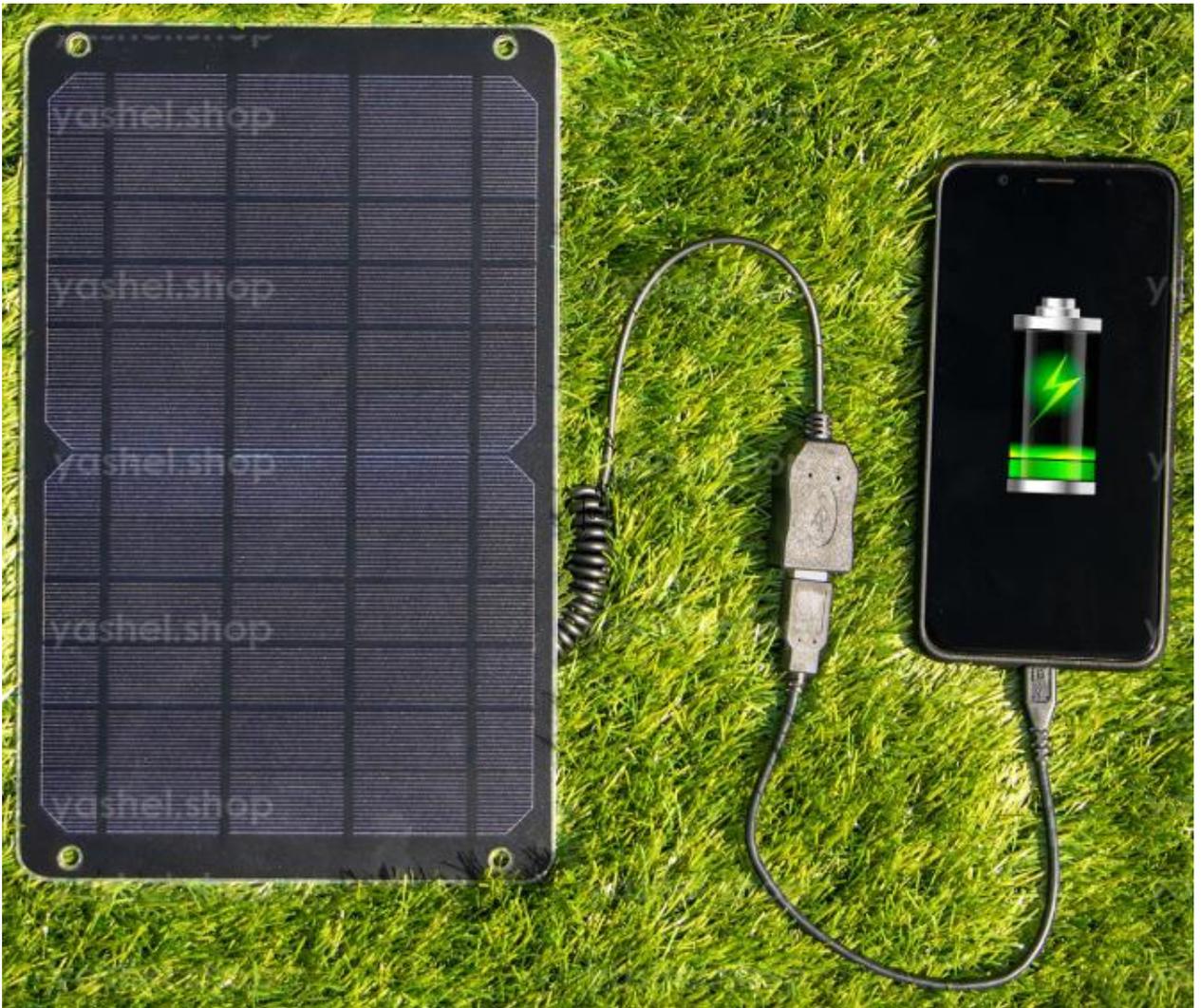


Рисунок 17 – Наглядный пример размера солнечной батареи со смартфоном

«Зарядное устройство Delta Tourist Light мощностью 6 Вт — это легкая и удобная солнечная панель туристическая для туризма и аксессуары для подзарядки в походных условиях смартфонов и прочих гаджетов с невысоким потребляемым током» [8].

Размеры данной солнечной батареи также можно посмотреть на сайте производителя, а также в паспорте устройства. Для удобства восприятия информации технические характеристики Delta Tourist Light 6 были перенесены в таблицу 5.

«Таблица 5 – Технические характеристики Delta Tourist Light 6

|                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| Мощность                 | 6,1 Вт              |
| $V_{\text{ВЫХ}}$         | 5 В                 |
| $I_{\text{ВЫХ}}$ (макс.) | 1200 мА             |
| Габариты                 | 275x170x10 мм       |
| Масса                    | 250 г               |
| Тип элементов            | Монокристаллический |

Судя по техническим характеристикам данной солнечной батареи видно, что по размерам она не превышает размеры листа формата А4, а также достаточно тонкая» [12].

Рассмотрим солнечную батарею на 60 Вт.

На рисунке 18 представлена солнечная батарея мощностью 60 Вт.

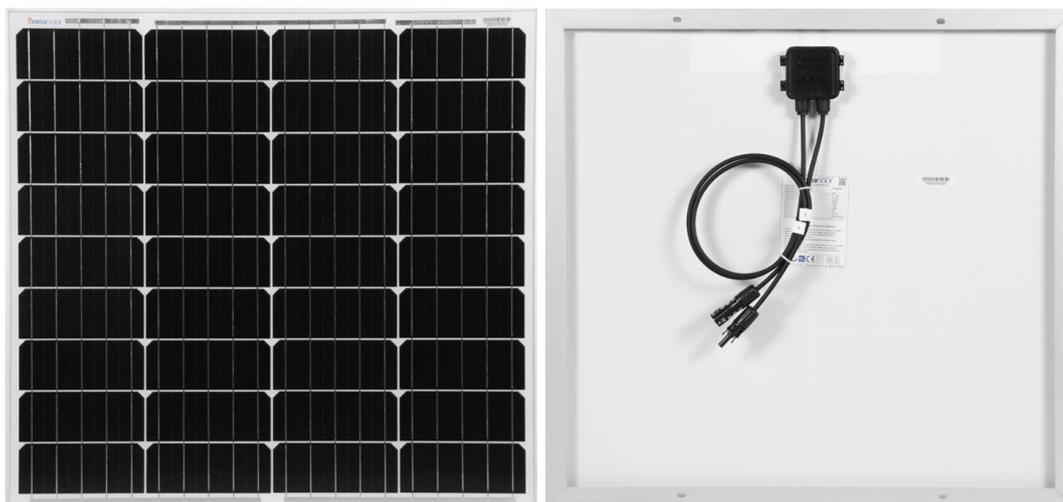


Рисунок 18 – Солнечная батарея RestarSolar 60Вт

На сайте производителя «RestarSolar RSM60M являются одним из самых популярных вариантов для небольших солнечных электростанций, благодаря их надежности и совместимости со всеми основными компонентами солнечных систем и большинством силовой электроники. Монокристаллические солнечные батареи 60Вт идеально подходят для установки на крыше дачного домика, кемпера, яхты или легко взять с собой в туристический поход в багажнике автомобиля» [13].

Также у производителя есть готовое решение, которое включает в себя наличие солнечной панели на 60 Вт, аккумулятора, контроллера заряда и нескольких проводов, с целью запасания выработанной электроэнергии в аккумулятор для последующего использования. Весь комплект изображен на рисунке 19.



Рисунок 19 – Готовое решение от производителя

Необходимо отметить, что данная солнечная панель, что используется в готовом решении, создана по технологии с использованием монокристаллической решетки.

## 2.2 Солнечные батареи средней мощности

Солнечные батареи от 100 Вт до 1000 Вт имеют множество вариаций, в следствии чего имеется большое множество их применений в жизни. Простейшими примерами использования данных солнечных батарей являются светофоры, дачные домики, а также от них имеется возможность запитывать более полноценные дома со всеми необходимыми благами.

Для примера сначала рассмотрим конструкцию светофора с солнечной батареей.

«Автономная солнечная станция SN LTO представляет собой солнечную панель, в корпус которой интегрированы аккумуляторная батарея, собранная на базе литий-титанатных ячеек Toshiba Scib, и контроллер заряда с системой управления аккумуляторной сборкой (BMS). Вся электроника находится внутри солнечной панели и не требует отдельного монтажа. Благодаря этому отсутствует необходимость в дополнительных распределительных щитах и корпусах» [14]. На рисунке 20 представлен автономный солнечный светофор Т.7 SN LTO.



Рисунок 20 – Автономный солнечный светофор T.7 SN LTO

По информации с сайта производителя, данные светофоры могут оснащаться различными типами аккумуляторов, солнечных станций разных мощностей, а также диаметром светодиодного светофора. В таблицах 6 и 7 представлены сравнения технических характеристик аккумуляторов и солнечных станций.

«Таблица 6 – Сравнительная характеристика технологий заряда АКБ

|  | AGM           | GEL           | LTO            |
|--|---------------|---------------|----------------|
| Температурный режим эксплуатации         | -20°C - +60°C | -20°C - +60°C | -40°C - +60°C  |
| Температурный режим заряда               | -10°C - +60°C | -10°C - +60°C | -40°C - +60°C  |
| Количество циклов                        | 300 шт        | 600 шт        | 15000 шт       |
| Безопасная глубина разряда               | 30%           | 50%           | 80%            |
| Максимальный ток заряда                  | 0,5С          | 0,5С          | 10С            |
| Время полного разряда                    | 6-8 часов     | 6-8 часов     | 1 час          |
| Защита от переразряда/перезаряда         | нет           | нет           | встроенная     |
| Система балансировки ячеек               | нет           | нет           | имеется        |
| Полезная емкость                         | 60%           | 80%           | 95%            |
| Падение емкости при снижении температуры | значительно   | значительно   | не значительно |

Таблица 7 – Технические характеристики солнечной станции SN-LTO

|                                | 100Вт/23Ач    | 150Вт/46Ач    |
|--------------------------------|---------------|---------------|
| Рабочее напряжение             | 12 В          | 12 В          |
| Мощность солнечной панели      | 100 Вт        | 150 Вт        |
| Емкость аккумуляторной батареи | 23 Ач         | 46 Ач         |
| Количество светофоров          | ю 2 шт        | ю 4 шт        |
| Частота мигания светофора      | 1 Гц          | 1 Гц          |
| Вес                            | 17 кг         | 25 кг         |
| Диаметр опоры                  | 56-89 мм      | 76-130 мм     |
| Температура эксплуатации       | -40°C - +60°C | -40°C - +60°C |
| Степень защиты                 | IP 65         | IP 65         |

Данные взяты с сайта производителя» [14].

На рисунке 21 представлено строение электрической составляющей светодиодного светофора Т.7 SN LTO.

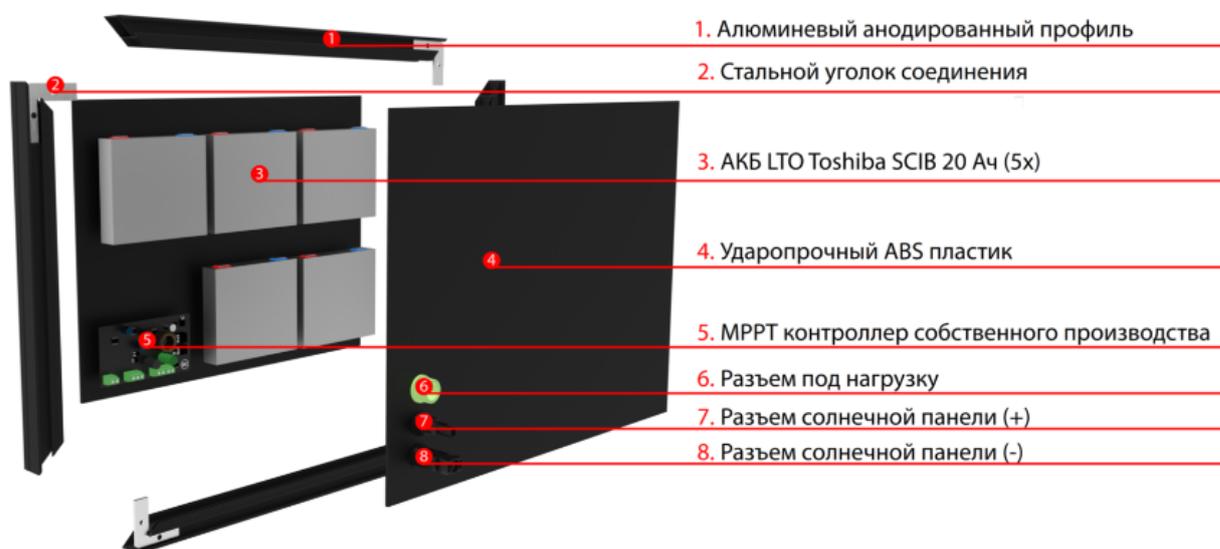


Рисунок 21 – Строение Т.7 SN LTO

Исходя из данных таблицы 6 видно, что аккумуляторные батареи типа LTO являются приоритетными для установки, поскольку имеют наибольший запас по всем параметрам, начиная от работы температурного режима и заканчивая полезной емкостью.

Наибольшей по мощности солнечной батареей, состоящей из 1 модуля, является Delta BST 540-72 М НС. На рисунке 22 продемонстрирована данная панель.



Рисунок 22 – Солнечная батарея Delta BST 540-72 М НС

Электрические параметры данной солнечной батареи сведены в таблицу 8 для удобного использования.

Таблица 8 – «Электрические параметры Delta BST 540-72 М НС

|  |         |
|--|---------|
| Пиковая электрическая мощность           | 540 Вт  |
| Толеранс                                 | +3 %    |
| Номинальное напряжение                   | 24 В    |
| Напряжение в точке максимальной мощности | 42 В    |
| Ток в точке максимальной мощности        | 12,86 А |
| Ток короткого замыкания                  | 13,7 А  |
| Напряжение холостого хода                | 49,8 В  |
| Максимальное напряжение системы          | 1500 В  |
| Максимальный номинал предохранителя      | 25 А    |
| КПД элемента ФЭМ                         | 22,8 %  |
| Практический КПД модуля                  | 21,11 % |

Данные из таблицы 8 верны при плотности света  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , воздушной массы  $AM=1,5$ , номинальной температуры  $25^\circ\text{C}$ » [15].

Также на сайте производителя было обнаружено готовое решение для дачного дома. В таблице 9 будет указано выбранное оборудование.

Таблица 9 – Готовое решение для дачного дома

| Наименование     | Марка                       |
|------------------|-----------------------------|
| Солнечная панель | YASHEL SunTec-M 300Wp - 3шт |
| Инвертор         | Must Prosolar 3кВ           |
| АКБ              | VEKTOR 200Ah                |

Поскольку на сайте производителя отсутствует какая-либо информация по данной спецификации выбранного оборудования, мы можем попытаться заменить похожим оборудованием.

Солнечные панели выберем Delta BST 320-60 М в количестве трех штук. Выбор данных солнечных панелей осуществлялся в первую очередь по мощности, а также это единственный вариант близкий к 300 Вт. На рисунке 23 представлена выбранная солнечная батарея.



Рисунок 23 – Delta BST 320-60 М

Технические характеристики Delta BST 320-60 М сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – «Технические характеристики Delta BST 320-60 М

|                                     |                     |
|-------------------------------------|---------------------|
| Бренд                               | Delta Solar         |
| Гарантия                            | 10 лет              |
| Номинальное напряжение              | 60 В                |
| Ток при пиковой мощности, $I_{mp}$  | 9,58 А              |
| Ток короткого замыкания, $I_{sc}$   | 10,14 А             |
| Мощность номинальная                | 320 Вт              |
| Технология солнечной батареи        | Монокристаллическая |
| Напряжение максимальное, $V_{mp}$   | 33,4 В              |
| Напряжение холостого хода, $V_{oc}$ | 41 В                |
| Количество ячеек                    | 60                  |

Данная солнечная батарея имеет габаритные размеры 1665x1002x35 мм» [16].

Инвертор также отсутствует, вместо него выберем SmartWatt ECO 3К 24V 60А МРРТ. Данный инвертор выбирался по выдаваемой мощности. Также, как сказано производителем, к данному инвертору возможно подключить солнечные батареи общей мощностью до 1500 Вт и аккумуляторную батарею на 24 В. На рисунке 24 изображен выбранный инвертор.



Рисунок 24 – SmartWatt ECO 3К 24V 60А MPPT

Технические характеристики SmartWatt ECO 3К 24V 60А MPPT указаны в таблице 11.

Таблица 11 – «Технические характеристики SmartWatt ECO 3К 24V 60A MPPT»

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Номинальное напряжение инвертора, В    | 24                      |
| Номинальная мощность инвертора, кВт    | 3                       |
| Диапазон частот, Гц                    | 52/60 (автоопределение) |
| Напряжение защиты от перенапряжения, В | 33                      |
| Форма выходного напряжения             | Чистая синусоида        |
| Выходное напряжение                    | 230                     |
| Пиковая мощность инвертора, кВт        | 6 (в течении 5с)        |
| Напряжение поддерживающего заряда, В   | 27                      |
| Тип контроллера заряда                 | MPPT                    |

Габаритные размеры данного инвертора составляют 285x334x100 мм» [17].

Аккумуляторная батарея имеется в наличии, однако, название батареи изменено на ВЕКТОР VPbC 12-200. На рисунке 25 представлена данная батарея.



Рисунок 25 – ВЕКТОР VPbC 12-200

Для упрощения восприятия информации в таблицу 12 перенесены технические характеристики аккумуляторной батареи ВЕКТОР VPbC 12-200.

Таблица 12 – «Технические характеристики VEKTOR VPbC 12-200

|                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Бренд                       | Vektor Energy               |
| Гарантия                    | 4 года                      |
| Тип                         | Super Lead-Carbon Batteries |
| Срок службы                 | 15 лет                      |
| Номинальная емкость АКБ, Ач | 200                         |

Масса данной аккумуляторной батареи составляет 72 кг» [18]

Со старой спецификацией выбранного оборудования, производитель заявлял, что максимальная расчетная выработка электроэнергии при помощи солнца составит примерно 4,3 кВт · ч.

### **2.3 Солнечные батареи высокой мощности**

Солнечные батареи мощностью свыше 1кВт в общем доступе не были обнаружены. Связано данное наблюдение с тем, что скорее всего производство подобного типа солнечных панелей не востребовано потребителем, экономически невыгодно в плане производства, а также присутствие высокой сложности при изготовлении. Возможно, подобные солнечные панели производятся в частном порядке. Однако, существуют комплексы с выработкой электроэнергии при помощи солнца при помощи использования нескольких модулей. Количество подобных комплексов достаточно велико, для оптимизации исследования мы рассмотрим некоторые из них, а именно:

- солнечная электростанция на 7,2 кВт;
- солнечная электростанция на 100 кВт.

Солнечная электростанция Hybrid 7200 MPPT 80A мощностью 7,2 кВт представлена на рисунке 26.

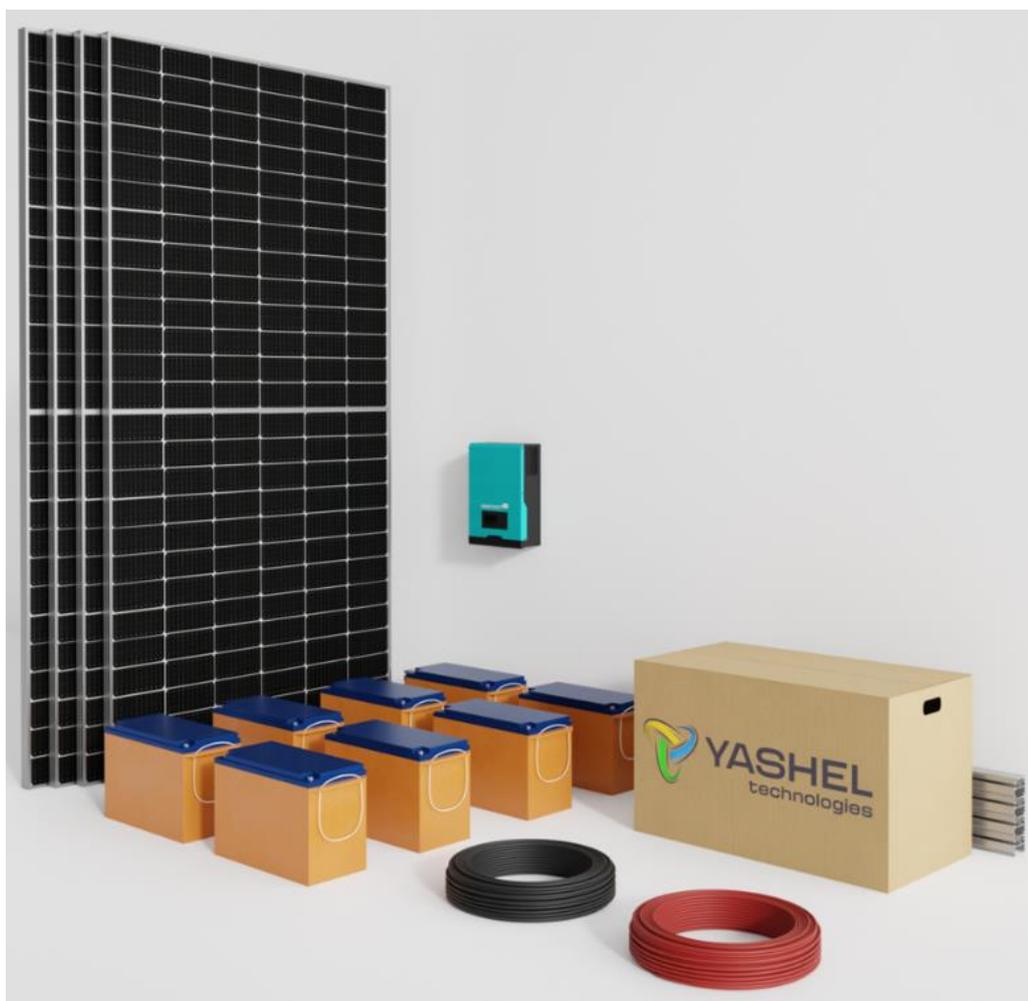


Рисунок 26 – Hybrid 7200 MPPT 80A

Технические характеристики данной солнечной электростанции сведены в таблицу 13.

Таблица 13 – «Технические характеристики Hybrid 7200 MPPT 80A»

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Тип АКБ                        | GEL   |
| Время автономной работы        | Продолжительность работы нагрузки 100Вт при глубине разряда АКБ не более 75% – 72 часов |
| Напряжение постоянного тока    | 48 В  |
| Пиковая мощность инвертора     | 14,4 кВт (в течении 5с)   |
| Выходное напряжение            | 220 В   |
| Форма выходного напряжения     | Синусоидальная  |
| Номинальная мощность инвертора | 7,2 кВт   |
| Мощность солнечных панелей     | 7200 Вт   |
| Емкость аккумулятора           | 200 А · ч   |

Данная солнечная электростанция является гибридной, это значит, что данная электростанция работает и от базовой электрической сети, и от солнечных батарей» [19]. На рисунке 27 представлена схема работы данной электростанции.

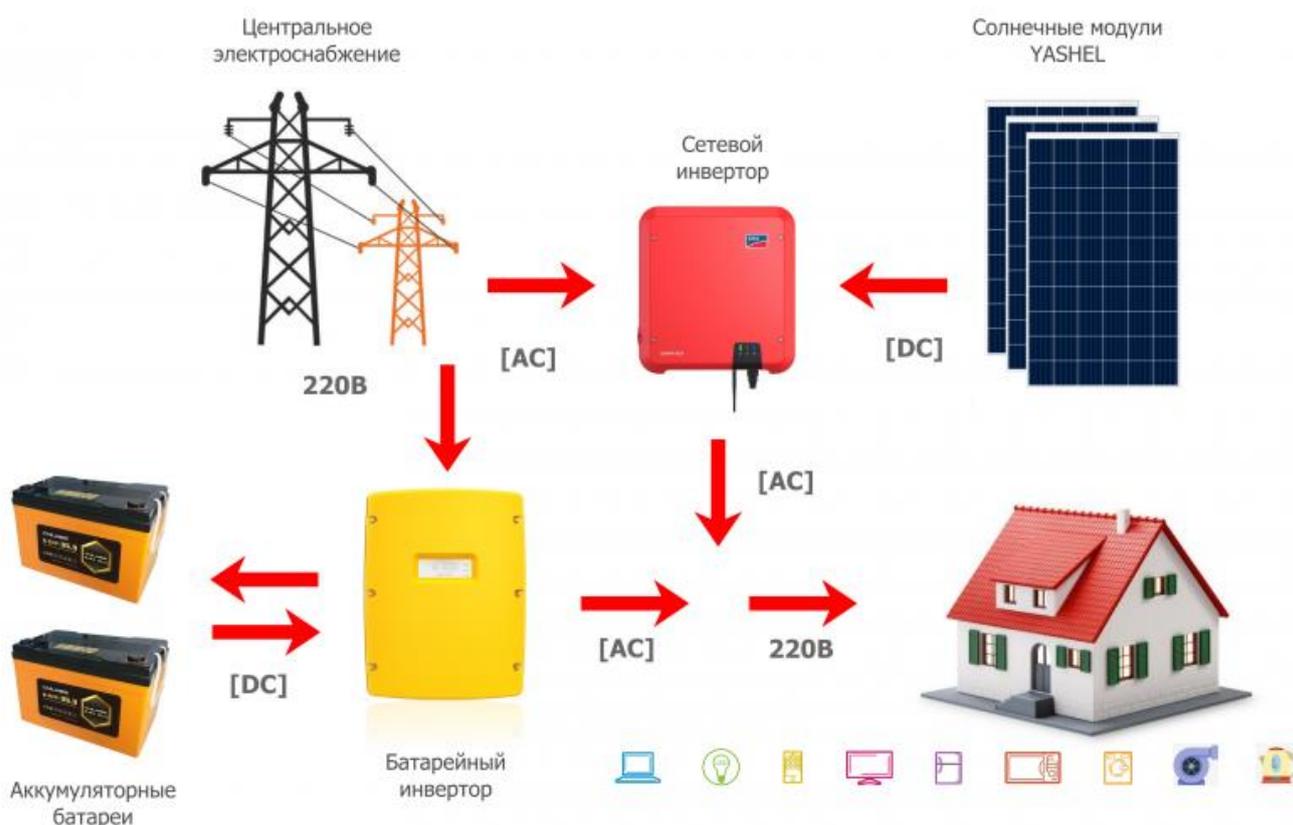


Рисунок 27 – Схема работы Hybrid 7200 MPPT 80A

Как видно из схемы работы, данная гибридная электростанция работает преимущественно от солнечных батарей, с возможностью запасания избытка электроэнергии в гелиевых аккумуляторных батареях. Если энергии от солнечных батарей, а также аккумуляторов не хватает, то этот недостаток будет компенсирован благодаря стороннему электроснабжению.

Существует на рынке и более мощные солнечные электростанции. Рассмотрим GRID 100кВт. На рисунке 28 показана данная электростанция.



Рисунок 28 – GRID 100кВт

Данная солнечная электростанция позиционируется как сетевая. Отличие от гибридной солнечной электростанции в том, что в данном комплексе исключены аккумуляторные батареи.

В таблице 14 сведены технические характеристики GRID 100кВт.

Таблица 14 – «Технические характеристики GRID 100кВт

|                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| Тип системы                    | Сетевая             |
| Количество фаз                 | 3                   |
| Тип солнечных панелей          | Монокристаллические |
| Количество инверторов          | 2                   |
| Гарантия                       | 5 лет               |
| Расчетный период пользования   | Круглый год         |
| Номинальная мощность инвертора | 50 кВт              |
| Мощность солнечных панелей     | 100 кВт             |

Поскольку изменена комплектация данной солнечной электростанции в отличии от Hybrid 7200 MPPT 80A, то изменена также и схема работы» [20]. На рисунке 29 представлена схема работы GRID 100кВт.

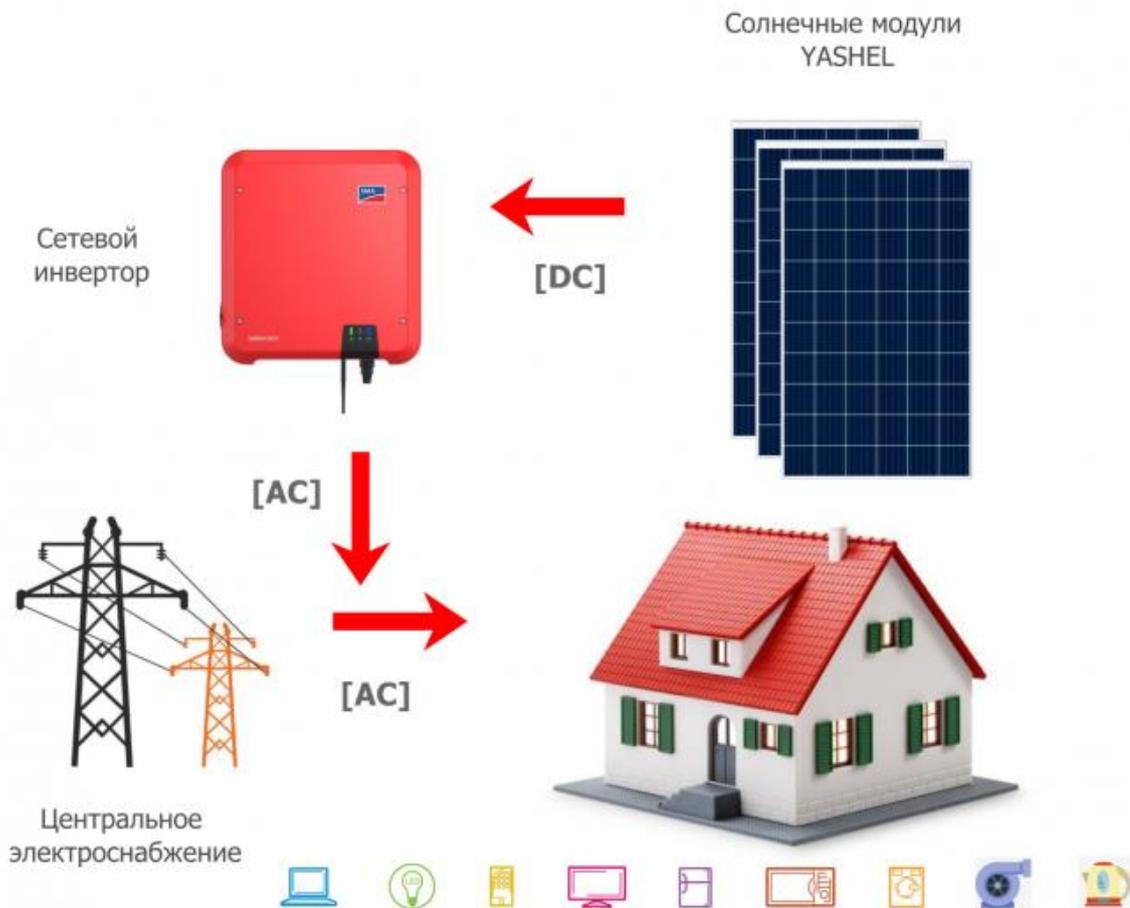


Рисунок 29 – Схема работы GRID 100кВт

Данная схема содержит в себе меньше компонентов, в следствии чего возрастает ее надежность.

Цены рассмотренных солнечных электростанций сведены в таблицу 15.

Таблица 15 – Цены различных солнечных электростанций

| Наименование продукции        | Цена, руб. |
|-------------------------------|------------|
| Delta Tourist Light 6         | 2500       |
| RestarSolar RSM60M            | 15000      |
| Delta BST 540-72 М НС         | 31500      |
| Delta BST 320-60 М            | 23000      |
| SmartWatt ECO 3К 24V 60А MPPT | 35500      |
| ВЕКТОР VPbC 12-200            | 60216      |
| Hybrid 7200 MPPT 80А          | 842369     |
| GRID 100кВт                   | 5842277    |

Выводы по второму разделу.

Как видно по информации из таблицы 15, цена на солнечные электростанции на 2023 год все еще достаточно высока. Возможно, с развитием технологий в области извлечение энергии солнца и ее преобразования в электрическую, цены на подобные электрические станции будут снижаться. Также важно отметить то, что солнечная энергетика является перспективным направлением развития электроэнергетики в любой стране, поскольку солнечная радиация попадает на все участки Земли.

Важно отметить также то, что для систем малой мощности, возможна установка литий-титанатных аккумуляторов, поскольку срок службы данного типа в разы выше, чем у иных аккумуляторов.

### **3 Модернизация солнечных батарей**

Способы модернизации солнечных батарей будут производиться на основании внешних факторов, а именно:

- движение солнца;
- охлаждение солнечной батареи в следствии ее нагрева.

Поскольку все солнечные батареи имеют темный цвет, то их температура будет всегда выше температуры окружающей среды. На сколько сильно влияет повышенная температура солнечной батареи и возможный способ скомпенсировать данное явление рассмотрим во втором способе.

#### **3.1 Первый способ модернизации**

Как известно, Солнце не находится в одной точке на небосводе, в следствии вращения Земли вокруг Солнца. Поскольку известно, что наибольшая выработка солнечной энергии происходит при падении солнечных лучей под углом  $90^\circ$  к батарее, то в связи с этим возникает необходимость ориентации солнечной батареи по Солнцу. Для решения данной задачи, необходимо обеспечить возможность поворота солнечных батарей относительно движения Солнца.

Обеспечение поворота солнечных панелей будет произведено при помощи простой схемы. На рисунке 30 изображена блок-схема системы поворота солнечных батарей относительно Солнца [1].

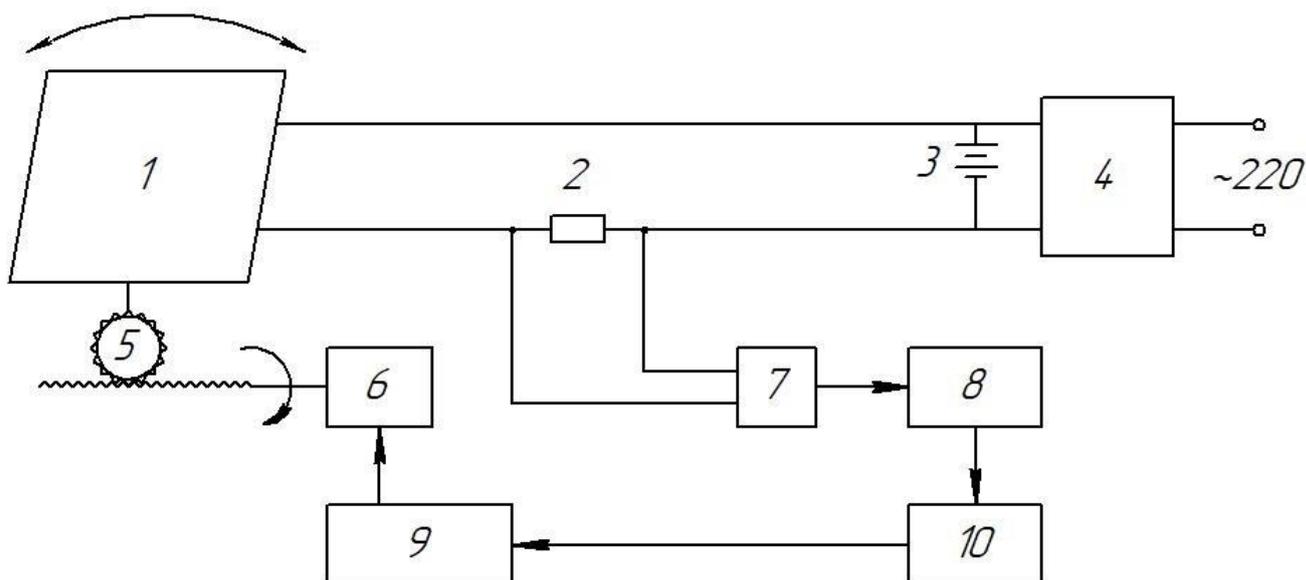


Рисунок 30 – Блок-схема системы поворота солнечных батарей

На рисунке 25 изображено:

- 1 – солнечная батарея,
- 2 – датчик тока,
- 3 – аккумуляторная батарея,
- 4 – инвертор,
- 5 – система поворота из шестерни с червячным редуктором,
- 6 – шаговый двигатель,
- 7 – усилитель сигнала,
- 8 – аналогово-цифровой преобразователь,
- 9 – система управления шаговым двигателем,
- 10 – микроконтроллер.

Данная схема реализует принцип поиска экстремума, изображенным на рисунке 31.

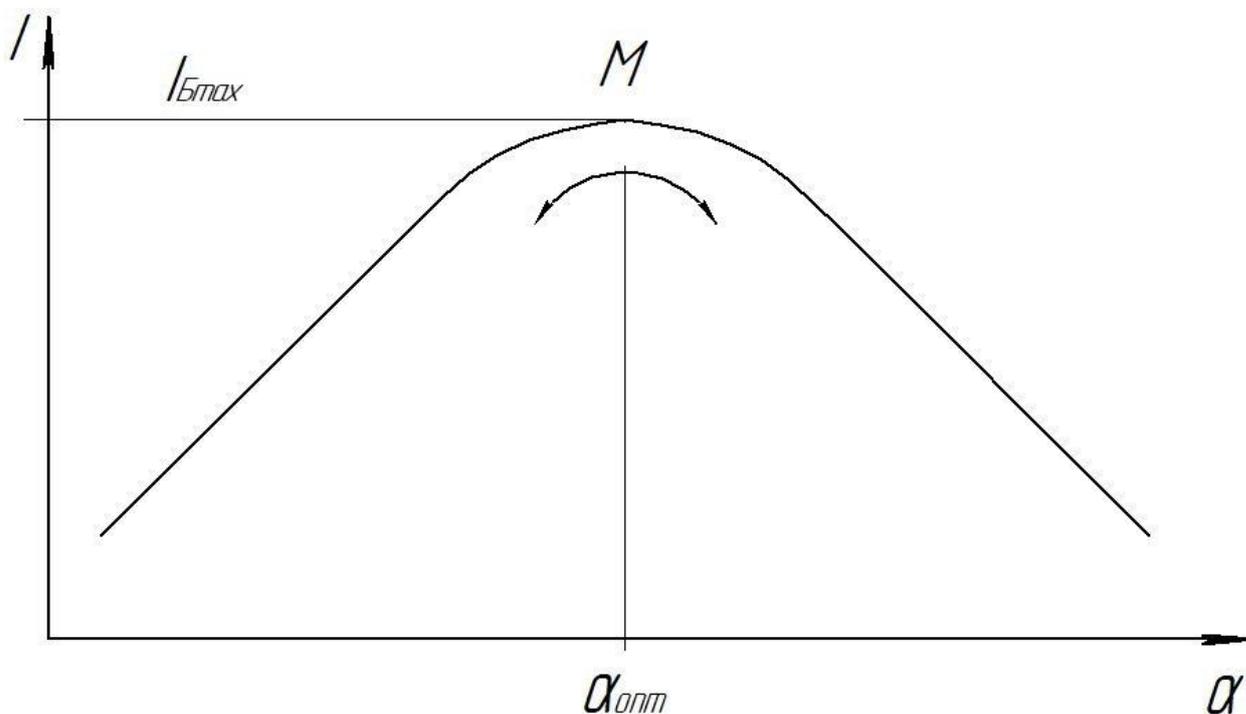


Рисунок 31 – Принцип поиска экстремума

При помощи данной схемы производится поворот солнечной батареи в горизонтальной плоскости и находится такой угол  $\alpha$  при котором солнечная батарея будет отдавать максимальный ток  $I_{СБmax}$ . Обратная связь производится по токовым значениям. В роли датчика тока (2) выступает шунт. Сигнал с шунта поступает на усилитель сигнала (7). После усиления сигнал поступает аналогово-цифровой преобразователь (8), после чего сигнал поступает в микроконтроллер (10). В микроконтроллере происходит обработка сигнала и в зависимости от результата выдается необходимая команда в систему управления шаговым двигателем (9). Из 9 поступает сигнал на шаговый двигатель (6) и посредством червячной передачи и шестерни происходит поворот солнечной батареи (1) в необходимую сторону. После поворота солнечной батареи, происходит повторное измерение силы тока поступающее с солнечной батареи с предыдущим значением. Если разность больше нуля, то задается команда на поворот солнечной батареи в том же направлении на один дискрет. Если разность меньше нуля, то поступает

команда на возврат в предыдущую точку. В конечном итоге система функционирует в районе точки экстремума  $M$ . Также возможно программирование дополнительной функции системы поворота солнечной батареи. Дополнительное программирование заключается в том, чтобы при нахождении оптимального угла солнечной панели, система останавливалась на определенный интервал времени, который необходимо задать. По истечении времени интервала, механизм вновь начинает поиск точки экстремума.

Для вертикальной ориентации солнечной батареи применяется аналогичная система.

Для солнечных батарей малой мощности возможно упрощение схемы ориентации в пространстве. Управление поворотами по горизонтали и вертикали производится при помощи таймера, которым отслеживается время суток и время года. В связи с этим исполнительные механизмы для данных батарей потребляют небольшую мощность, так как ориентация солнечной батареи осуществляется дискретно через значительные промежутки времени. Для примера, горизонтальную ориентацию можно изменять каждый 1 час, а вертикальную ориентацию 1 раз в неделю или 1 раз в месяц.

Поворот солнечной батареи, как было сказано ранее, будет осуществляться за счет червячной передачи и шестерни, которые будут вращать шаговый двигатель. Шаговый двигатель принято было устанавливать фирмы «Электропривод» марки ШТД86 с тормозом. Данный двигатель используется в лаборатории Тольяттинского Государственного Университета и зарекомендовал себя как надежное устройство высокой точности. На рисунке 32 представлен данный шаговый двигатель.

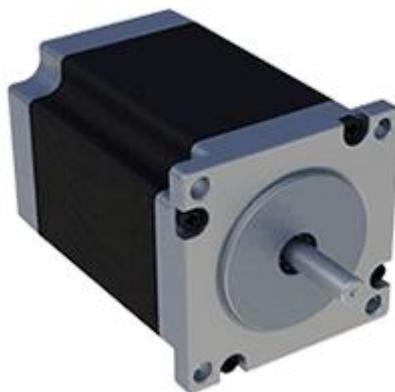


Рисунок 32 – Шаговый двигатель ШТД86

Проведем расчет увеличения мощности солнечной панели BST 320-60 М за счет преобразования солнечной энергии в электрическую при помощи использования предложенного механизма поворота.

Электрические параметры данной солнечно батареи приведены в таблице 16.

Таблица 16 – «Электрические параметры BST 320-60 М

|   |         |
|---|---------|
| Пиковая электрическая мощность ( $P_{max}$ )      | 320 Вт  |
| Толеранс  | +3 %    |
| Номинальное напряжение $U_{nom}$                  | 24 В    |
| Напряжение в точке максимальной мощности $U_{mp}$ | 33,4 В  |
| Ток в точке максимальной мощности $I_{mp}$        | 9,58 А  |
| Ток короткого замыкания $I_{sc}$                  | 10,14 А |
| Напряжение холостого хода $U_{oc}$                | 41 В    |
| Максимальное напряжение системы                   | 1000 В  |
| Максимальный номинал предохранителя               | 15 А    |
| КПД элемента ФЭМ                                  | 21,16 % |
| Практический КПД модуля                           | 19,18 % |

Данные параметры верны при плотности света  $1000\text{Вт}/\text{м}^2$ , воздушной массе  $AM = 1,5$ , номинальной температуре  $25^\circ\text{C}$ » [23].

Максимальная мощность солнечного излучения в июне составляет  $1350 \text{ Вт/м}^2$  [28], что показано на рисунке 33. При учете переменной облачности, значение солнечного излучения составляет  $P_{\text{И}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$  [29].

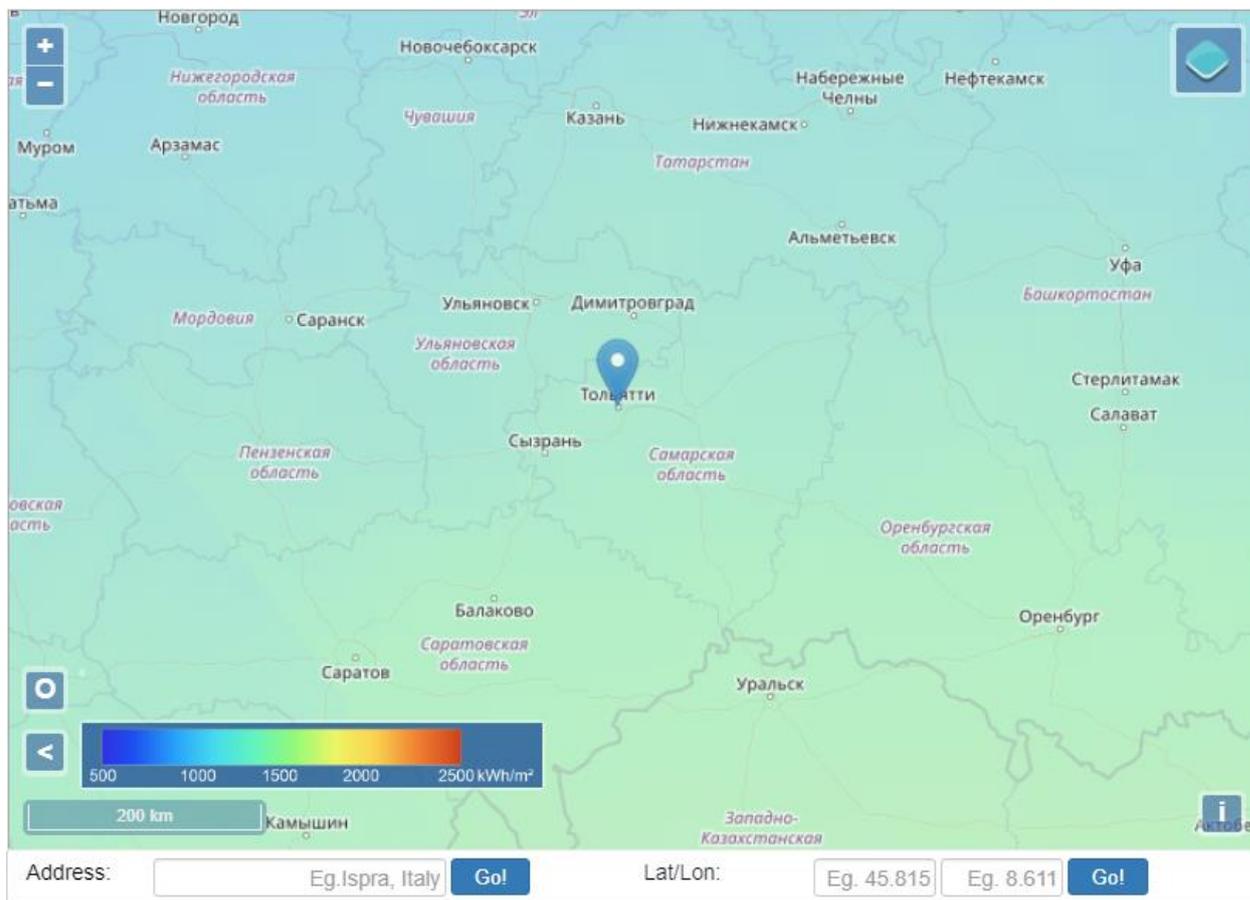


Рисунок 33 – Распределение мощности солнечного излучения

Коэффициент полезного действия выбранной солнечной панели составляет 19,18%. Таким образом, с  $1 \text{ м}^2$  солнечной батареи можно снять определенное количество энергии, которое рассчитывается по формуле (1).

$$P_1 = P_{\text{И}} \cdot \eta, \quad (1)$$

где  $P_{\text{И}}$  – мощность солнечного излучения,  $\text{Вт/м}^2$ ;

$\eta$  – КПД солнечной батареи.

Подставив данные из таблицы 16 в формулу (1) получим следующее значение.

$$P_1 = 1000 \cdot 0,1918 = 191,8 \text{ Вт}$$

Как видно из формулы, итоговая мощность, которую может выработать данная солнечная батарея составляет 191,8 Вт. Наглядное представление вырабатываемой мощности солнечной батареи с механизмом поворота показано на рисунке 34.

Для того, чтобы рассчитать мощность, которую будет выдавать данная батарея без механизма поворота, необходимо воспользоваться формулой (2).

$$P_2 = P_1 \cdot \cos(\alpha), \quad (2)$$

где  $P_2$  – вырабатываемая мощность солнечной батареи без механизма поворота, Вт;  
 $\cos(\alpha)$  – корректировочный коэффициент реальных значений относительно идеальных.

Используя формулу (2), рассчитаем вырабатываемую мощность солнечной батареи без механизма поворота в 17 часов.

$$P_2 = 139,055 \cdot \cos(35^\circ 43') = 112,8988 \text{ Вт.}$$

Остальные значения высчитывались аналогичным образом. Полученные данные сведены в таблицу 17.

Таблица 17 – Почасовые значения мощности солнечной батареи без механизма поворота

|              |   |      |       |       |        |        |        |        |       |        |        |        |        |       |       |      |    |
|--------------|---|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|----|
| Время, ч     | 5 | 6    | 7     | 8     | 9      | 10     | 11     | 12     | 13    | 14     | 15     | 16     | 17     | 18    | 19    | 20   | 21 |
| Мощность, Вт | 0 | 8,22 | 35,33 | 72,95 | 112,90 | 148,11 | 170,76 | 185,36 | 191,8 | 185,36 | 170,76 | 148,11 | 112,90 | 72,95 | 35,33 | 8,22 | 0  |

Для удобства сравнения на рисунке 34 отобразим криволинейные зависимости, вырабатываемых солнечными батареями совместно с механизмом поворота и без него. Также на рисунке 34 изображен пример поиска угла  $\alpha$ .

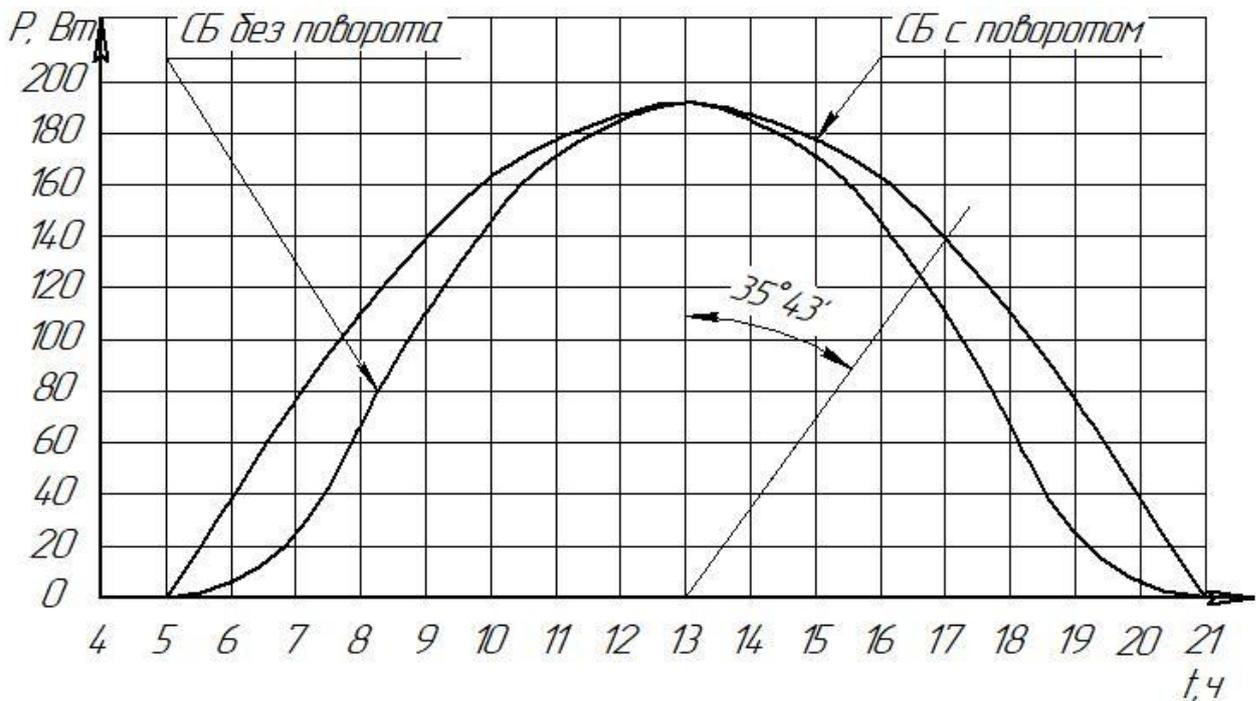


Рисунок 34 – Графическое сравнение мощностей солнечных батарей

Для того, чтобы определить в процентном соотношении увеличение эффективности солнечной батареи с механизмом поворота необходимо вычислить разность площадей двух криволинейных фигур под красной и синей линиями.

Для вычисления площади данных криволинейных фигур воспользуемся методом аппроксимации. Метод аппроксимации подразумевает использование более простых фигур максимально приближенных к исходной. Для расчета данных фигур воспользуемся прямоугольными трапециями, основания которых будут находиться на оси ординат, длины оснований будут численно равны показаниям мощности в данный час, высота будет находиться на оси абсцисс и равняться 1ч.

Для расчета площади фигуры под линией солнечной батареи с механизмом поворота воспользуемся формулой (3). Для наглядного примера на рисунке 35 продемонстрирована аппроксимация части фигуры.

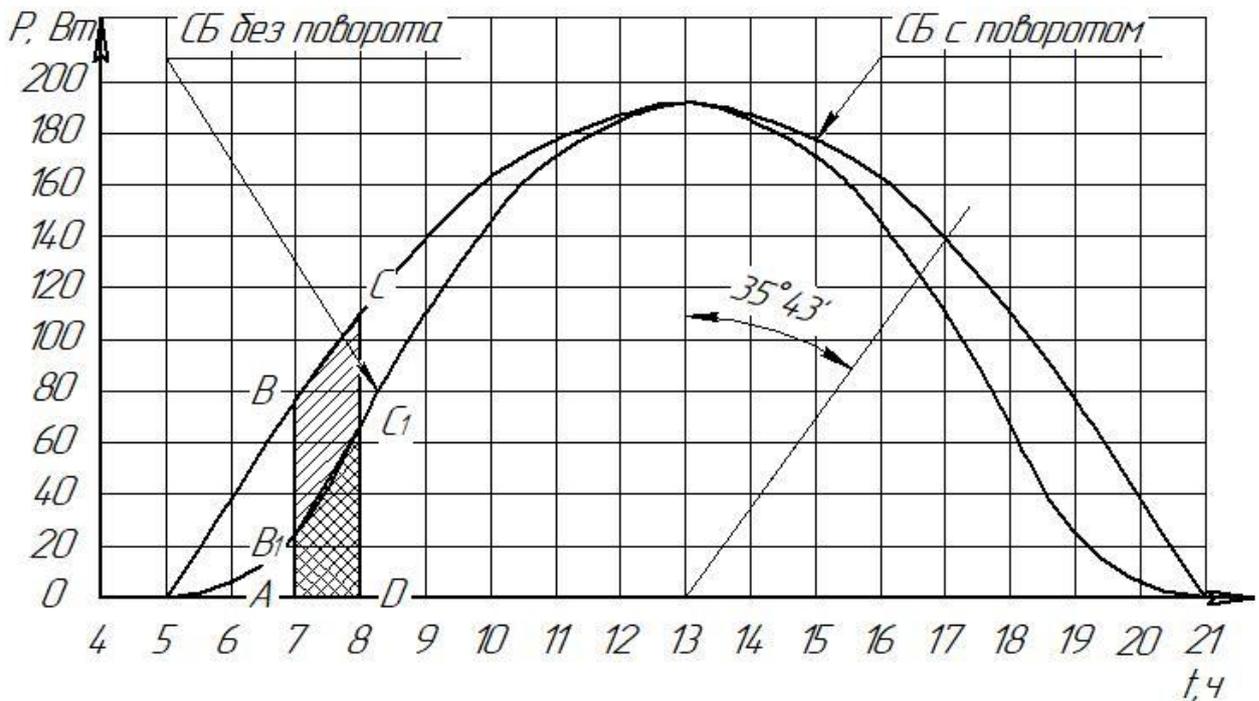


Рисунок 35 – Пример аппроксимирования части фигуры для расчета

$$S_{7,8} = \frac{AB+DC}{2} \cdot AD = \frac{76,72+110,29}{2} \cdot 1 = 93,505, \quad (3)$$

Остальные значения высчитывались аналогичным образом. Для удобства восприятия суммарные значения вычислений площадей двух фигур были сведены в таблицу 18.

Таблица 18 – Суммарные значения искомым площадей

|       |         |
|-------|---------|
| $S_1$ | 1659,07 |
| $S_2$ | 1975,54 |

Эффективность применения батареи с механизмом поворота находится по формуле (4).

$$\varepsilon = \frac{S_2 - S_1}{S_2} \cdot 100\% = \frac{1975,54 - 1659,07}{1975,54} \cdot 100\% = 16,02\%, \quad (4)$$

Общее увеличение эффективности составило 16%.

### 3.2 Второй способ модернизации

Так как солнечные панели преобразуют энергию солнечных лучей в электрическую, то они находятся постоянно под воздействием Солнца, что приводит в свою очередь к их нагреву. В таблице 19 сведены температурные характеристики работы солнечной панели BST 320-60 M.

Таблица 19 – «Температурные коэффициенты

|                                     |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| NOCT*                               | $45 \pm 2^{\circ}\text{C}$    |
| По мощности ( $P_{max}$ )           | $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$     |
| По напряжению ( $U_{oc}$ )          | $-0,29\%/^{\circ}\text{C}$    |
| По току ( $I_{sc}$ )                | $0,05\%/^{\circ}\text{C}$     |
| Температура эксплуатации и хранения | $-40 \div 85^{\circ}\text{C}$ |

\*NOCT – номинальная рабочая температура солнечного модуля» [16].

Как видно из таблицы 19, температурный диапазон работы солнечной панели BST 320-60 M составляет от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Данный температурный диапазон имеет одинаковое значение для солнечных панелей разной мощности для продукции Delta.

Для того, чтобы определить возможный коэффициент полезного действия солнечной батареи при ее перегреве, необходимо воспользоваться формулой (5).

$$\eta_{pi} = \eta_0 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (T_{pi} - 25)), \quad (5)$$

где « $\eta_{pi}$  – КПД солнечной панели, %;

$\eta_0$  – КПД солнечной панели при температуре равной  $25^{\circ}\text{C}$ , %;

$T_{pi}$  – температура поверхности солнечной панели,  $^{\circ}\text{C}$ » [5].

В средней полосе России солнечные батареи могут разогреваться до 70°C, а при движении в сторону экватора, температура солнечных батарей может достигать даже 90°C.

Используя формулу (5), можно подсчитать падение коэффициента полезного действия для солнечной батареи. Подставив данные из таблицы 16 в формулу 2 получим следующие значения.

При температуре панели в 45 °С.

$$\eta_{pi} = 21,16 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (45 - 25)) = 19,2556 \%,$$

При температуре панели в 85 °С.

$$\eta_{pi} = 21,16 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (85 - 25)) = 15,4468 \%,$$

В первом случае, при температуре панели в 45 °С, потери составляют примерно 10%, а во втором случае, при температуре панели в 85 °С, потери составят уже примерно 30%. Исходя из этого можно сделать вывод, что солнечные батареи необходимо охлаждать до рабочей температуры в 25 °С.

Для того, чтобы охладить солнечные панели до данной температуры, можно прибегнуть к установке блока радиатора к самой панели.

Радиаторы охлаждения производят из сплава различных металлов, преимущественно из алюминия. Однако, при более детальном рассмотрении данного вопроса было обнаружено, что радиаторы делают также из специального, теплорассеивающего пластика. Чтобы понять из какого материала изготавливать радиаторы охлаждения, в первую очередь необходимо сравнить коэффициенты теплопроводности разных материалов. В таблице 20 показаны различные материалы и их коэффициенты теплопроводности.

Таблица 20 – Теплопроводность различных материалов

| Материал                  | $\lambda$ , (Вт/м · К) |
|---------------------------|------------------------|
| Серебро                   | 407                    |
| Медь                      | 384                    |
| Золото                    | 308                    |
| Алюминий                  | 209                    |
| Бронза                    | 47-58                  |
| Теплорассеивающий пластик | 1-40                   |
| Пластмасса                | 0,15                   |

Как видно из таблицы 20, наиболее теплопроводным металлом является серебро. По заявлению ООО «Олента» «согласно расчетам “эффективно” работающая величина коэффициента теплопроводности  $\lambda$  эф колеблется в районе 5 – 10 Вт/м · К. Дальнейшее его увеличение уже избыточно и не приведёт к увеличению теплосъема в целом» [11].

Для подтверждения данного заявления были произведены эксперименты. Термопластмасса «CoolPolymers», обычный пластик и алюминий закреплялись на источнике тепла мощностью 5Вт и измеряли перепад температур.

«На рисунке 36 показан наглядный график произведенного эксперимента.

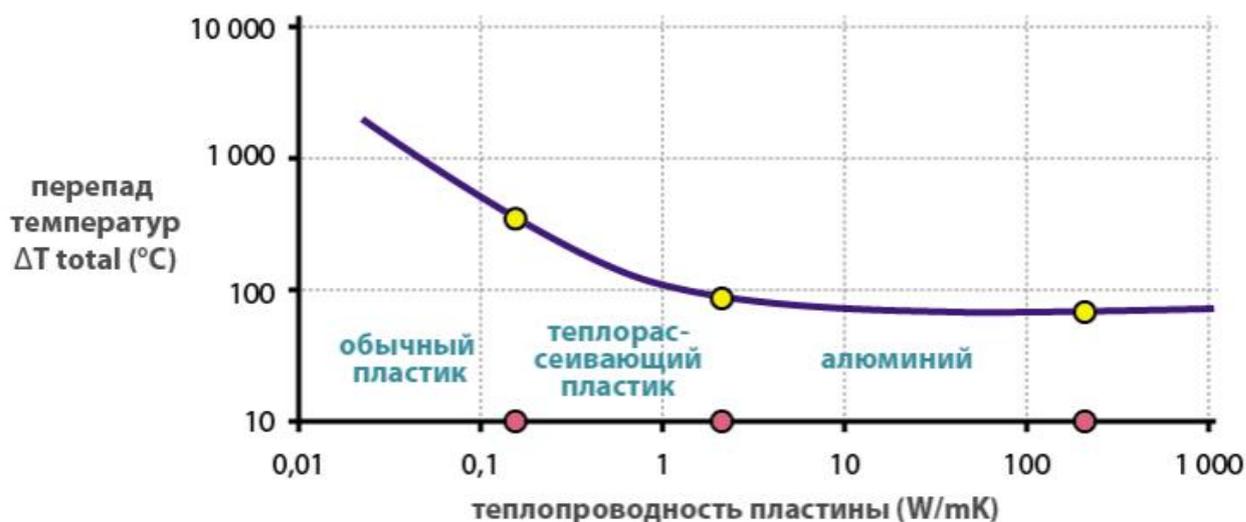


Рисунок 36 – Влияние теплопроводности материала на неравномерность температурного поля при точечном нагреве» [11]

Как видно из графика, при увеличении теплопроводности снижается перепад температур. Однако, следует отметить то, что при десятикратном увеличении теплопроводности, перепад температур снизился примерно в 20 раз, в то время как при последующем практически стократным увеличении теплопроводности, перепад температур снизился незначительно., что подтверждает данное заявление.

Также на сайте ООО «Олента» присутствуют иллюстрации сравнения теплоотсеивающей ппсамассы и обычного пластика на экране тепловизора. «На рисунке 37 показана данная иллюстрация.

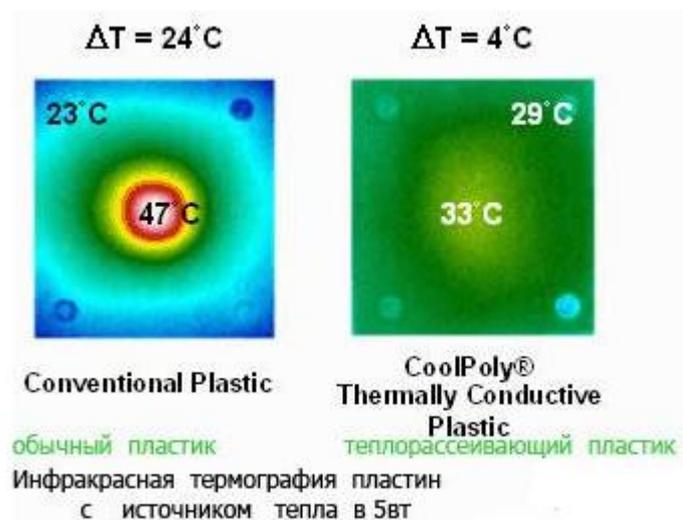


Рисунок 37 – Иллюстрация способности теплорассеивающих пластмасс минимизировать локальные перегревы и перепады температур» [11]

Следует отметить то, что радиаторы из данных теплорассеивающих пластмасс отлично подходят для отвода тепла при воздушном охлаждении без применения вспомогательных устройств, например вентиляторов. В данной работе рассматривается вариант отвода тепла не с целью рассеивания его в открытый воздух, а с возможностью использования отведенного тепла различных целей. Например, выделенное тепло при помощи радиатора и системы труб можно направить на нагрев воды для бытовых нужд, что также сократит расходы электроэнергии на нагрев этой воды.

Возможно ли использование в качестве тела радиатора терморассеивающих пластмасс совместно с трубками для отвода тепла, пока не известно.

На рисунке 38 представлена функциональная схема защиты солнечной батареи от перегрева [2].

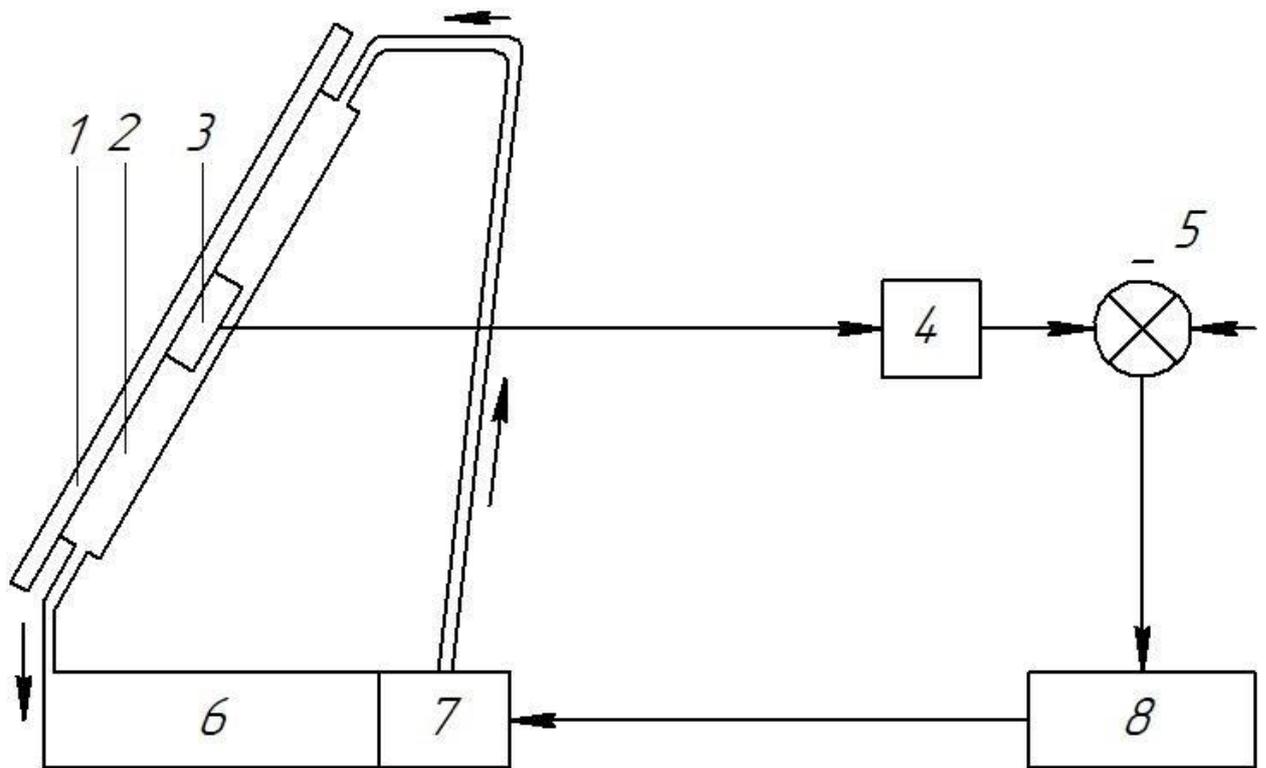


Рисунок 38 – Функциональная схема защиты солнечной батареи от перегрева

На рисунке 30 изображено:

- 1 – солнечная батарея,
- 2 – радиатор,
- 3 – датчик температуры,
- 4 – усилитель сигнала,
- 5 – устройство сравнения,
- 6 – бак с охлаждающей жидкостью,
- 7 – циркуляционный насос,
- 8 – система управления циркуляционным насосом.

На рисунке 39 показан пример расположения датчика температуры на радиаторе.

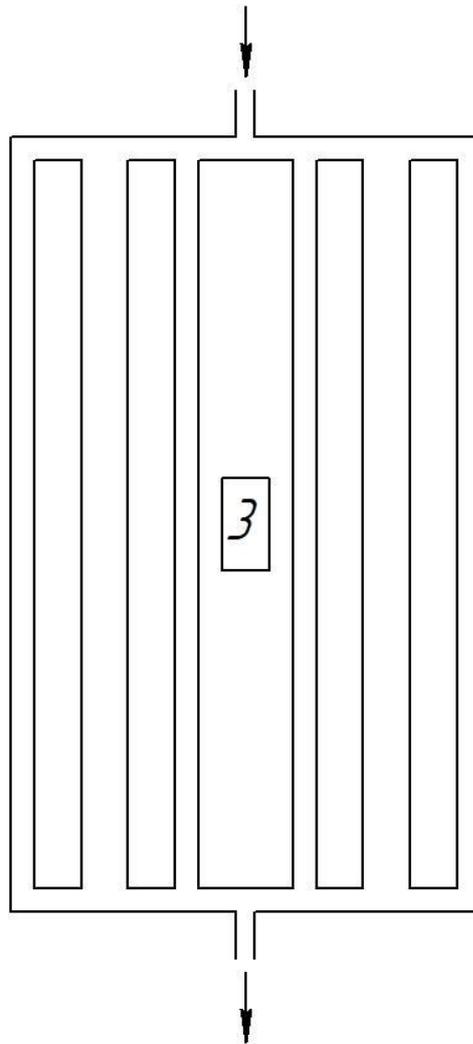


Рисунок 39 – Пример расположения датчика температуры

Датчик температуры (3) выдает электрический сигнал пропорциональный температуре солнечной батареи (1). Далее сигнал поступает в усилитель сигнала (4). После того, как сигнал был усилен, он поступает в устройство сравнения (5), где происходит сравнение сигнала с сигналом с задатчика. При выполнении условия  $\Delta U = U_{\text{ДТ}} - U_3 > 0$  сигнал с устройства сравнения подается в систему управления шаговым двигателем (9). Система управления шаговым двигателем подает команду на запуск шагового двигателя (8), который запускает циркуляционный насос (7). Циркуляционный насос начинает подавать охлаждающую жидкость из бака (6) в верхний патрубок радиатора (2), откуда по многочисленным дренажным каналам

охлаждающая жидкость стекает вниз бак, отбирая при этом тепло от солнечной батареи (1).

Функциональную схему для проверки тестового образца возможно собрать на компонентах, представленных в таблице 21.

Таблица 21 – Компоненты функциональной схемы защиты солнечной батареи от перегрева

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| Датчик температуры   | K1019EM1  |
| Циркуляционный насос | K-9.04-24 |

На рисунках 40 и 41 представлены выбранные компоненты.



Рисунок 40 – Датчик температуры K1019EM1



Рисунок 41 – Циркуляционный насос K-9.04-24

Датчик температуры K1019EM1 на данный момент является одним из большинства распространенных датчиков температур. Для данной системы важен температурный диапазон работы данного датчика, который составляет от  $-45$  до  $125^{\circ}\text{C}$ .

Циркуляционный насос K-9.04-24 запитывается от 24В. Необходимо отметить также высокую производительность выбранного образца, которая составляет 1700л/час. Данный тип насосов широко распространен, поскольку устанавливается в автомобилях для циркуляции охлаждающей жидкости.

Выводы по третьему разделу.

В данном разделе были представлены два варианта повышения эффективности преобразования солнечной энергии солнечными батареями при использовании механизма поворота солнечных батарей и системы охлаждения/поддержания оптимальной температуры. Система поворота совместно с системой поиска экстремума, по предварительным расчетам, увеличивает общую эффективность солнечных батарей до 16%.

При использовании системы охлаждения можно добиться увеличения коэффициента полезного действия фотоэлектрических элементов солнечной батареи до 30% в особенно жаркие дни, при которых температура солнечных батарей может достигать  $85^{\circ}\text{C}$ . Также отводимое тепло можно дополнительно использовать в бытовых нуждах

## Заключение

В выпускной квалификационной работе было документально подтверждено увеличение вырабатываемой электрической мощности солнечных электростанций в России, в связи с чем было сделано вывод по численному увеличению самих солнечных электростанций.

Также во время работы над диссертацией были исследованы достижения иностранных ученых в области солнечной энергетики. Данные исследования направлены в первую очередь на изменение подхода к выбираемому материалу. В одной из рассмотренных статей было предложено заменить кремний на органический сенсбилизатор на основе свекольного сока. Результаты данной статьи показали, что органические солнечные батареи возможно производить, но их эффективность на данный момент мала, поскольку технология достаточно новая. В пользу защиты были выдвинуты аргументы в области безвредности отходов данных солнечных элементов в отличии от солнечных элементов на основе кремния, а также низкая стоимость с примерном временем окупаемости в 1,5 года при благополучном исходе. В другой статье предлагалось использовать 3D печать для изготовления солнечных батарей. Также была обнаружена статья, в которой производилось исследование на предмет использования иных материалов солнечных батарей для космической промышленности, таких как галлий, индий и мышьяк.

При детальном рассмотрении готовых решений от различных производителей было выявлено то, что все производители/поставщики предлагают к установке стационарные солнечные батареи различной мощности, которые жестко крепятся к различным поверхностям в зависимости от пожеланий заказчика. В сети имеется множество информации по поводу установки рекомендуемого угла наклона солнечных батарей в зависимости от времени года, но не было найдено ни одного решения с механизмом поворота солнечных батарей средней мощности по обратной

связи. Также не было обнаружено ни одного решения или исследования на тему необходимости или возможности охлаждения солнечных панелей.

В данной работе произведено исследование по увеличению эффективности преобразования солнечных батарей средней мощности при использовании механизма поворота совместно с отслеживанием точки экстремума до 16%, а при использовании системы охлаждения – до 30%, что в совокупности применения суммарно повысит эффективность преобразования до 46%. Также отведенное тепло при охлаждении солнечных батарей можно использовать в бытовых нуждах

Важно отметить, что все вычисления производились с использованием данных распространенных солнечных батарей, в условиях приближенным к реальным, а также не учитывался параметр антибликового покрытия, поскольку данный параметр у каждого производителя разный.

## Список используемых источников

1. Безладнов С.В. Повышение эффективности преобразования электрической энергии солнечных батарей при помощи использования механизма поворота / С.В. Безладнов // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 3 апреля – 28 апреля) : сборник студенческих работ / отв. За вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2023.
2. Безладнов С.В. Повышение эффективности преобразования электрической энергии солнечных батарей при помощи использования системы охлаждения // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 3 апреля – 28 апреля) : сборник студенческих работ / отв. За вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2023.
3. ГОСТ 19341-84 Энергетика и электрификация [Электронный ресурс] Введ. 1986-01-01. М.: Стандартиформ, 2005. (дата обращения 10.09.2022)
4. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс] Введ. 2014-07-01. М.: Стандартиформ, 2014.
5. Научная электронная библиотека «КиберЛенинка» [Электронный ресурс] URL.: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-peregreva-solnechnyh-paneley-sposob-resheniya-problemy-putyom-elektronnoy-tonirovki/viewer> (формула) (дата обращения 10.05.2023)
6. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году [Электронный ресурс] URL.: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups\\_rep2021.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf) (дата обращения 10.10.2022)

7. Российская Федерация Федеральный Закон Об электроэнергетике [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/901856089/> (дата обращения 10.09.2021)
8. Руководство пользователя солнечные зарядные устройства Delta [Электронный ресурс] URL.: <https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-disk-public%3A%2F%2FABUqO23DS7dwlvpCC%2F3nQcrw3HIOSJTX8GPEEHobdCoCdmiHSKiKtu%2FpjLBZOELBq%2FJ6bpmRyOJonT3VoXnDag%3D%3D&name=Tourist%20Light%206.pdf> (дата обращения 10.05.2023)
9. Сайт производителя ИП «ВольтБайкс» [Электронный ресурс] URL.: <https://www.voltbikes.ru/blog> (дата обращения 10.15.2022)
10. Сайт производителя ООО «Курс» [Электронный ресурс] URL.: <https://zaokurs.ru/prensa/stati/shhelochnyie-akkumulyatoryi-i-populyarnyie-voprosyi-o-nix> (дата обращения 10.15.2022)
11. Сайт производителя ООО «ОЛЕНТА» [Электронный ресурс] URL.: <https://www.olenta.ru/info/teplorasseivayushchie-plastmassy-vyzov-alyuminiyu.php> (дата обращения 10.05.2023)
12. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/solnechnaya-batareya-dlya-zaryadki-telefonov> (дата обращения 10.05.2023)
13. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/solnechnaya-panel-resun-solar-60w> (дата обращения 10.05.2023)
14. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://dtech.su/avtonomcomplex/svetofort7/solart7lto> (дата обращения 10.05.2023)
15. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/solnechnaya-batareya-delta-bst-540-72-m-hc> (дата обращения 10.05.2023)

16. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/solnechnaya-batareya-delta-bst-320-60-m> (дата обращения 10.05.2023)

17. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/solnechnyy-invertor-smartwatt-eco-3k-24v-60a-mppt> (дата обращения 10.05.2023)

18. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/akkumulyator-vektor-vpbc-12-200> (дата обращения 10.05.2023)

19. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/gibridnaya-solnechnaya-elektrostantsiya-yashel-serii-hybrid-7200-mppt-80a> (дата обращения 10.05.2023)

20. Сайт производителя ООО «ЯШЕЛ» [Электронный ресурс] URL.: <https://yashel.shop/product/setevaya-solnechnaya-elektrostantsiya-yashel-serii-grid-100kvt> (дата обращения 10.05.2023)

21. Смирнов И.А., Безладнов С.В. Модернизация преобразовательных установок для асинхронного двигателя // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 3 апреля – 28 апреля) : сборник студенческий работ / отв. За вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2023.

22. Смирнов И.А., Безладнов С.В. Как влияет преобразователь частоты на асинхронный двигатель // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 3 апреля – 28 апреля) : сборник студенческий работ / отв. За вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2023.

23. Технические характеристики стеклянной солнечной батареи батареи Delta BST 320-60M [Электронный ресурс] URL.: <https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-disk-public%3A%2F%2FgMQylswMS8x%2FOJXIUvcA6QuBVB4skeFiwjs17ETA6KOPj239upCirYr1aDRpi6C%2Bq%2FJ6bpmRyOJonT3VoXnDag%3D%3D&name>

=Технические%20характеристики%20стеклянной%20солнечной%20батареи  
%20батареи%20Delta%20BST%20320-60M.pdf&nosw=1 (дата обращения  
10.05.2023)

24. Томашевский Т.Н. Автономные инверторы: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского Университета, 2019. 5 с.

25. Bonsa R.H., Abraham D.W. 3D printing and solar cell fabrication methods: A review of challenges, opportunities, and future prospects [Электронный ресурс] // Results in Optics. 2023. Vol. 11. PP. 1-11. URL.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666950123000378> (дата обращения 20.11.2022)

26. Mahendra S., Deepak S., Piyush P., Sunita S., Dhananjay S., Balendu S.G. Synthesis and performance evaluation of Beta vulgaris based dye-sensitized organic solar cell [Электронный ресурс] // Environmental Technology & Innovation. 2023. URL.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235218642300216X> (дата обращения 29.05.2023)

27. Mugdha V.D., Moharil S. V. A systematic review on enhancing efficiency of solar cells using upconversion [Электронный ресурс] // Materials Today: Proceedings. 2023. URL.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323023829> (дата обращения 20.11.2022)

28. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM [Электронный ресурс] URL.: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/#](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#) (дата обращения 10.05.2023)

29. Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) | Data Access Viewer Enhanced (DAVe) [Электронный ресурс] URL.: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/> (дата обращения 10.05.2023)

30. Wu X., Long J., Sun Q., Wang X., Chen Z., Yu M., Luo X., Li X., Zhao H., Lu S. Accelerated aging of unencapsulated flexible GaInP/GaAs/InGaAs solar cells by means of damp heat and thermal cycling tests [Электронный ресурс] //

Heliyon. 2023. Vol. 9. Issue. 6. URL.:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023036691> (дата  
обращения 20.01.2023)