

Выполнил:
Петрусёв Александр Сергеевич
Россия, г. Томск
ЭНИН, ТПУ

*Повышение эффективности солнечных батарей с
помощью одноосного трекера и акрилового концентратора*

Руководитель:
Сарсикеев Ермек Жасланович

2014г.

Оглавление

Введение.....	3
Строение фотоэлектрического модуля	4
Зависимость доходящей до фотоэлементов мощности от угла падения на них лучей	6
Зависимость площади падения лучей от угла наклона фотоэлементов	6
Зависимость коэффициента отражения от угла наклона батареи и фоновое излучение	6
Расчёт итоговой мощности	8
Практические подтверждения	9
Концентратор и солнечный трекер.....	11
Акриловый концентратор, его строение и принцип действия	11
Аргументирование выбора солнечного трекера	15
Плата управления. Концевики	17
Расчёт шага ориентирования системы для типичных фотоэлектрических модулей	19
Увеличение производительности	22
Высота и азимут солнца в течение дня. Датчик света	22
Расчёт увеличения эффективности установок и экономии денег.....	25
Выводы:	28
Литература:	30

Введение

В наше время для получения энергии человек в подавляющем большинстве использует полезные ископаемые, но их запасы ограничены, что стало особенно заметно в последние годы. К тому же выбросы токсичных веществ в атмосферу, выделяющихся при сгорании топлива, оказывают негативное влияние на окружающую среду. В связи с указанными проблемами применение нетрадиционных источников энергии (геотермальная энергетика, ветроэнергетика, биотопливо, солнечная энергетика) становится вполне оправданным. Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности наиболее перспективна. Сейчас солнечная энергетика растёт бурными темпами – на 30% в год. В 2013 году было введено порядка 30 ГВт солнечных мощностей, тогда как общее количество в 2012 составляло 102 ГВт. Полное количество солнечной энергии, падающей на поверхность Земли за год, составляет величину около $(7.5-10) \cdot 10^{17}$ кВт*ч [1], тогда как нынешнее потребление энергии всем человечеством около $0,0015 \cdot 10^{17}$ кВт*ч. При этом стоит так же учитывать, что среднегодовые поступления солнечной энергии на некоторые южные территории России (например, Астраханская, Ивановская, Ростовская области) выше, чем у Италии, Испании и Германии (стране, наиболее активно применяющей солнечные батареи). Найти своё применение этот вид энергии может даже на тепловых станциях: солнечные установки способны обеспечивать собственные нужды станции, а также быть дополнительным источником полезной отдачи. Особенно актуально использование солнечных энергетических установок в регионах без стационарной сети электропитания. Но и в городской среде солнечная энергетика может быть экономически выгодной и способствовать решению энергетических и экологических проблем. Вышесказанное объясняет актуальность тематики исследования.

К сожалению, в данный момент используется лишь малая часть потенциала данного направления энергетики. Одними из основных факторов, сдерживающих массовое распространение, являются

- 1) Относительно низкая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую.
- 2) Довольно высокая стоимость самих солнечных элементов.

Целью данной научно-исследовательской работы является поиск и осуществление наиболее эффективного способа увеличения мощности источников питания на солнечной энергии и снижение себестоимости за вырабатываемую энергию.

Для её достижения в работе поставлено несколько задач:

- 1) Рассмотреть строение и принцип действия солнечной батареи. На основе полученных знаний сделать собственный рабочий образец и изучить зависимость мощности солнечной батареи от угла падения на неё лучей. Рассмотреть все влияющие на это факторы. Независимо вывести формулы и построить соответствующие графики.
- 2) Разработать и построить модель недорогого устройства, способного сконцентрировать солнечную энергию на элементы, не уменьшая при этом

надёжность традиционных солнечных батарей. Рассчитать его эффективность под различными углами действия

3) Разработать уникальный механизм ориентации солнечных панелей на солнце. Собрать опытный образец своего варианта решения проблемы.

4) Рассчитать экономическую и энергетическую целесообразность проекта.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ) поддерживает идею «зелёной энергетики» - в настоящее время на крыше 10 и 18 корпусов ТПУ установлены 24 солнечные панели суммарной мощностью около 6 кВт. Также ТПУ совместно с ОАО «НИИПП» и администрацией Томской области реализует проект по строительству гибридных электростанций в двух населенных пунктах – Алатаево (Парабельский район) и Новоникольское (Александровский). Работа проводилась на примере модернизации солнечных модулей, установленных на 10 корпусе ТПУ. Тем не менее, полученные результаты смогут использоваться как в промышленных масштабах, так и частными потребителями, что является особенно важным.

Часть работ проводилась в лабораториях ОАО Научно-исследовательского института полупроводников (НИИПП) и НИ ТПУ; все поясняющие картинки нарисованы в программе AdobePhotoshopCS4; графики построены в программе Mathcad14.

Строение фотоэлектрического модуля

Солнечная батарея представляет собой один или несколько соединённых фотоэлектрических модулей, каждый из которых состоит из нескольких соединённых фотоэлементов. Фотоэлементы изготавливают из материалов, напрямую преобразующих солнечный свет в электричество. В настоящее время подавляющая часть изготавливается из кремния (в последние годы ещё применяются также тонкоплёночные солнечные элементы, изготовленные из теллурида кадмия, а также более эффективные, но значительно более дорогие элементы из арсенида галлия). Фотоэлемент состоит из двух слоёв с различными типами проводимости, антибликового покрытия (интерференционной плёнки) и контактов для присоединения к внешней цепи. Верхний слой *n* (или *negative*) характеризуется электронным типом проводимости за счёт движения свободных электронов и играет роль катода. Нижний *p* (или *positive*) слой имеет дырочную проводимость и является анодом. Основные составляющие фотоэлектрического модуля указаны на рисунке 1.

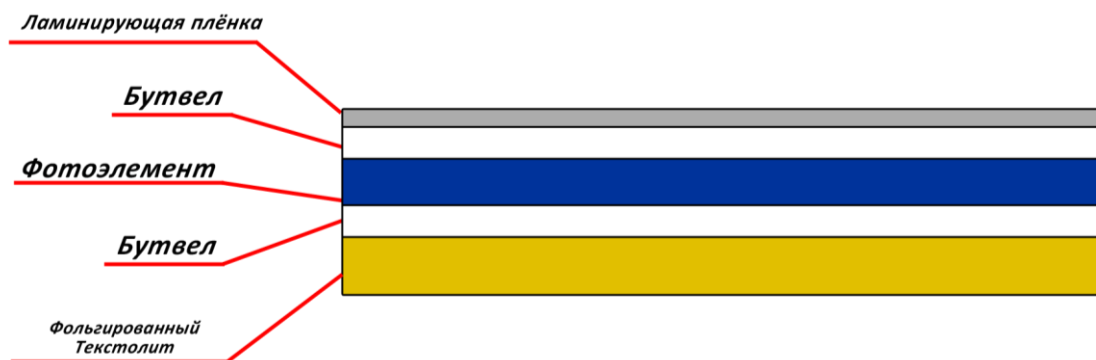


Рисунок 1. Фотоэлектрический модуль в разрезе

Принцип работы фотоэлемента основан на *p-n* переходе - часть электронов из *n* слоя переходит в *p* слой, вследствие чего на границе *p* и *n* слоёв образуется *p-n* переход.

Чтобы его преодолеть, электронам нужна дополнительная энергия. Когда фотон света попадает на n слой, он поглощается электроном, электрон получает энергию и ему удаётся «перескочить» p - n переход, вследствие чего образуется разность потенциалов и начинает идти ток.

Создание собственного фотоэлектрического модуля осуществлялось в лабораториях НИИПП, которые предоставили нужные материалы и необходимое оборудование. Для производства фотоэлементов чаще используют монокристаллический, поликристаллический или аморфный кремний. Наибольший КПД имеют элементы на основе монокристаллического кремния, которые и использовались при создании рабочей модели.

Чтобы изготовить солнечный модуль несколько фотоэлементов соединяются вместе. Для этого элементы размещают на специальной панели и с помощью проводников спаивают между собой. Затем фотоэлементы с двух сторон покрывают поливинилбутиральной плёнкой и помещают на текстолитовую пластину, припаявая к ней крайние контакты. После этого их сверху покрывают ламинирующей плёнкой и запекают в вакуумной печи при температуре в несколько сотен градусов. Для фотоэлектрических модулей значительного размера в качестве покрытия вместо плёнок используется чаще стекло.

Полученные модули соединяют между собой в нужном количестве, параллельно или последовательно, в зависимости от требований к мощности и напряжению. Для проведения исследования были спаяны три модуля (Рисунки 2 и 3), два из них были соединены последовательно и объединены в одну батарею (Рисунок 3).

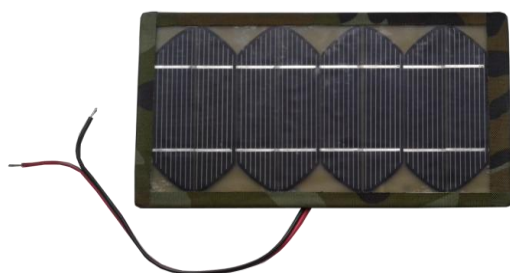


Рисунок 2. Готовый фотоэлектрический модуль

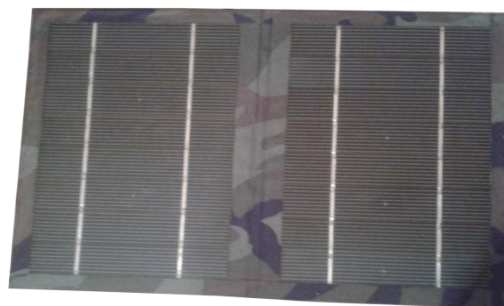


Рисунок 3. Два фотоэлектрических модуля, соединенных последовательно

Очевидно, что итоговая мощность вырабатываемой энергии зависит в первую очередь от количества падающей на батарею солнечной радиации. Следовательно, чем больше площадь модулей и их КПД, тем большее количество электричества мы получаем на выходе. Однако эффективность работы солнечной батареи зависит также от температуры фотоэлементов (чем она выше, тем меньше КПД), а также от угла падения лучей на батарею[2].

Зависимость доходящей до фотоэлементов мощности от угла падения на них лучей

Зависимость площади падения лучей от угла наклона фотоэлементов

Рассмотрим две батареи: одна расположена перпендикулярно линии падения лучей, другая под углом в 45 градусов. Обозначим площадь падения лучей на первую батарею за S . Проведём перпендикуляр из конца второй батареи к земле, площадь падения лучей на вторую равна примерно $0,7S$. Несложно прийти к выводу, что площадь падения лучей в процентах высчитывается по формуле:

$$y = 100 * \cos(x), \quad (1)$$

где x – угол между линией падения лучей и нормалью к плоскости батареи (в градусах).

Построим график, используя формулу (1)

Из рисунка 4 можно заметить, что с увеличением угла падения лучей площадь падения монотонно убывает.

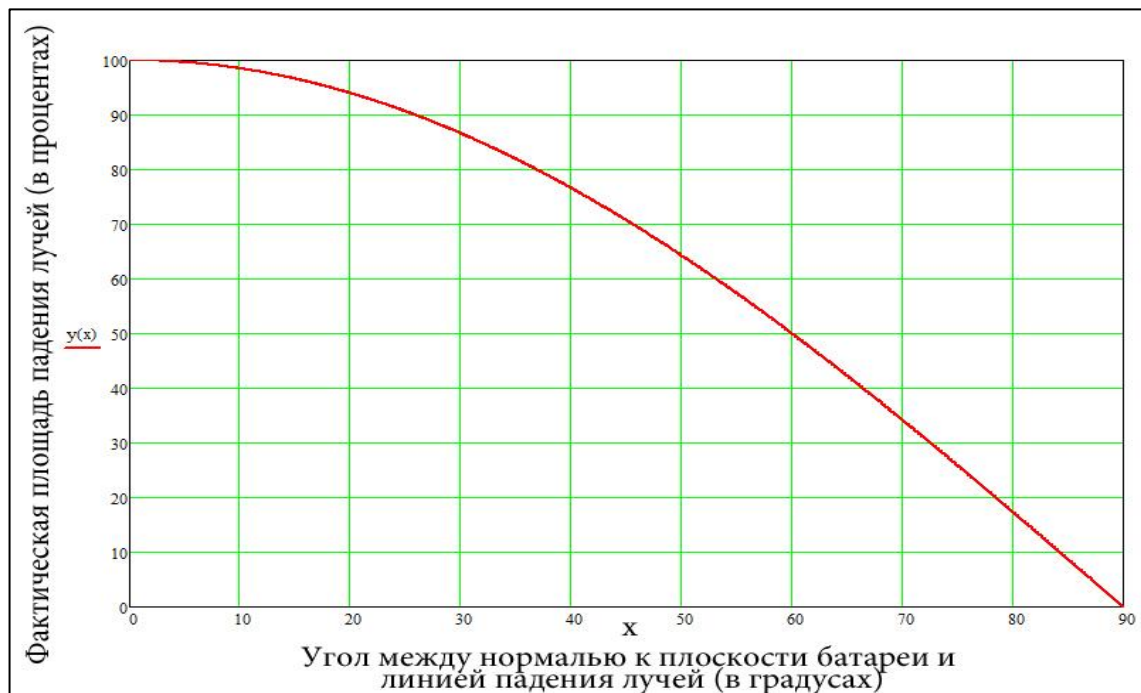


Рисунок 4. Зависимость площади падения лучей от угла между линией лучей и нормалью к батарее

Зависимость коэффициента отражения от угла наклона батареи и фоновое излучение

Помимо площади падения лучей стоит учитывать отражение лучей от различных поверхностей. При падении света на батарею, часть света поглощается, а часть отражается (количество отражённого излучения зависит от поверхности, на которую упали лучи, и от угла падения лучей). С другой стороны, часть излучения, отражённого от других поверхностей, попадает на батарею и поглощается ею. Это излучение называется

фоновым и не зависит от угла наклона батареи, являясь константой, и составляя примерно 20% от общего излучения, падающего на фотоэлементы [2].

Чтобы получить зависимость от вышеуказанных факторов, воспользуемся формулами Френеля для отражения волн, поляризованных перпендикулярно и параллельно плоскости падения [3]:

$$p(x, r) = \frac{tg^2(x-r)}{tg^2(x+r)}; \quad (2)$$

$$f(x, r) = \frac{\sin^2(x-r)}{\sin^2(x+r)}, \quad (3)$$

где p – коэффициент отражения волны, поляризованной в плоскости падения

f – коэффициент отражения волны, поляризованной перпендикулярно плоскости падения,

x – угол падения,

r – угол преломления.

При нормальном падении света на вещество ($x=0$) формулы дают значение [3]:

$$p(0) = f(0) = \frac{(n-n_1)^2}{(n+n_1)^2} = z, \quad (4)$$

где n – показатель преломления среды, в которую попадает луч,

n_1 – показатель преломления среды, из которой движется луч.

Однако, в формулах (2) и (3) зависимость ведётся от двух величин – углов падения и преломления, поэтому воспользуемся законом преломления Снеллиуса [4]. Он гласит, что отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред, которая называется коэффициентом преломления:

$$n = \frac{\sin(x)}{\sin(r)} \quad (5)$$

Коэффициент преломления для каждого материала свой. Ламинирующая плёнка, которая используется при покрытии модулей в НИИПП (а соответственно и от которой идёт отражение лучей), поставляется американской компанией RoyalSovereign, делающей её из полиэстера[5]. Показатель преломления полиэстера равен $n=1,55$. Примечательно, что примерно такой же показатель преломления имеет стекло, поэтому ниже приведённые расчёты применимы и для солнечных батарей, состоящих из модулей со стеклянным покрытием. Выразим из формулы (5) угол преломления, подставим его в формулы (3) и (4), получаем выражения для коэффициента отражения волны, поляризованной параллельно плоскости падения (6) и выражения для коэффициента отражения волны, поляризованной перпендикулярно плоскости падения (7) и найдём их среднее арифметическое (8), так как солнечный свет можно представить как сумму двух линейно поляризованных волн равной интенсивности, в которых колебания происходят соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости падения:

$$p(x) = \frac{tg^2(x - \arcsin(\frac{\sin(x)}{n}))}{tg^2(x + \arcsin(\frac{\sin(x)}{n}))}; \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{\sin^2(x - \arcsin(\frac{\sin(x)}{n}))}{\sin^2(x + \arcsin(\frac{\sin(x)}{n}))}; \quad (7)$$

$$K(x) = 100 * \frac{p(x) + f(x)}{2}. \quad (8)$$

Зависимость коэффициента отражения естественного света от поверхности фотоэлектрического модуля обозначена на Рисунке 5 линией 2. Можно заметить, что при небольших отклонениях коэффициент отражения невелик и начинает резко возрастать только после отметки в 40 градусов.



Рисунок 5. Зависимость коэффициента отражения от угла падения лучей

Расчёт итоговой мощности

Подставим формулы (4) и (8) в формулу (1), учитывая фоновое излучение, получим выражение для мощности солнечной радиации в процентах, дошедшей до фотоэлемента:

$$W(x) = 80 * \cos(x) (100 - K(x)) + 20 * (1 - z) \quad (9)$$

На Рисунке 6 показана зависимость W от x . При перпендикулярном угле падения лучей на батарею до фотоэлементов доходит около 96%. Эта цифра изменяется незначительно при отклонениях до 10 градусов, но при повышении данного порога потери в мощности становятся весьма ощутимыми и становятся выше 80% при угле в 90 градусов, когда падающая на батарею мощность становится равна фоновому излучению.

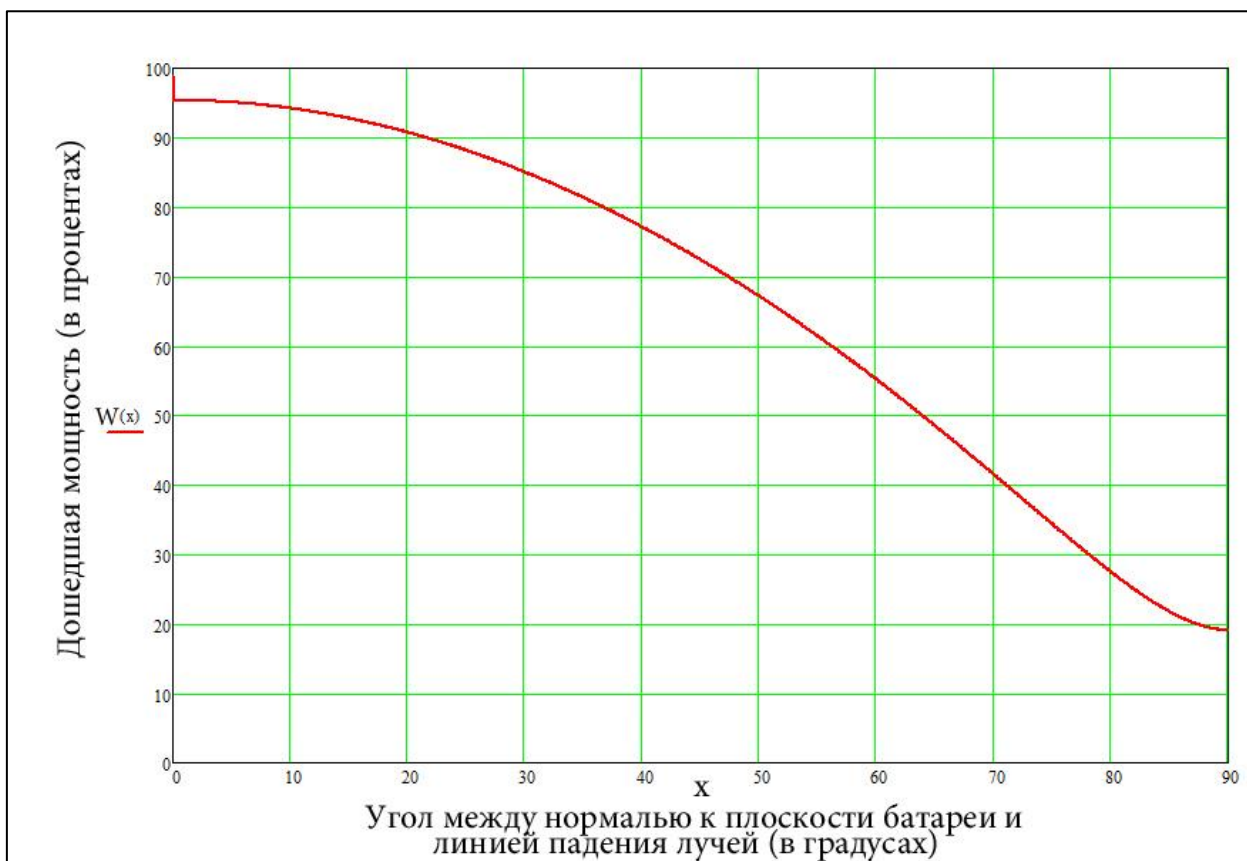


Рисунок 6. Зависимость мощности батареи от угла падения на неё лучей

Практические подтверждения

Полученные теоретические выкладки были проверены экспериментально. Для реализации эксперимента была сооружена специальная стойка, на которой ранее произведённый фотоэлектрический модуль мог быстро принимать устойчивые положения с шагом в 15 градусов. Вычисления проводились на крыше НИИПП в полдень ясного дня с помощью мультиметра и пиранометра, предоставленных заводом (Рисунки 7,8).



Рисунок 7. Измерения суммарной солнечной радиации

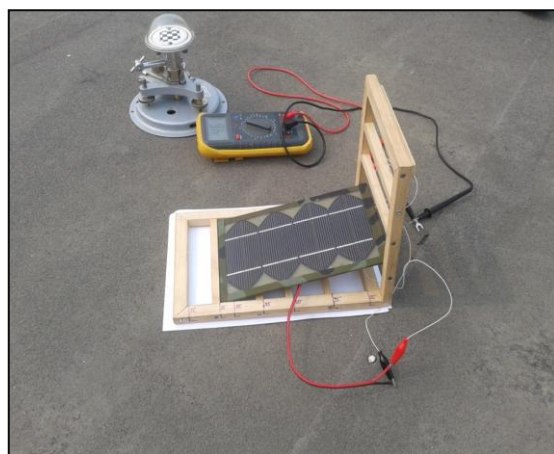


Рисунок 8. Измерение мощности фотоэлектрического модуля

Ход опыта:

Батарея была установлена в начальное положение перпендикулярно линии падения лучей с помощью трубки, в которой имелось продольное сквозное отверстие (ориентация происходила до появления яркой светящейся точки под трубкой). Затем с помощью аналогично установленного пиранометра было измерено количество суммарной солнечной радиации, падающей на 1 квадратный метр, перпендикулярный линии падения лучей.

После этого были произведены измерения силы тока короткого замыкания и напряжения холостого хода батареи при углах между нормалью к фотоэлектрическому модулю и линией падения лучей в 0, 15, 30, 45, 60, 75, и 90 градусов. Количество измерений для каждого угла равнялось трём. Среднее арифметическое измерений заносилось в таблицу и отмечалось на графике.

Результаты измерений показаны в Таблице 1:

Угол наклона батареи (в градусах)	0	15	30	45	60	75	90
Напряжение ХХ (в вольтах)	4.28 4.27 4.28 4.28	4.27 4.28 4.28 4.28	4.26 4.24 4.25 4.25	4.25 4.26 4.25 4.25	4.25 4.25 4.24 4.22	4.23 4.24 4.24 4.24	4.22 4.24 4.23 4.23
Ток КЗ (в миллиамперах)	764.1 759.3 761.5 761.2	729.1 746.5 732.5 721.8	688.9 656.5 672.5 672.2	597.2 594.1 588.2 573.3	431.3 464.6 449.5 452.7	286.2 279.9 278.5 269.4	151.3 164.6 157.6 156.9
Дошедшая мощность (в процентах)	95.5%	91.9%	84.3%	73.7%	56.4%	34.9%	19.8%

Таблица 1. Результаты экспериментальных измерений 30 июля, 2012. Время измерений 12:00-12:10

Небольшое число измерений для каждого угла обусловлено тем, что измерения нужно было проводить в наиболее кратчайшие сроки. В противном случае суммарная солнечная радиация, приходящаяся на 1 квадратный метр, могла сильно поменять своё значение за счёт движения солнца.

Контрольные точки измерений были нанесены на график (Рисунок 9). В результате было получено, что точки и график практически совпадали. Небольшие отклонения объясняются тем, что измерения проводились не мгновенно, а в течение десятиминутного промежутка времени, за который мощность излучения немного изменилась, а также погрешностью ориентирования на солнце и измерительных приборов

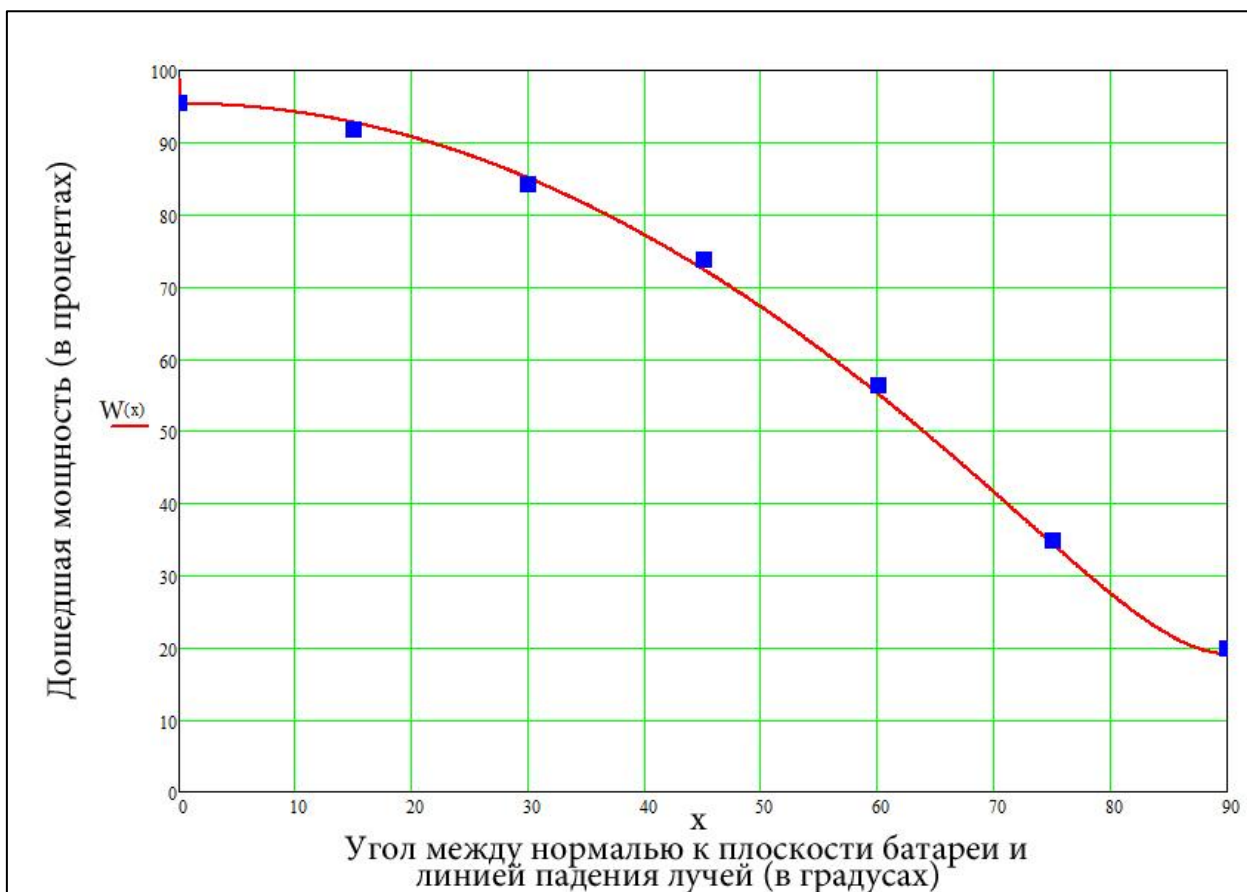


Рисунок 9. График выведенной функции с нанесёнными на него контрольными измерениями

Эксперимент подтвердил гипотезу и выведенную для неё формулу (9) о зависимости мощности батареи от угла падения на неё лучей, что позволило использовать её и в дальнейшей работе.

Концентратор и солнечный трекер

Акриловый концентратор, его строение и принцип действия

Для повышения КПД солнечных элементов можно:

- Использовать тандемные установки, многослойные фотоприёмники на гетеропереходах. Но их стоимость гораздо выше обычных фотоэлектрических панелей, поэтому в соотношении цена\эффективность мы фактически не только не получаем никакого выигрыша, но и проигрываем
- Применять двусторонние фотоэлектрические преобразователи, что незначительно увеличивает эффективность при значимом увеличении цены
- Добавлять различные концентраторы, которые позволяют использовать малые солнечные модули для выработки энергии, сопоставимой с той, которую вырабатывают в разы большие батареи при тех же условиях
- Оборудовать солнечные элементы системой слежения за солнцем (солнечным трекером)

Единственным способом значительно снизить себестоимость энергии, вырабатываемой качественными солнечными элементами, является установка концентратора.

Концентратор представляет собой устройство, осуществляющее сбор солнечного потока с большей площади и направляя его на солнечные элементы с меньшей площадью. Основные типы концентраторов, представленные в данный момент на рынке это зеркала с формой тел вращения (параболические зеркала), фокусирующие линзы (линзы Френеля) и системы зеркал.

К сожалению, данные концентраторы имеют ряд весомых недостатков, которые ограничивают их массовое распространение. Для параболических концентраторов это, в первую очередь, крайняя массивность и громоздкость, а также проблемы с эксплуатацией – из-за чашеобразной формы концентратора в нём скапливаются атмосферные осадки, а конденсат внутри резко снижает эффективность работы. К тому же данные концентраторы требуют точных систем слежения за солнцем, систем охлаждения, а также имеют довольно высокую стоимость, при этом повышая риск поломки и требуя мощных двигателей из-за своих габаритов. Линзы Френеля имеют меньшие размеры, которые, тем не менее, по-прежнему значительны в сравнении с традиционными солнечными батареями. К тому же цены на данные концентраторы ещё более высоки, системы охлаждения требуются более мощные, а солнечные трекеры ещё более точные (с точностью наведения до 0,05 градуса). Другие представленные решения имеют ещё больше минусов, не получив значительного распространения в мире.

В данной работе представляется решение, выгодно отличающееся от своих аналогов – акриловый (или планарный) концентратор, названный так из-за его основного составного материала и толщины – менее 1 см. Планарный концентратор представляет собой лист оргстекла со специальной внутренней и внешней структурой, на торцах которого расположены фотоэлементы.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является солнечный планарный световод по патенту RU № 2133415, МПК F24J2/42, опубликован 20.07.1999 г.

Известный планарный световод выполнен в виде оптического клина, где на рабочей грани, воспринимающей солнечное излучение, установлен светоотклоняющий элемент, представляющий собой решетку из расположенных рядами зеркальных экранов с двухсторонними зеркальными поверхностями.

В известном световоде падающий свет отклоняется зеркалами светоотклоняющего элемента к рабочей грани клина, проникает внутрь последнего, где, испытывая полное внутреннее отражение, концентрируется на его основании.

Основным его недостатком, обусловленным потерей значительной части лучей, не испытавших полного внутреннего отражения в оптическом клине, является низкий коэффициент концентрации солнечной энергии.

Предлагаемый световод (планарный концентратор) имеет высокий коэффициент концентрации, вплоть до 5,5 кратной концентрации. Такое значение удаётся получить благодаря второму клину, установленному своей рабочей гранью смежно с первым, причём между гранями клиньев имеется зазор, заполненный специальной оптической средой.

На рисунке 10 схематически представлен разрез планарного концентратора. Он содержит оптические клинья 1,2 с рабочими гранями 3,4 и торцами 5, на которых

расположены фотоэлементы, светоотклоняющий элемент 6 и зазор 7, заполненный клеем 8.

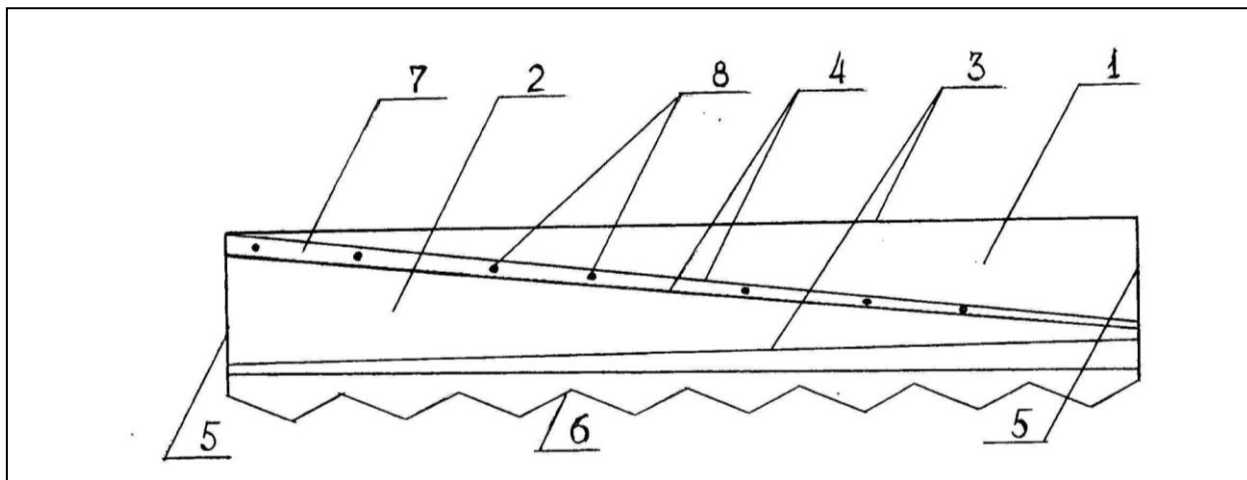


Рисунок 10. Схема акрилового концентратора в разрезе

Принцип действия концентратора основан на явлении полного внутреннего отражения. Солнечные лучи, падая на рабочую грань 3 оптического клина 1, частично отражаются, а частично, испытывая преломление на границе раздела, проникают внутрь клина. В зависимости от коэффициента преломления материала клиньев, оптической среды 7 и угла клина лучи, попавшие в клин 1, либо отражаются от его грани 4, либо проходят сквозь нее и оптическую среду 7, имеющую показатель преломления, меньший, чем показатели преломления оптических клиньев 1 и 2, внутрь клина 2. При этом, вследствие эффекта полного внутреннего отражения лучи, отразившиеся от грани 4 клина 1, попадают в конечном счете на основание 5 оптического клина 1. Лучи, прошедшие в оптический клин 2, проходят через его рабочую грань 3 и попадают на светоотклоняющий элемент 6, отражаясь им обратно в оптические клинья 1 и 2. Элемент 6 выполнен таким образом, что отраженные от него лучи входят в клинья 1 и 2 под углами, обеспечивающими их полное внутреннее отражение внутри клиньев, с дальнейшим попаданием их на основания 5 клиньев.

Данный концентратор имеет оптический КПД порядка 75%, связанный с потерями энергии при поглощении излучения материалом концентратора и частичном отражении излучения на каждой границе материалов. Геометрическая эффективность лучей, доходящих до фотоэлементов на торцах, рассчитывалась методом Монте-Карло в программе ZEMAX. На рисунке 11 показана мощность $P(i)$ в процентах, попадающая на фотоэлементы, в зависимости от продольного угла отклонения от нормали i при фиксированном нормальном падении лучей по поперечной плоскости.

Как видно из графика, концентратор крайне эффективен при продольном угле отклонения в диапазоне от -3 до $-0,1$ градусов, после чего его мощность значительно уменьшается.

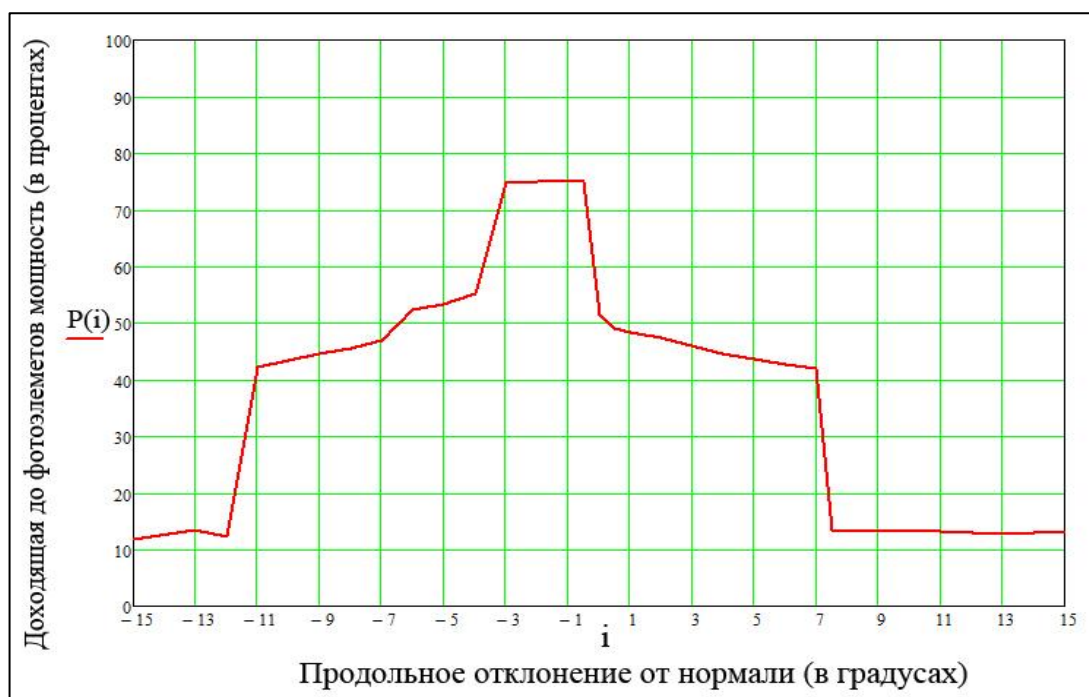


Рисунок 11. Зависимость мощности на фотоэлементах от угла отклонения концентратора
(-2 градуса по поперечному отклонению)

Также были построены зависимости мощности в процентах на фотоэлементах в зависимости от поперечного угла отклонения от нормали при фиксированных углах в 0 и -2,5 градуса продольного отклонения (Рисунки 12 и 13). Из приведённых графиков видно, что концентратор имеет значительную эффективность при углах отклонения от -20 до +20 градусов при продольном в 0 градусов (мощность резко падает после отклонения менее -0,1 градуса) и от -30 до +30 при продольном -2,5 градуса. Это даёт возможность ориентировать концентратор только по одной продольной оси, которая гораздо более чувствительна к направлению солнечных лучей.

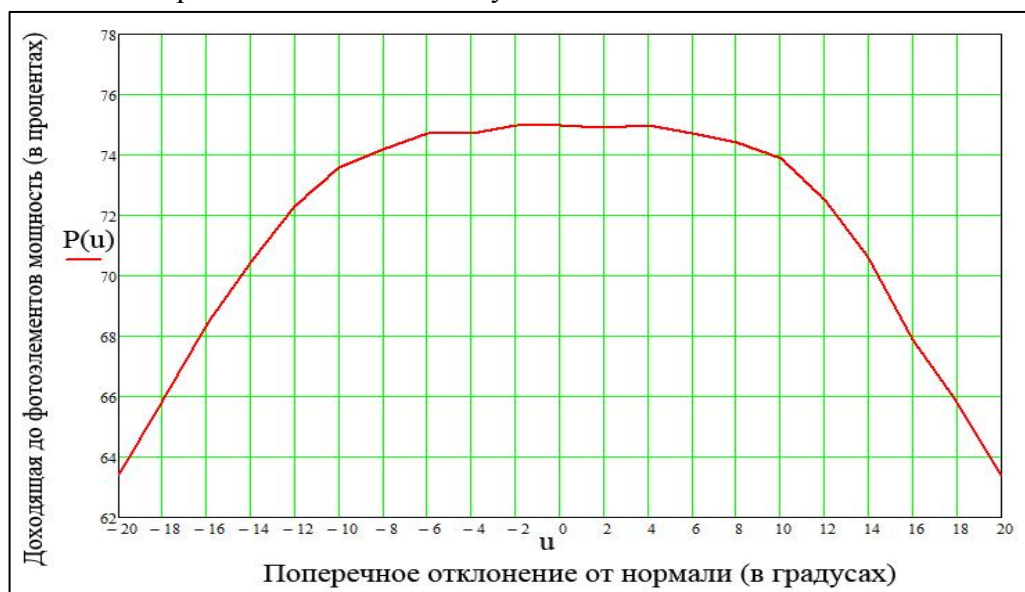


Рисунок 12. Зависимость мощности на фотоэлементах от угла отклонения концентратора
(0 градусов по продольному отклонению)

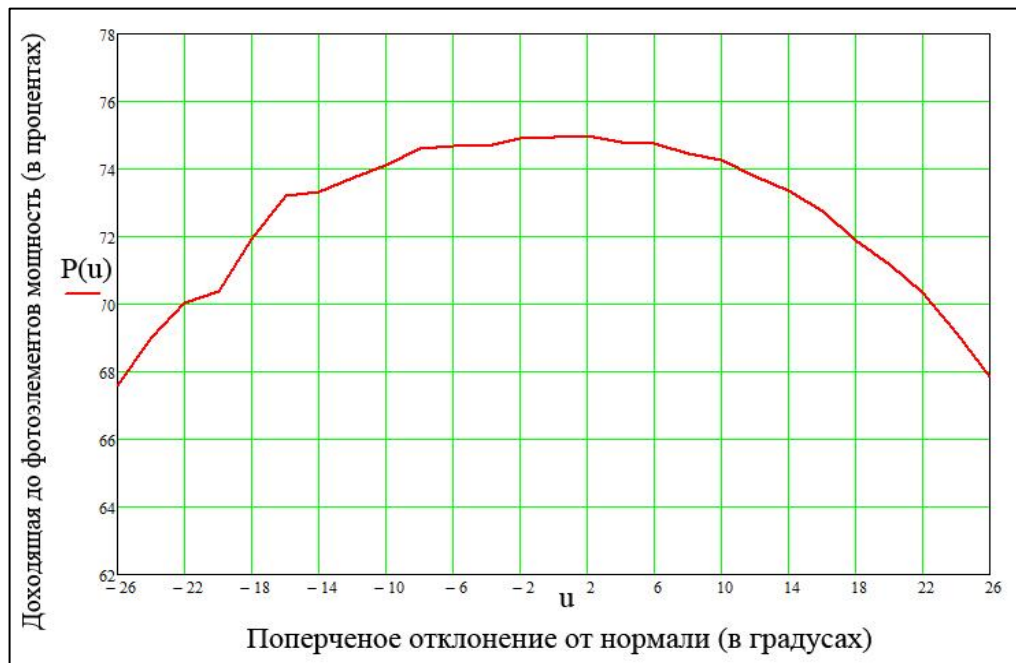


Рисунок 13. Зависимость мощности на фотоэлементах от угла отклонения концентратора
(0 градусов по продольному отклонению)

Обобщая вышеизложенное, точность позиционирования концентратора составляет $\pm 1,5$ градуса по одной оси и ± 30 градусов по другой. Вследствие этого, возможно обойтись ориентированием даже только по одной оси. Но даже при таком раскладе встаёт необходимость применения систем слежения за солнцем.

Аргументирование выбора солнечного трекера

Солнечный трекер позволяет не только увеличивать эффективность работы обычных солнечных батарей, но и необходим для нормальной работы концентрирующих систем. Благодаря тому, что он периодически настраивает батарею на линии падения солнечных лучей, гораздо большее количество солнечной радиации достигает фотоэлементов, при этом значительно меньше отражаясь, а значит, увеличивается итоговая мощность. Для концентраторов, предъявляющих довольно жёсткие требования к углу падения солнечных лучей, система слежения просто незаменима. Для планарного концентратора ограничения на угол отклонения гораздо более мягкие, поэтому главной целью при создании солнечного трекера являлась простота конструкции и низкая цена при надёжности, сравнимой с зарубежными аналогами.

Ориентирование на солнце возможно с помощью одноосевых и двухосевых систем слежения. Если первая способна регулировать фотоэлектрическую панель только по азимуту, то вторая может ориентироваться также и по высоте. Естественно, что фотоэлектрическая панель, оборудованная двухосевой системой, способна выработать наибольшее количество энергии. Но в то же время конструкция двухосевой системы более сложна, сильнее подвержена риску выхода из строя. К тому же цена на двухосевые системы будет значительно выше, но выигрыш в мощности по сравнению с одноосевой

составит не более 10% для солнечных батарей[2] и на 20% для планарного концентратора. В то же время применение одноосевой системы по сравнению со стационарной батареей позволяет увеличить эффективность примерно на 30% (расчёты приведены ниже) и в разы увеличивает эффективность планарного концентратора. Именно поэтому массовое производство одноосевых систем кажется наиболее приемлемым и осуществимым.

Существует несколько основных способов ориентирования на солнце:

- Ручная наводка. Обладает относительно невысокой точностью, к тому же требует оператора, что неудобно
- Пассивная система. Основана на программировании алгоритма движения в течение дня. Высокая точность, не требующая оператора. Но требуется введение поправок движения на каждый день года. Также установка используется только для одного заданного географического положения.
- Активная система.

Активная система наиболее удобна и эффективна. Именно она получила наибольшее развитие.

Разработан и собран собственный демонстрационный образец в уменьшенном масштабе, показывающий принцип действия таких систем (Рисунки 14,15).

Основные составляющие:

- аккумулятор, осуществляющий питание мотора и внешней цепи (1)
- плата управления, регулирующая поворот установки(2)
- мотор, осуществляющий поворот (3)
- концевики, не позволяющие вращаться батарее более чем на 180 градусов, предотвращая наматывание и излом проводов (4)
- солнечная батарея, закреплённая под углом в 45 градусов к горизонту и заряжающая аккумулятор (5)
- рубильник, позволяющий включать и выключать систему (6)
- выходные разъёмы, подключающиеся к внешней цепи и позволяющие за счёт установки питать какие-либо электроприборы (на демонстрации в качестве потребителя используется светодиод на подставке) (7)

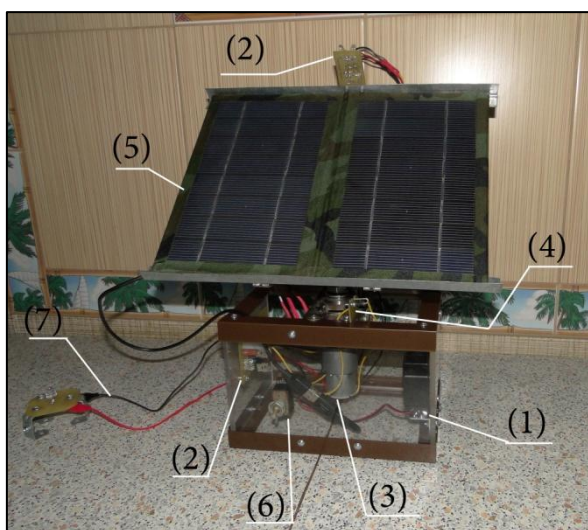


Рисунок 14. Демонстрация основных частей стендовой модели (вид спереди)

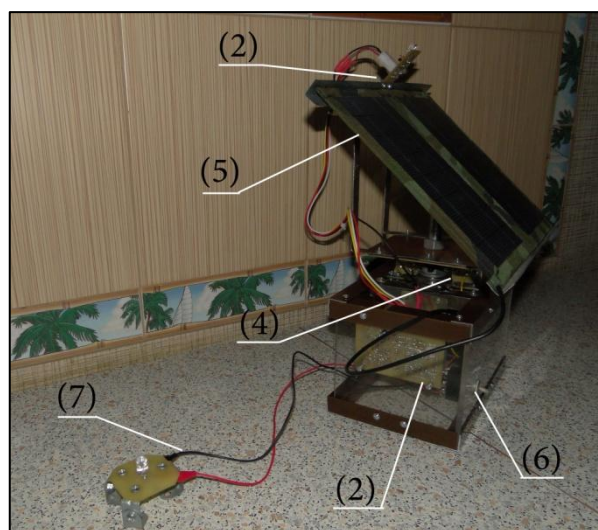


Рисунок 15. Демонстрация основных частей стендовой модели (вид сзади)

Для наибольшей наглядности корпус установки сделан из прозрачного оргстекла, но в проекте решено использовать пластик, который позволяет получить аналогичную прочность за меньшие деньги.

Плата управления. Концевики

Главной частью установки является плата управления. Нарботки платы были взяты с сайта американца Дуэйна Джонсона[6], выложившего их в открытый доступ для любого желающего. Они были модифицированы для более удобной работы и эксплуатации и установлены в систему.

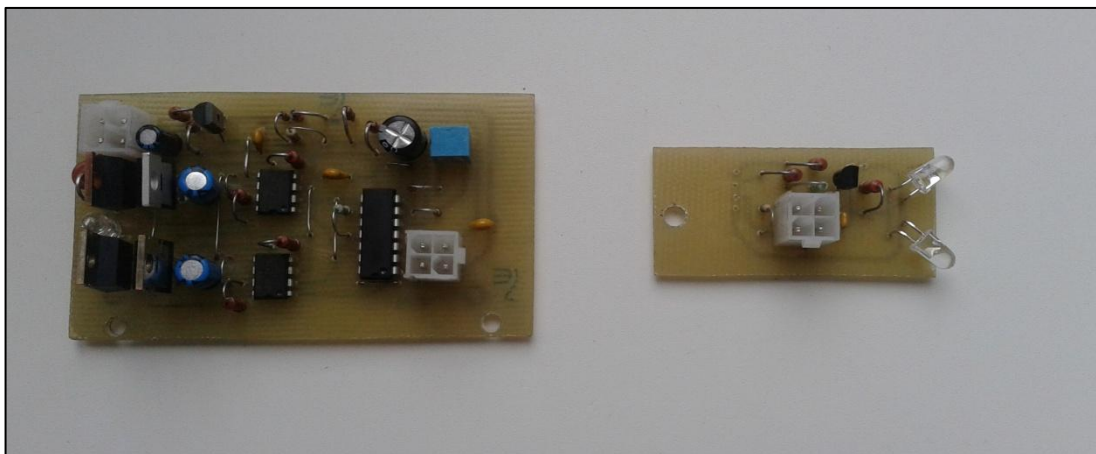


Рисунок 16. Внешний вид платы

Принцип действия платы показан на схеме. Два светодиода (LED1 и LED2) разведены на угол около 30 градусов. Поскольку солнечное излучение, падающее на них, различно, то они посылают соответствующий импульс, усиливаемый транзистором Q5. Далее он параллельно идёт через логические элементы DD3A и DD3B, DD3F, вследствие чего сигналы, доходящие до микросхем DD1 и DD2, являются противоположными. Поэтому микросхемы замыкают противоположные по знаку полюса, начинает течь ток и работать мотор (из одной микросхемы сигнал выходит через LO, а в другой через HO, открывая мосфеты Q1(или Q2) и Q3(или Q4) соответственно). При изменении импульса на противоположный, полюса меняются местами, следовательно, меняется направление тока, а значит и направление движение мотора. Установка останавливается в тот момент, когда излучение, падающее на оба светодиода, одинаково, либо по истечении определённого промежутка времени (около 10 секунд). Часть платы, где расположен реостат R6, отвечает за шаг системы, т.е. не позволяет фотоэлектрической панели ориентироваться без остановки, что приводило бы к большим и бесполезным энергозатратам.

Модификации платы:

- Одна плата была разделена на две. Малая плата крепится отдельно от большой, так как должна находиться перпендикулярно плоскости солнечной батареи. Большая плата соединена с малой с помощью проводов и крепится в любом удобном месте. Разделение платы на две части позволяет разместить их более удобно и аккуратно, а также снижает вероятность поломки. Пунктиром на схеме показано деление платы.
- Возможность быстро и удобно регулировать промежуток времени, через который установка ориентируется на солнце (шаг системы). Дуэйн Джонсон

предлагал делать это с помощью замены конденсатора C2 и резистора R7 на детали с другим сопротивлением и электроёмкостью. Но для этого их приходилось выпаивать. Нами был установлен реостат R7 с большим максимальным сопротивлением, что позволило менять шаг системы любому неподготовленному пользователю, просто изменяя сопротивление на реостате.

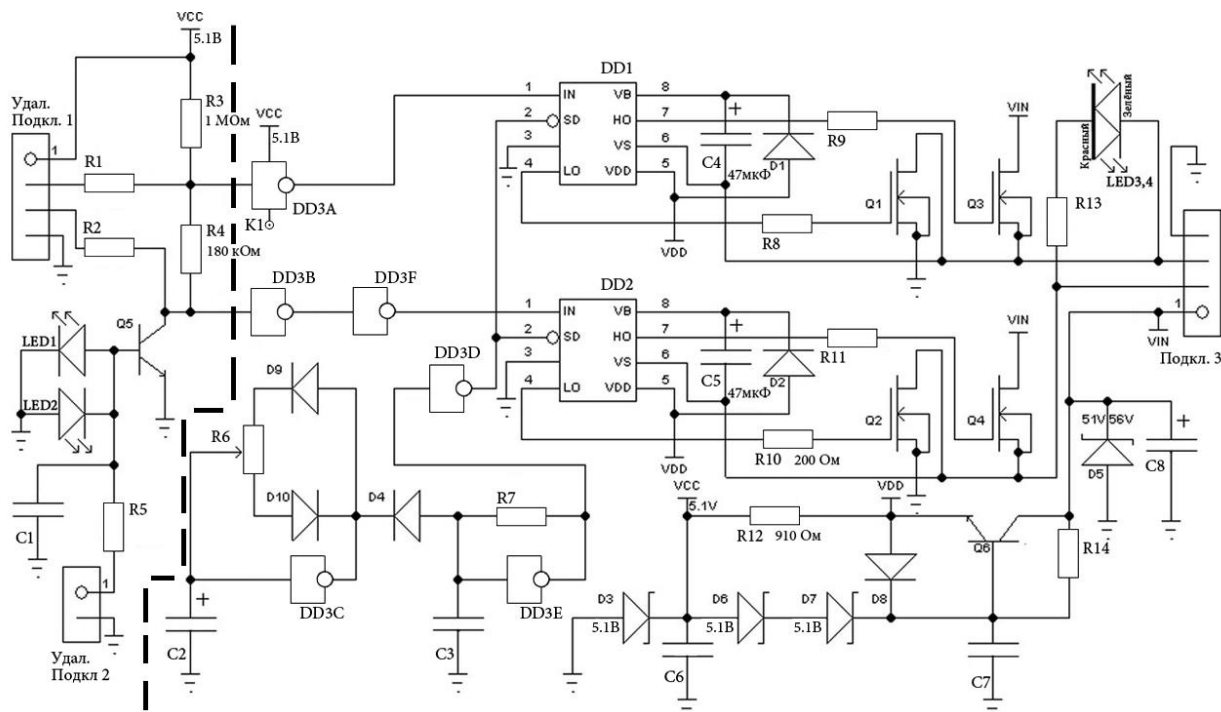


Рисунок 17. Принципиальная схема платы

Датчиками для платы управления служат именно светодиоды, а не фотодиоды. Вследствие того, что принцип действия у них во многом схож, можно использовать более доступные светодиоды вместо более дорогих фотодиодов.

При попадании фотонов света на светодиоды электроны n- слоя выбиваются из дырок, но в большинстве своём рекомбинируют, вследствие того, что не способны преодолеть гораздо более широкий p-n переход, нежели у фотодиодов. Тем не менее, небольшое число электронов всё же преодолевают его. Создаётся разность потенциалов и начинает течь ток, который усиливается транзистором Q5.

Концевики представляют собой две платы, закреплённые около вращающего батарею вала. Их принцип действия основан на оптопаре: при внесении металлической пластины между излучающим светодиодом и принимающим фотодиодом ток прекращает идти в заданную сторону.

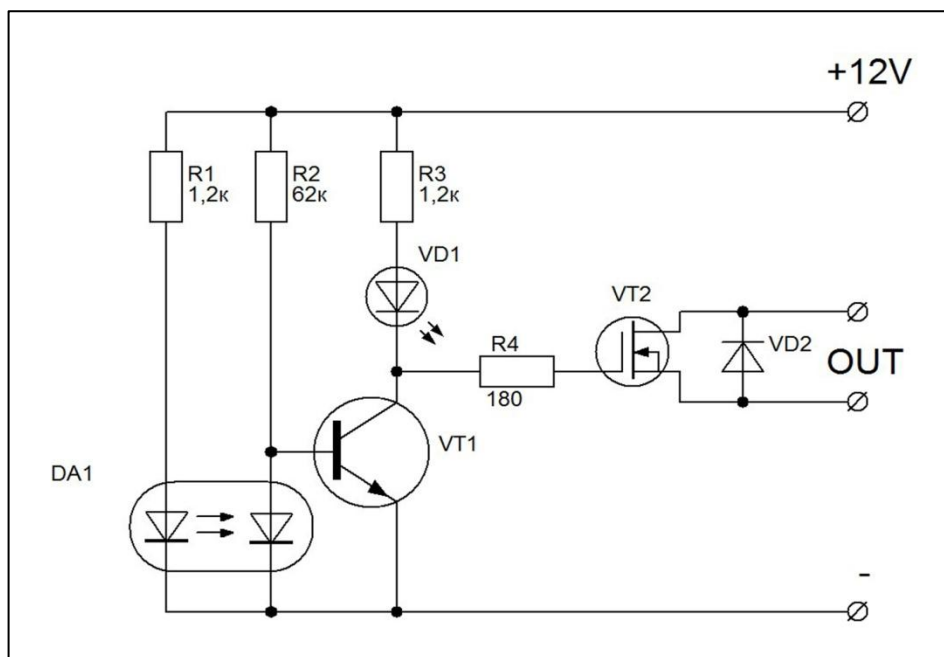


Рисунок 18. Принципиальная схема концевиков

При внесении препятствия между DA1 ток начинает идти через транзистор VT1 и светодиод VD1 (используется в схеме также как индикатор – светится при включении концевиков), в результате чего мосфет VT2 связывается с минусом питания и выходы OUT размыкаются

Расчёт шага ориентирования системы для типичных фотоэлектрических модулей

Если система будет постоянно ориентироваться, то будет постоянное потребление энергии, вырабатываемой фотоэлементами. Следовательно, можно снизить энергопотребление движущихся частей системы, если она будет срабатывать через определённые промежутки времени. Рассчитаем, при каком интервале времени T выигрыш в производительности будет максимальным.

Рассмотрим два случая:

1 случай:

Используемая солнечная установка размещена в какой либо стационарной точке. Изменение шага ориентирования не планируется: посёлки, дачи, пасеки, городские крыши и другие потребители, не требующие от систем ориентирования иных целей, кроме как максимальное увеличение мощности с наименьшими затратами.

В данном случае учтём, что чем больше отклонение от нормали к плоскости рабочей поверхности батареи, тем быстрее идёт снижение итоговой мощности, что наглядно показано на Рисунке 6. Поэтому эффективней ориентировать солнечную панель на то расположение солнца, которое оно достигнет только через определённый промежуток времени.

Предлагаемое решение можно проиллюстрировать на простом примере. Предположим, что система ориентируется раз в 80 минут. За это время солнце смещается по азимуту примерно на 20 градусов. Если использовать нерациональный для указанных

потребителей способ ориентации солнечных панелей, то система во время наведения расположит панели прямо перпендикулярно расположению солнца, позволяя осуществлять максимальную выработку энергии в данный момент времени. Но в течение всех следующих 80 минут солнце будет двигаться в неблагоприятную сторону от солнечной батареи, увеличивая угол между собственными лучами и нормалью к батарее. Усреднённое отклонение солнца за этот промежуток времени составит приблизительно 10 градусов. Теперь же сориентируем панель по предполагаемой методике: панель расположится так, что нормаль к ней будет отклонена от солнечных лучей на 10 градусов вперёд. В течение 80 минут до следующей ориентации солнце половину времени будет приближаться к наилучшему положению, уменьшая отклонение с 10 градусов до нуля, и ещё половину времени продолжать отклоняться в неблагоприятное положение, вплоть до 10 градусов. Следовательно, усреднённое отклонение за данный промежуток времени составит всего 5 градусов, что позволит ещё более повысить эффективность солнечной установки в целом. Данный метод предлагает ориентировать панель вперёд на половину градусной меры, которую проходит солнце между ориентированием.

Для определения оптимального интервала T системы будем использовать уже выведенную формулу зависимости мощности от угла падения лучей на фотоэлементы (9).

По климатическим данным NASA[7] средняя дневная сумма солнечной радиации в Томске и Новосибирске порядка $2,91 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$.

Световой день в течение года колеблется от 9 до 16 часов, усредним его и примем за 13 часов. То есть в среднем за 1 час на 1 квадратный метр поверхности, перпендикулярной линии падения лучей, падает около $224 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ солнечной радиации.

В расчёте будем использовать физические параметры системы с использованием 2 установок АИЭП-2, суммарной установленной мощностью 720 Вт (при $1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$), весом не более 76 кг и площадью $5,12 \text{ м}^2$ (4 модуля $800 \times 1600 \text{ см}$), которые производятся в томском НИИПП. Для вращения солнечной системы такого веса и размера подходит мотор компании «ЭЛ-МОТО» на 60 Вт . Во время ориентировании установка работает около 10 секунд. Т.е. при каждом ориентировании мотор потребляет около $600 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ или

$$\frac{1}{6} \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Найдём, при каких условиях выработанная за час энергия окажется максимальной. За T обозначим шаг системы (в минутах).

$W(x)$ – Формула для зависимости мощности от угла падения лучей (9)

$P(T)$ – Количество выработанной за час энергии

Q – Среднее значение суммарной солнечной радиации, падающей на 1 м^2 за 1 час

L – Установленная мощность рассматриваемых солнечных батарей (720 Вт)

По данным баз данных NASA[7], средняя высота солнца над горизонтом в течение дня около 30 градусов. Так как угол наклона фотоэлектрических модулей к горизонту составляет обычно около 45 градусов, то отклонение лучей по высоте от нормали к фотоэлементам будем брать 15 градусов.

Среднее изменение положения солнца по азимуту составляет около 14,5 градусов в час[7]. Но как посчитать количество дошедшей до фотоэлементов в течение часа солнечной радиации, ведь угол отклонения постоянно меняется? На небольших отклонениях (меньше 20 градусов) изменение мощности почти линейно, будем считать, что отклонение солнечного света по азимуту равнялось среднему арифметическому между

минимальным и наибольшим отклонением в течение этого промежутка времени. Поскольку наименьшее – ноль, то будем брать половину от наибольшего отклонения. Так как из выше предложенной методики максимальное отклонение будет составлять

половину всей градусной меры, то угол будет равняться $\frac{T}{60} * \frac{(\frac{14,5}{2} - 0)}{2} = \frac{14,5 * T}{240}$

И формула примет вид:

$$P(T) = \frac{Q}{1000} * L * W(15) * W\left(\frac{T * 14,5}{240}\right) - \frac{10}{T} \quad (10)$$

Зависимость вырабатываемой мощности от шага системы показана на Рисунке 19. Как можно заметить, наибольшей эффективности система достигает при шаге ориентирования 35-60 минут. Будем считать время 1 час оптимальным, используя его в дальнейших расчётах.

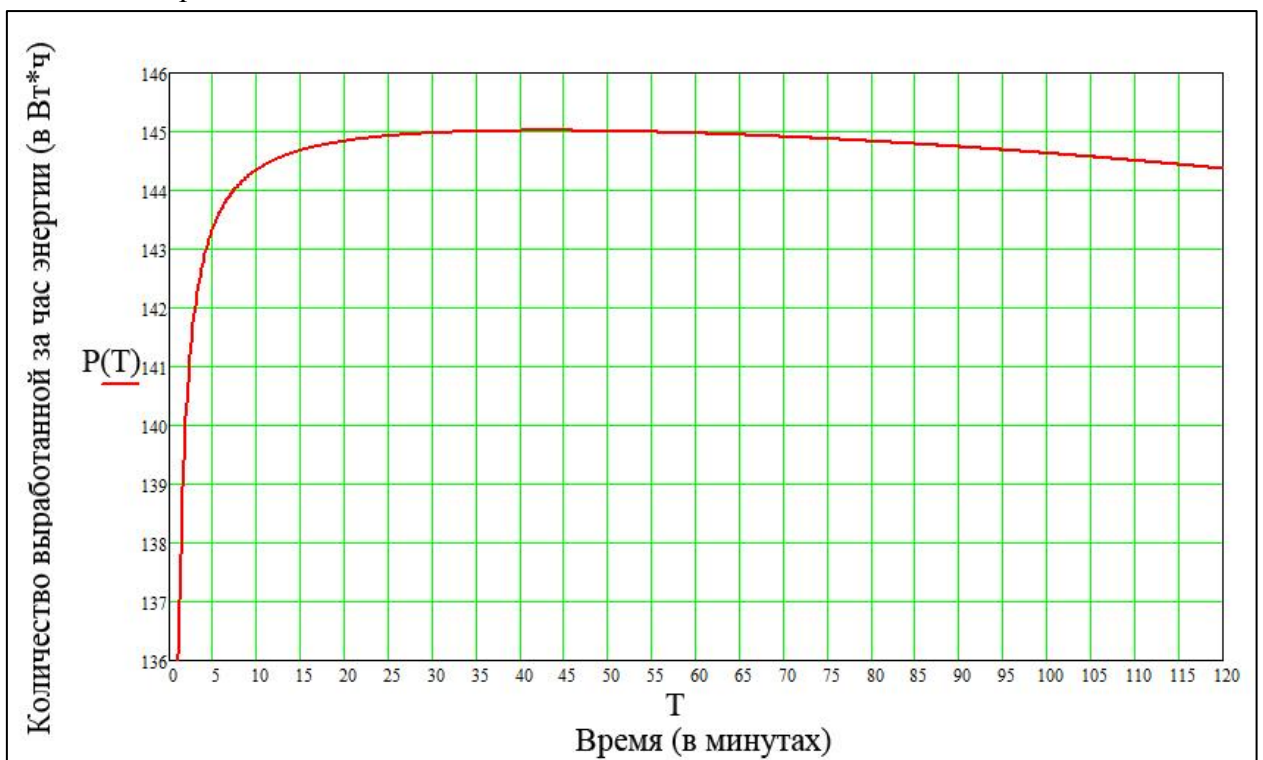


Рисунок 19. Зависимость средней вырабатываемой мощности от шага системы

2 случай:

Используемая солнечная установка стоит на динамических объектах, либо есть потребность в изменении времени ориентирования: поезда, корабли, туристические машины, возможная последующая установка вместо солнечной панели концентратора.

В данном случае актуальна ориентация панели прямо на солнечные лучи, без захвата «лишних» градусов. В таком случае формула примет вид:

$$P(T) = \frac{Q}{1000} * L * W(15) * W\left(\frac{T * 14,5}{120}\right) - \frac{10}{T}$$

Зависимость вырабатываемой мощности от шага системы показана на Рисунке 20. Как можно заметить, наибольшей эффективности система достигает при шаге ориентирования 25-35 минут. Для удобства время 0,5 часа можно считать оптимальным.

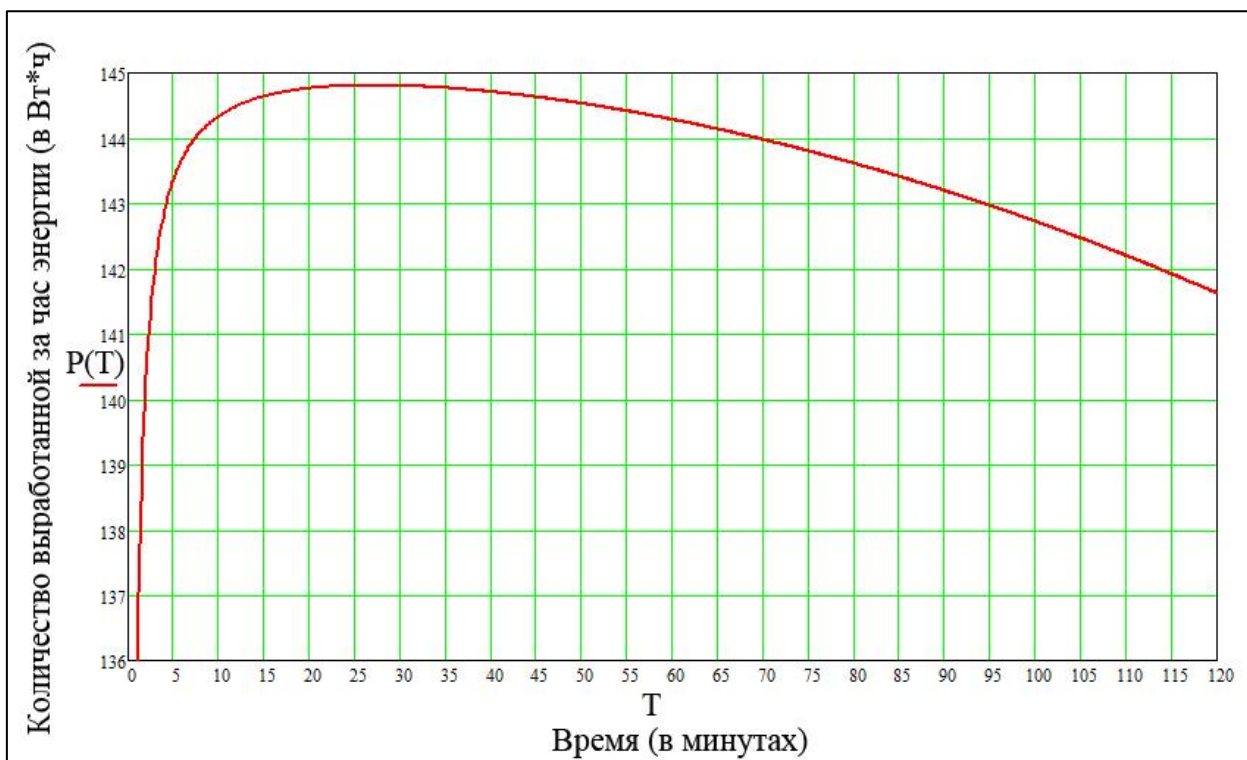


Рисунок 20. Зависимость средней вырабатываемой мощности от шага системы

Увеличение производительности

Высота и азимут солнца в течение дня. Датчик света

Для расчёта примерного увеличения производительности взяты данные за один день. В томской области в наиболее яркие и тёплые дни мощность суммарной солнечной радиации достигает в пике около 1100 Вт/м.^2 , а в холодные дни зимой эта цифра опускается до 150 [8]. Был взят график суммарной солнечной радиации за 14 августа, предоставленный сайтом климатологии атмосферного состава Томской области [8] (14-ого августа было примерно среднее значение солнечной радиации между летними и зимними показаниями).

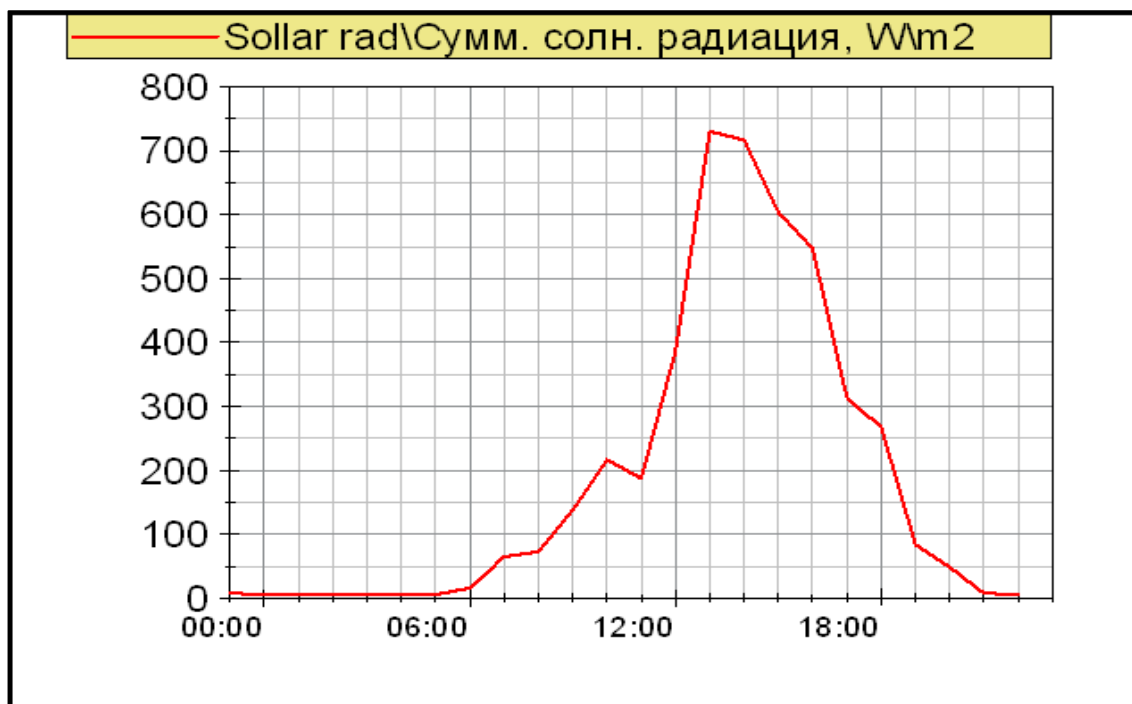


Рисунок 21. Суммарная солнечная радиация за 14 августа (Томск)

Также были взяты данные NASA[7] о высоте (Рисунок 22) и азимуте (Рисунок 23) солнца в Томской области 14 августа.

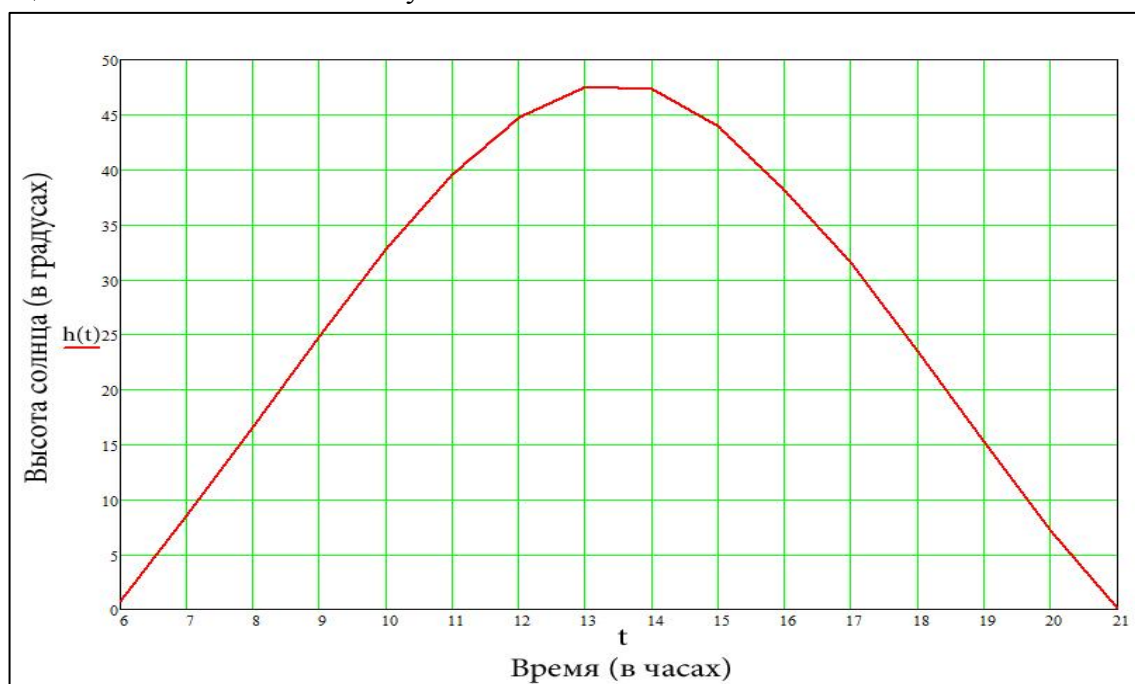


Рисунок 22. Временная зависимость высоты солнца h в течение дня (14 августа, Томск)

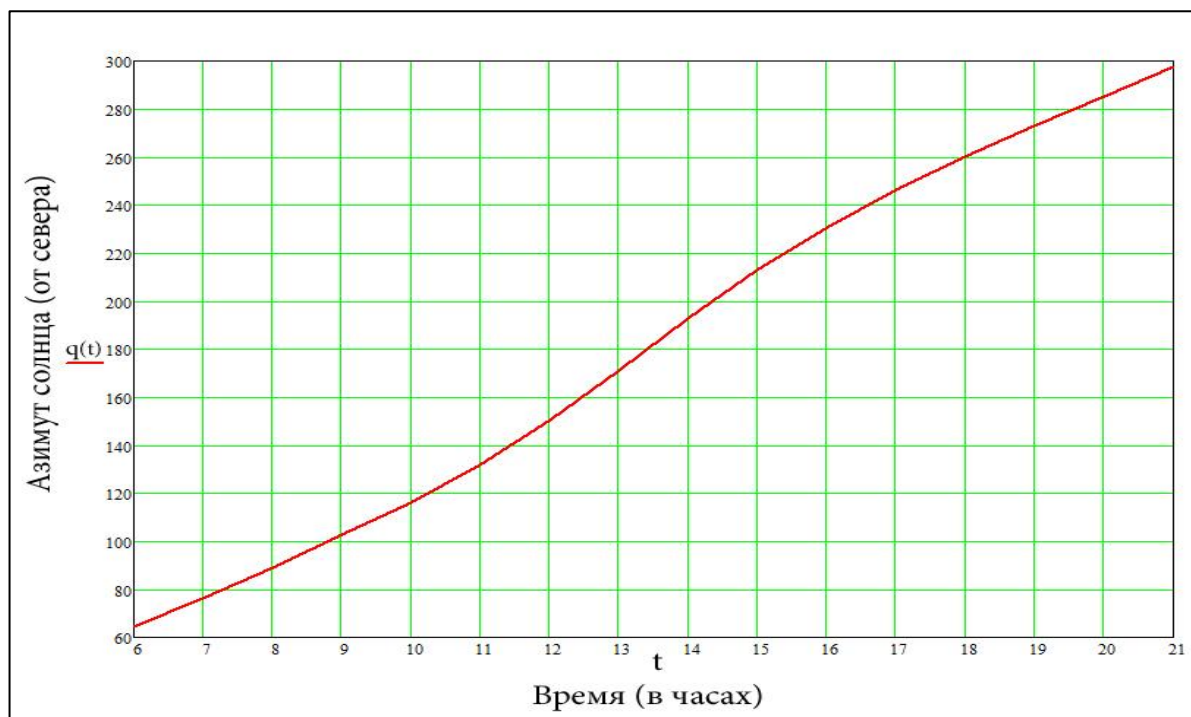


Рисунок 23. Временная зависимость азимута солнца q в течение дня (14 августа, Томск)

Как можно видеть из Рисунка 22, солнце выше горизонта лишь 15 часов в сутки (в самый короткий день года продолжительность солнечного дня меньше 9 часов). Остальное время занимает ночь, в течение которой нет ни одного существенного источника света, вследствие чего идут бесполезные энергозатраты на ориентирование. Чтобы это предотвратить, был разработан датчик света. Его принцип действия основан на том, что если свет попадает на фотодиод, то датчик открывает транзистор, который управляет питанием микросхемы. При отсутствии источника света цепь размыкается, что убирает возможность бессмысленного энергопотребления. Датчик подсоединяется к аккумулятору и к логическому элементу DD3A через K1.

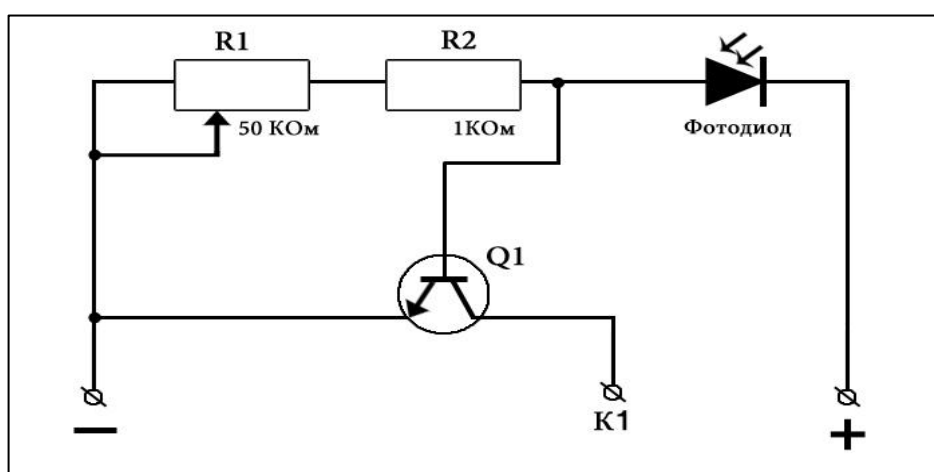


Рисунок 24. Принципиальная схема датчика.

Расчёт увеличения эффективности установок и экономии денег

Рассчитаем увеличение эффективности при вводе системы слежения и установке датчика.

Значения суммарной солнечной радиации (Q), % мощности при угле отклонения солнца от нормали к модулям по высоте (h) и % мощности при углах отклонения солнца от нормали по азимуту для ориентированной на юг статичной установки (q) и батареи, оборудованной одноосевой системой ориентирования (q1) для каждого часа солнечного дня 14 августа представлены в Таблице 2.

t (в часах)	Q (в Вт/м. ²)	h (в градусах)	q (в градусах)	q1 (в градусах)
6	20	W(44.3)	0	W(5.6)
7	65	W(36.5)	0	W(5.7)
8	75	W(28.3)	0	W(6.6)
9	140	W(20.1)	W(77.2)	W(6.8)
10	215	W(12.2)	W(63.9)	W(6.7)
11	190	W(5.4)	W(48)	W(7.9)
12	400	W(0.2)	W(29.6)	W(9.2)
13	730	W(2.5)	W(8.9)	W(10.3)
14	715	W(2.3)	W(12.6)	W(10.7)
15	600	W(1)	W(32.9)	W(10.1)
16	550	W(6.5)	W(50.9)	W(9)
17	310	W(13.5)	W(66.4)	W(7.7)
18	265	W(21.5)	W(80.2)	W(6.3)
19	90	W(29.7)	0	W(6.1)
20	50	W(37.9)	0	W(6.1)
21	15	W(44.9)	0	W(5.8)

Таблица 2. Значения суммарной солнечной радиации, угла отклонения солнца от нормали к модулям по высоте и азимуту

Итоговая мощность будем рассчитывать на примере ранее упомянутых солнечных установок на 720Вт пиковой мощности с использованием систем слежения, для которых рассчитывался шаг ориентирования:

$$A = \frac{Q}{1000} * L * h * q; \quad (11)$$

$$A1 = \frac{Q}{1000} * L * h * q1, \quad (12)$$

где A – мощность, вырабатываемая статичной батареей, направленной на юг, A1 – количество вырабатываемой энергии при работе системы ориентирования.

На Рисунке 25 показана зависимость вырабатываемой за час энергии для ориентированной батареи (линия 1) и для статичной батареи (линия 2). Можно заметить, что вырабатываемая энергия при использовании системы ориентирования была заметно выше практически в течение всего дня и сравнялась с вырабатываемой энергией статичной батареи лишь на промежуток времени с 13 до 14 часов, когда солнце было на юге.

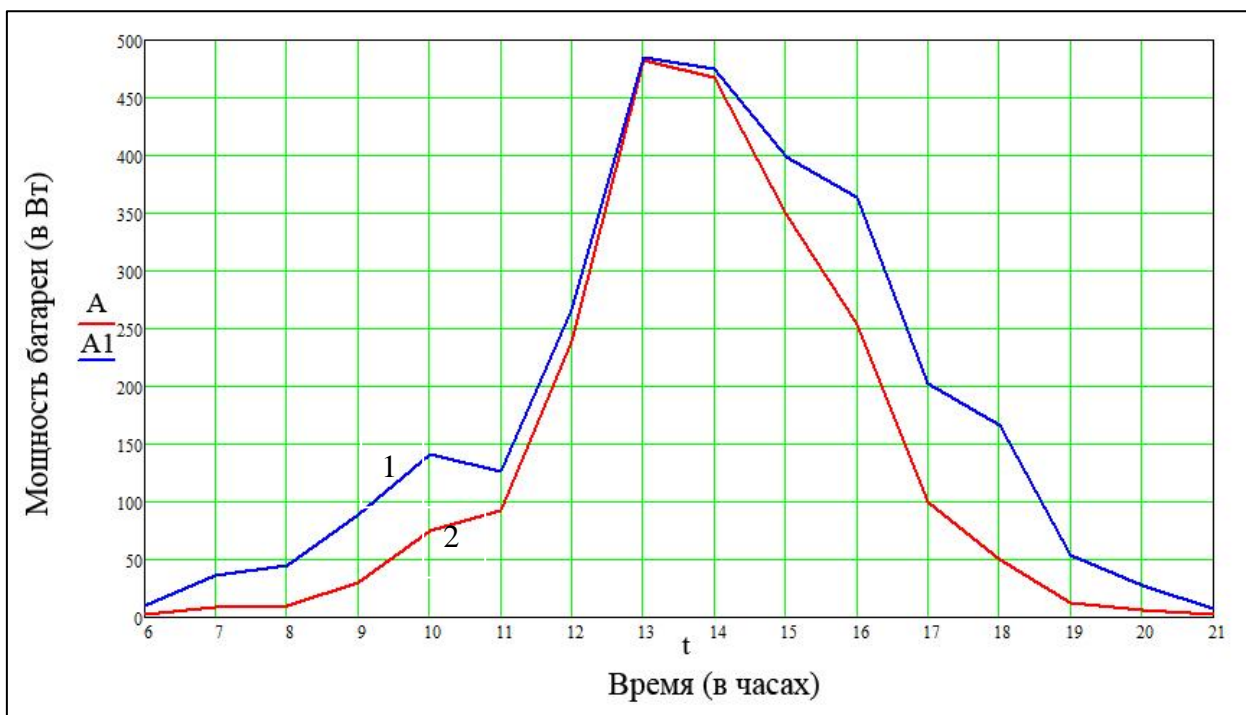


Рисунок 25. Количество вырабатываемой за час энергии для ориентируемой батареи (1) и для статической батареи (2)

Найдём значение мощности в конце каждого часа и посчитаем площадь под каждым из графиков, что и даст нам значение выработанной энергии.

t (в часах)	A (в Вт)	A1 (в Вт)
6	2.746	10.241
7	8.925	36.455
8	10.298	45.176
9	30.344	88.726
10	74.678	140.654
11	92.087	126.06
12	238.869	266.134
13	481.92	484.985
14	467.502	475.014
15	348.526	398.921
16	254.2	364.109
17	100.152	201.886
18	50.317	166.743
19	12.357	53.643
20	6.865	27.632
21	2.06	7.612

Таблица 3. Значения мощности в середине каждого часа для статичной и ориентируемой батареи.

$$S_A = 2179,4$$

$$S_{A1} = 2885,1$$

В результате получаем, что при статичной установке батарея выработала за день менее 2,2 кВт*ч, а при работе системы ориентирования почти 2,9 кВт*ч. Также, за день

система ориентировалась 16 раз, т.е. мотор в сумме работал около 160 секунд, затратив около 2,6 Вт*ч. Найдём увеличение производительности u

$$u = \frac{2885,1 - 2179,4 - 2,6}{2179,4} = 0,323 = 32,3\%$$

В итоге выходит, что выигрыш в работе составляет более 32%

Рассчитаем, какую выгоду получит институт, приобретая систему ориентирования вместо того, чтобы докупить фотоэлектрических модулей для аналогичного увеличения эффективности.

Для расчётов возьмём продукцию НИИПП – АИЭП-2 (автономных источников электропитания), потому что именно такие модули в данный момент стоят на корпусе НИ ТПУ. Двенадцать АИЭП-2 обойдутся в 456 тысяч рублей (38 тысяч за один экземпляр)[9]. Каждый из них весит около 37кг. Вследствие того, что мы сравниваем установку системы ориентирования и дополнительный закуп фотоэлектрических панелей, то не будем брать в расчёт цены инвертора, аккумуляторов и других частей источника, потому что в обоих случаях они дополнительно не приобретаются.

Так как при использовании системы ориентирования вырабатываемая энергия от солнечной батареи увеличивается примерно на 32,3%, то для достижения такого же результата с помощью стационарных батарей нужно докупить фотоэлектрических модулей на сумму $12 * 38000 * 0,323 = 147300$ рублей (приблизительно)

Материал для системы ориентирования одной батареи такого веса и размера обойдётся:

Электродвигатель ПЛ-061 – 3560 рублей (по прайсу компании «ЭЛ-МОТО»)

Плата управления и концевики – 360 рублей (по прайсу компании «ЭлкоПро»)

Пластик – 250 рублей (по прайсу компании «Стеклопласт»)

Металлические конструкции – 4500 рублей (по прайсу компании ООО «Мечел-Сервис»)

Подшипники – 980 рублей (по прайсу компании «Подшипники»)

Вал и площадка для батареи – около 800 рублей (по прайсу компании «Стройпарк»)

Итого: 10450 рублей

Следовательно, 6 систем ориентирования будут стоить 62700 рублей.

С учётом сборки и последующей продажи увеличим цену в 1,5 раза, то есть итоговая цена 94 тысячи

Получаем экономию денег: $147300 - 94000 = 53300$ рублей или около 36% .

В качестве сравнения: продукция компании «Энергия Дисижн» (г. Омск), ED-1500, для аналогичного увеличения мощности обойдётся примерно в 250 тыс. руб [10]. Поэтому мы предлагаем весьма дешёвую, но при этом качественную и эффективную продукцию для ориентирования солнечных установок на солнце, которая сможет весьма успешно конкурировать на рынке.

На данный момент имеются опытные образцы как трекера, так и концентратора. Ведутся работы по созданию полномасштабных образцов и их последующему патентованию.

Была вычислена стоимость наших трекеров с учётом оптовых цен деталей, приблизительной зарплаты сотрудникам, стоимости аренды помещения, налогов и маржи

с продажи продукции. В таблице 4 приведены сравнения с основными аналогами трекеров в России и странах СНГ как по цене, так и по другим наиболее важным характеристикам.

-----	Угол поворота	Цена для батарей установленной мощностью 3,5 кВт	Увеличение мощности (в августе)	Регулировка вручную	Сервисное обслуживание
Наша продукция	Более 200 градусов	\$3,5 тыс.	32%	имеется	Дешёвое, доступное, раз в 2 года
«Энергия Дисижн» (Челябинск, Омск), ED1500	150 градусов	\$7,8 тыс.	28%	отсутствует	Дорогое, раз в 2 года
«Flagma» (Санкт-Петербург), HS-1000	150 градусов	\$9,5 тыс.	28%	отсутствует	Дорогое, раз в 2 года
«Байкал-Энергия (Иркутск)	120 градусов	\$9,4 тыс.	26%	отсутствует	Дорогое, раз в 2 года
«Солнечные батареи» (Украина)	180 градусов	\$7,2 тыс.	30%	отсутствует	Дорогое, ежегодно
«SAT Control» (Словения), ST40M2V3P	100 градусов	\$4 тыс.	20%	имеется	Дорогое, Раз в 2 года

Таблица 4. Сравнение трекера с основными аналогами в России и странах СНГ.

Выводы:

- Созданы рабочие полноценные образцы фотоэлектрических модулей.
- Произведены собственные расчёты и выведены зависимости величин, влияющих на итоговую мощность батареи, от угла падения лучей на батарею. Проанализированы способы увеличения мощности солнечных батарей. Аргументирован выбор акрилового концентратора и одноосевой активной системы ориентирования.
- Созданы рабочие образцы концентратора и трекера, отличающиеся своей уникальностью и характеристиками, превосходящими аналоги.
- Произведены расчёты, показывающие энергетический и ценовой выигрыши использования данных систем.

Даже при наиболее эффективной стационарной установке солнечной батареи, использование систем ориентирования на солнце позволяет достигнуть выигрыша в вырабатываемой мощности более чем 30%, с учётом расхода энергии на работу электродвигателя. Использование же концентратора с трекером позволит в 2-5 раз снизить стоимость солнечных установок. Использование таких систем особенно актуально на солнечных станциях, занимающих 90% рынка, т.к. они будут не только дешевле используемых сейчас, но и позволят отказаться от излишнего сервисного обслуживания

(больше нет проблем с конденсатом в параболических зеркалах). К тому же такие системы по своим размерам и пропорциям будут приближены к стандартным солнечным панелям, что даёт им широкий спрос и для частного пользования в небольших масштабах на крышах и участках, позволяя минимизировать основные проблемы солнечных установок.

Литература:

- [1] Учебное пособие для вузов / Виссарионов В.И. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова– Москва, 2008 – 317с.
- [2] Статья / Юрченко А.В. Система слежения за солнцем для солнечной энергоустановки / А.В Юрченко, М.В Китаева. А.В. Охорзина– Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений, 2010 – 11с.
- [3] Работа / Вавилова О.С. Формулы Френеля – теория отражения / О.С. Вавилова, Ю.П. Яшин, 2003 – 9 с.
- [4] Учебник / Трофимова Т.И.. Курс физики / Т.И. Трофимова и др. – Москва, 1997 – 542с.
- [5] Электронный ресурс / Продукция компании RoyalSovereign / www.royalsovereign.com (дата обращения 18.07.2012)
- [6] Электронный ресурс / Redrockenergy / www.redrok.com (дата обращения 10.08.2012)
- [7] Электронный ресурс / NaturalResourcesCanada / www.retscreen.net (дата обращения 02.09.2012)
- [8] Электронный ресурс / Лаборатория климатологии атмосферного состава / lor.iao.ru (дата обращения 14.09.2012)
- [9] Электронный ресурс / Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов / www.niipr.ru (дата обращения 25.12.2012)
- [10] Электронный ресурс / Энергия Дисижн / e-ds.ru (дата обращения 25.01.2013)