

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Китаева Мария Валерьевна

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ  
НА МАКСИМАЛЬНЫЙ ПОТОК СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 05.11.13. – Приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Юрченко Алексей Васильевич., д.т.н

Томск – 2014

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ФМ И АНАЛИЗ СРЕДСТВ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ .....	21
1.1 Системы контроля ориентации ФМ .....	22
1.2 Математическая модель работы ФМ .....	25
1.3 Способы контроля ориентации ФМ .....	35
1.3.1 Системы ручной наводки на Солнце.....	35
1.3.2 Пассивные системы контроля.....	36
1.3.3 Активные системы контроля .....	37
1.4 Методы контроля максимального потока солнечного излучения .....	39
1.4.1 Датчики, основанные на оптическом методе.....	40
1.4.2 Датчики, основанные на температурном методе.....	55
1.4.3 Анализ способов, методов и датчиков контроля .....	57
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ФМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ .....	59
2.1 Эффективность применения систем контроля ориентации ФМ.....	59
2.2 Энергетический критерий работы ФМ .....	65
ГЛАВА 3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК .....	70
3.1 Разработка и модель фотоэлектрического датчика .....	70
3.2 Оптимизация конструкции фотоэлектрического датчика с использованием математической модели.....	74

3.3 Двухосный фотоэлектрический датчик .....	79
3.4 Макет фотоэлектрического датчика и его испытания.....	84
3.5 Оптимизация конструкции фотоэлектрического датчика по результатам испытаний .....	88
<b>ГЛАВА 4. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ФМ .....</b>	<b>96</b>
4.1 Эффективность работы ФМ с системой контроля его ориентации .....	96
4.2 Шаг поворотного устройства.....	98
4.3 Интервал времени между ориентированием ФМ .....	100
4.4 Методика работы системы контроля ориентации ФМ.....	110
4.5 Блок контроля .....	112
4.6 Экспериментальный макет аппаратно-программного комплекса .....	114
Заключение .....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
Приложение А Алгоритм работы одноосной системы .....	129
Приложение Б Алгоритм работы двухосной системы .....	130
Приложение В Схема электрическая принципиальная блока контроля .....	132
Приложение Г Текст программы микроконтроллера на языке СИ .....	134
Приложение Д Расчет точности.....	138

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших мировых проблем современности – энергетическая проблема. В связи с увеличением потребления электроэнергии и ограниченности запасов традиционных источников энергии появляется необходимость разработки и использования альтернативных источников энергии [1-8]. Помимо истощения запасов традиционных источников энергии, существует еще одна важная проблема их использования – загрязнение окружающей среды веществами, выбрасываемыми в атмосферу. Нарастают опасения по поводу экологических изменений, вызванных использованием традиционных источников энергии, в связи с чем проявляется все больший интерес к освоению новых возобновляемых источников энергии (ВИЭ), обладающих высокой эффективностью и не загрязняющих окружающую среду, а также отличающихся повсеместным распространением.

Совместное использование традиционных и возобновляемых источников энергии позволят повысить надёжность энергообеспечения путем создания резервных источников энергии, снизить вредные воздействия на окружающую среду благодаря использованию экологически чистых возобновляемых источников энергии, решить проблему энергоснабжения потребителей, не подключенных к энергосистемам, занимающих в России более 70% территории с населением около 22 млн. человек [6-8].

Возобновляемые источники энергии следует активно применять в районах, не охваченных системой централизованного энергоснабжения, из-за удаленности и низкой плотностью населения, в районах с дефицитом мощности, также в местах массового отдыха для улучшения экологической обстановки и местах сезонной работы, и пр. [6-8].

Среди возобновляемых источников энергии солнечная энергия представляется наиболее привлекательной [3-5]. Солнечная энергетика характеризуется максимальной простотой использования, наибольшими

ресурсами, экологической чистотой и повсеместным распространением. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за неделю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана [6-9]. Эти обстоятельства определяют гелиоэнергетику как одно из наиболее перспективных направлений развития возобновляемой энергетики.

Достоинствами солнечной энергии является высокая надежность, отсутствие расходов на топливо, постоянное улучшение производительности, снижение затрат на производство гелиоприемников и отсутствие опасных загрязнителей или отходов.

К серьезным недостаткам использования солнечной энергии на сегодняшний день относится высокая стоимость получаемой электроэнергии по сравнению с традиционными источниками [9-11]. Это вызвано невысокой плотностью энергетических потоков и их непостоянством во времени, в результате чего приходится использовать дорогостоящее оборудование для сбора, аккумулирования и преобразования энергии. Однако в последнее время имеется тенденция снижения стоимости энергии солнечных установок, обусловленная научными достижениями в технологии их изготовления и ростом масштабов производства [9]. В тоже время повышение стоимости традиционных ископаемых источников энергии, вызванное их истощением и усложнением технологии добычи, делает экономически выгодным использование солнечной энергии в больших масштабах.

Применение солнечных электростанций (СЭС) не предлагается в качестве замещения традиционного энергоснабжения, а в качестве дополнительного источника энергии с целью вытеснения части органического топлива.

В статье [10] приведены результаты компьютерного моделирования СЭС, установленных в Калининграде и на Чукотке, которые доказывают что СЭС с коэффициентом полезного действия (КПД) фотоэлектрического модуля (ФМ) 20% и со стороной квадрата 25 км, позволяет вырабатывать электроэнергию 500ТВт·ч круглосуточно с 1 апреля по 1 сентября. Это позволит удовлетворить

все потребности России в электроэнергии в течение этих пяти месяцев. В марте и сентябре продолжительность электроснабжения составит 22 часа в сутки. Таким образом, россияне на 5-7 месяцев смогут практически отказаться от использования топливных электростанций и перевести их в разряд резервных. Авторами также предлагается сэкономить природные ресурсы поставить на экспорт. Данная статья показывает перспективность использования солнечной энергии в России.

Применение СЭС наиболее актуально в изолированных от энергосистемы населенных пунктах. Замена дизельных генераторов на СЭС в таких регионах поможет облегчить энергетические и экологические проблемы, позволит сократить объемы потребления органического топлива, а также является экономически выгодной.

#### **Актуальность темы исследования**

В СЭС преобразователем солнечной энергии в электрическую энергию является фотоэлектрический модуль (ФМ). Энергия, полученная ФМ, а, следовательно, и выработанная энергия, напрямую зависит от количества солнечной радиации, пришедшей на его поверхность [12]. В зависимости от пространственной ориентации поверхностей ФМ возможно регулировать величину получаемой энергии. Получаемая энергия будет максимальна при падении солнечных лучей перпендикулярно поверхности ФМ. Применение системы слежения за Солнцем позволит постоянно направлять ФМ на самое «яркое пятно» на небе в течение дня, что позволит увеличить отбор мощности [13-14]. Система слежения выполняет роль системы контроля оптимальной ориентации ФМ (далее по тексту системы контроля).

#### **Степень разработанности темы исследования**

Проведены математические расчеты, моделирование и натурные испытания ФМ с применением систем контроля для различных городов мира, подтверждающие эффективность их применения.

Согласно источнику [15], применение одноосных систем контроля позволит увеличить выработанную мощность ФМ на 20% в Сиднее относительно стационарно установленного. Для Калифорнии прирост мощности составит 35% при введении одноосной системы и 45% - при двухосной [16]. Авторы статьи [17] доказали, что применение двухосной системы контроля позволит увеличить выработанную мощность ФМ на 34%. Испытания двухосной системы во Франции [18] показали, что слежение за Солнцем по двум осям способствует увеличению выработанной мощности на 27% относительно пассивных систем контроля (систем, основанных на программировании алгоритма поворота ФМ) и на 45% относительно фиксированного ФМ.

Применение систем контроля ФМ является эффективным для всех географических положений, для которых были проведены подобные исследования, системы дают дополнительный прирост мощности до 45%.

Использование гелиопотенциала для энергетических целей считается целесообразным, если годовой приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность составляет не менее  $1200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  (или  $3,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\text{день}$ ) и продолжительность солнечного сияния более 2000 ч/год [19]. Рассмотрим на примере Росси распределение в течение года суммарной среднесуточной солнечной радиации на наклонную поверхность южной ориентации с углом наклона равным широте местности [20] и определили благоприятные регионы, отвечающие описанному требованию целесообразности использования солнечной энергии.

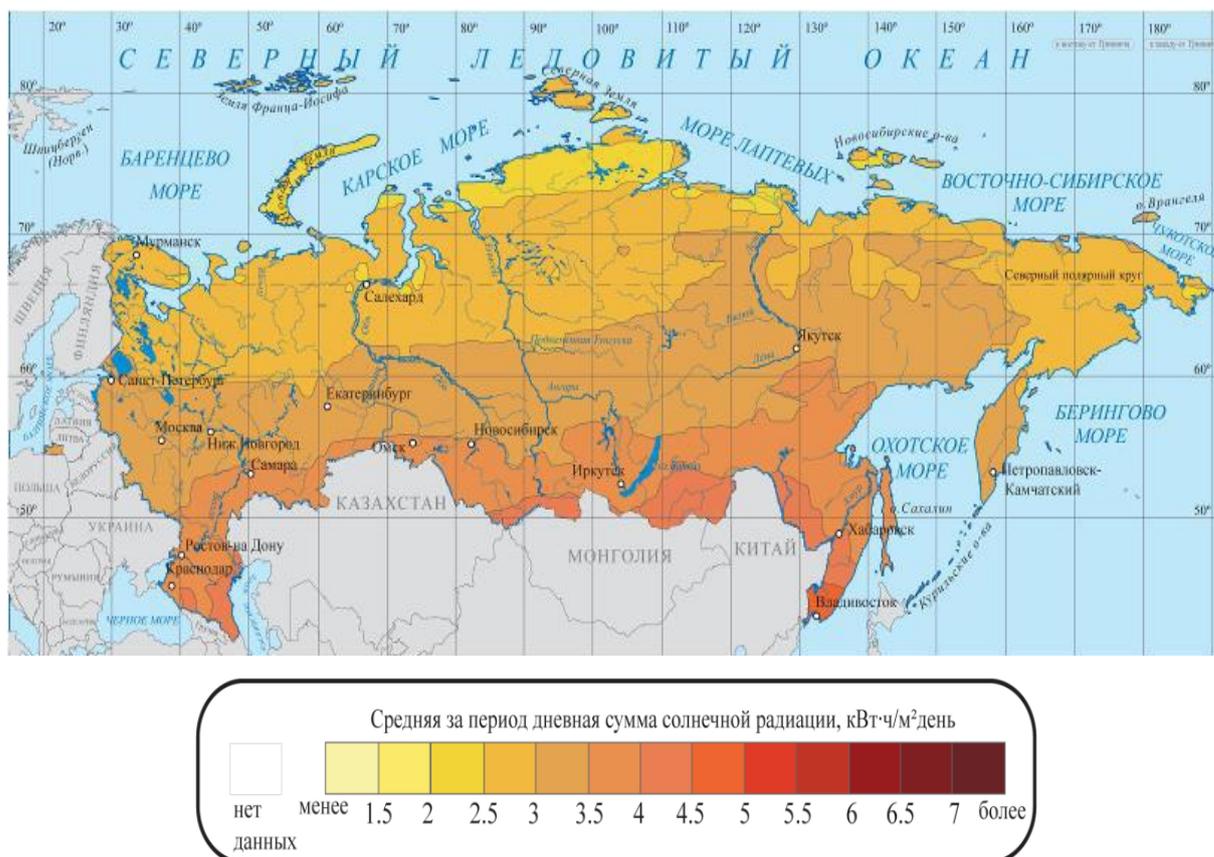


Рисунок 1. Суммарная среднедневная солнечная радиация на наклонную поверхность с углом наклона равным широте местности (год)<sup>1</sup>.

Как видно из рисунка 1, с севера на юг страны значение солнечной радиации изменяется от 2 до 5 кВт·ч/м<sup>2</sup>день. Только на юге страны значение солнечной радиации превышает 3,3 кВт·ч/м<sup>2</sup>день, характеризуя эту область благоприятной для использования СЭС.

Применение системы контроля позволит снизить показатель целесообразности использования солнечной энергии, за счет увеличения сбора мощности в течение дня, что видно из рисунка 2.

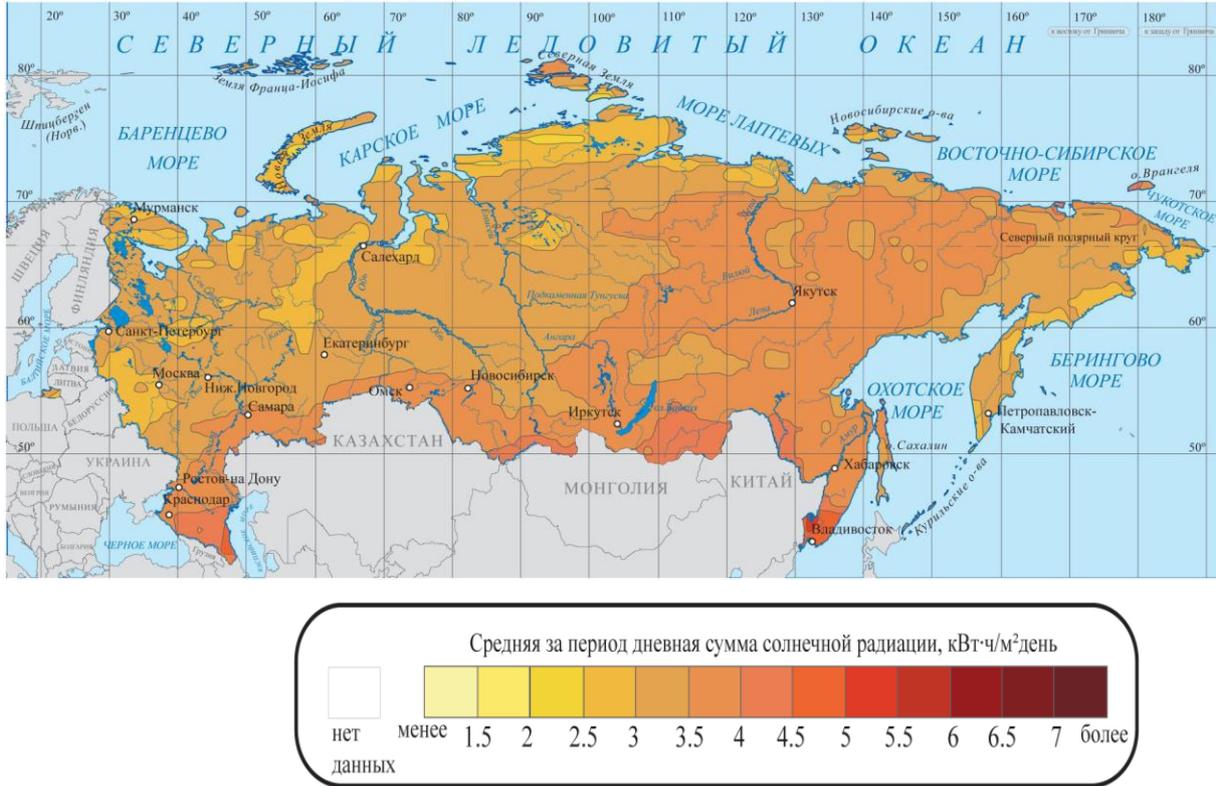


Рисунок 2. Прямая среднедневная солнечная радиация на следящую за Солнцем поверхность (год)<sup>1</sup>.

Благодаря системам контроля большая часть страны стала благоприятной для использования гелиоэнергетики, исключая районы крайнего севера. В период с апреля по сентябрь приходящая суммарная солнечная радиация на следящую поверхность настолько высока, что на всей территории России целесообразно использование СЭС. На рисунке 3 видно, что значение солнечной радиации изменяется от 3,5 до 7 кВт·ч/м<sup>2</sup>день.

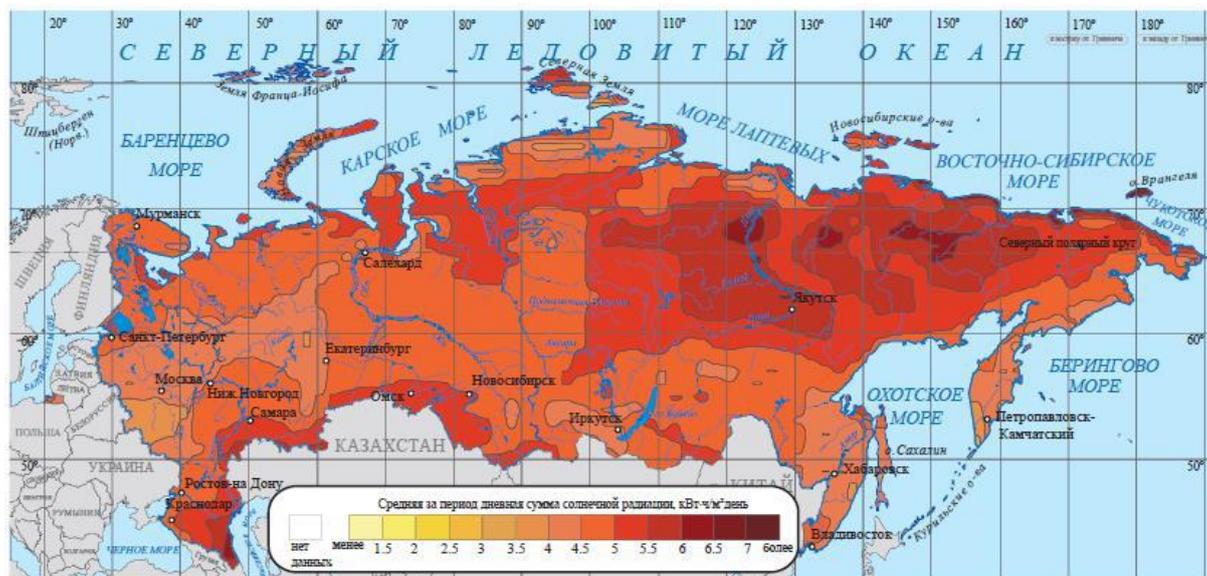


Рисунок 3. Прямая солнечная радиация на следящую за Солнцем поверхность (период: апрель - сентябрь, кВт·ч/м<sup>2</sup>день)<sup>1</sup>.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать вывод, что применение систем контроля позволит увеличить сбор мощности, а значит уменьшить требование значения годового прихода солнечной радиации. Потребителю при решении о целесообразности использования СЭС и расчете количества ФМ следует учитывать, что применение систем контроля позволит значительно увеличить получаемую мощность, что приведет к уменьшению количества применяемых ФМ.

Актуальность работ, нацеленных на разработку внедрение систем контроля для СЭС, не вызывают сомнений. Изучением, разработкой и активным использованием систем контроля занимаются в различных странах. Данные исследования соответствуют приоритетным направлениям развития науки и техники и позволяют увеличить отбор мощности ФМ, уменьшить срок их окупаемости, и, как следствие, увеличить конкурентоспособность СЭС,

<sup>1</sup> Рисунки 1-3 взяты из презентации Попеля О.С. «Научно-технические проблемы разработки, создания и применения энергоустановок на ВИЭ в изолированных системах», представленные на Международной конференции «Возобновляемая энергетика в изолированных системах Дальнего Востока России, 27-29 июня 2013г., г. Якутск.

расширить традиционную географию использования СЭС в регионах России, где ранее солнечная энергетика не использовалась, такие как Томская и Новосибирская области, Якутия, Сахалин и т.д.

Проектируя СЭС, потребитель рассчитывает необходимое количество ФМ, исходя из значения среднедневной солнечной радиации для данной местности, размера и КПД ФМ, указанный производителем в паспорте.

Такой подход не позволяет произвести точный прогноз полученной мощности по следующим причинам. Согласно ГОСТ Р 51594-2000 [21], КПД ФМ вычисляется как отношение мощности ФМ к солнечной энергии, поступившей на его поверхность. Производитель указывает КПД при нормальных условиях: плотность потока солнечной энергии  $1000\text{Вт/м}^2$  и температуре солнечных элементов  $(25\pm 2)$  °С. При измерении КПД в нормальных условиях направление потока солнечной энергии перпендикулярно плоскости ФМ. При таком взаимном расположении источника и ФМ выходная мощность будет максимальна. Однако в реальных условиях источником света является Солнце, которое непрерывно перемещается по небосводу в течение дня. При стационарно установленном ФМ на юг под углом к горизонту, равным широте местности направление солнечных лучей будет перпендикулярно только в полдень. Таким образом, использование значения КПД ФМ при расчете ожидаемой полученной мощности не даст реальной картины и введет потребителя в заблуждение.

Так же ГОСТ Р 51594-2000 дает определение КПД СЭС, которое зависит от выработанной электрической энергии и площади СЭС. По мнению автора диссертации, такая характеристика не позволяет правильно оценить эффективность использования солнечной энергии и вводит потребителя в заблуждение.

В некоторых источниках литературы [22-23] используется термин «эффективность использования солнечной энергии» различными солнечными установками, в том числе водонагревательными, с концентраторами и другими. Часто авторами данный термин применяется как синоним КПД, одним из

исключений является заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии и энергосбережения Объединенного института высоких температур РАН Попель О.С., который в своих работах [24-26] постоянно использует термин «энергетический критерий эффективности использования солнечной энергии».

Автором диссертации предлагается ввести термин «эффективность использования солнечной энергии» как энергетический критерий оценки работы ФМ. По мнению автора, данный критерий позволит потребителю дать реальную оценку полученной мощности при проектировании СЭС.

Введение систем контроля позволяет максимально эффективно использовать солнечную энергию. Системы контроля являются одним из самых доступных способов повышения эффективности использования солнечной энергии. Кроме того, данный способ применим для уже действующих СЭС, для которых необходимо изменить только опорную конструкцию. Системы контроля повышают выработку в утренние и вечерние часы и позволяют сделать более равномерной генерацию энергии в течение дня.

### **Цель**

Целью диссертационной работы является разработка аппаратно-программного комплекса на основе фотоэлектрического датчика и разработка методики оптимальной ориентации фотоэлектрического модуля на максимальный поток солнечного излучения для обеспечения наибольшей эффективности работы солнечной электростанции.

### **Задачи**

1. Разработать математическую модель, описывающую работу фотоэлектрического модуля с применением систем контроля его оптимальной ориентации на максимальный поток солнечного излучения и провести оценку эффективности применения солнечной энергии фотоэлектрическим модулем.

2. Провести анализ датчиков положения Солнца и на его основе разработать датчик для оптимальной ориентации фотоэлектрического модуля на максимальный поток солнечного излучения, создать математическую модель работы датчика.

3. Разработать аппаратно-программный комплекс на основе фотоэлектрического датчика для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения и алгоритм управления для максимальной эффективности работы солнечной электростанции.

4. Провести натурные испытания датчика и аппаратно-программного комплекса для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения при различных погодных условиях, используя полученные данные, провести оптимизацию конструкции датчика и алгоритма управления.

### **Научная новизна**

1. Установлена математическая совокупность соотношений, определяющих зависимость потока солнечного излучения, приходящего на поверхность фотоэлектрического модуля, от пространственной ориентации его поверхности, с помощью которой построена математическая модель фотоэлектрического датчика и доказана его работоспособность, подтвержденная натурными испытаниями.

2. Предложен энергетический критерий работы фотоэлектрических модулей, позволяющий оценить реальную эффективность использования им солнечной энергии, и обоснована эффективность применения одноосной и двухосной систем контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей.

3. Разработана конструкция фотоэлектрического датчика, имеющая два лицевых чувствительных элемента, расположенных под углом  $20^\circ$  и третий

тыловой элемент, что обеспечивает наибольшую чувствительность к изменению положения источника максимального потока солнечного излучения и позволяет определить необходимость ориентирования, а также запустить систему утром.

4. Разработаны аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения и алгоритм его работы для повышения эффективности использования солнечной энергии.

### **Практическая значимость**

Математическая модель работы фотоэлектрического модуля с применением системы контроля оптимальной ориентации может быть использована на стадии проектирования солнечной электростанции.

Полученные в работе результаты натурных испытаний позволяют дать практические рекомендации по использованию солнечной электростанции в регионе.

Предложенный энергетический критерий работы фотоэлектрического модуля может быть использован потребителем для оценки эффективности работы и при проектировании.

Разработан фотоэлектрический датчик и проведены его натурные испытания.

Результаты работы использованы при выполнении гранта президента РФ МД-5352.2013.8 «Разработка и апробация кремниевых фотоэлектрических модулей с трехмерной развитой поверхностью из полимерных композиционных материалов», хоз. договора №1-9/10 «Проведение натурных испытаний кремниевого солнечного энергетического комплекса мощностью 240 Вт с получением экспериментальных данных по эффективности его использования в климатических условиях города Томска», опытно-конструкторской работы «Меганом-Б»: «Разработка автономного источника электропитания мощностью до 1000 Вт на основе фотоэлектрических преобразователей».

### **Методы исследования**

В диссертации использованы теоретические исследования и экспериментальная проверка полученных результатов. Работа выполнялась с использованием математического моделирования.

Экспериментальные данные, полученные в диссертации, сопоставлялись с результатами, полученными другими авторами.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Конструкция фотоэлектрического датчика, состоящая из двух чувствительных элементов, расположенных под углом  $20^\circ$  относительно друг друга и отвечающих за определение положения максимального потока солнечного излучения, и третьего тылового элемента, необходимого для определения необходимости ориентирования и для запуска системы утром.

2. Энергетический критерий работы фотоэлектрических модулей, позволяющий определить эффективность использования солнечной энергии.

3. Аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения.

4. Алгоритм работы системы контроля оптимальной ориентации, позволяющий увеличить выработанную мощность фотоэлектрическим модулем на 37% при использовании одноосной системы контроля, на 56% - при использовании двухосной.

5. Результаты натурных испытаний, подтверждающие эффективность применения системы контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов работы подтверждается данными многолетних испытаний работы фотоэлектрического модуля, результатами проведенных испытаний, а также согласованностью результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на 16 Всероссийских и международных конференциях:

1. XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»- Томск, ТПУ, 4-8 мая 2009.
2. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - Spain, Valencia, 6-10 September 2010.
3. XVI Международная научно-практическая конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» - Томск, ТПУ, 12-16 апреля 2010.
4. I Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» – Томск, ТПУ, 25-26 февраля 2010.
5. II Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений» - Томск, ТПУ, 23-25 ноября 2010.
6. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, September 5-9, 2011.
7. Всероссийская школа-конференция молодых ученых "Методы и средства неразрушающего контроля", Томск, ТПУ, 29-31 Июля 2011.
8. II Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» - Томск, ТПУ, 5-7 Мая 2011.

9. XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» - Томск, ТПУ, 18-22 Апреля 2011.

10. XII международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация» - Барнаул, АлтГТУ, 29 – 30 марта 2011 г.

11. XIII международная научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация» - Барнаул, АлтГТУ, 28-29 марта 2012.

12. XVIII Международная научно-практическая конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, ТПУ, 9-13 Апреля 2012.

13. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt am Main, September 25-28, 2012.

14. Всероссийская школа-конференция молодых ученых "Методы и средства неразрушающего контроля" - Томск, 16-18 Августа 2013.

15. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, 30 September-4 October 2013.

16. XV Международная научно-практическая «Измерение, контроль, информатизация» - Барнаул, АлтГТУ, 23 Апреля 2014.

По результатам докладов на конференции и участия в выставках имеются следующие награды:

- Серебряная медаль за разработку «Двухкоординатная система ориентации на Солнце для фотоэлектрических установок», представленную на второй Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир, человек – 2012», г. Барнаул.

- Бронзовая медаль за разработку «Автономная система слежения за Солнцем», представленную на первой Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир, человек – 2011», г. Барнаул.

- Бронзовая медаль за доклад «Диагностика фотоэлектрических модулей в натуральных условиях» на Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Методы и средства неразрушающего контроля», г.Томск.

- Диплом I степени за проект «Система ориентации солнечных энергетических систем на основе фотоэлектрического датчика», представленный на I Университетской конференции студентов Элитного технического образования «Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых», г.Томск.

- Диплом I степени за разработку «Двухосевая система слежения за Солнцем» по итогам выставки научно-технических и инновационных разработок в рамках III Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии», г.Томск.

- Диплом II степени за разработку (экспонат) «Автономная система слежения за Солнцем» представленную в рамках выставки II Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии», г.Томск.

- Диплом за лучший доклад «Система слежения за Солнцем для солнечной энергоустановки», представленный на второй Международной научно-практической конференции молодых ученых «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений», г.Томск.

По теме диссертации опубликовано 34 работы, из них 4 – в изданиях, из списка ведущих научных журналов и изданий, утвержденного ВАК РФ, и 6 – в зарубежных изданиях. Получен патент на изобретение № 2459156 «Солнечная энергоустановка», отражающий основное содержание работы и новизну технических решений. В соавторстве издана монография «Неразрушающий контроль в производстве и испытаниях кремниевых фотоэлектрических модулей».

### **Личный вклад автора**

Автором самостоятельно разработана математическая модель работы фотоэлектрического модуля и на ее основе обосновано применение систем контроля оптимальной ориентации фотоэлектрического модуля. Разработан фотоэлектрический датчик позволяющий контролировать положение максимального потока солнечного излучения, и самостоятельно проведены его натурные испытания в Томске.

Предложен энергетический критерий оценки эффективности работы фотоэлектрического модуля. Разработан аппаратно-программный комплекс на основе фотоэлектрического датчика для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей и эффективный алгоритм управления, позволяющий максимизировать полученную мощность солнечной электростанции.

Совместно с Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) проведены испытания фотоэлектрического модуля с целью определения эффективности использования солнечной энергии в регионе.

### **Структура и объем диссертации**

Краткое изложение диссертационной работы по главам.

Введение содержит обоснование актуальности диссертационной работы, формулировку цели и задач исследований, основные положения, выносимые на защиту, и определяет содержание работы.

В первой главе приведена математическая модель солнечной радиации, работы ФМ без использования систем контроля и с ними. Так же в главе рассмотрены способы, методы и датчики контроля и проведен их анализ.

Во второй главе проведена оценка эффективности систем контроля, используя математическую модель, представленную в первой главе. Предложен энергетический критерий работы ФМ, дающий наиболее точную оценку эффективности использования солнечной радиации.

Третья глава посвящена разработке фотоэлектрического датчика. В главе представлена математическая модель работы датчика и результаты его натурных испытаний.

В четвертой главе описан аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации ФМ на максимальный поток солнечного излучения. Приведен алгоритм работы аппаратно-программного комплекса, максимизирующий эффективность работы СЭС.

В заключении представлены основные результаты работы.

Автор приносит благодарность Институту оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) за содействие при проведении натурных испытаний ФМ, датчиков и СЭС и ОАО «Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов» за помощь при создании датчика и аппаратно-программного комплекса.

## **ГЛАВА 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ФМ И АНАЛИЗ СРЕДСТВ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ**

Результаты проведенных исследований по оценке использования солнечного излучения для целей энергетики [27-29] свидетельствуют об экономической неэффективности и коммерческой непривлекательности ФМ в современных ценовых условиях.

Снижение стоимости производства электроэнергии возможно двумя способами: снижение стоимости ФМ и повышение эффективности сбора энергии.

Реализация первого способа возможна следующими путями: удешевлением производства - цеха автоматического производства ФМ, для обслуживания которых необходима пара человек; удешевлением материала гелиоприемника [30-32]. Что касается второго способа, повысить эффективность можно: используя тандемные установки, однако это увеличивает стоимость системы; применяя двусторонние фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), что незначительно улучшает эффективность; добавив различные концентраторы, которые наряду с увеличением фотоответа, сопровождаются повышением температуры элементов, что негативно влияет на КПД; введя систему слежения за Солнцем [32-38].

На данном этапе развития солнечной энергетики наиболее пристальное внимание следует уделить последнему варианту. Величиной, оказывающей влияние на выработанную мощность ФМ, является угол падения солнечных лучей на её поверхность, даже при самой эффективной стационарной установке ФМ проигрыш в вырабатываемой мощности составляет до 50%, чем при непрерывном ориентировании на Солнце [39-43]. Применение систем слежения позволит изменять угол наклона ФМ в течение дня таким образом, что бы сохранять прямой угол падения солнечных лучей на его поверхность. Это позволит увеличить количество пришедшей мощности, а, следовательно, и количество вырабатываемой мощности. Данный способ подходит для уже работающих СЭС, для этого требуется только изменить опорную конструкцию.

## 1.1 Системы контроля ориентации ФМ

Для наибольшей эффективности работы ФМ, т.е. преобразования солнечной энергии в электрическую, необходимо, чтобы солнечные лучи были направлены перпендикулярно поверхности модуля. В таком случае освещенность поверхности ФМ будет максимальной [44-46]. Для этого необходимо, чтобы система контроля максимума освещенности в течение дня периодически изменяла положение ФМ для сохранения прямого угла между направлением лучей и его плоскостью. Система, обеспечивающая поворот ФМ в течение дня на максимальный поток солнечного излучения, называется системой контроля максимума освещенности ФМ (далее по тексту система контроля).

Перемещение Солнца по небу в течение года и дня является входной характеристикой для системы контроля. Система контроля отвечает за ориентирование ФМ на Солнце в течение дня и года, поэтому рассмотрим геометрические отношения между Солнцем и Землей.

В течение года Земля описывает эллиптический путь вокруг Солнца (рисунок 1.1). Это движение является причиной изменения сезонов года и длительности светового дня. Изменение высоты Солнца на небосклоне в течение года определяется прецессией земной оси (рисунок 1.2), отвечающей за склонение оси Земли относительно плоскости эклиптики в течение года. В течение дня Земля также вращается вокруг своей оси, описывая полный круг, это движение является причиной восходов и закатов [47].

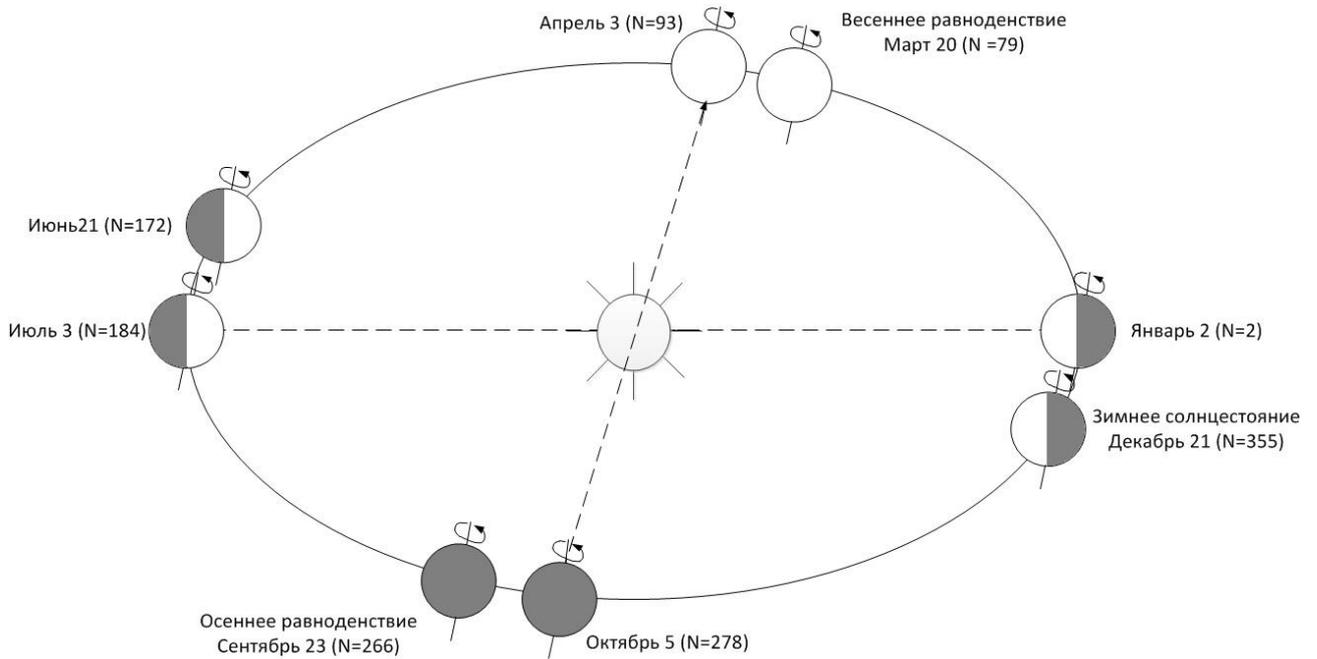


Рисунок 1.1. Вращение Земли вокруг Солнца в течение года.

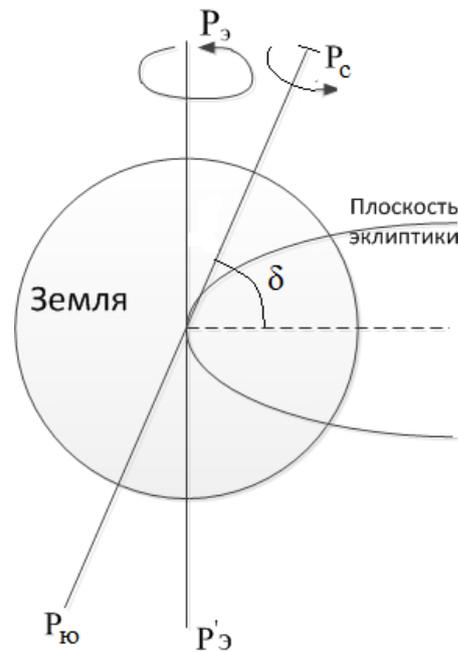


Рисунок 1.2. Схематическое изображение прецессии земной оси.

За одни сутки земля поворачивается вокруг своей оси на  $360^\circ$ , однако ФМ будет генерировать энергию только в течение светового дня. Длительность дня меняется в зависимости от широты и места установки ФМ. Необходимо проследить за двумя условиями изменения высоты Солнца: в течение дня и условия изменения высоты Солнца по временам года [48-50].

Положение Солнца на небосводе может быть описано двумя углами: азимут и зенит. Азимут - угол между истинным направлением севера и проекцией Солнца на горизонтальную плоскость Земли. Зенитный угол характеризует высоту солнцестояния. Азимут изменяет значение в течение дня из-за вращения Земли вокруг своей оси (его также называют часовой угол), а зенитный угол изменяется из-за прецессии земной оси. Следовательно, при проектировании системы контроля необходимо принимать во внимание два вращательных движения Солнца: ежедневное движение (перемещение по оси азимута) и ежегодной прецессии земной оси (перемещение по оси эклиптики) [51-52]. Существует два способа контроля положения Солнца: по одной оси и по двум. Количество осей определяет механизм системы контроля: одноосная и двухосная (рисунок 1.3).

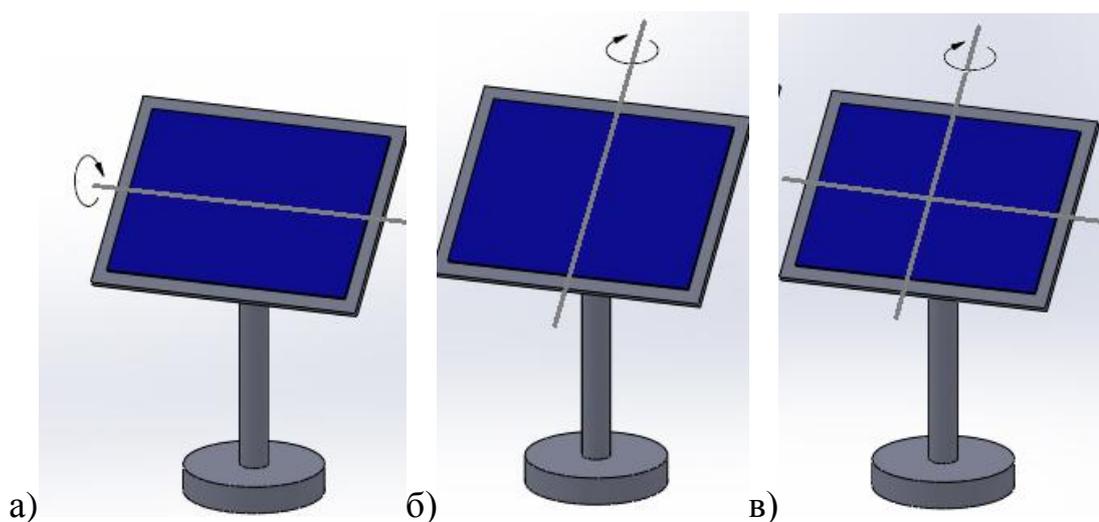


Рисунок 1.3. Системы контроля: а – одноосная азимутальная, б – одноосная зенитальная, в – двухосная.

Одноосные системы вращают ФМ только в одной плоскости, осуществляющие контроль при перемещении Солнца по азимуту или эклиптике. На практике системы контроля по оси эклиптики не применяются, т.к. перемещение Солнца в течение дня по оси азимута значительно.

Для достижения большей эффективности при одноосном слежении по эклиптике вторую ось выставляют параллельно оси Земли [52], т.е. на юг под углом к горизонту, соответствующему широте местности (рисунок 1.4).

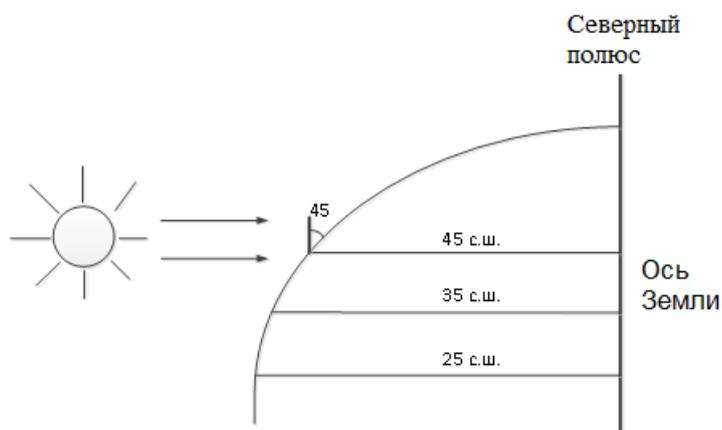


Рисунок 1.4. Расположение ФМ относительно горизонта.

Двухосные системы контролируют положение Солнца в двух плоскостях (азимуту и эклиптике Солнца), что обеспечивает точное отслеживание солнечного перемещения в течение дня.

Двухосные системы имеют большую эффективность по сравнению с одноосными, однако стоимость их гораздо выше, в связи с усложнением их конструкции и блока контроллера. Поэтому чаще используют системы с одной осью контроля, а вторую ось, как говорилось ранее, выставляют параллельно оси Земли или, для достижения большей эффективности, выставляют вручную 3-4 раза в год на наиболее эффективный угол.

## 1.2 Математическая модель работы ФМ

Проведем расчет вырабатываемой мощности ФМ. Для этого сначала определим количество солнечной радиации, поступающей в течение дня.

Поток прямой солнечной радиации  $Sr_{np}$  на поверхность, расположенную под углом  $\beta$  к этому потоку равен [53-57]:

$$Sr_{np} = Sr_{max} \cdot K_{am} \cdot \cos \beta \quad (1.1)$$

$Sr_{\max}$  – количество радиации, которое поступает от Солнца на Землю. Эта величина является солнечной константой, равной  $1325 \text{ Вт/м}^2$ . При расчетах нужно учитывать, что 30-35% этой энергии отражается назад в космос, поэтому возьмем  $Sr_{\max} = 925 \text{ Вт/м}^2$ .

$\beta$  – приведенный угол падения солнечных лучей на поверхность инсоляции,  
 $K_{am}$  – коэффициент поправки на воздушную массу, которую необходимо пройти лучу.

$$K_{am} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sinh_c} \quad (1.2)$$

$$\cos \beta = \sinh_c \cos \alpha + \cosh_c \sin \alpha \quad (1.3)$$

$\alpha$  – угол наклона плоскости ФМ к горизонту,  
 $h_c$  – угол, который определяет высоту Солнца над горизонтом в данный момент времени.

Ось Земли отклоняется от перпендикуляра к плоскости эклиптики на угол  $23^\circ 27'$ , поэтому половину года каждое географическое местоположение наклонено в сторону Солнца, а другую половину – от Солнца (рисунок 1.1).

В полдень дня весеннего равноденствия высота солнцестояния равна  $h=90^\circ-\theta$ , где  $\theta$  – географическая широта. В полдень дня летнего солнцестояния высота соответствует наибольшему значению  $h_{\max}=90^\circ-\theta+23^\circ 27'$  и продолжительность светового дня максимальна. Когда Солнце находится в точке осеннего равноденствия, продолжительности дня и ночи равны, а высота солнцестояния в полдень равна  $h=90^\circ-\theta$ , как и в день весеннего равноденствия. В полдень зимнего солнцестояния высота солнцестояния соответствует наименьшему значению  $h_{\min}=90^\circ-\theta-23^\circ 27'$  и продолжительность светового дня минимальна. В остальные дни года высота солнцестояния в полдень изменяется от  $h_{\min}$  до  $h_{\max}$ .  $h_{\max}$  до  $h_{\min}$  - это предельные значения угла наклона ФМ в течение года [56].

Определим выражение для высоты солнцестояния  $h_c$ . Солнечный зенитный угол – угол между направлением вектора солнечных лучей  $S$  и зенитной осью относительно наблюдателя (рисунок 1.5). Зенитный угол  $v_z$  характеризует высоту солнцестояния  $h_c$  [53-57].

$$v_z = 90^\circ - h_c \quad (1.4)$$

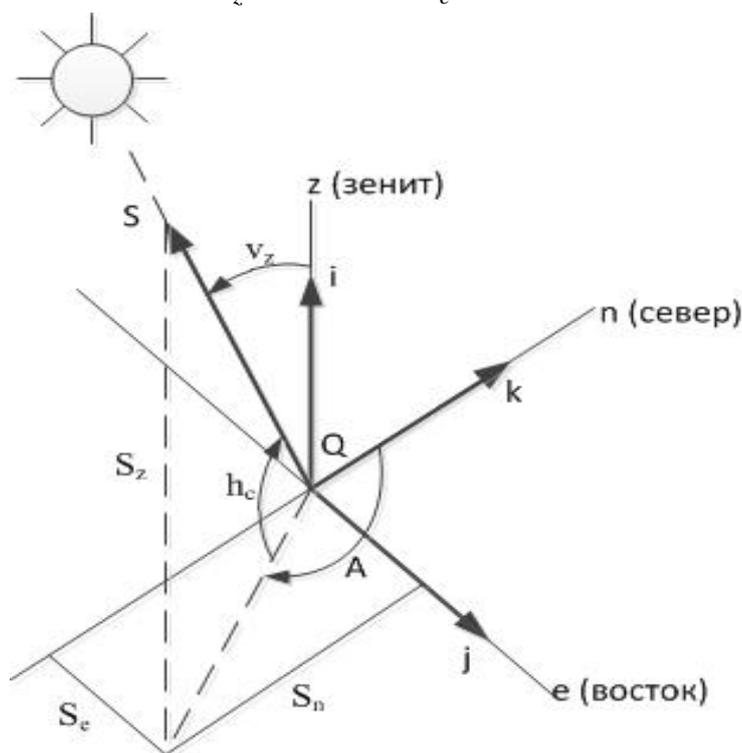


Рисунок 1.5. Солнечный угол для наблюдателя

В векторных обозначениях  $S$  можно записать в виде:

$$S = S_z i + S_e j + S_n k \quad (1.5)$$

где  $i$ ,  $j$  и  $k$  – единичные векторы вдоль осей Зенит ( $z$ ), Восток ( $e$ ) и Северной ( $n$ ).

С точки зрения солнечного азимута и высоты,  $S$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} S_z &= \sin(h_c) \\ S_e &= \cos(h_c) \sin(A) \\ S_n &= \cos(h_c) \cos(A) \end{aligned} \quad (1.6)$$

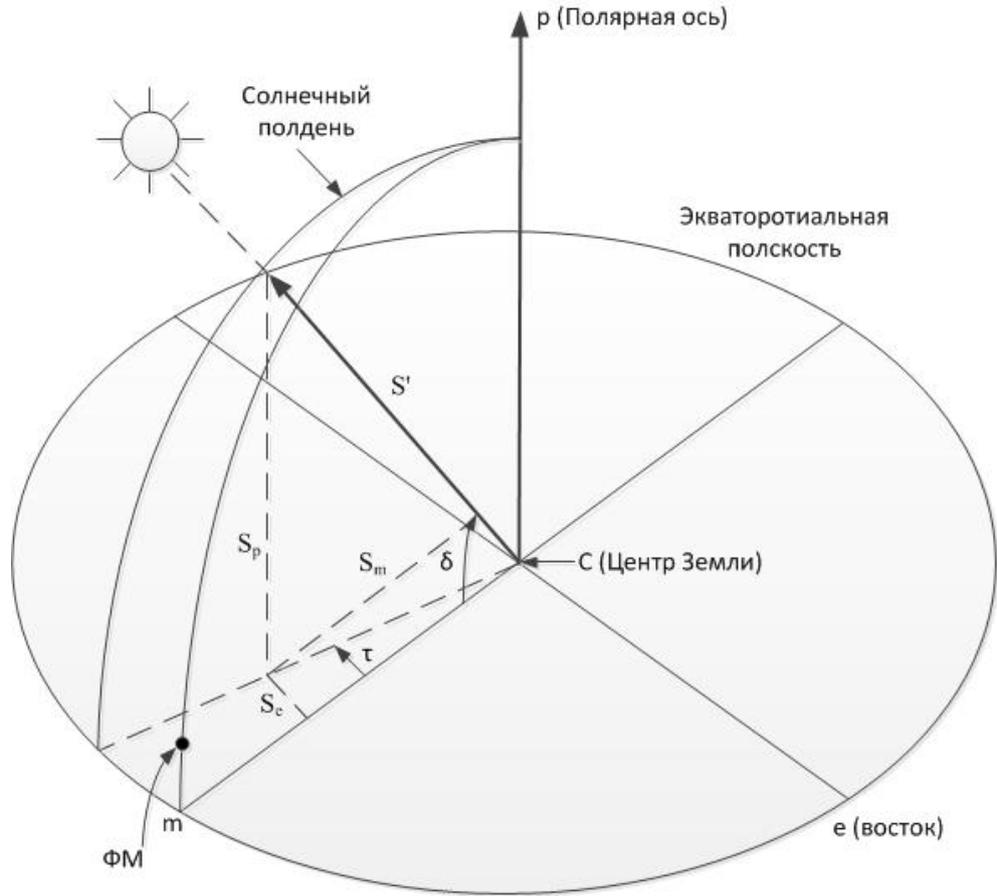


Рисунок 1.6. Геометрия солнечного угла

В геоцентрической системе координат, показанной на рисунке 1.6, ось  $m$  пересекает центр Земли и точку пересечения между местным меридианом и экваториальной плоскостью. Ось  $e$  перпендикулярна оси  $m$  и лежит в экваториальной плоскости. Ось  $p$  – нормаль экваториальной плоскости, пересекающая Северный полюс. Новый солнечный вектор  $S'$  может быть описан с помощью угла солнечного склонения и часового угла.

$$\begin{aligned}
 S' &= S'_m i + S'_e j + S'_n k \\
 S_e &= \cos(\delta) \cos(\tau) \\
 S'_e &= \cos(\delta) \sin(\tau) \\
 S'_n &= \sin(\delta)
 \end{aligned}
 \tag{1.7}$$

Топоцентрическая и геоцентрическая координаты связаны между собой вращением вокруг оси  $e$  через угол широты ( $\varphi$ ).

$$\begin{pmatrix} S_z \\ S_e \\ S_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S'_m \\ S'_e \\ S'_p \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

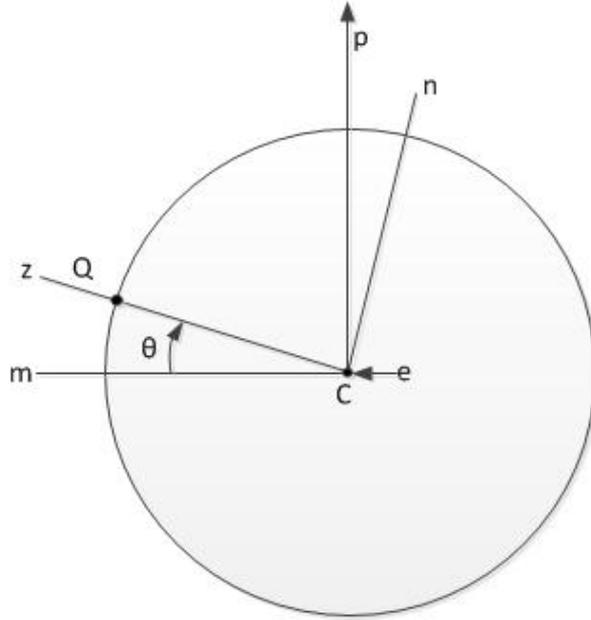


Рисунок 1.7. Преобразование геоцентрических координат в топологические

Решив уравнение 1.8 и подставив в выражения 1.5 и 1.7, получим

$$\begin{cases} \sin(h_c) = \sin(\delta) \sin(\theta) + \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\theta) \\ \cos(h_c) \sin(A) = -\cos(\delta) \sin(\tau) \\ \cos(h_c) \cos(A) = \sin(\delta) \cos(\theta) - \cos(\delta) \cos(\tau) \sin(\theta) \end{cases} \quad (1.9)$$

Из системы уравнений 1.9 выразим  $h_c$ :

$$h_c = \arcsin(\sin(\delta) \sin(\theta) + \cos(\delta) \cos(\tau) \cos(\theta)) \quad (1.10)$$

Таким образом, высота солнцестояния  $h_c$  зависит от величины склонения Солнца  $\delta$ , часового угла  $\tau$  и широты местности  $\theta$ . Широта местности соответствует географическому местоположению ФМ. Определим оставшиеся две величины.

### Угол склонения Солнца

Построим график изменения угла склонения Солнца в полдень в течение года, для этого воспользуемся формулой Буржаса [51]:

$$\delta = 0,372 + \sum_{k=1}^3 [A_k \sin(kD) + B_k \cos(kD)], \quad (1.11)$$

где коэффициенты  $k$ ,  $A_k$  и  $B_k$  соответствуют значениям, представленным в таблице 1.1, коэффициент  $D$  можно определить по формуле:

$$D = \frac{360}{365.25} (N - 79.346), \quad (1.12)$$

где  $N$  – порядковый номер дня в году.

Таблица 1.1. Значения коэффициентов  $k$ ,  $A_k$  и  $B_k$

<b>k</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	23,2567	-0,758
2	0,1149	0,3656
3	-0,1712	0,0201

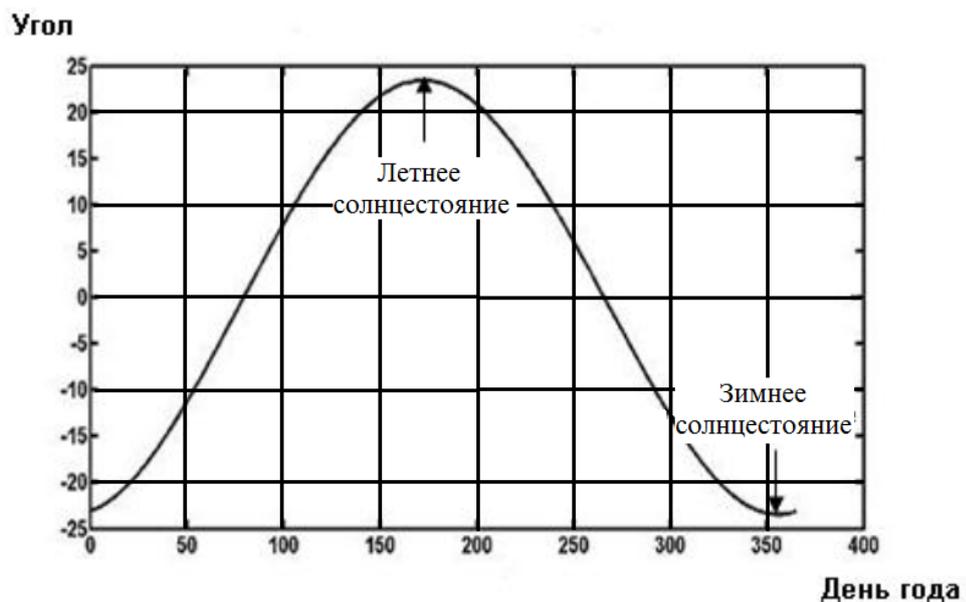


Рисунок 1.8. Изменение угла склонения в течение года

Как видно из графика выше, угол склонения Солнца изменяется в течение года от  $-23,5^\circ$  до  $23,5^\circ$ . Угол склонения Солнца можно определить, используя более простую формулу:

$$\delta = 23.5 \sin\left(\frac{284 + N}{365}\right), \quad (1.13)$$

где  $N$  – порядковый номер дня в году.

### Часовой угол

Местный часовой угол находится в линейной зависимости от местного солнечного времени [58]:

$$\tau = 15(T_s - 12), \quad (1.14)$$

где  $\tau$  - часовой угол,  $^\circ$ ,

$T_s$  – местное время, ч.

Разность между средним и истинным солнечным временем называется уравнением времени [59]. Разница возникает по двум причинам:

- из-за эллиптической орбиты Земли и неравномерного движения по ней, с максимальной скоростью в перигелии и с минимальной в афелии;

- из-за наклона эклиптики к экватору вблизи равноденствий проекция скорости Солнца на экватор меньше, чем в период солнцестояний, когда оно движется параллельно экватору [60].

Оба отклонения имеют вид синусоид (рисунок 1.9). Сумма этих двух графиков является графиком уравнения времени [61].

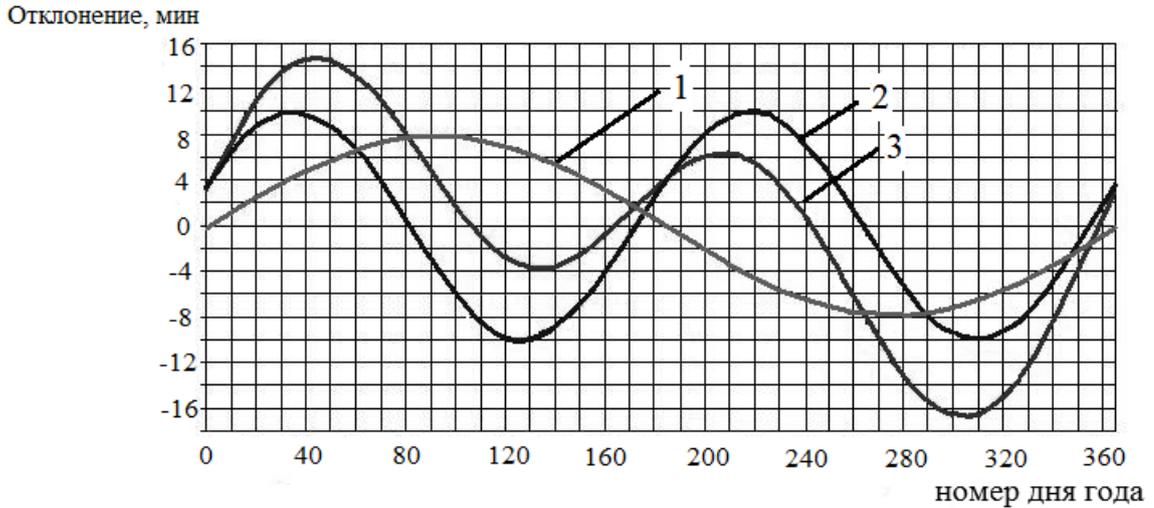


Рисунок 1.9. Графики поправок времени и уравнение времени:  
 1 – поправка, вызванная эллиптичностью земной орбиты, 2 – поправка, вызванная наклоном эклиптики, 3 - график уравнения времени.

Как видно из рисунка 1.9, истинное солнечное время может смещаться на 17 минут от среднего солнечного времени.

Выражение для определения уравнения времени EOT будет иметь вид:

$$EOT = 60 \sum_{k=1}^6 \left( A_k \cos\left(\frac{360kn}{365.25}\right) + B_k \sin\left(\frac{360kn}{365.25}\right) \right), \quad (1.15)$$

где  $n$  – порядковый номер в цикле високосного года (от 1 до 1461),

$k$ ,  $A$  и  $B$  – константы, значения которых приведены в таблице 1.2

Таблица 1.2. Значения коэффициентов  $k$ ,  $A_k$  и  $B_k$

<b>k</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	$2,0870 \cdot 10^{-4}$	0
2	$9,2869 \cdot 10^{-3}$	$-1,2229 \cdot 10^{-1}$
3	$-5,2258 \cdot 10^{-2}$	$-1,5698 \cdot 10^{-1}$
4	$-1,3077 \cdot 10^{-3}$	$-5,1602 \cdot 10^{-3}$
5	$-2,1867 \cdot 10^{-3}$	$-2,9823 \cdot 10^{-3}$
6	$-1,5100 \cdot 10^{-4}$	$-2,363 \cdot 10^{-4}$

Зависимость истинного значения солнечного времени и местного времени имеет вид:

$$T_s = T_L - \frac{EOT}{60} - P - LC \quad (1.16)$$

где  $T_L$  – местное время,

$P$  – поправка на переход на летнее время ( $P=1$  после перехода на летнее время и  $P=0$  после перехода на зимнее). С осени 2011 года указом президента РФ отменен переход на зимнее время. Таким образом, для России  $P=1$ .

$LC$  можно определить по формуле [51]:

$$LC = \frac{M.d - Д.ст.м.}{15} \quad (1.17)$$

где  $M.d$  – местная долгота,

$Д.ст.м.$  – долгота стандартного меридиана

Таким образом, определены выражения для всех величин, влияющих на поток прямой солнечной радиации приходящий на поверхность, расположенную под некоторым углом к этому потоку.

Определим формулы для потока прямой солнечной радиации приходящего на поверхность ФМ с применением одно- и двухосной систем контроля.

При использовании двухосной системы контроля поверхность ФМ направлена на Солнце, следовательно, угол  $\beta$  между нормалью поверхности и солнечными лучами равен 0, тогда:

$$Sr = Sr_{\max} \cdot K_{am} \quad (1.18)$$

Выражение приходящей мощности солнечного излучения для ФМ с одноосной системой контроля будет иметь вид:

$$Sr = Sr_{\max} \cdot K_{am} \cdot \cos(\theta - h_c) \quad (1.19)$$

В данном случае учтен угол наклона поверхности к горизонту по второй оси (обычно угол равен широте местоположения ФМ).

Рассчитать приходящую мощность солнечного излучения на неподвижную поверхность, установленную под углом к горизонту, можно по формуле:

$$Sr = Sr_{\max} \cdot K_{am} \cdot \cos(\theta - h_c) \cdot \cos(90 - \tau) \quad (1.20)$$

Формулы 1.18-1.20 отображают зависимость приходящей мощности солнечного излучения на поверхность ФМ с применением двухосной и одноосной системы контроля, а также на поверхность стационарно установленного ФМ под углом к горизонту.

Для оценки эффективности систем контроля необходимо сравнить мощности ФМ, выработанная с применением систем контроля, с мощностью стационарно установленного ФМ. Для этого необходимо определить зависимость выходной мощности ФМ от мощности солнечного излучения, приходящего на его поверхность.

### Мощность ФМ

Наиболее простая модель расчета мощности ФМ - это способ, при котором вырабатываемая мощность считается путем умножения КПД ФМ на солнечное излучение, пришедшее на поверхность ФМ [62-63].

$$P_{\text{ФМ}} = Sr_{\text{пр}} \cdot \text{КПД} \cdot S_{\text{ФМ}} \quad (1.21)$$

где  $P_{\text{ФМ}}$  - выработанная мощность ФМ;

КПД – коэффициент полезного действия ФМ;

$S_{\text{ФМ}}$  – площадь ФМ.

Совокупность формул 1.1-1.21 составляет математическую модель работы ФМ в течение дня. Описанная модель может быть использована при моделировании работы СЭС с целью предварительной оценки вырабатываемой мощности и расчета необходимого количества ФМ.

### 1.3 Способы контроля ориентации ФМ

Существует три способа контроля ориентации ФМ [64]:

- Ручной способ, при котором наводка на Солнце производится оператором;
- Пассивный способ, при котором поворот ФМ в течение дня производится по заданному алгоритму управления;
- Активный способ, обеспечивающий постоянную ориентацию на максимальный поток солнечного излучения.

Стоит отметить, что рассмотренные в главе способы, методы, датчики и системы на их основе также применимы для концентраторов солнечного излучения и гибридных теплосолнечных установок. Однако в рамках тематики диссертации они рассматриваются для контроля ориентации ФМ.

Рассмотрим системы, основанные на данных способах контроля. Системы контроля на основе ручного способа называются системы ручной наводки на Солнце, а использующие пассивный и активный способ контроля - пассивные системы контроля и активные системы контроля.

#### 1.3.1 Системы ручной наводки на Солнце

В системах с ручной наводкой ФМ на Солнце производится оператором. Для ориентации большого количества ФМ используется пульт управления общим приводом. Точность, а, как результат, и выработанная в течение дня мощность напрямую зависит от работы оператора: его выбора угла наклона ФМ, количества поворотов ФМ в течение дня и времени работы поворотного устройства [13].

Системы ручной наводки на Солнце получили наименьшее распространение.

Однако данный способ позволяет оператору быстро отследить наличие поломки в случае ее возникновения. Ручной способ чаще всего используется в

качестве резервного для большого количества ФМ, управляемых одним приводом. Также к ручной наводке прибегают при использовании активного способа контроля, в случае отказа по какой-либо причине датчика системы контроля. Некоторые фирмы используют ручной способ совместно с активным для ориентирования ФМ утром на восходящее Солнце, если в используемом датчике не решена проблема запуска утром.

### **1.3.2 Пассивные системы контроля**

Все пассивные системы контроля имеют один принцип работы – управление скоростью вращения ФМ, на основе расчетно-постоянных характеристик для данного географического положения ФМ.

Исходные величины для разработки алгоритма работы системы контроля являются постоянными: географическая широта местности, продолжительность дня для данной местности, изменение высоты солнцестояния в течение дня и в течение года.

Угол и скорость поворота ФМ определяется исходя из данных метеослужбы о продолжительности дня, высоты Солнца утром, максимальной высоты в полдень и вечером в определенное время, координат местоположения ФМ [65].

Пассивные системы имеют ряд недостатков, являющихся причиной их непопулярности на сегодняшний день.

Для использования таких систем необходимы данные метеослужбы для каждого конкретного местоположения ФМ и требуют перерасчета угла и скорости поворота ФМ, а, следовательно, изменения программы. Для перерасчета и перепрограммирования микроконтроллера необходима работа специалистов, что лишает ее универсальности и увеличивает стоимость установки.

При использовании пассивной системы контроля необходима точная установка ФМ по сторонам света, что возможно при использовании дополнительных приборов и требует опыта работы.

К тому же, работа по алгоритму не может обеспечить ориентирование ФМ на максимальный поток солнечного излучения, который может не соответствовать положению Солнца при облачном небе.

Несмотря на уровень приходящей солнечной радиации и погодные условия, пассивная система работает по заданному алгоритму, что приводит к неэффективному использованию в пасмурные дни, двигатель будет потреблять электроэнергию при отсутствии необходимости ориентирования. Иногда это проблема решается с помощью датчика освещенности, что приводит к использованию систем с датчиком, т.е. активных, о которых будет рассказано в следующем пункте.

### **1.3.3 Активные системы контроля**

Активные системы контроля получили наибольшее развитие и распространение на сегодняшний день.

В отличие от пассивных систем активные ориентируют поверхность ФМ на максимальный поток солнечного излучения, другими словами на самое яркое пятно на небе, которое в ряде случаев не соответствует положению Солнца на небе.

Активные системы принимают во внимание не только прямое солнечное излучение, но также, например, свет, который отражается от снега, воды или камня светлого цвета (рисунок 1.10 а), диффузное солнечное излучение (рисунок 1.10 б, в), которое проникает через облака - и делает это индивидуально для каждой системы (рисунок 1.10 г). Оценить математически прирост мощности в зависимости от этих факторов не просто, однако многочисленные натурные испытания ФМ подтверждают, что влияние описанных факторов на мощность, выработанную ФМ, существенно [66].

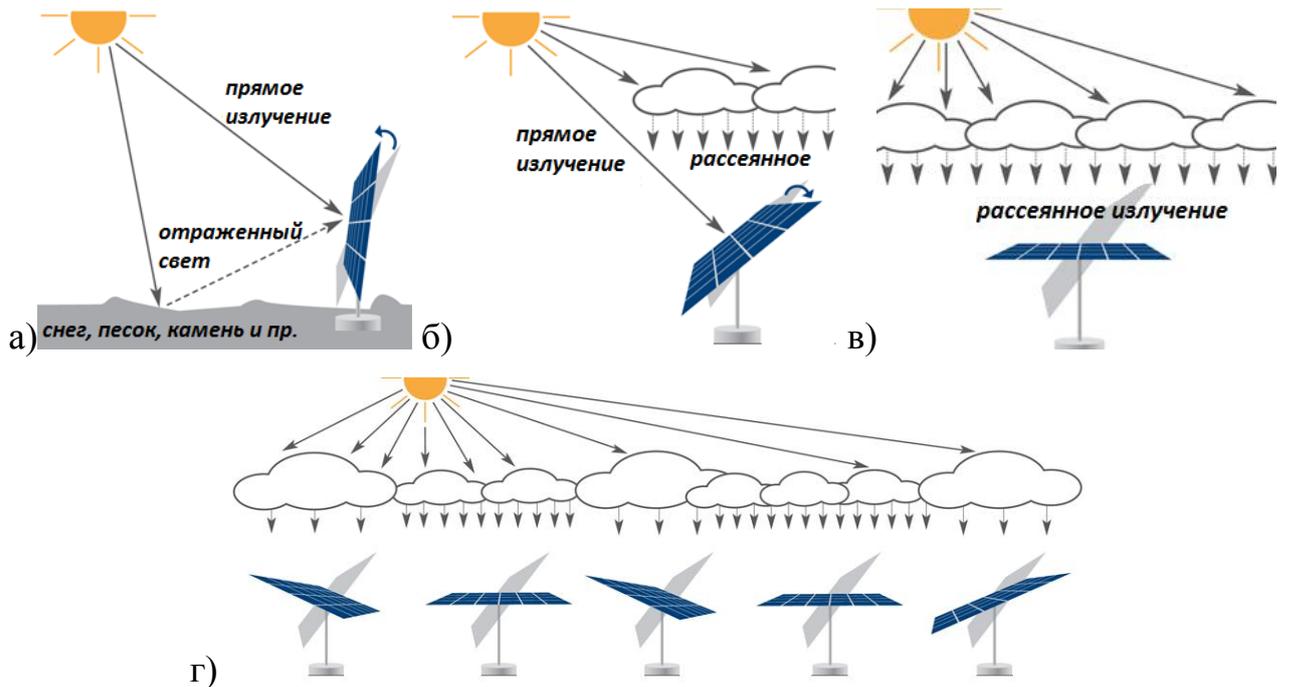


Рисунок 1.10. Ориентация на яркое пятно при различных погодных условиях.

В активных системах важно то, что производятся только те движения модуля, которые приведут к увеличению выработанной мощности.

На сегодняшний день существует большое количество способов реализации активных систем контроля и принципов их работы. Активные системы состоят из трех основных блоков: датчик, блок обработки сигнала датчика и выработки управляющего сигнала для поворотного устройства и самого поворотного устройства. Исключения составляют системы на основе термочувствительных элементов, которые являются и датчиком, и поворотным устройством, а блок контроля отсутствует. Более подробно о таких системах будет рассказано позже.

В общем виде все активные системы имеют одинаковый принцип работы и блок схему, изображенную на рисунке 1.11.

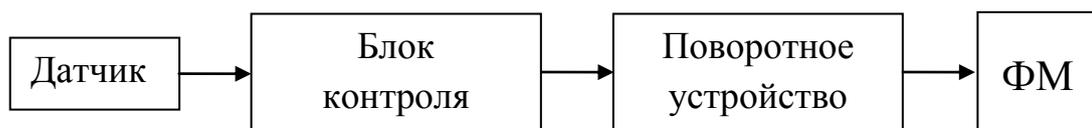


Рисунок 1.11. Структурная схема активной системы контроля ориентации ФМ

Принцип работы активных систем заключается в следующем: датчик реагирует на изменение положения яркого пятна на небе и подает сигнал блоку контроля, который его обрабатывает по заданному алгоритму и при необходимости выдает команду поворотному устройству.

Основная проблема реализации схемы – формирование управляющего сигнала от датчика к блоку контроля и алгоритм управления системой контроля. Блок контроля может быть реализован в любом варианте: от дискретных элементов до программируемых микроконтроллеров. Датчик является наиболее важным элементом системы, т.к. именно от него зависит точность ориентирования и адаптируемость к природным явлениям. Поэтому актуальна разработка датчика реагирующего на изменение положения яркого пятна на небе или, при отсутствии такового, способного подать сигнал об отсутствии необходимости ориентироваться.

К датчику системы контроля предъявляются следующие требования: погрешность определения положения яркого пятна на небе не более  $10^\circ$ , температурная стабильность, возможность работы в полевых условиях, удобство установки и эксплуатации.

#### **1.4 Методы контроля максимального потока солнечного излучения**

Методы контроля максимального потока солнечного излучения зависят от физических свойств потока солнечного излучения. Падающий на поверхность какого-либо тела поток солнечного (оптического) излучения частично отражается, частично проходит через тело и частично поглощается им.

Поглощённая часть энергии оптического излучения преобразуется в тепло, повышая температуру тела. Другой вид преобразования энергии оптического излучения - фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия), фотолюминесценция, фотохимические превращения и пр. [67].

Исходя из этого, можно сделать выводы, что датчики контроля следует разрабатывать, основываясь на двух свойствах излучения Солнца – повышение температуры освещенного тела и поглощения им лучистой энергии. Рассмотрим датчики, основанные на оптическом и тепловом методах контроля.

### **1.4.1 Датчики, основанные на оптическом методе**

Все датчики оптического излучения можно разделить на следующие основные группы:

- системы без использования датчиков;
- сканирующий датчик;
- щелевые солнечные датчики;
- датчики на эффекте Саньяка;
- гелиотрекер.

### **Системы контроля без использования датчика**

Самой простой активной системой контроля является система, без применения дополнительных датчиков [68]. В качестве чувствительных элементов используют несколько ФМ, количество которых зависит от количества осей слежения.

Одноосные системы имеют два одинаковых ФМ, расположенных на одной из осей: Запад-Восток для контроля положения яркого пятна по оси азимута или на оси Север-Юг – для контроля по оси эклиптики. Двухосные системы имеют дополнительные ФМ, расположенные по второй оси (рисунок 1.12).

Сигналы (значения тока или напряжения) с обоих ФМ поступают в блок контроля. Сигналы сравниваются и, если одно из значений больше, поворотному устройству (или нескольким, в зависимости от конструкции) поступает сигнал для поворота поверхностей в сторону ФМ с большим значением выходного сигнала.

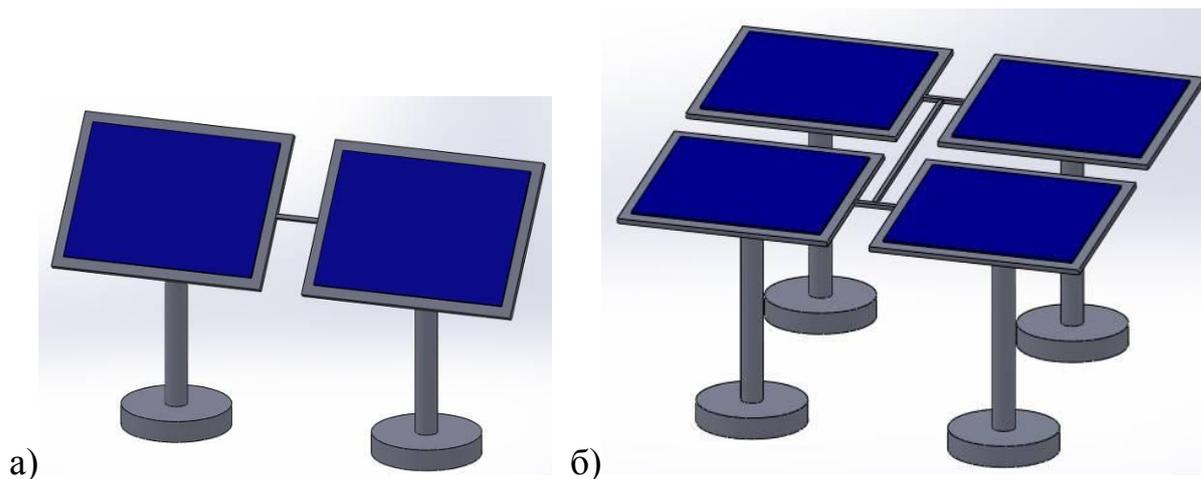


Рисунок 1.12. Активные системы контроля без использования датчика:  
а – одноосная, б – двухосная.

К недостаткам описанной системы относятся низкая точность и чувствительность. Это объясняется разнесенностью чувствительных элементов, и как следствие, их неравномерным нагреванием, которое, как известно, влияет на выходной сигнал [69]. Кроме того, такой способ контроля подходит только для двух и более ФМ.

Система контроля без использования датчика может быть использована только для ФМ. Предпочтительнее иметь систему с датчиком в виде малогабаритного отдельного блока, который может быть освоен в производстве и пригоден для использования с любым типом и количеством солнечных модулей (тепловых коллекторов, концентраторов солнечного излучения или ФМ).

### **Датчик на эффекте Саньяка**

Датчиком является оптический гироскоп, принцип действия которого основан на эффекте Саньяка. Через расщепитель солнечный луч распространяется в двух направлениях на поверхность ФМ, затем два луча отражаются от нее и суммируются в расщепителе. Если при этом плоскость ФМ направлена на Солнце, два луча имеют одинаковую длину, и при их сложении нет фазового сдвига. Когда Солнце находится под некоторым углом к плоскости ФМ, между

двумя световыми волнами возникает разность фаз. Это явление называется эффектом Саньяка. Измерив разность фаз, можно определить положение источника света. Поскольку частота света составляет несколько сотен терагерц, даже ее незначительные изменения позволяют измерить разность частот, поэтому данный датчик характеризуется высокой чувствительностью и разрешающей способностью порядка  $0,001^\circ/\text{ч}$ . Главными источниками погрешностей для датчика на эффекте Саньяка является дрейф нуля, вызванный изменением температур, магнитными полями и т.д. [70].

На сегодняшний день существует ряд нерешенных проблем использования данного датчика: нелинейность выходного сигнала, дрейф выходного сигнала, изменение длины оптического пути под воздействием теплового расширения, давления и механических деформаций.

Помимо описанных проблем, датчик, основанный на эффекте Саньяка, отличается сложностью конструкции и дороговизной его исполнения. К тому же столь высокая точность ориентирования на Солнце не обоснована для ФМ. Поэтому датчики, работающие по данному принципу не нашли практической реализации для наземных ФМ.

### **Гелиотрекер**

Гелиотрекер представляет собой небольшую плату с укрепленными на ней четырьмя элементами, представляющими собой фотодатчики (фоторезисторами, фотодиодами или др.) [71]. Элементы разделены между собой крестообразной перегородкой (рисунок 1.13). При ориентации на Солнце или яркое пятно освещены все четыре элемента. При изменении положения яркого пятна на небе изменится освещенность гелиотрекера, некоторые элементы окажутся в тени, что отследит схема управления.

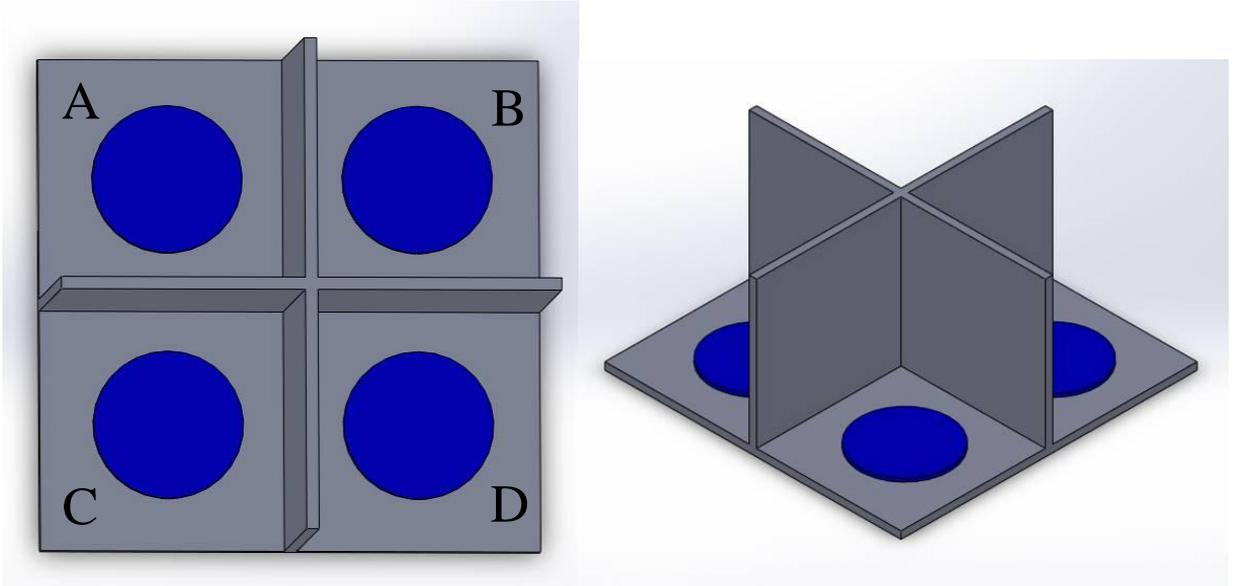


Рисунок 1.13. Гелиотрекер.

Возможные варианты освещения гелиотрекера отображены в таблице 1.3. «1» означает, что элемент освещен, «0» - элемент в тени. Возможное количество положений гелиотрекера - 9, любые комбинации с  $A=«1»$  и  $C=«1»$ , так же как  $B=«1»$  и  $D=«1»$  невозможны. Каждой комбинации сигналов, поступившей на блок контроллера, соответствует команда для поворотного устройства.

Таблица 1.3. Возможные варианты освещения двухосного гелиотрекера

Элемент А	1	0	1	0	0
Элемент В	0	1	1	0	0
Элемент С	0	0	0	1	0
Элемент D	0	0	0	0	1
Положение яркого пятна	выше и западнее	выше и восточнее	выше	ниже и восточнее	ниже и западнее
Команда поворотному устройству по оси эклиптики	вверх	вверх	вверх	вниз	вниз
Команда поворотному устройству по оси азимута	на запад	на восток	стоять	на восток	на запад

Продолжение таблицы 1.3

Элемент А	1	1	0	0	1
Элемент В	1	0	1	0	1
Элемент С	0	0	1	1	1
Элемент D	0	1	0	1	1
Положение яркого пятна	выше	западнее	восточнее	ниже	точно
Команда поворотному устройству по оси эклиптики	вверх	стоять	стоять	вниз	стоять
Команда поворотному устройству по оси азимута	стоять	на запад	на восток	стоять	стоять

Одноосный гелиотрекер является модификацией двухосного и состоит из двух элементов, разделенных перегородкой. Такой датчик используется для контроля положения яркого пятна в течение дня по оси азимута. Возможные варианты освещения одноосного гелиотрекера представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Возможные варианты освещения одноосного гелиотрекера

Элемент А	1	1	0	0
Элемент В	1	0	1	0
Положение яркого пятна	точно	западнее	восточнее	ночь
Команда поворотному устройству	стоять	на запад	на восток	на восток до конца

Если оба элемента одноосного гелиотрекера или все элементы двухосного не освещены, то подается команда разворота ФМ на восток в ожидании восхода Солнца.

Принцип работы гелиотрекера самый распространенный. На сегодняшний день существует множество вариантов его исполнения, отличающихся чувствительными элементами, формой перегородки или углом наклона чувствительных элементов (рисунок 1.14).

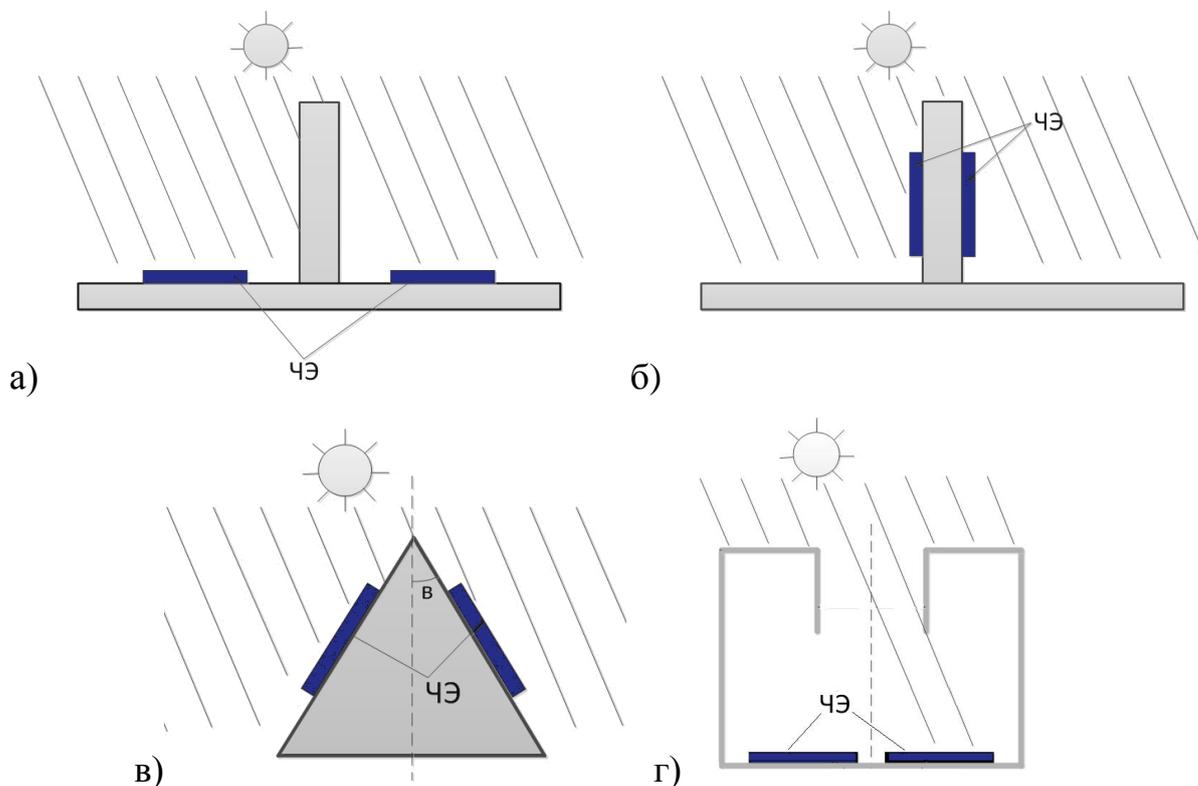


Рисунок 1.14. Варианты конструкции одноосного гелиотрекера.

На рисунках 1.14 а, б изображены гелиотрекеры с перегородкой перпендикулярной основанию, отличающиеся между собой расположением чувствительных элементов: на рисунке 1.14 а – элементы находятся на основании, на 1.14 б – на сторонах перегородки. Датчик на рисунке 1.14 а ориентирован на яркое пятно, когда оба элемента освещены, имеют максимальные и одинаковые значения выходных сигналов. Для датчика на рисунке 1.14 б наоборот, когда оба датчика имеют минимальные и одинаковые значения выходных сигналов, система является ориентированной на яркое пятно.

На рисунке 1.14 в изображен гелиотрекер с перегородкой в виде призмы, на сторонах которой расположены чувствительные элементы. Когда датчик будет

ориентирован на яркое пятно, значения выходных сигналов чувствительных элементов будут одинаковыми.

На рисунке 1.14 г изображен датчик, отличающийся от предыдущих вариантов, однако использующий принцип работы гелиотрекера. Он имеет форму куба с прямоугольным отверстием на верхней стороне. Чувствительные элементы расположены на дне куба таким образом, что при ориентации на яркое пятно они оба освещены одинаково. При изменении положения яркого пятна один из элементов оказывается в тени, как видно на рисунке, а второй – освещен. Таким образом, систему необходимо поворачивать в сторону неосвещенного датчика. Возможные варианты освещения одноосного гелиотрекера, изображенного на рисунке 1.14 г, представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Возможные варианты освещения одноосного гелиотрекера, представленного на рисунке 1.17 Г.

Элемент А	1	1	0	0
Элемент В	1	0	1	0
Положение яркого пятна	точно	восточнее	западнее	ночь
Команда поворотному устройству	стоять	на восток	на запад	на восток до конца

На рисунке 1.15 изображена одноосная система контроля с датчиком, основанным на принципе работы гелиотрекера и являющегося аналогом датчика, изображенного на рисунке 1.14 в. Только в данном случае элементы А и В разнесены на разные стороны поверхности ФМ. В качестве чувствительных элементов в данном случае используются ФЭП, расположенные под углом  $45^\circ$  к поверхности ФМ. При ориентировании ФМ на яркое пятно значения сигналов элементов А и Б одинаковы [72].

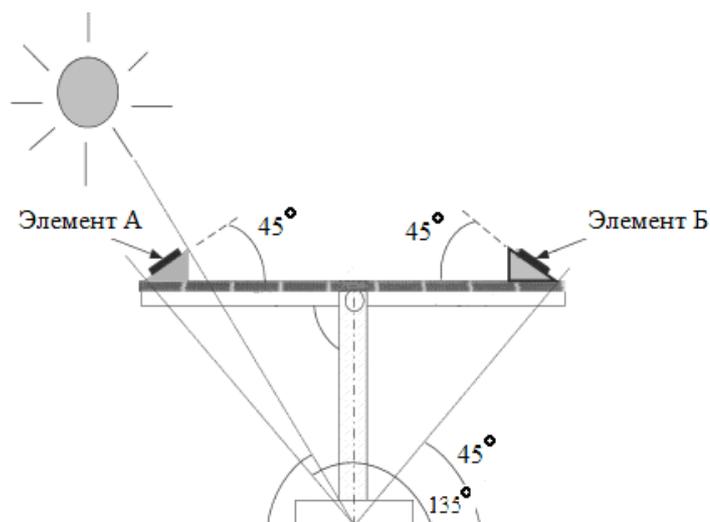


Рисунок 1.15. Гелиотрекер с разнесенными чувствительными элементами.

На рисунке 1.16 представлены некоторые практические реализации гелиотрекера [73-75].



Рисунок 1.16. Варианты исполнения гелиотрекера.

Несмотря на распространенность принципа работы гелиотрекера среди современных датчиков, у них имеется ряд недостатков. При облачной погоде, во время затенения всех элементов облаком блок контроллера передаст поворотному устройству команду поворота «на восток до конца». Таким образом, когда облако прекратит затенять гелиотрекер, все элементы будут отвернуты от Солнца, ни один элемент не будет освещен, и ФМ оставшийся день не будет вырабатывать энергию.

Датчики типа гелиотрекер часто имеют температурную нестабильность, что приводит к погрешности ориентирования.

### Датчик максимальной освещенности

Вариантом конструкции одноосного датчика, представленного на рисунке 1.17 В является MLD-sensor («Maximum Light Detection») немецкой фирмы «DEGERenergie» (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17. MLD-sensor

Датчик состоит из трех элементов, расположенных на сторонах треугольной пирамиды. В основании пирамиды расположена плата блока контроля. Блок контроля непрерывно измеряет интенсивность солнечного излучения и определяет положение яркого пятна, при необходимости подает команду поворотному устройству изменить наклон ФМ [13].



Рисунок 1.18. Установка MLD-sensor

Недостатками представленного датчика является проблема определения необходимости ориентирования, система постоянно в режиме «поиска яркого пятна», что может привести к лишним движениям ФМ. Так же не решена проблема запуска системы утром. Кроме того, угол между элементами  $60^\circ$  не является максимально эффективным. Фирмой предлагается использовать два таких датчика для двухосной системы контроля, что приводит к таким неудобствам, как использование двух независимых креплений на разных сторонах ФМ (рисунок 1.19) и необоснованное использование двух блоков контроля.

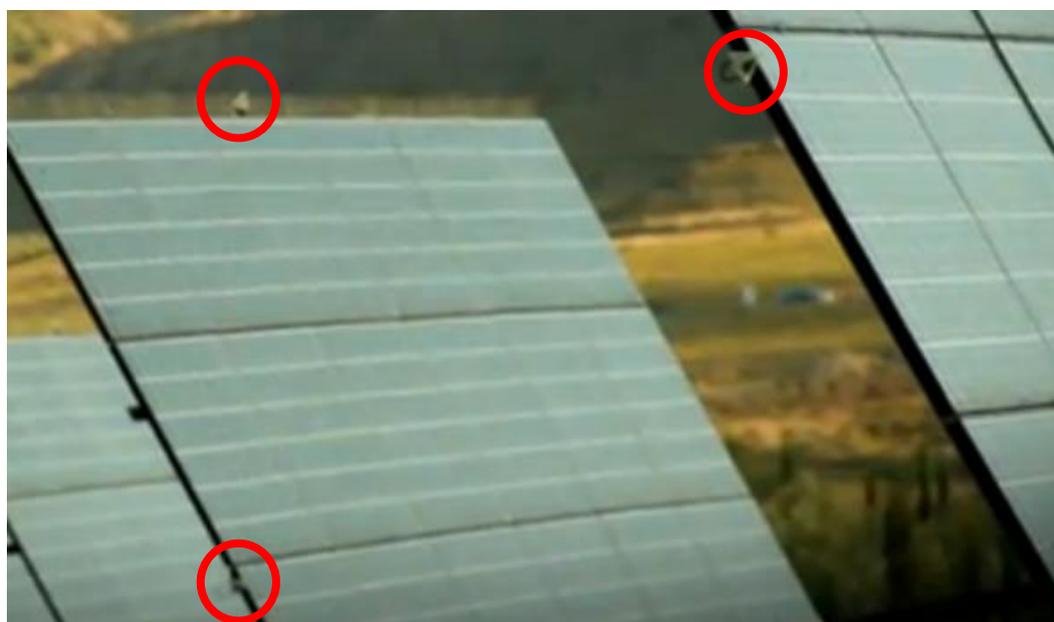


Рисунок 1.19. Крепление MLD-sensor для двухосной системы контроля

### **Датчик, сканирующий небосвод**

Сканирующим небосвод, называют датчик, который при включении «сканирует» небо по заданному алгоритму с определенным шагом и фиксирует значения солнечной радиации в каждом положении. Блок контроллера выявляет точку с максимальным значением и подает команду поворота ФМ на соответствующий угол. Таким образом, проводится ориентация на самое яркое пятно.

Существует несколько способов реализации «сканирующих» датчиков. Один из них является аналогом гелиотрекера, описанного ранее (рисунок 1.20) [76].

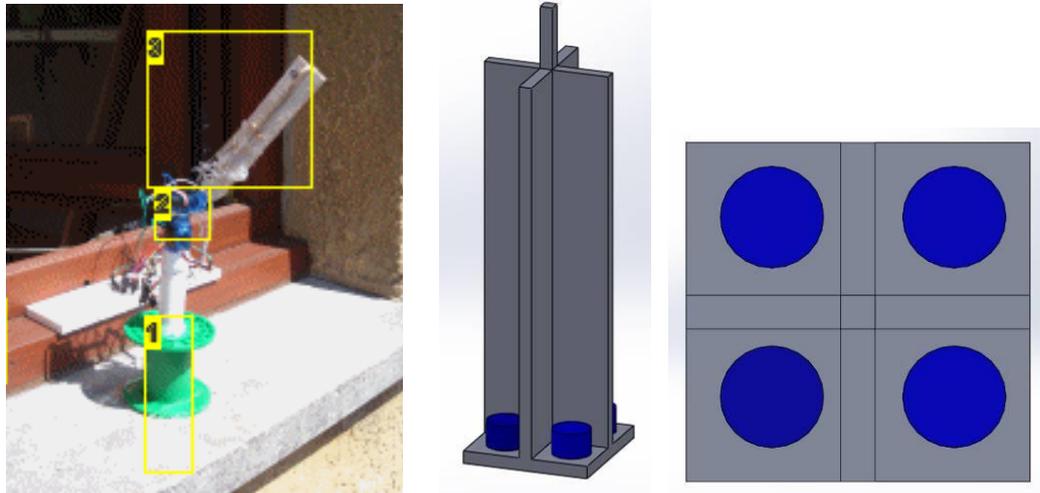


Рисунок 1.20. Датчик, сканирующий небосвод (вариант 1)

Датчик состоит из четырех чувствительных элементов, разделенных между собой перегородкой. Располагается он в непосредственной близости к ФМ на отдельной неподвижной платформе. При включении датчик сканирует небосвод, записывая значения выходных сигналов чувствительных элементов в каждом положении. Угол, при котором все четыре датчика максимально освещены, характеризует положение Солнца (или самого яркого пятна) на небе. Блок контроллера подает команду поворота ФМ на заданный угол. Далее система работает по принципу гелиотрекера.

При низкой освещенности чувствительных элементов датчика, система перезапускается, т.е. снова сканирует небо и находит самое яркое пятно. В пасмурные дни и ночью блок контроллера после сканирования не выявляет максимального значения и подает команду перехода системы в «спящий режим» на время, соответствующее заданному алгоритму.

Другой вариант сканирующего датчика изображен на рисунке 1.21.

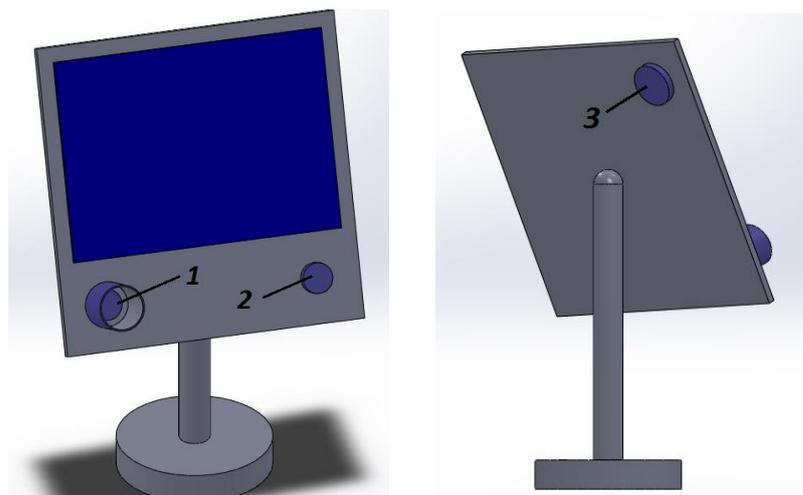


Рисунок 1.21. Датчик, сканирующий небосвод (вариант 2).

Датчик состоит из трех чувствительных элементов, разнесенных и расположенных на поверхности ФМ. Элемент 1 расположен в непрозрачном цилиндре на поверхности ФМ. Ось цилиндра расположена под прямым углом к поверхности ФМ. Таким образом, элемент 1 освещен только при ориентировании ФМ на Солнце. Когда Солнце изменит положение, элемент 1 будет в тени стенок цилиндра и выходной сигнал элемента станет равным нулю.

Элемент 2 расположен на поверхности ФМ и служит для определения необходимости ориентирования. Если сигнал с элемента 2 выше порогового значения срабатывания и сигнал элемента 1 равен нулю, то блок контроллера запускает «режим сканирования неба» в поисках солнца. Когда элемент 1 будет освещен, т.е. плоскость ФМ станет перпендикулярной солнечным лучам, блок контроллера подает команду остановки поворотному механизму.

В пасмурные дни и ночью сигнал элемента 2 ниже порогового значения и блок контроллера делает вывод об отсутствии необходимости ориентирования и переходит в «спящий режим» на время, определенное алгоритмом управления.

Элемент 3 расположен на обратной стороне поверхности ФМ. В течение всего дня он отвернут от солнца, поэтому его сигнал равен нулю. Он необходим для запуска системы утром. Вечером ФМ повернут на запад и в таком положении переходит в «спящий режим». Утром элемент 1 и 2 оказываются отвернутыми от восходящего Солнца, в то время как элемент 3 направлен к нему. Наличие

сигнала на элементе 3 является признаком восхода, и блок контроллера подает команду поворота системы на восток.

Далее блок контроллера определяет сигналы с элементов 2 и 3 и при необходимости ориентирования запускает «режим сканирования».

Одним из главных недостатков сканирующих датчиков, относительно представленных выше, является потребление поворотного устройства в течение дня для определения положения яркого пятна на небе. Это особенно неоправдано в пасмурную погоду, когда сканировать небосвод приходится несколько раз в день. Для варианта датчика, изображенного на рисунке 1.20, требуется отдельно стоящая неподвижная площадка вблизи ФМ.

### Щелевые солнечные датчики

Щелевые солнечные датчики получили широкое распространение в космической отрасли для ориентирования на Солнце ФМ и концентраторов солнечной энергии для космических аппаратов [77].

Один из вариантов исполнения щелевого солнечного датчика представлен на рисунке 1.22. Чувствительными элементами являются кремниевые фотодиоды, расположенные на полукруглом основании, каждый в своей щели.

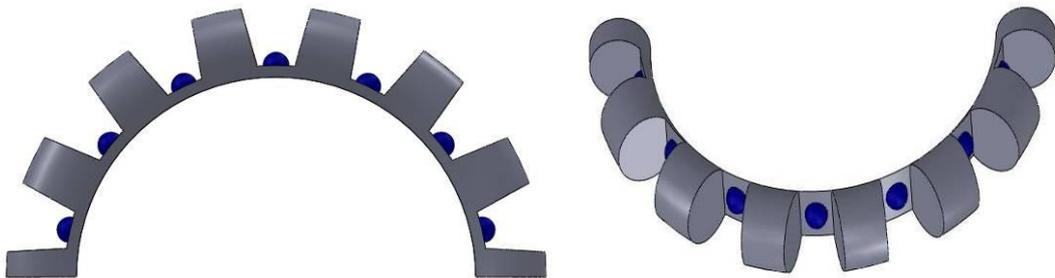


Рисунок 1.22. Щелевой солнечный датчик.

Принцип работы датчика основан на сравнении сигналов, поступающих с фотодиодов, и выявлении максимального сигнала. Датчик расположен так, чтобы при любом положении Солнца один из фотодиодов был освещен, а другие

находились в тени перегородок. Блок контроля определяет положение фотодиода с максимальным сигналом и подает команду поворота ФМ на угол, соответствующий положению этого фотодиода. Чем больше количество фотодиодов, тем больше чувствительность и точность ориентации. Щелевые датчики могут быть одноосными и двухосными.

Основными недостатками щелевых датчиков являются их большие размеры, дороговизна и сложность конструкции. Кроме того, принцип работы данных датчиков исключает возможность их размещения на поверхности ФМ, т.е. требует дополнительной неподвижной поверхности вблизи с ФМ.

### Экваториальный датчик

Признаки гелиотрекера и щелевых датчиков сочетает в себе экваториальный датчик [78].

Датчик состоит из двух одинаковых панелей, соединенных под прямым углом. На каждой панели размещены чувствительные элементы, представляющие собой кремниевые ФЭП (рисунок 1.23). Чувствительные элементы каждой панели соединены последовательно.

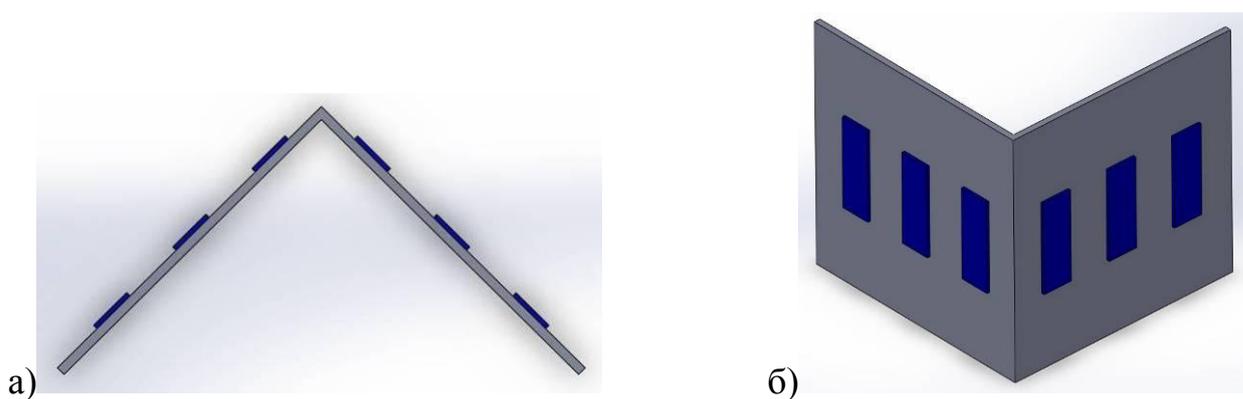


Рисунок 1.23. Экваториальный датчик.

Датчик устанавливается таким образом, чтобы в полдень стык панелей был направлен на Солнце. Благодаря такому положению, от рассвета и до заката одна из частей устройства будет освещена. Следовательно, на выходе датчика всегда

будет вырабатываться электрический сигнал независимо от положения Солнца на небосклоне.

При достаточных размерах элементов, датчик может являться источником питания блока контроллера. Таким образом, решается вопрос необходимости ориентации ФМ. Если уровня освещения не достаточно для работы блока контроля (например, ночью, при наличии тумана или облачности), значит и уровень сигнала меньше порога срабатывания, система не включается, ФМ стоит неподвижно. Когда появится Солнце, один из элементов будет освещен, и выработанного им напряжения будет достаточно для включения блока контроллера.

Блок контроллера сравнивает сигналы двух панелей и подает команду для поворота ФМ в сторону большего. Для определения угла поворота необходимо использовать два дополнительных фотодатчика (например, фоторезисторы), расположенных непосредственно на поверхности ФМ, на противоположных сторонах. Как только освещенность дополнительных фотодатчиков сравнивается, блок контроллера подаст команду остановки работы поворотного устройства. Таким образом, плоскость ФМ будет направлена на Солнце (или яркое пятно). Как только Солнце сместится, освещенность дополнительных фотодатчиков станет разной, и блок контроллера запустит поворотный механизм, пока снова не восстановится нужное направление ФМ на Солнце.

К недостаткам данного датчика можно отнести излишнее количество чувствительных элементов (минимум 6 на панелях датчика и 2 на плоскости ФМ), низкую чувствительность датчика, Аналогично щелевым датчикам экваториальное устройство требует стационарной горизонтальной поверхности для установки. Как и в системах без использования датчика, на выходные сигналы чувствительных элементов будет влиять температура их нагрева, что может увеличить погрешность ориентирования ФМ. Авторами также не сказано как расположить два чувствительных элемента на поверхности или сторонах ФМ, а от этого зависит чувствительность и точность ориентирования.

## 1.4.2 Датчики, основанные на температурном методе

### Термотрекер

По принципу работы гелиотрекера, описанного ранее, можно создать датчик контроля на основе температурных преобразователей. Конструкция датчика аналогична конструкции гелиотрекера, только чувствительными элементами являются термопреобразователи. При ориентации на яркое пятно освещены все четыре элемента, следовательно, и температура их нагрева одинакова. При перемещении Солнца (или яркого пятна) некоторые чувствительные элементы окажутся в тени, и их температура уменьшится, что отследит блок контроля и подаст команду поворота ФМ в сторону элемента с максимальной температурой. Аналогично гелиотрекеру, возможна реализация одно- и двухосных термотрекеров.

Недостатками описанного термотрекера являются температурная нестабильность, возникающая из-за влияния ветра. Кроме того, не решены проблемы необходимости ориентирования и запуска системы утром.

### Двигатель Стирлинга

Двигатель Стирлинга – тепловой двигатель, использующий для перемещения поршней расширяющийся газ (рабочее тело), которым может являться гелий или водород [79]. Если на поршни установить ФМ, то двигатель Стирлинга будет являться и датчиком, и поворотным механизмом системы контроля. Рабочее тело находится в замкнутом пространстве – в двух цилиндрах с поршнями, на которых расположен ФМ. Освещенная область цилиндра нагревается, что приводит к расширению газа и перемещению поршня. Не освещенная область имеет более низкую температуру, и низкое положение поршня. Таким образом, изменяется угол наклона ФМ, чтобы поверхность его

была ориентирована на яркое пятно. При изменении положения яркого пятна, изменяется нагрев цилиндров, следовательно, и положения поршней, и как результат угол наклона ФМ. Таким образом, происходит контроль максимума освещенности ФМ.

Одним из важных недостатков данного способа контроля является сложность и дороговизна конструкции. К тому же подобная конструкция не может обеспечить высокую точность ориентирования в течение всего года. Также могут возникнуть проблемы с рабочим телом в цилиндрах. Гелий - летучий газ, из-за чего объем его со временем может уменьшиться, что приведет к большой погрешности ориентирования. Водород является взрывоопасным газом, использование его требует большой осторожности и опыта. Для установки и обслуживания систем типа двигателя Стирлинга потребуются опытные рабочие, что приведет к удорожанию системы.

### **Термомеханическая самонаводящаяся система контроля**

В термомеханической самонаводящейся системе контроля чувствительными элементами и поворотным устройством являются термочувствительные элементы (ТЧЭ) с большим температурным коэффициентом линейного расширения. Каждый ТЧЭ представляет собой полосу твердого материала, имеющего плоскую зачерненную поверхность [80].

Принцип работы системы основан на изменении длины ТЧЭ в зависимости от их температуры. При одинаковой освещенности всех ТЧЭ температуры их, а, следовательно, и длины одинаковы, в таком случае ФМ ориентирован горизонтально. Если освещенность одного ТЧЭ отличается от уровня освещенности другого, появляется необходимость ориентирования ФМ. Наиболее освещенный ТЧЭ под действие большей температуры удлиняется, что приводит к наклону плоскости ФМ в сторону положения Солнца (или яркого пятна). При перемещении Солнца в течение дня меняется освещенность ТЧЭ, их температура,

как следствие их длина и угол наклона ФМ. Описанная система контроля может быть выполнена в одноосном и двухосном варианте.

Основным недостатком термомеханической самонаводящейся системы является тепловая инерционность нагрева ТЧЭ при восходе Солнца и в условиях переменной облачности. Кроме того, на точность ориентации ФМ будет оказывать влияние температура окружающего воздуха, скорость и направление ветра.

### **1.4.3 Анализ способов, методов и датчиков контроля**

В результате анализа способов контроля выявлены три способа: ручной, пассивный и активный. Анализ показал, что в системах с ручной наводкой на Солнце точность ориентирования, а значит и выработанная мощность напрямую зависит от работы оператора: выбора им оптимального угла наклона ФМ, количества совершенных поворотов. Однако данный способ позволяет оператору быстро отследить наличие поломки в случае ее возникновения. Ручной способ чаще всего используется в качестве резервного для большого количества ФМ, управляемых одним приводом. Также к этому способу прибегают при использовании активного способа контроля, в случае отказа по какой-либо причине датчика системы контроля. Некоторые фирмы используют ручной способ совместно с активным для ориентирования ФМ утром на восходящее Солнце, если в использующемся датчике не решена проблема запуска утром.

На пассивном способе ориентирования основаны системы, использующие заданный алгоритм поворота ФМ в течение дня. Пассивные системы не обеспечивают ориентирование плоскости ФМ на максимальный поток солнечного излучения, что приводит к потере вырабатываемой мощности по сравнению с активными системами. В пасмурные дни работа по заданному алгоритму приводит к необоснованной работе двигателя, а, следовательно, и его энергопотреблению. Существенным недостатком пассивных систем является необходимость корректировки алгоритма для каждого конкретного

местоположения ФМ на основе данных метеослужб. Из-за этого данные системы не являются универсальными для любого ФМ.

Активный способ контроля наиболее распространенный в существующих системах. В отличие от ручного и пассивного способа активные системы позволяют ориентировать поверхность ФМ на максимальный поток солнечного излучения, который в ряде случаев не совпадает с положением Солнца на небосводе. Такое ориентирование позволяет наиболее эффективно использовать солнечную энергию. Важной частью активной системы является датчик, разработкой новых конструкций которого до сих пор занимается множество ученых, что говорит об актуальности данных исследований.

Реализация датчиков активных систем возможно на основе разных методов. Однако проведенный анализа показал, что для ориентации ФМ наиболее подходящим является оптический метод. Это связано с тем, что работа ФМ основана на фотоэффекте, а значит, датчик, использующий тот же метод, будет наиболее эффективным для данной цели.

Анализ показал, что датчики на основе теплового метода отличаются большей инерционностью, меньшей точностью определения положения яркого пятна, а системы типа двигателя Стирлинга и термомеханической самонаводящейся системы отличаются сложностью конструкции и обслуживания.

В результате анализа датчиков, работа которых основана на оптическом методе, выявлены следующие недостатки: сложность конструкции; температурная зависимость; проблема определения необходимости ориентации; проблема запуска системы утром.

Таким образом, возникает потребность создания датчика положения максимального потока солнечного излучения (яркого пятна) с низкой температурной зависимостью, высокой точностью, компактный, простой в изготовлении и использовании, с возможностью определения восхода для запуска системы утром.

## ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ФМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ

### 2.1 Эффективность применения систем контроля ориентации ФМ

На основе математической модели работы ФМ, приведенной в первой главе, вычислена мощность, выработанная ФМ в каждом месяце года. Расчеты проведены для ФМ установленных горизонтально, под углом к горизонту, соответствующему широте местности, с применением одно- и двухосной систем контроля.

Как видно из формул (1.18-1.21), влияющими величинами на мощность ФМ являются местное время, номер дня в году, широта местности, КПД ФМ и пространственная ориентация плоскости ФМ по отношению к горизонту.

Для определения выработанной мощности ФМ за месяц расчеты проведены в течение всего дня с интервалом времени 5 минут. С целью получения среднего значения за месяц для расчетов использовались номера дней 15 числа каждого месяца (для января номер дня – 15, для февраля – 30 и т.д.).

Расчеты проведены на примере ФМ, установленного в Томске, географические координаты которого соответствуют  $56^{\circ} 29'$  с.ш.  $84^{\circ} 57'$  в.д. [59]. Наиболее эффективным углом наклона плоскости ФМ по оси эклиптики будет угол, соответствующий географической широте местоположения, т.е. для Томска –  $56^{\circ}$ .

95% всех ФМ в мире изготовлены из кремния [31]. На сегодняшний день КПД кремниевого ФМ варьируется от 11 до 18 %. Для расчетов будем использовать наиболее распространенные кремниевые ФМ с КПД 15% [63].

Используя указанные выше значения величин, рассчитаны средние значения мощности ФМ в течение года с использованием систем контроля и без них, и построены графики зависимости среднемесячной мощности ФМ на примере Томска (рисунок 2.1).

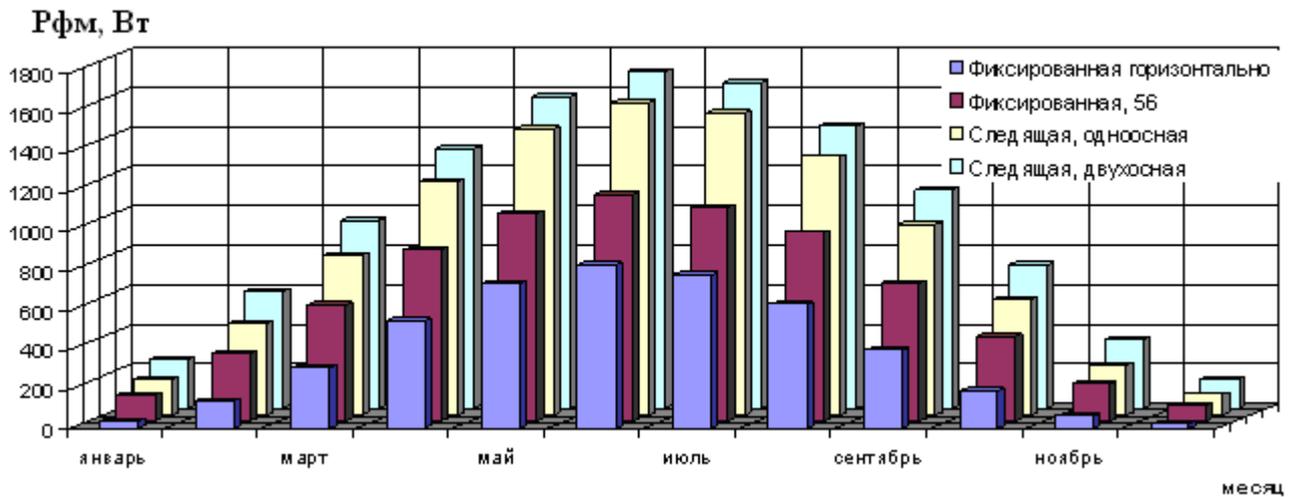


Рисунок 2.1. Значения среднемесячной мощности ФМ в течение года с использованием систем контроля и без них.

Полученные расчетным путем значения мощности ФМ в течение года сравнены с результатами, полученными на основе двенадцатилетнего анализа работы установленного горизонтально ФМ в Сибири (рисунок 2.2) [81].

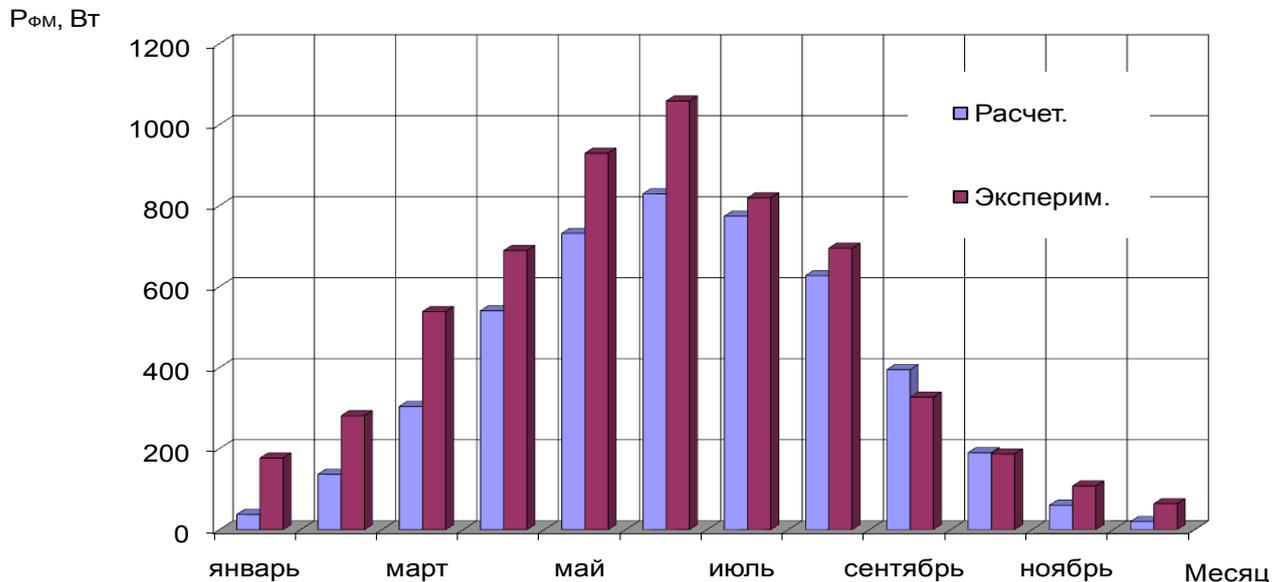


Рисунок 2.2. Значения среднемесячной мощности ФМ в течение года, полученные расчетным и экспериментальным путем.

Как видно из рисунка 2.2, динамика изменений мощности ФМ в течение года одинаковая. Экспериментальные значения больше теоретических, что

обусловлено тем, что среднегодовое значение солнечной радиации в рассматриваемый год было выше среднестатистического. Также влияние оказали фоновое и рассеянное излучение. В зимние месяцы большая разница теоретических и экспериментальных данных объясняется наличием отраженно от снега излучения, которое также не учтено при расчетах. Результаты подтверждают достоверность расчетов и построенной модели.

Полученные данные позволяют сделать заключение об эффективности использования систем контроля. На рисунке 2.3 представлена зависимость выигрыша в процентах выработанной мощности ФМ с применением одно- и двухосной систем относительно выработанной мощности ФМ, установленного под углом  $56^\circ$ , который является наиболее эффективным для Томска.

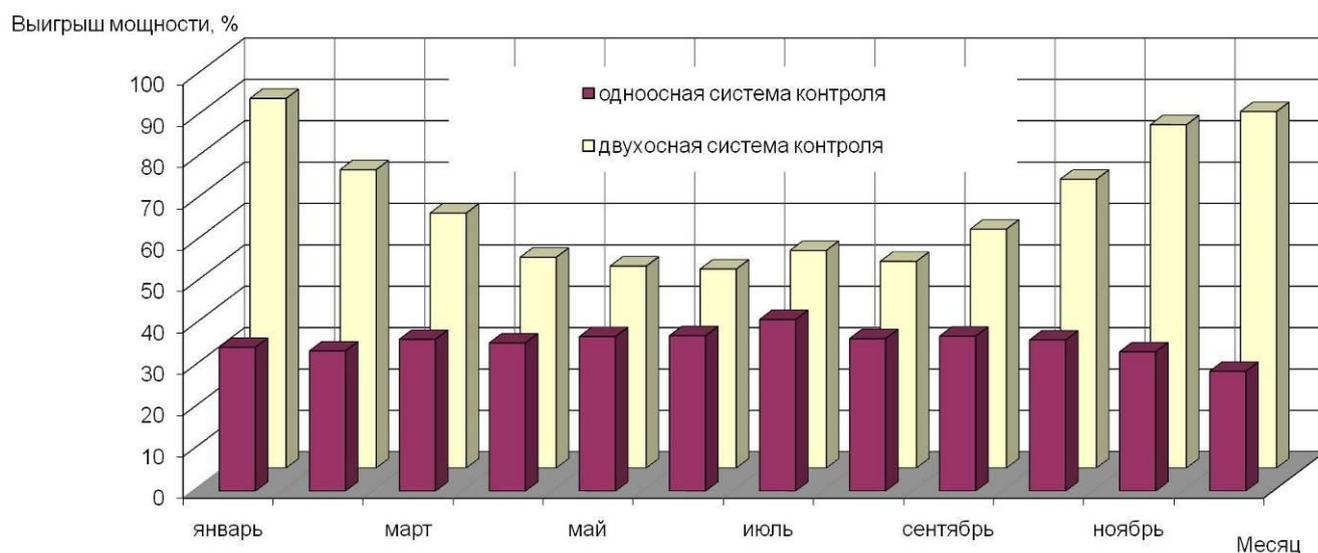


Рисунок 2.3. Зависимость выигрыша мощности ФМ с применением одно- и двухосной систем относительно установленного под углом  $56^\circ$ .

Из рисунка выше видно, что применение систем контроля приносят ощутимый выигрыш выработанной мощности ФМ. Одноосная система в разные месяцы приносит дополнительно от 28 до 41% мощности ФМ, а двухосная – от 48 до 89%.

Согласно расчетам, применение одноосной системы принесут дополнительно 37% в год, а двухосная система контроля увеличит выработанную мощность ФМ на 56%.

Используя математическую модель расчета мощности ФМ, произведены расчеты для нескольких городов, расположенных на различной географической широте. На рисунке 2.4 представлены результаты расчетов среднегодовой мощности ФМ при его фиксированном положении под углом к горизонту, равным широте местности, при использовании одно- и двухосных систем ориентирования.

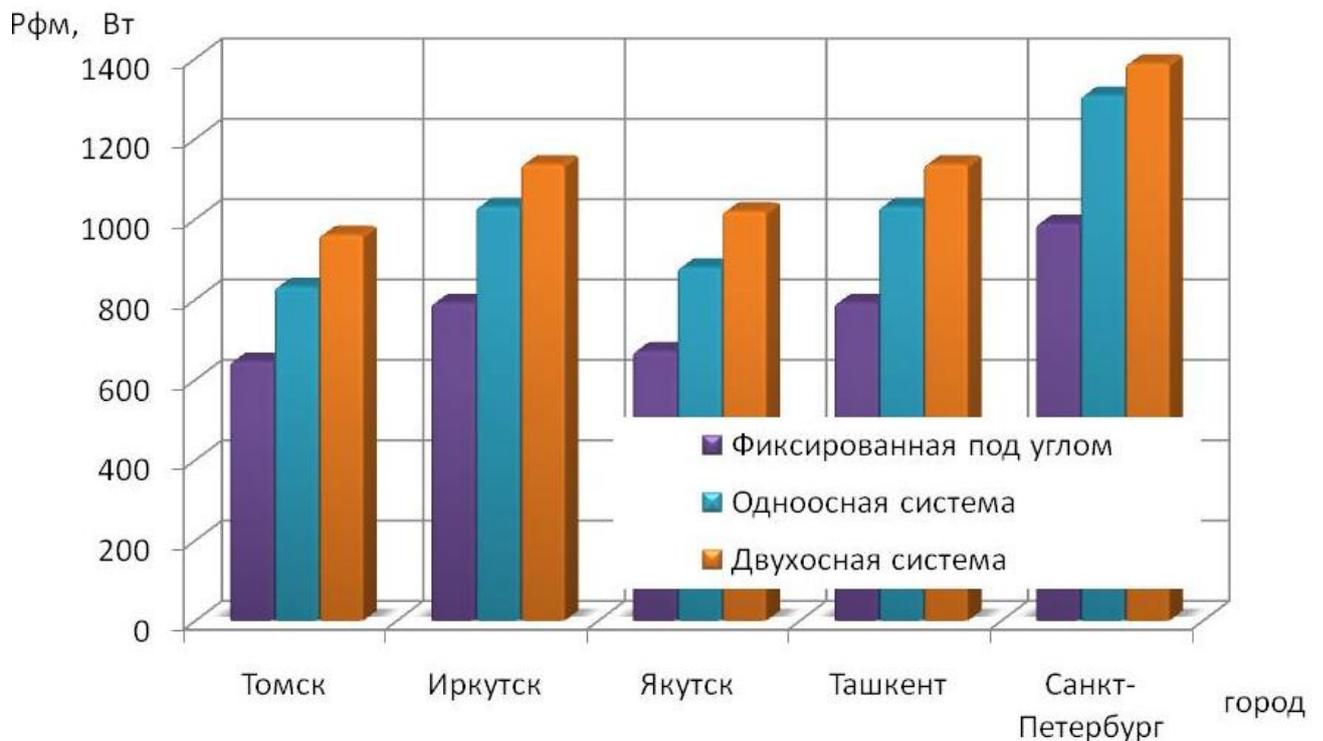


Рисунок 2.4. Годовая мощность ФМ установленного под углом, с применением одно- и двухосной систем контроля в разных городах.

В таблице 2.1 можно увидеть результаты процентного выигрыша выработанной мощности ФМ с применением систем контроля относительно мощности ФМ, фиксированного под углом, равным широте местности для разных регионов.

Таблица 2.1. Выигрыш мощности ФМ с применением систем контроля относительно мощности фиксированного под углом ФМ для разных регионов.

Город	Широта	Выигрыш мощности, %	
		С одноосной системой	С двухосной системой
Томск	56°29'19" с.ш	37	56
Иркутск	52°17'00" с.ш	38	50
Якутск	62°01'38" с.ш	40	59
Ташкент	41°18'00" с.ш	39	51
Санкт-Петербург	59°57'00" с.ш	41	47

Как видно из рисунка 2.4 и таблицы 2.1, эффективность систем ориентирования однозначна: одноосная система приносит дополнительно от 37 до 41 % мощности, а двухосная – от 47 до 59 % относительно фиксировано установленного ФМ.

Однако, несмотря на столь большую эффективность двухосной системы, рентабельнее использовать одноосную. Для Томска выигрыш по мощности двухосной системы относительно одноосной составляет всего 13% при установленной второй оси на 56°. На рисунке 2.3 видно, что выигрыш двухосной систем особо ощутим в зимние месяцы, т.е. когда склонение Солнца изменяется значительно. Если несколько раз в год менять вручную угол наклона поверхности ФМ на угол, соответствующий высоте солнцестояния, то выигрыш двухосной относительно одноосной системы будет меньше. Ввод второй оси обойдется дороже и уменьшит надежность всей системы.

В первой главе говорилось, что использовать солнечную энергию целесообразно при годовой солнечной радиации на горизонтальную поверхность более 1200 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Данное условие актуально для ФМ, установленного под углом к горизонту, равным широте местности. Определим на примере Томска

необходимые значения годовой солнечной радиации для получения той же мощности, выработанной ФМ с применением одно- и двухосной систем контроля.

Значение выработанной за год мощности фиксированного ФМ под углом к горизонту, равным широте местности при годовой солнечной радиации  $1200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  обозначим  $P_{\text{годовая ФМ}}$ . Применение одноосной системы увеличит значение годовой мощности ФМ на 37%, а двухосной – на 56%.

$$\begin{aligned} Sr &= k \cdot P_{\text{годовая ФМ}} \\ 1.37 \cdot Sr_1 &= k \cdot P_{\text{годовая ФМ}} \\ 1.56 \cdot Sr_2 &= k \cdot P_{\text{годовая ФМ}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $Sr$  – значение годовой солнечной радиации на горизонтальную поверхность, при которой целесообразно использовать ФМ,  $Sr=1200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ;

$k$  – коэффициент, отражающий зависимость выработанной мощности ФМ от значения солнечной радиации;

$Sr_1$  – значение годовой солнечной радиации, при которой целесообразно использовать ФМ с одноосной системой;

$Sr_2$  – с двухосной системой.

Решив уравнения 2.1, получим  $Sr_1=876 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ,  $Sr_2=769 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ . Использование ФМ с одноосной системой контроля будет целесообразным при годовой солнечной радиации  $876 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  и  $769 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  – с применением двухосной. Согласно рисунку 2.5 [82] и полученным данным, на территории всей Томской области целесообразно использование ФМ с применением систем контроля. Без систем контроля данный регион не был бы благоприятным для СЭС. Таким образом, применение систем контроля позволяет значительно расширить географию использования ФМ.

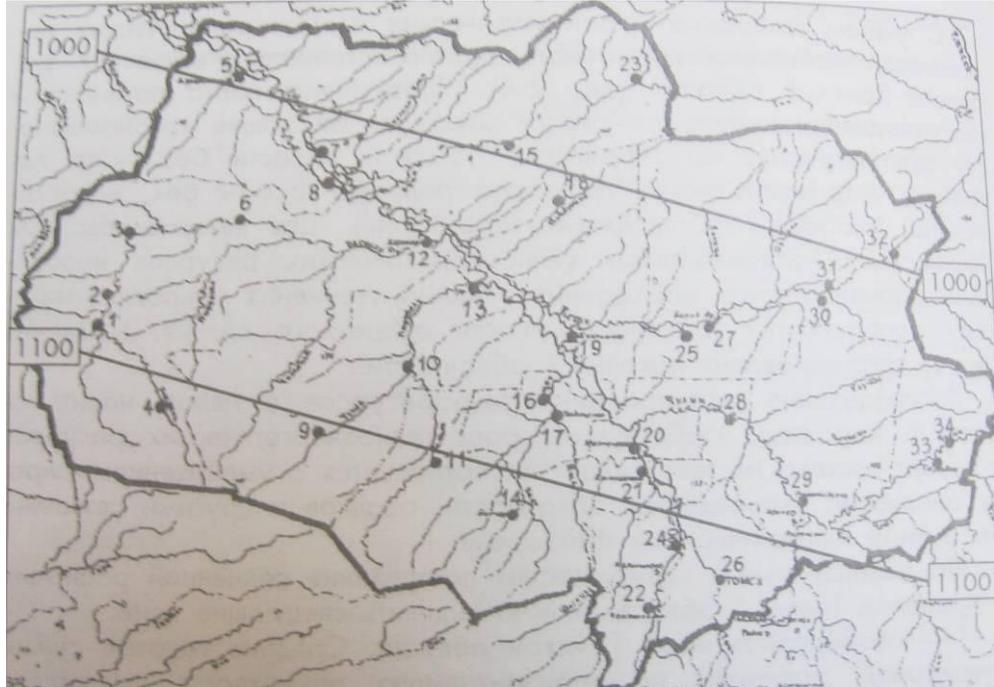


Рисунок 2.5. Потенциальные гелиоэнергетические ресурсы Томской области  
(кВт·ч/м<sup>2</sup>·год)

## 2.2 Энергетический критерий работы ФМ

При планировании установить СЭС, потребитель зачастую делает заключение о целесообразности ее использования, основываясь на данных производителя о КПД ФМ и данных метеослужб.

Такой подход не может дать реальную оценку полученной мощности, т.к. КПД указанный производителем в паспорте является величиной, определенной в лабораторных условиях при потоке солнечного излучения под прямым углом к поверхности ФМ. Как говорилось в предыдущей главе, при таком взаимном расположении источника света и ФМ, выходная мощность будет максимальна. Однако в реальных условиях положение Солнце изменяется в течение дня по двум осям. ФМ обычно устанавливают таким образом, что бы его поверхность была направлена на Солнце в полдень. Значит значение КПД с целью определения мощности ФМ можно использовать только при расчетах нескольких часов в день, в остальное время мощность ФМ будет ниже. Использование

значения КПД ФМ при проектировании СЭС и расчете мощности ФМ не даст реальной картины и введет потребителя в заблуждение.

На сегодняшний день ни в одном существующем нормативном документе нет характеристики ФМ, позволяющей дать точную оценку расчета ожидаемой мощности ФМ и эффективности ее работы [21, 83-84].

Автором диссертации предлагается ввести термин «эффективность использования солнечной энергии», как энергетический критерий оценки работы ФМ, позволяющий наиболее приближенно к реальности оценить эффективность использования солнечной энергии ФМ СЭС. Данный энергетический критерий может быть использован при проектировании СЭС.

Предложено следующее определение термина.

Эффективность использования солнечной радиации ФМ – энергетический критерий работы ФМ, равный отношению среднемесячной выработанной в течение дня мощности ФМ к среднемесячной приходящей солнечной радиации в течение дня на следящую поверхность, соответствующую площади поверхности ФМ.

$$K_{\text{ФМ}} = \frac{P_{\text{ФМ}}}{Sr \cdot S_{\text{ФМ}}}, \quad (2.2)$$

где  $K_{\text{ФМ}}$  – энергетический критерий эффективности использования солнечной энергии ФМ;

$P_{\text{ФМ}}$  – среднемесячная мощность ФМ, выработанная в течение дня;

$Sr$  – среднемесячная солнечная радиация, падающая на следящую поверхность в течение дня;

$S_{\text{ФМ}}$  – площадь поверхности ФМ.

Солнечную радиацию, падающую на следящую поверхность, можно определить, используя математическую модель работы ФМ (1.1 и 1.18).

$$Sr_{\text{np}} = Sr \cdot \cos \beta, \quad (2.3)$$

где  $Sr_{np}$  – прямая солнечная радиация на поверхность, расположенную под углом  $\beta$ , определяется по данным метеослужбы для конкретного региона,

$Sr$  – солнечная радиация, падающая на следящую поверхность.

$\beta(t)$  – приведенный угол падения солнечных лучей на поверхность. Расчет  $\cos \beta$  проводится с использованием математической модели (формула 1.3).

Выразим из 2.3 солнечную радиацию, падающую на следящую поверхность:

$$Sr = \frac{Sr_{np}}{\cos \beta}, \quad (2.4)$$

Формула 2.4 подходит для расчета мгновенного значения. Среднемесячная солнечная радиация  $Sr$  определяется, как дневная сумма отношений среднемесячной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, в течение часа по данным метеослужбы к  $\cos \beta$ , соответствующему данному часу (формула 2.5).

$$Sr = \int \frac{Sr_{np}(t)}{\cos \beta(t)} dt, \quad (2.5)$$

где  $Sr_{np}(t)$  – среднемесячная приходящая солнечная радиация, падающая на горизонтальную поверхность за час, данные метеослужбы.

Совместно с ИОА СО РАН в течение года проведены испытания кремниевого ФМ площадью  $0,12 \text{ м}^2$ , установленного стационарно под углом  $56^\circ$  в г. Томске. В ходе испытаний были измерены значения солнечной радиации пришедшей на поверхность ФМ в течение дня и мощность ФМ, выработанная в течение дня. Результаты испытаний представлены на рисунке 2.6.

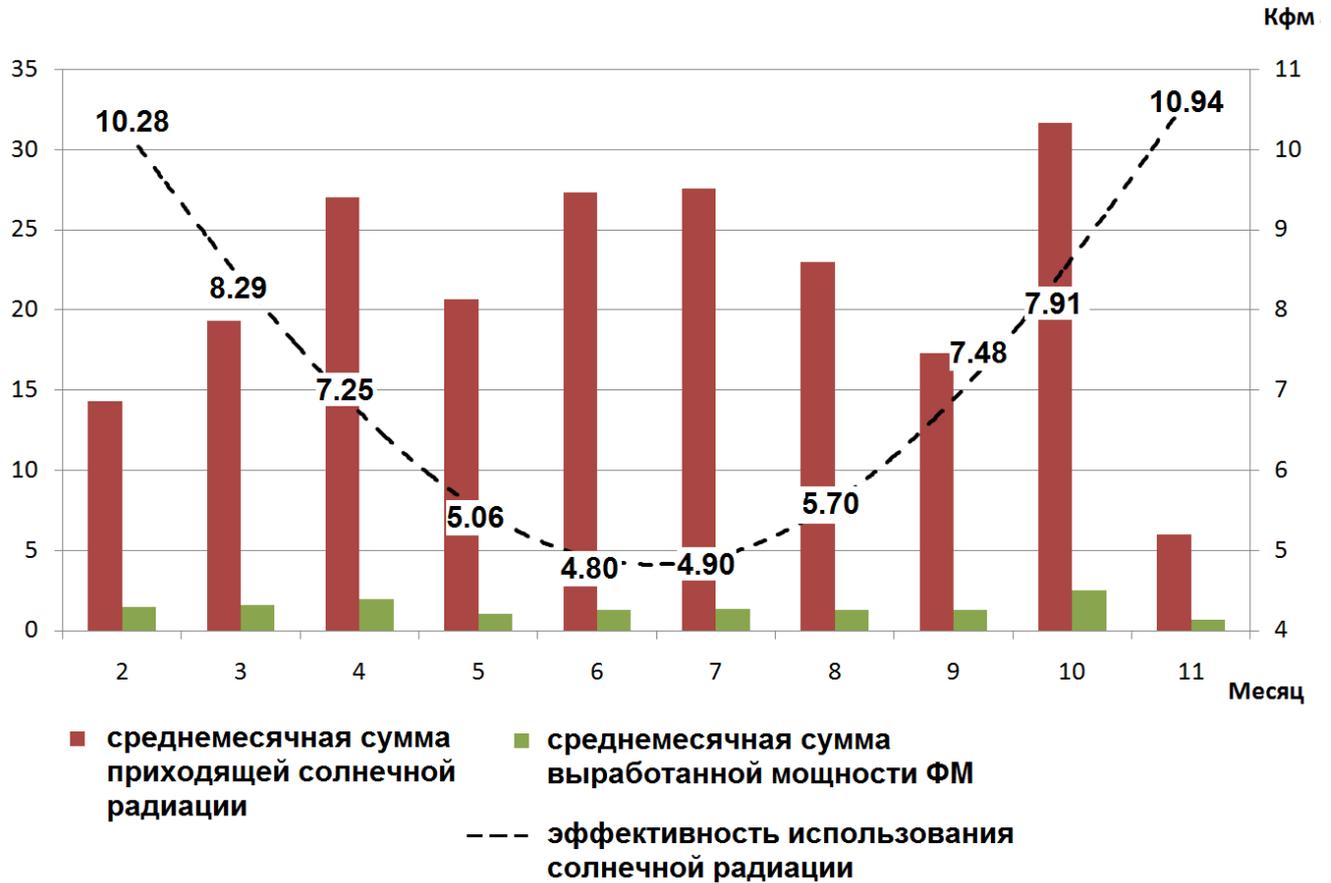


Рисунок 2.6. Результаты натурных испытаний ФМ в Томске и эффективность работы ФМ (2013 год).

По формуле 2.2, используя полученные данные испытаний, был рассчитан  $K_{ФМ}$ . Испытания доказали, что реальный коэффициент преобразования ФМ солнечной энергии в электрическую  $K_{ФМ}$  гораздо ниже КПД, заявленного производителем (15%), и изменяется в течение года от 4,8 до 10,94%.

Используя полученные экспериментальным путем значения среднемесячной солнечной радиации и математическую модель работы ФМ, описанную в первой главе, проведены расчеты эффективности использования солнечной энергии ФМ с применением систем контроля. Результаты представлены на рисунке 2.7.

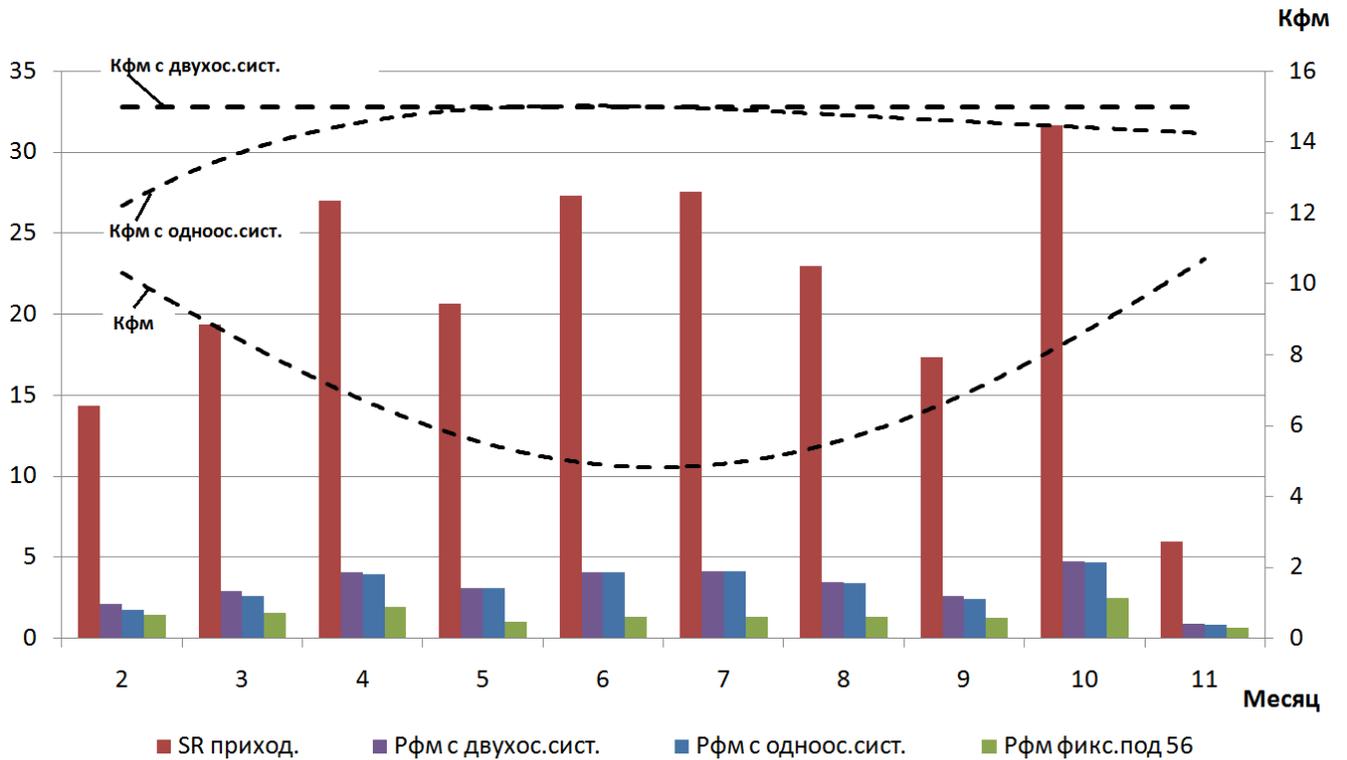


Рисунок 2.7. Результаты натуральных испытаний ФМ в Томске и расчетная эффективность работы ФМ с использованием систем контроля.

Согласно расчетам, КПД ФМ при использовании одноосной системы изменяется от 12.24% в феврале до 15% в июле, а при использовании двухосной КПД составляет 15% в течение всего времени работы ФМ, т.е. ограничивается паспортным значением КПД ФМ.

Введение систем контроля позволяет максимально эффективно использовать солнечную энергию, коэффициент преобразования практически соответствует значению КПД ФМ. Применение систем контроля позволяет увеличить эффективность сбора солнечного излучения, следовательно, и эффективность использования ФМ.

## ГЛАВА 3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

### 3.1 Разработка и модель фотоэлектрического датчика

На основе проведенного анализа датчиков систем контроля, разработан фотоэлектрический датчик (ФЭД), позволяющий исключить влияние фонового излучения, решить проблему запуска системы утром, отличающийся низкой ценой, простотой конструкции и использования. Разработанный датчик позволяет определять положения яркого пятна в течение дня по одной оси, т.к. одноосные системы признаны рентабельнее двухосных, что было доказано выше.

При разработке датчика за прототипы приняты гелиотрекер и MLD-sensor, описанные в первой главе. Принцип работы обоих прототипов основан на сравнении показаний двух чувствительных элементов, этот же принцип лег в основу ФЭД. Для определения положения «яркого пятна» на небосводе по одной оси достаточно двух элементов, расположенных на разных сторонах перегородки. Также для исключения недостатков прототипов, а именно для определения необходимости ориентирования и для запуска системы утром, введен третий элемент, расположенный с тыльной стороны ФЭД.

Анализ методов контроля выявил оптический метод, как наилучший для ориентации ФМ, поэтому в качестве чувствительных элементов рассмотрены только фоточувствительные элементы. В качестве фоточувствительных элементов выбран кремниевый фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), т.к. 95% всех ФМ в мире изготовлены из кремния [31].

В качестве выходного сигнала в датчиках часто используют напряжение ФЭП, однако из-за влияния температуры окружающей среды на значение напряжения повышается погрешность датчика. При нагреве элемента на один градус выше  $25^{\circ}\text{C}$  он теряет в напряжении  $0,002\text{ В}$ , т.е.  $0,4\text{ \%/}^{\circ}$ . На рисунке 3.1 приведено семейство кривых ВАХ для температур  $25$  и  $60^{\circ}\text{C}$  [85].

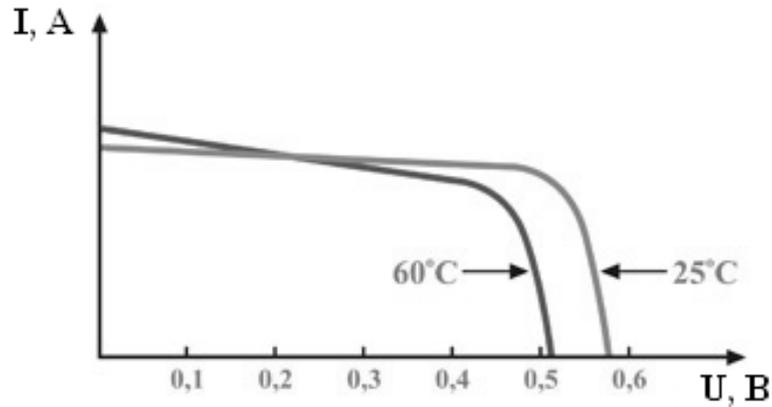


Рисунок 3.1. Зависимость тока и напряжения кремниевого ФЭП от температуры.

Менее зависим от температуры ток ФЭП, поэтому в предлагаемом датчике в качестве выходного сигнала чувствительных элементов используется ток, что позволяет повысить чувствительность датчика. Кроме того ток короткого замыкания, а соответственно и рабочий ток, прямо пропорциональны освещенности в отличие от напряжения холостого хода, мало зависящего от освещенности [85]. С уменьшением интенсивности солнечного излучения ВАХ ФЭП смещается вниз, что приводит к снижению тока короткого замыкания, напряжение холостого хода при этом уменьшается незначительно. Влияние интенсивности солнечного освещения на ВАХ иллюстрируется кривыми на рисунке 3.2.

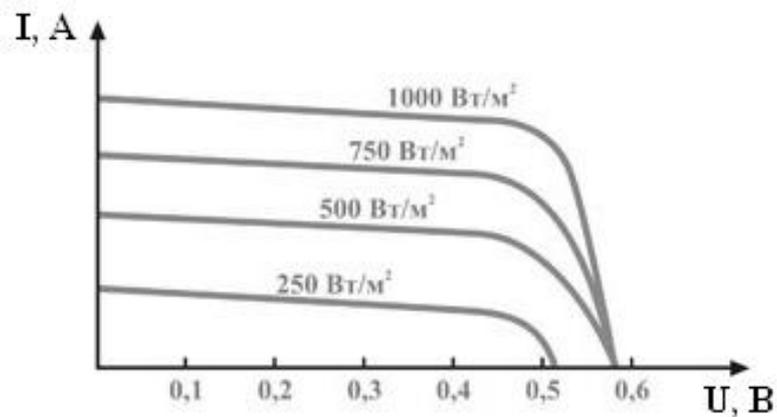


Рисунок 3.2 ВАХ кремниевого ФЭП при различной интенсивности солнечного освещения.

Основываясь на сказанном выше, принято решение использовать в ФЭД в качестве чувствительных элементов три пластины ФЭП одного размера, а в качестве выходного сигнала – ток, близкий к току короткого замыкания.

Разработанный датчик представлен на рисунке 3.3.

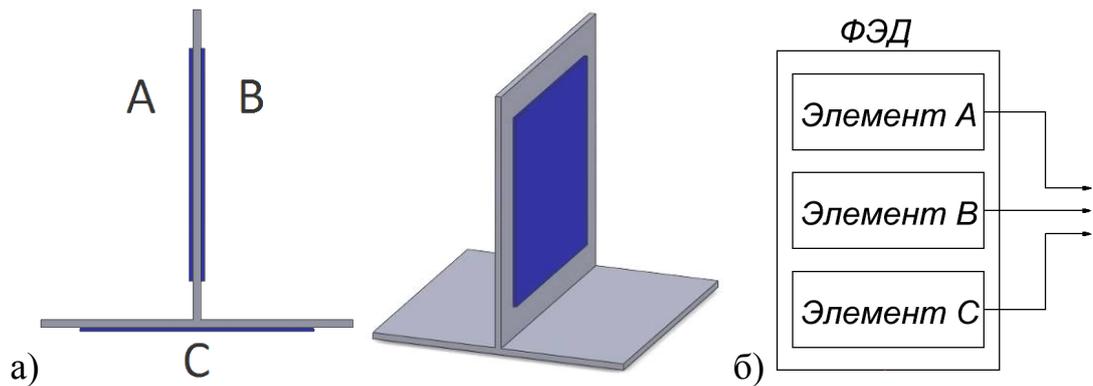


Рисунок 3.3 ФЭД. а) схематическое изображение, б) функциональная схема.

В основе датчика два лицевых элемента для определения положения Солнца, третий тыловой элемент (С) – для определения уровня фонового излучения и для запуска системы утром.

Элементы А и В установлены на разные стороны перегородки, что позволяет скомпенсировать влияние разности температур. Также перегородка служит токопроводящим элементом. Элемент С необходим для измерения рассеянного излучения, исключения его влияния на два других датчика и запуска системы в утренние часы.

Все элементы имеют одинаковый размер, а значит и выходной сигнал при одинаковом уровне освещенности. Равенство сигналов элементов А, В и С означает пасмурную погоду или ночное время суток, ориентирование в таком случае не имеет смысла. Если сигнал с элемента С меньше остальных, то система подает команду поворота двигателя в сторону большего среди А и В. Поворот будет осуществляться пока сигналы А и В не станут равны, что произойдет при ориентации ФМ на Солнце или самое яркое пятно на небе.

Утром, в то время как лицевые элементы отвернуты от Солнца, тыльный ориентирован на него, что воспринимает блок контроллера и подает команду поворота ФМ на восток. Таблица вариантов освещения и команд поворотному устройству представлена ниже.

Таблица 3.1 Варианты освещения и команд поворотному устройству.

Элемент А	0	0	0	1	1
Элемент В	0	0	1	0	1
Элемент С	0	1	0	0	0
Положение яркого пятна	ночь	восход	восточнее	западнее	точно
Команда поворотному устройству	стоять	на восток	на восток	на запад	стоять

Примечание: «1» – элемент освещен, «0» – элемент в тени.

Использование в качестве выходного сигнала тока, который практически не зависит от температуры окружающей среды, позволяет исключить температурную нестабильность. Выходной сигнал в таком случае зависит только от солнечного излучения.

Особенности разработанного датчика:

1. Использование ФЭП в качестве активного элемента и добавление в конструкцию тылового ФЭП для измерения фонового излучения и запуска систем в утренние часы.

2. Для обеспечения единой температуры чувствительные элементы ФЭД расположены на теплопроводящей конструкции. Данная конструкция обеспечивает электрические соединения тыловых контактов элементов датчика.

3. В качестве регулирующего сигнала используется ток, близкий к току короткого замыкания  $I_{кз}$  ФЭП, который зависит от интенсивности солнечного излучения и не зависит от температуры.

### 3.2 Оптимизация конструкции фотоэлектрического датчика с использованием математической модели

Для оптимизации конструкции датчика проведены расчеты с использованием математической модели, представленной в главе 1.

Как сказано ранее, в качестве выходных сигналов ФЭД приняты токи трех его элементов.

Ток  $I_N$  определяется по формуле [86]:

$$I_N = K_{\text{инт}} \cdot E, \quad (3.1)$$

где  $K_{\text{инт}}$  – интегральная чувствительность ФЭП,  $E$  – освещенность ФЭП, лк.

Освещенность  $E$  зависит от значения приходящей солнечной радиации  $SR_{np}$  и площади ФЭП  $S$ :

$$E = SR_{np} \cdot S. \quad (3.2)$$

Расчет  $SR_{np}$  представлен в первой главе.

Как видно из формул 3.1 и 3.2, ток прямопропорционально зависит от уровня солнечной радиации. Следовательно, значение тока элемента также зависит от угла наклона, как и значение приходящей солнечной радиации на поверхность (см. первую главу).

Построена модель ФЭД при различных значениях угла между элементами А и В (рисунок 3.4).

$$I_A = I_N \cdot \cos(90 - \alpha/2 + \beta); \quad (3.3)$$

$$I_B = I_N \cdot \cos(90 - \alpha/2 - \beta); \quad (3.4)$$

где  $I_A$  и  $I_B$  – значения тока КЗ элементов А и В соответственно;

$I_N$  – значение тока КЗ при  $\beta=0$ ,  $\alpha$  – угол между элементами А и В;

$\beta$  – угол отклонения Солнца от нормали ФЭД.

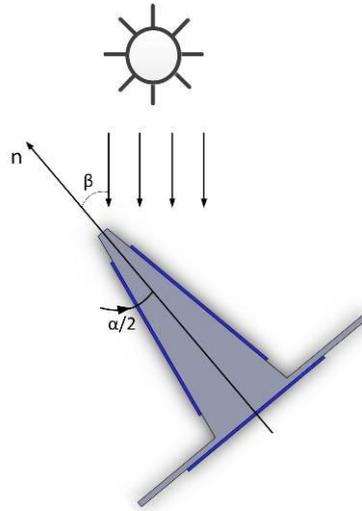


Рисунок 3.4. ФЭД, расположенный под углом  $\beta$  относительно солнечных лучей.

Результаты расчетов разницы сигналов А и В от угла отклонения солнечных лучей от нормали ФЭД при различных углах между элементами представлены на рисунке 3.5.

$|A-B|, \text{ мА}$

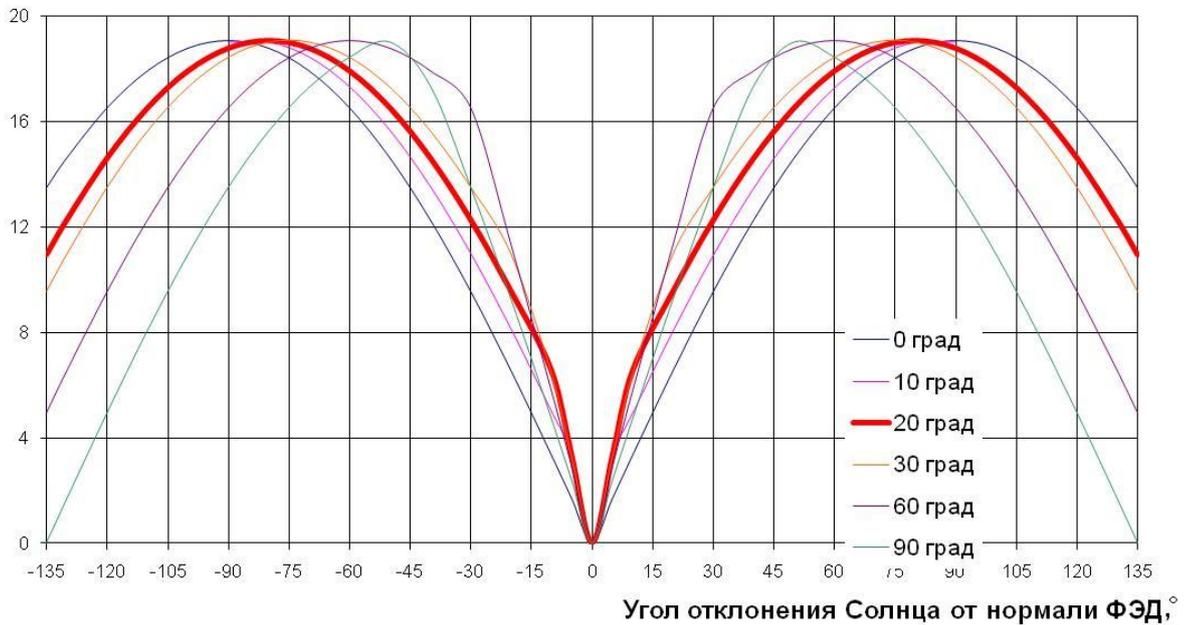


Рисунок 3.5. Зависимость разницы токов короткого замыкания элементов А и В от угла между этими элементами.

Как видно из рисунка 3.5 графики симметричны, для наглядности на рисунке 3.6 приведена часть этих же графиков при изменении угла отклонения Солнца от нормали ФЭД от 0 до 40°.

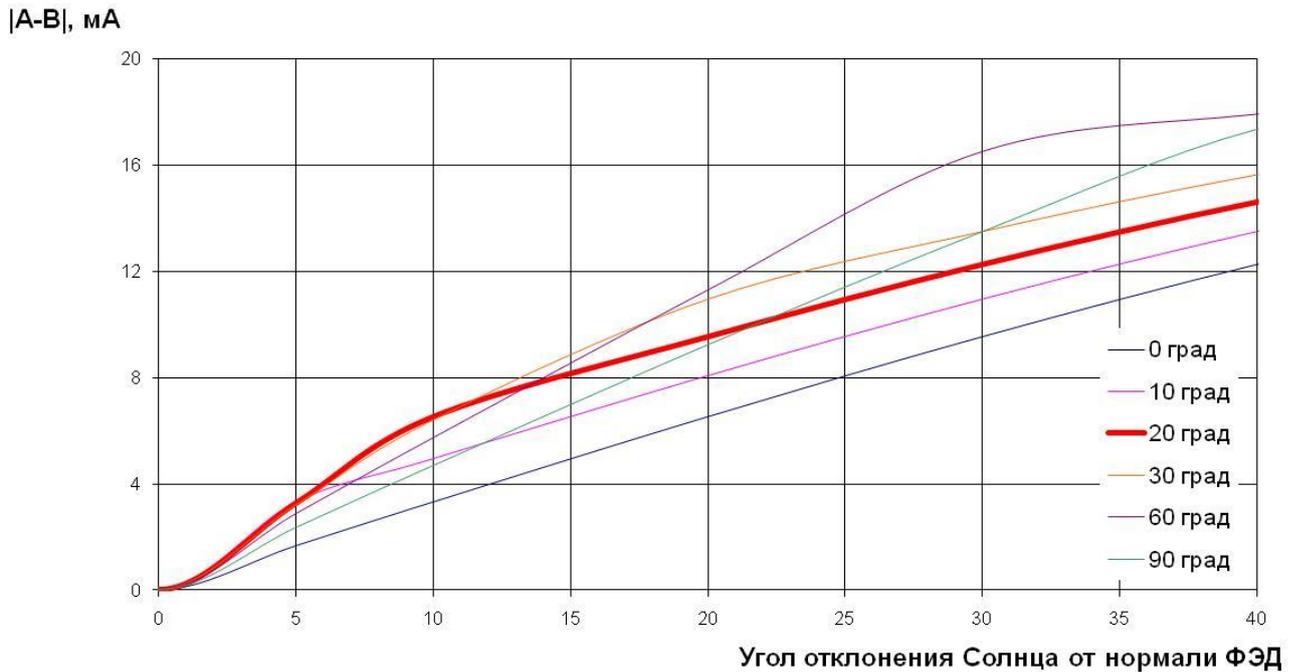


Рисунок 3.6. Зависимость разницы токов короткого замыкания элементов А и В от угла между этими элементами.

На рисунка 3.6 видно, что максимальная разница между значениями тока короткого замыкания элементов А и В при отклонении Солнца до  $10^\circ$  достигнута при угле  $\alpha$   $20^\circ$ .

Чувствительность ФЭД  $S_{\text{ФЭД}}$  определяется отношением разницы токов короткого замыкания элементов А и В к углу отклонения Солнца от нормали ФЭД  $\beta$ .

$$S_{\text{ФЭД}} = (A-B) / \Delta\beta \quad (3.5)$$

На рисунке 3.7 приведены графики зависимости чувствительности ФЭД при различных значениях угла  $\alpha$ . Как видно из рисунка, максимальная чувствительность датчика при отклонении Солнца от нормали ФЭД до  $10^\circ$  достигнута при  $\alpha=20^\circ$ . Выбор угла отклонение солнечных лучей от нормали, равный  $10^\circ$ , будет объяснен в четвертой главе диссертации.

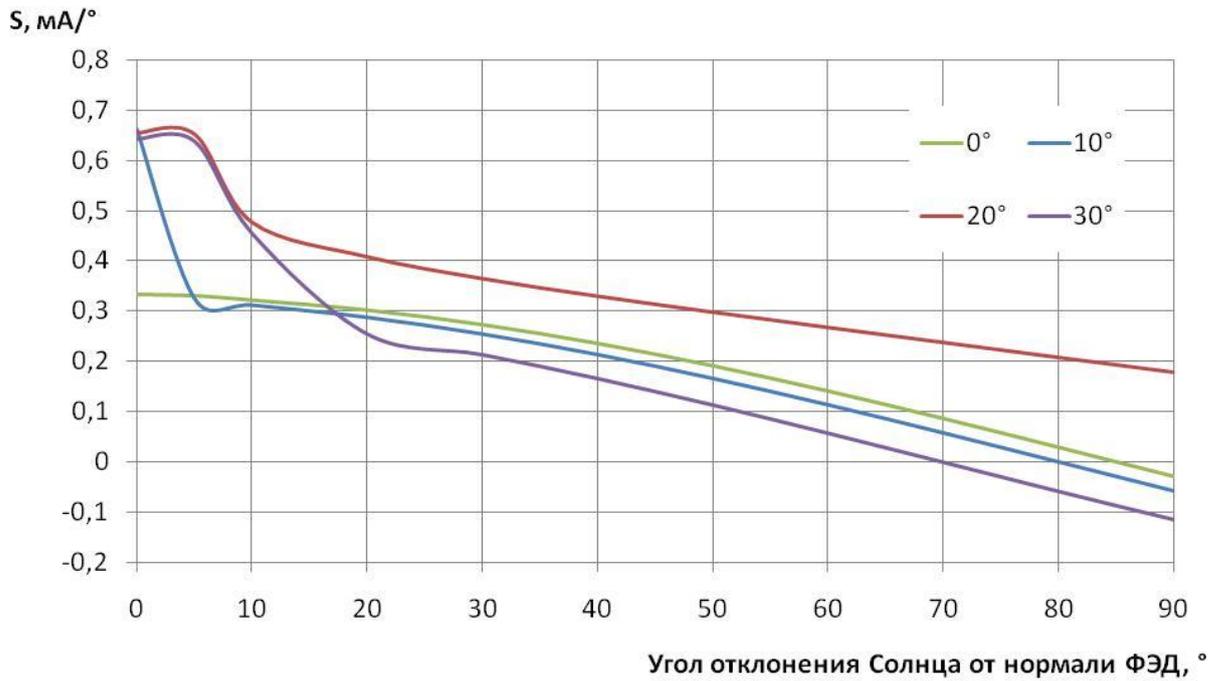


Рисунок 3.7. График чувствительности ФЭД при различных значениях угла  $\alpha$  между элементами А и В.

По результатам расчетов оптимизирована конструкция ФЭД с целью повышения его чувствительности. На рисунке 3.8 представлена конструкция оптимизированного ФЭД, а на рисунке 3.9 показана установка ФЭД на ФМ.

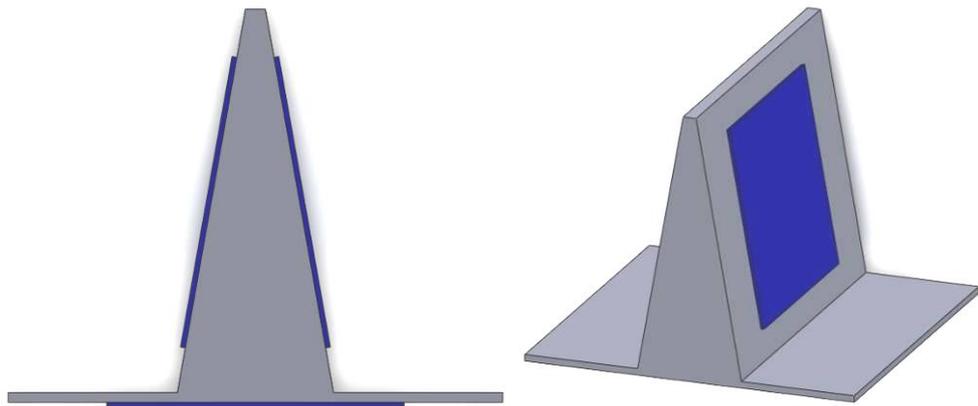


Рисунок 3.8. Конструкция ФЭД.

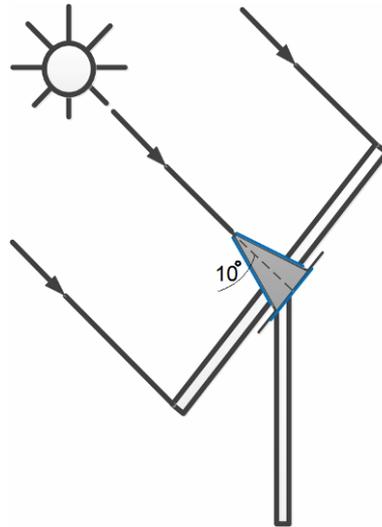


Рисунок 3.9. Установка ФЭД.

Используя математическую модель работы ФЭД, с помощью программы Visual Studio разработана программа, описывающая работу ФЭД [87]. Окно программы представлено на рисунке 3.10.

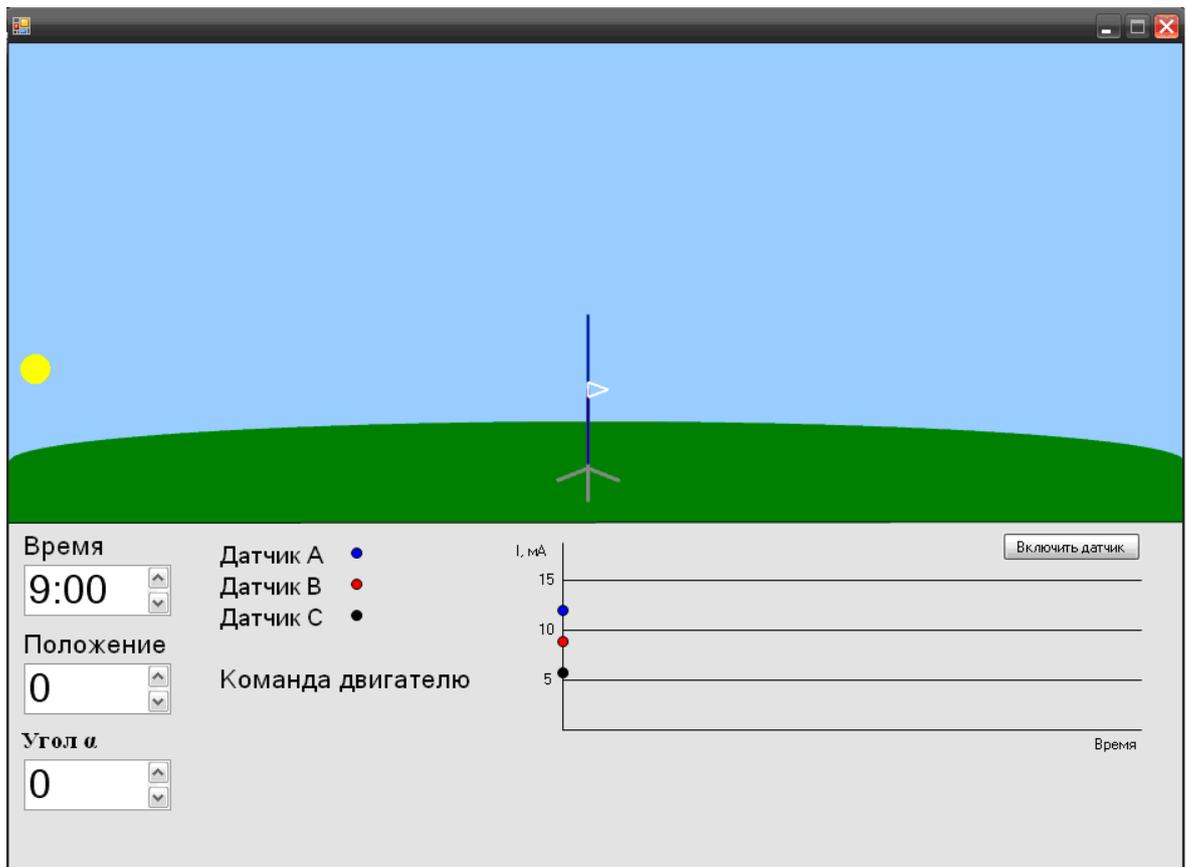


Рисунок 3.10. Окно программы «Модель работы ФЭД»

Пользователю необходимо задать положение Солнца на небосклоне введя соответствующее данному положению значение времени в поле «Время». В поле «Положение ФМ» пользователь задает начальное положение ФМ, т.е. угол между плоскостью ФМ и горизонтом. В поле «Угол  $\alpha$ » необходимо задать угол между элементами А и В. После нажатия кнопки «Включить датчик» программа определит необходимое направление поворота для ориентирования ФМ на Солнце. Процесс поворота будет отображаться в центральном окне. В правой части окна можно отметить изменение сигналов с элементов А, В и С датчика. При ориентировании ФМ на Солнце значения сигналов с элементов А и В станут равны.

Данная программа позволяет моделировать работу системы контроля в течение дня, наглядно демонстрируются выходные сигналы датчика при различных углах  $\alpha$  и доказывает, что наиболее эффективным является угол  $\alpha$   $20^\circ$ . Программа доказывает работоспособность и эффективность разработанного ФЭД.

### **3.3 Двухосный фотоэлектрический датчик**

Для двухосной системы контроля можно использовать два ФЭД, расположив один для контроля положения яркого пятна по азимуту, а второй – по эклиптике. Однако более удобным в использовании является датчик, выполненный единой конструкцией.

Модифицировав описанный ФЭД, введя еще два элемента для контроля положения Солнца по эклиптике, получим двухосный датчик положения Солнца в едином конструктиве (рисунок 3.11). Обозначим данный датчик ФЭД-2.1.

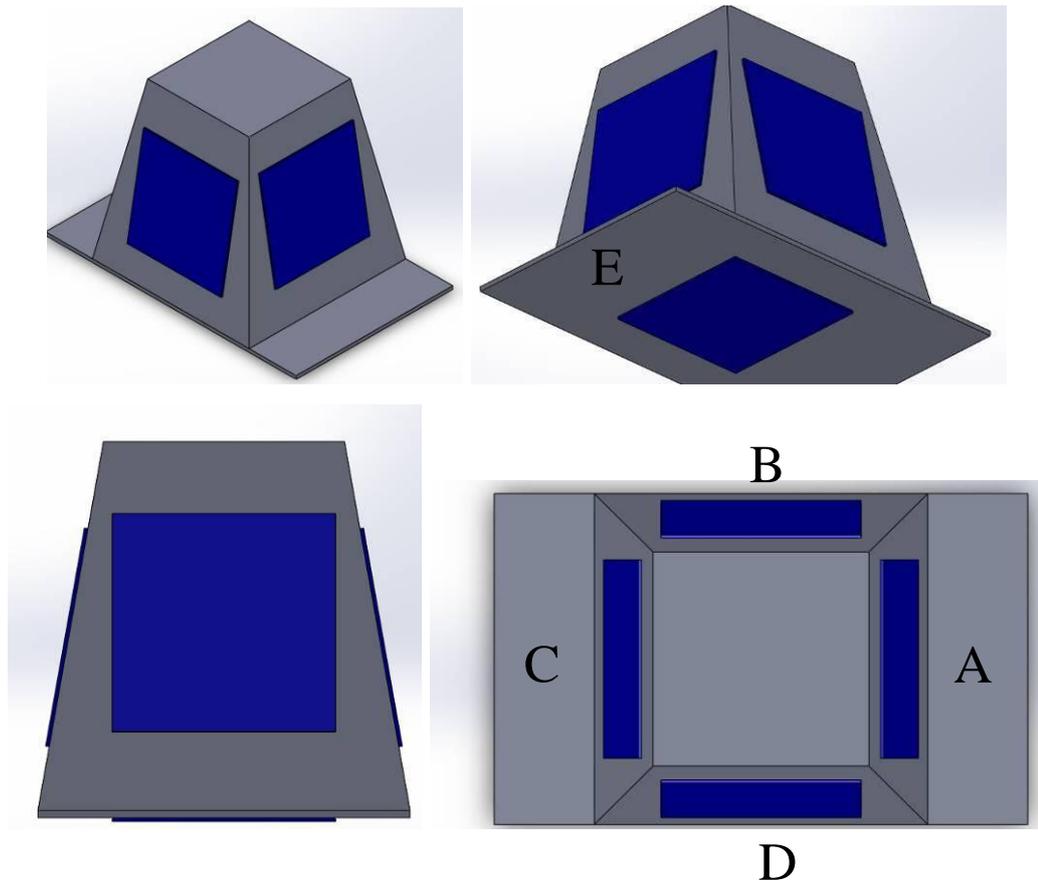


Рисунок 3.11. ФЭД для двухосной системы контроля.

Двухосный ФЭД-2.1 состоит из пяти идентичных по размеру чувствительных элементов, выполненных из кремниевых ФЭП и расположенных на гранях четырехугольной пирамиды (пирамида усечена для исключения неиспользуемой поверхности). Для ориентирования по азимуту используется пара противоположных элементов, а для ориентирования по эклиптике – вторая пара, пятый элемент расположен на тыльной стороне и служит для определения уровня фонового излучения и для запуска системы утром. Для большей чувствительности отклонения Солнца угол между противоположными элементами составляет  $20^\circ$ , который, как говорилось ранее, является наиболее эффективным. Варианты освещения и команды поворотному устройству представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Варианты освещения и команд поворотному устройству.

Элемент А	0	0	0	0	0
Элемент В	0	0	0	0	0
Элемент С	0	0	0	1	1
Элемент D	0	0	1	0	1
Элемент Е	0	1	0	0	0
Положение яркого пятна	ночь	восход	ниже	западнее	западнее и ниже
Команда поворотному устройству по оси эклиптики	стоять	стоять	вниз	стоять	вниз
Команда поворотному устройству по оси азимута	стоять	на восток	стоять	на запад	на запад

Элемент А	0	0	0	1	1
Элемент В	1	1	1	0	0
Элемент С	0	1	1	0	0
Элемент D	0	0	1	0	1
Элемент Е	0	0	0	0	0
Положение яркого пятна	выше	западнее и выше	западнее	восточнее	восточнее и ниже
Команда поворотному устройству по оси эклиптики	вверх	вверх	стоять	стоять	вниз
Команда поворотному устройству по оси азимута	стоять	на запад	на запад	на восток	на восток

Элемент А	1	1	1	1	1
Элемент В	0	1	1	1	1
Элемент С	1	0	0	1	1
Элемент D	1	0	1	0	1
Элемент Е	0	0	0	0	0
Положение яркого пятна	ниже	восточнее и выше	восточнее	выше	точно
Команда поворотному устройству по оси эклиптики	вниз	вверх	стоять	вверх	стоять
Команда поворотному устройству по оси азимута	стоять	на восток	на восток	стоять	стоять

Возможно усовершенствование ФЭД-2.1, исключением одного элемента. Как показано на рисунке 3.12, элементы расположены на гранях треугольной

призмы. Таким образом, для ориентирования в течение дня по двум осям будут использоваться три элемента, а четвертый тыловой, как и в предыдущих вариантах, выполняет функции измерения уровня фонового излучения и для запуска системы на восходе. Обозначим данный датчик ФЭД-2.2.

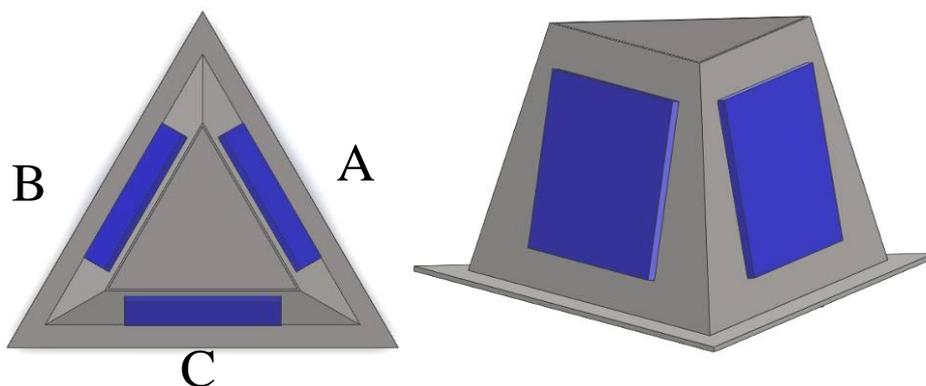


Рисунок 3.12. Конструкция двухосного датчика ФЭД-2.2.

Элементы А и В служат для определения положения Солнца по азимуту, а для контроля положения ФМ по эклиптике – элемент С, сигнал с которого будет сравниваться с сигналом А (рисунок 3.13). Угол между каждым элементом и нормалью датчика равен  $10^\circ$ .

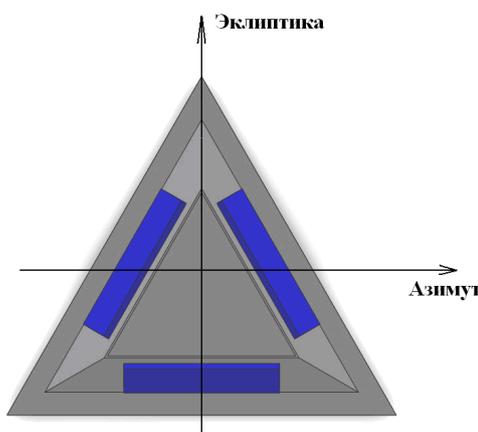


Рисунок 3.13. Установка ФЭД-2, вид сверху.

При ориентировании на Солнце элементы А, В и С будут одинаково освещены, а соответственно и сигналы трех элементов должны быть равными.

Определение положения яркого пятна в течение дня происходит следующим образом. Сначала необходимо провести ориентирование по оси азимута. Несмотря на то, что элементы по оси эклиптике не ориентированы на Солнце, они

расположены на одной оси, следовательно, и угол отклонения для обоих один. Сравнив сигналы А и В, блок контроля подаст команду поворота в сторону элемента с большим значением. Равные сигналы элементов А и В свидетельствует об ориентировании ФЭД-2.2, а, следовательно, и ФМ на Солнце.

Для ориентирования по эклиптике необходимо, чтобы сигналы трех лицевых элементов были равны. Но так как А и В к этому моменту равны, будет сравнивать А и С. Сравнив полученные сигналы, система дает команду второму поворотному механизму повернуть ФМ в сторону элемента с большим значением сигнала. Таблица вариантов освещения и команд поворотному устройству представлена ниже.

Таблица 3.3. Варианты освещения и команд поворотному устройству.

Элемент А	0	0	0	0	0
Элемент В	0	0	0	1	1
Элемент С	0	0	1	0	1
Элемент D	0	1	0	0	0
Положение яркого пятна	ночь	восход	ниже	западнее и выше	западнее
Команда поворотному устройству по оси эклиптики	стоять	стоять	вниз	вверх	стоять
Команда поворотному устройству по оси азимута	стоять	на восток	стоять	на запад	на запад

Элемент А	1	1	1	1	1
Элемент В	0	0	1	1	1
Элемент С	0	1	0	1	1
Элемент D	0	0	0	0	0
Положение яркого пятна	восточнее и выше	восточнее	выше	точно	точно
Команда поворотному устройству по оси эклиптики	вверх	стоять	вверх	стоять	стоять
Команда поворотному устройству по оси азимута	на восток	на восток	стоять	стоять	стоять

Алгоритм работы блока контроля для ФЭД-2 будет сложнее, чем для одноосного ФЭД. Более подробно об этом будет рассказано в главе 4.

### 3.4 Макет фотоэлектрического датчика и его испытания

С целью определения работоспособности разработанного одноосного ФЭД и подтверждения результатов расчетов создан макет ФЭД. Макет представлен на рисунке 3.14. Каркас имеет Т-образную форму с тремя чувствительными элементами на сторонах: два лицевых (А и В) и один тыловой (С). Для создания каркаса ФЭД использовался текстолит, а в качестве чувствительных элементов – три краевых кремниевых ФЭП, площадью  $7,5 \text{ см}^2$ . Угол  $\alpha$  между элементами А и В равен  $0^\circ$ . Чувствительные элементы имеют общий вывод. Макет позволяет изменять угол между нормалью ФЭД и горизонтом от  $0^\circ$  до  $270^\circ$ .



Рисунок 3.14. Макет ФЭД.

На территории ИОА СО РАН проведены натурные испытания макета при различных значениях солнечной радиации.

При проведении испытаний использовалось следующее оборудование: климатическая станция, пиранометр, LA-20USB [88], ПК, оснастка для установки по оси эклиптики, транспортир. Схема измерения представлена на рисунке 3.15. Для измерения тока чувствительных элементов к каждому был подключен резистор, номиналом 1 Ом. К каждому резистору параллельно подключен аналоговый вход LA-20USB, с которого значения сигналов по USB интерфейсу

передавались в ПК. Перед началом измерений с помощью пиранометра проводилась установка ФЭД по оси эклиптики, и снимались показания климатической станции (температура окружающей среды, значение солнечной радиации, влажность воздуха). ФЭД устанавливался таким образом, чтобы лицевая сторона элемента А была направлена на Запад, а лицевая сторона элемента В – на восток.

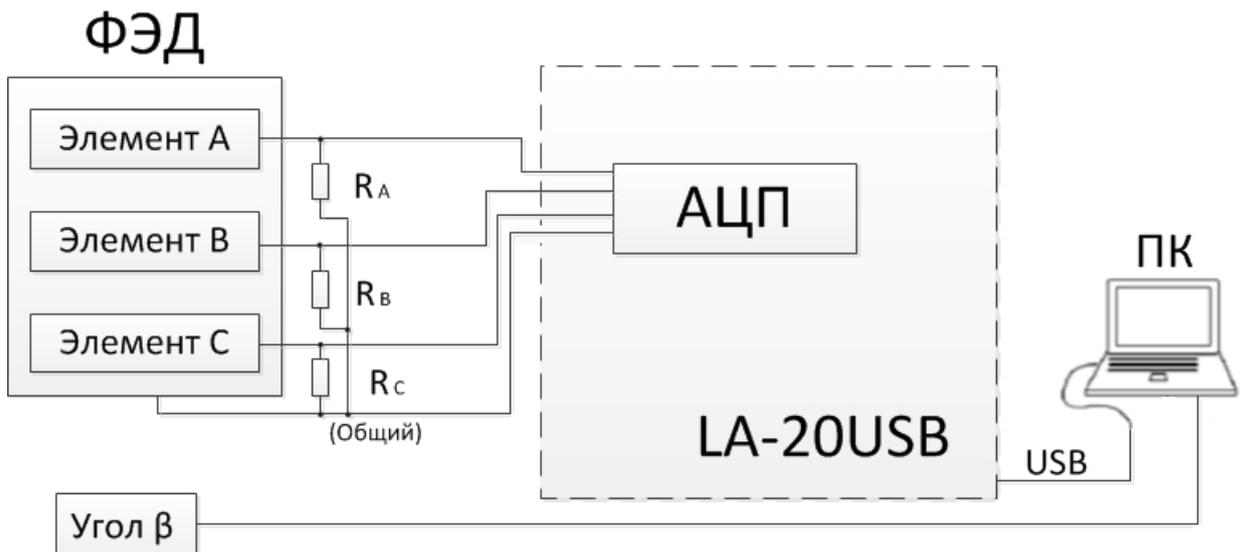


Рисунок 3.15 Схема измерения при проведении натуральных испытаний ФЭД.

После предварительной подготовки проводились измерения и запись выходных сигналов элементов ФЭД. В каждой точке положения ФЭД для каждого элемента производились десятикратные измерения и запись в ПК усредненного значения [89-91].

Макет ФЭД поворачивался по оси азимута с запада на восток с шагом  $10^\circ$ . Крайнее положение на запад, соответствовало углу  $\beta$  между нормалью ФЭД и солнечными лучами  $-90^\circ$ , а крайнее положение на восток соответствовало углу  $\beta$   $90^\circ$ , при ориентировании на Солнце угол  $\beta$  равен  $0^\circ$ . Значение угла  $\beta$  выставлялось вручную визуальным методом с помощью транспортира, значение  $\beta$  вводилось в ПК вручную.

В результате были получены диаграммы направленности макета ФЭД при различных значениях солнечного излучения представлены на рисунках 3.16-3.19.

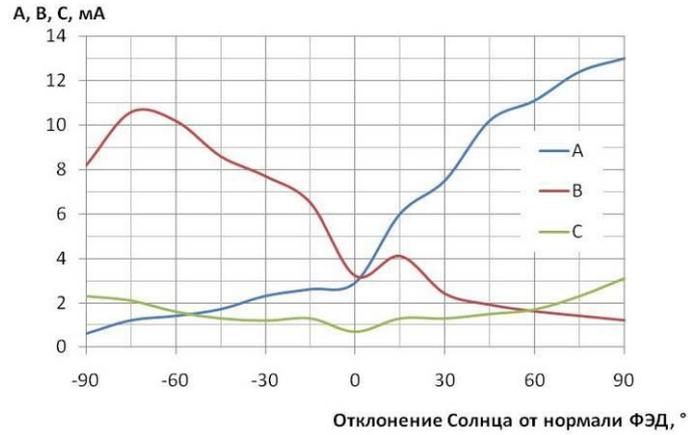


Рисунок 3.16 Диаграмма направленности макета ФЭД при угле  $\alpha 0^\circ$  (уровень солнечной радиации  $200 \text{ Вт/м}^2$ ).

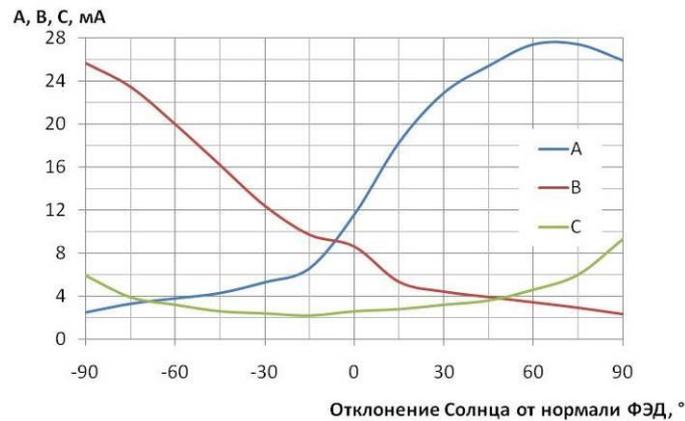


Рисунок 3.17 Диаграмма направленности макета ФЭД при угле  $\alpha 0^\circ$  (уровень солнечной радиации  $500 \text{ Вт/м}^2$ ).

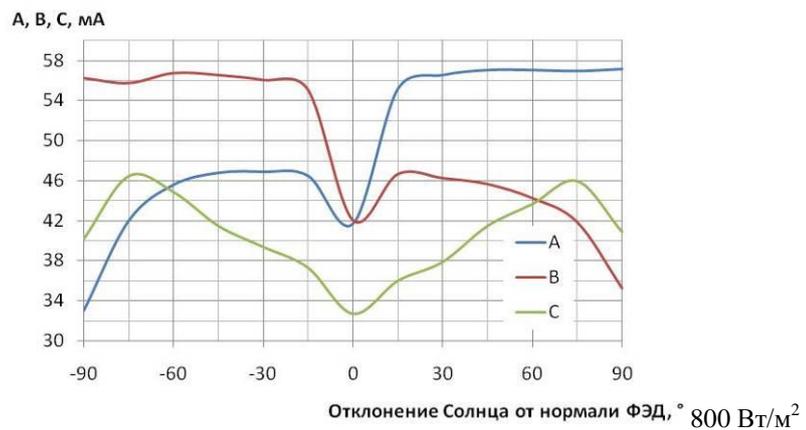


Рисунок 3.18 Диаграмма направленности макета ФЭД при угле  $\alpha 0^\circ$  (уровень солнечной радиации  $800 \text{ Вт/м}^2$ ).

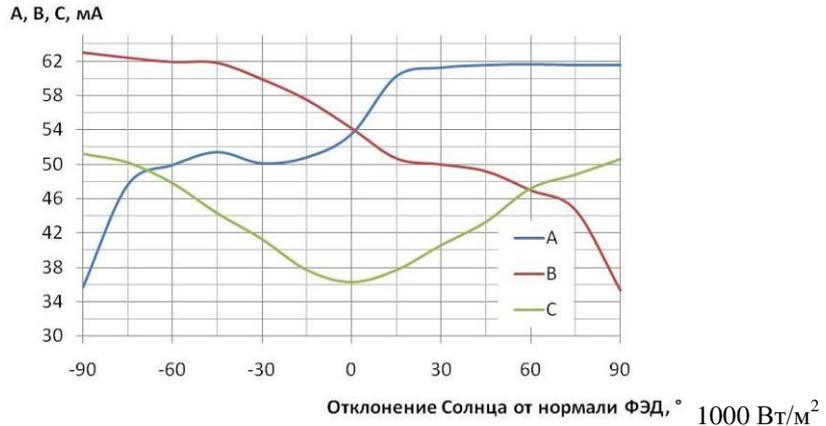


Рисунок 3.19. Диаграмма направленности ФЭД при угле  $\alpha 0^\circ$  (уровень солнечной радиации  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ).

Как видно из представленных диаграмм выше, характер изменения сигналов элементов А, В и С аналогичен не зависимо от уровня солнечного излучения.

Графики на рисунках 3.16-3.19 подтверждают работоспособность ФЭД: при отклонении нормали ФЭД от направления солнечных лучей на угол  $\beta$ , равный  $-90^\circ$ , значение сигнала элемента В больше значения сигнала элемента А, что позволяет сделать вывод о том, что яркое пятно находится западнее, т.к. элемент В освещен больше. При повороте на запад разница между сигналами А и В становится меньше и достигает минимума (значение А и В равны) при угле  $\beta$ , равным  $0^\circ$ , т.е. при ориентировании ФЭД точно на яркое пятно. При дальнейшем отклонении нормали ФЭД на запад значение сигнала элемента А становится больше сигнала элемента В, что свидетельствует о положении яркого пятна восточнее нормали ФЭД, т.к. элемент А освещен больше. График зависимости разницы сигналов  $|A-B|$  от угла отклонения нормали ФЭД от солнечных лучей представлен на рисунке 3.20.

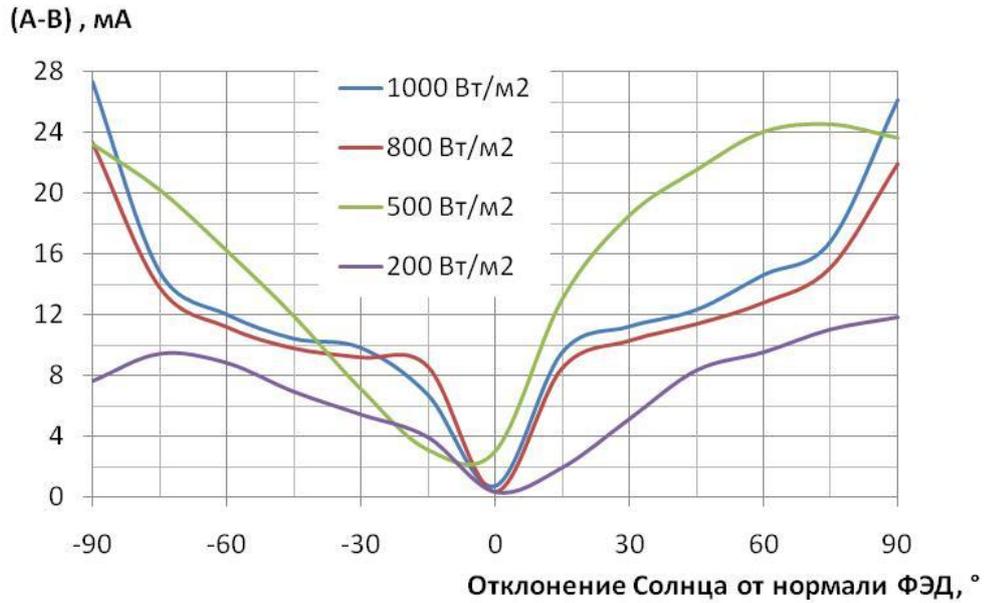


Рисунок 3.20. График зависимости |А-В| от угла отклонения Солнца от нормали ФЭД при различных уровнях солнечной радиации

Результаты испытаний подтверждают, что разработанный датчик позволяет определить положение яркого пятна на небосводе, т.е. конструкция ФЭД является работоспособной.

### 3.5 Оптимизация конструкции фотоэлектрического датчика по результатам испытаний

Для подтверждения результатов оптимизации ФЭД полученных расчетным путем во второй главе были созданы макеты ФЭД аналогичные описанному ранее (3.1), отличающиеся значением угла  $\alpha$  между элементами А и В (рисунок 3.21). Всего создано 6 макетов с углами  $\alpha$ , соответствующими  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ .

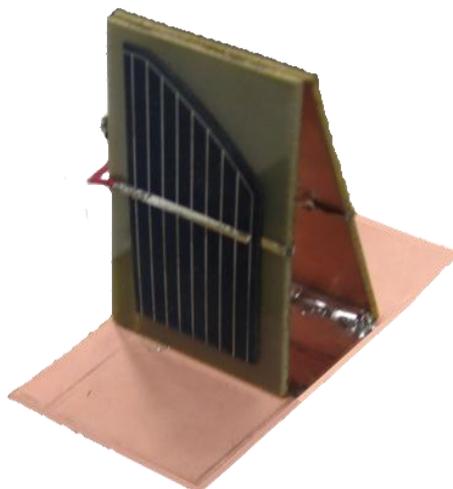


Рисунок 3.21. Макет ФЭД с углом  $\alpha$  20°.

Испытания проходили с использованием оборудования, описанного в 3.4 и специальной оснастки. Схематическое изображение оснастки для испытаний с целью оптимизации ФЭД представлено на рисунке 3.22. Схема измерения представлена на рисунке 3.23.

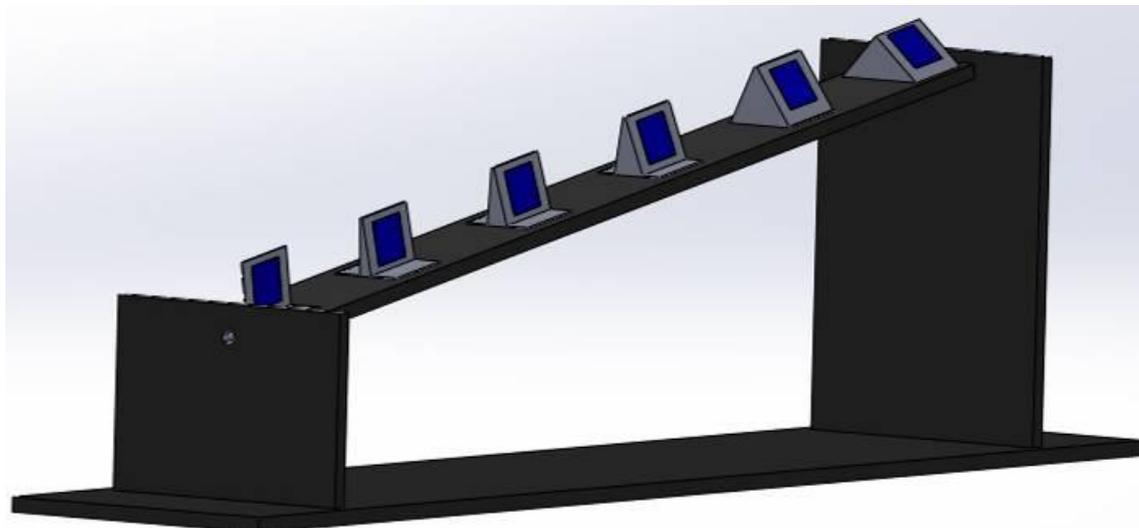


Рисунок 3.22. Оснастка для испытаний макета ФЭД с разными значениями угла  $\alpha$ .

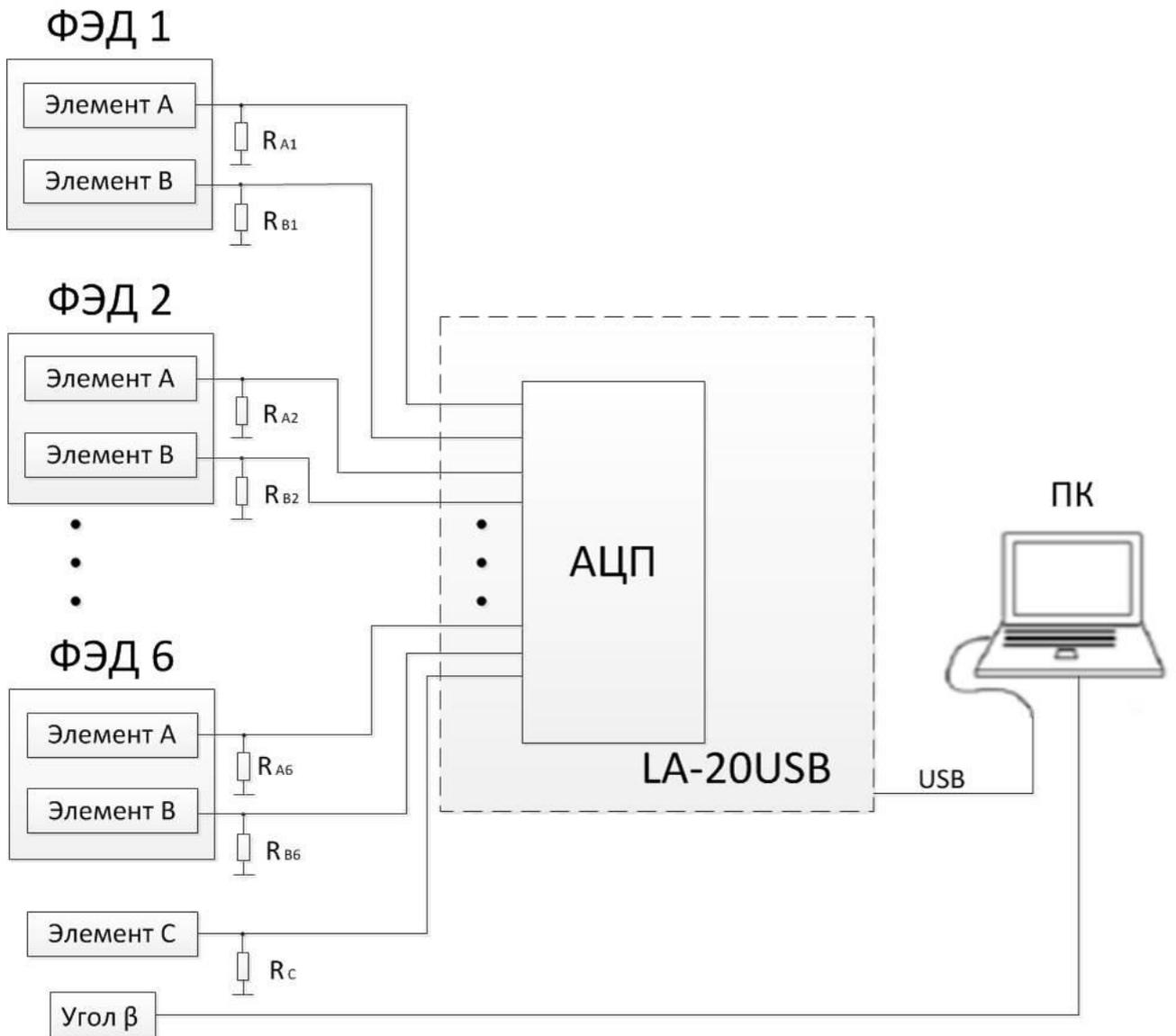


Рисунок 3.23. Схема измерения

Подготовка и проведение испытаний проводились аналогично описанным ранее для макета ФЭД с углом  $\alpha$   $0^\circ$ . Испытания также проводились при различных уровнях солнечного излучения

Диаграмма направленности ФЭД с разными углами  $\alpha$  при различных значениях солнечной радиации представлены на рисунках 3.24-3.27.

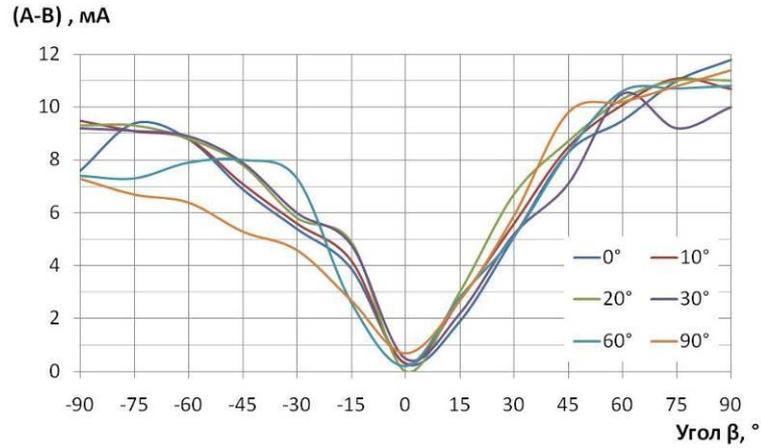


Рисунок 3.24. Диаграмма направленности макетов ФЭД при разных углах  $\alpha$  (уровень солнечной радиации 200 Вт/м<sup>2</sup>).

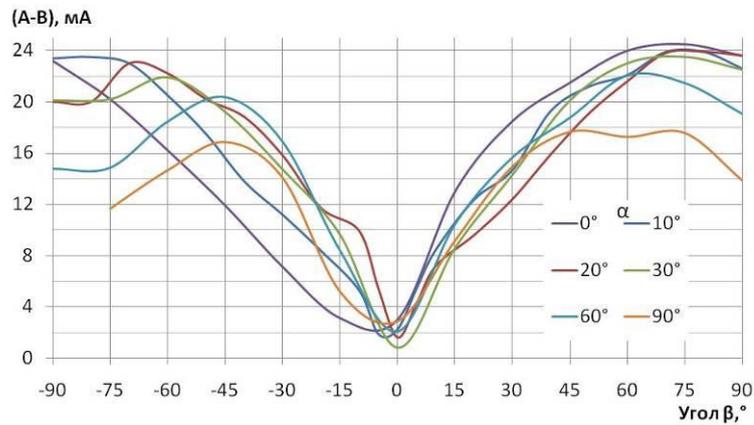


Рисунок 3.25. Диаграмма направленности макетов ФЭД при разных углах  $\alpha$  (уровень солнечной радиации 500 Вт/м<sup>2</sup>).

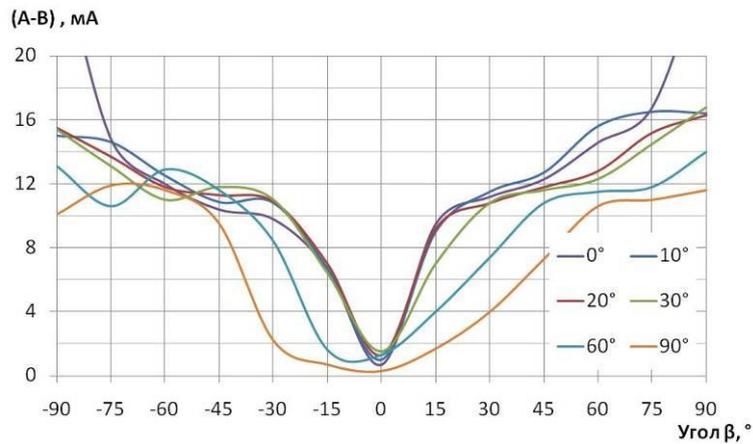


Рисунок 3.26. Диаграмма направленности макетов ФЭД при разных углах  $\alpha$  (уровень солнечной радиации 800 Вт/м<sup>2</sup>).

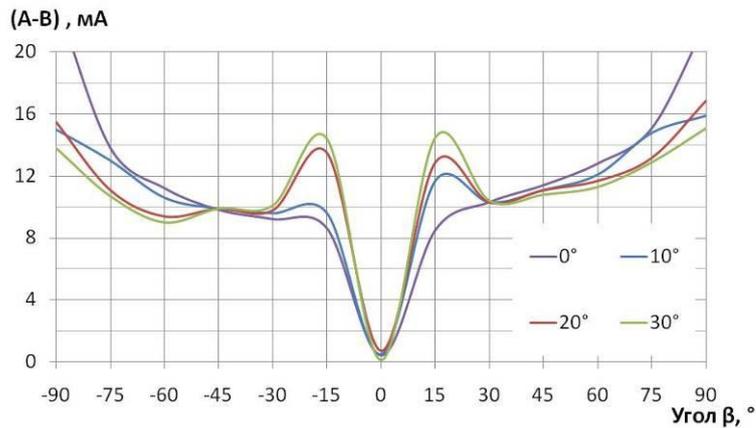


Рисунок 3.27. Диаграмма направленности макетов ФЭД при разных углах  $\alpha$  (уровень солнечной радиации  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ).

Проведен расчет чувствительности ФЭД с различными значениями угла  $\alpha$  при отклонении нормали от направления солнечных лучей, используя результаты испытаний макетов ФЭД при уровне солнечной радиации  $1000 \text{ Вт/м}^2$  (1 октября 2013г.) и формулу 3.5. Результаты представлены на рисунке 3.28.

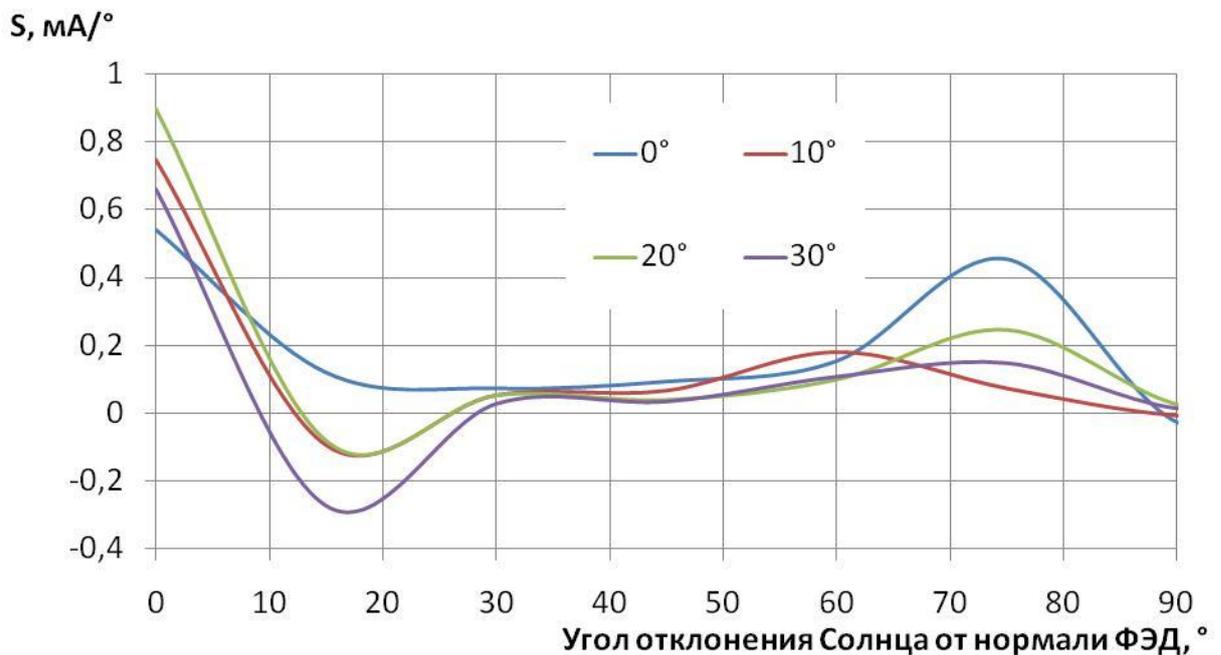


Рисунок 3.28. График чувствительности макетов ФЭД при различных значениях угла  $\alpha$  между элементами А и В.

Из графика на рисунке 3.28 можно сделать вывод, что максимальная чувствительность ФЭД при отклонении нормали от Солнца до  $10^\circ$  достигается при угле  $\alpha$   $20^\circ$ .

Сравнив полученные экспериментальным путем данные с расчетными, сделан вывод, что оптимальным значением угла  $\alpha$  между элементами ФЭД А и В будет являться угол  $20^\circ$ . Графики чувствительности ФЭД, полученные экспериментальным путем отличаются от полученных расчетным путем по форме и уровню из-за влияния на выходные сигналы различных факторов (фоновое излучение, рассеянное, температура окружающей среды и пр.). Однако общая картина чувствительности одинаковая – максимальная чувствительность при отклонении Солнца до  $10^\circ$  достигнута при угле  $\alpha$   $20^\circ$ .

Используя полученную модель ФЭД, проведены расчеты оптимального размера чувствительных элементов с целью минимизации габаритов и упрощения электрической части блока контроля.

Площадь чувствительного элемента выбрана из расчета удовлетворения условий входного сигнала для блока контроллера. В качестве информационного сигнала, как было сказано ранее, будет использоваться ток близкий к КЗ, как известно [57], ток ФЭП зависит от его площади, в отличие от напряжения холостого хода, являющегося постоянным для ФЭП любого размера. Для работы блока контроллера, структурная и принципиальная схемы которого подробно будут представлены в главе 4, необходимо, чтобы минимальное значение входного сигнала соответствовало 25 мкА. Данному значению должен соответствовать ток КЗ чувствительного элемента при уровне солнечного излучения  $200 \text{ Вт/м}^2$ . Уровень излучения  $200 \text{ Вт/м}^2$  является минимальным для эффективной работы ФМ [37]. Солнечное излучение меньше  $200 \text{ Вт/м}^2$  при пасмурной погоде или в темное время года, а значит, ориентирование ФМ и работа системы контроля в данном случае не имеет смысла.

Рассчитать необходимую площадь элемента  $S$  для генерирования тока  $I_N$  25 мкА при солнечном излучении  $Sr_{\text{гпр}}$   $200 \text{ Вт/м}^2$ , можно используя формулы

второй главы и значение интегральной чувствительности кремниевого ФЭП  $K_{инт}$ , равного 10 мА/лм [92].

$$S = \frac{I_N}{K_{инт} \cdot Sr_{пр}} \quad (3.6)$$

Минимальная площадь элемента согласно расчетам составляет  $0,0001\text{м}^2$ , что соответствует квадратному элементу со стороной 1 см. Однако, изготовление датчика с элементами такого размера затруднительно, при увеличении площади возможно использовать операционный усилитель с меньшим коэффициентом усиления, также ФЭД с элементами площадью  $4\text{ см}^2$  легче создать. Внутри каркаса планируется разместить электронную схему управления поворотным устройством ФМ.

По результатам математических расчетов и натурных испытаний была оптимизирована конструкция ФЭД и создан опытный образец (рисунок 3.29).

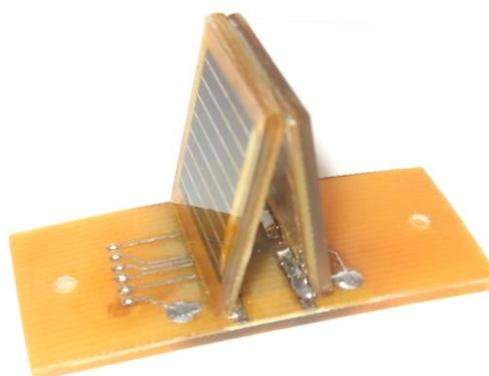


Рисунок 3.29. Опытный образец ФЭД

ФЭД состоит из каркаса в форме прямой трехгранной призмы, на двух боковых гранях которой, выполненных под углом  $20^\circ$ , размещены фотоэлементы для определения положения Солнца, а на третьей грани установлен командный фотоэлемент разворота модулей с запада на восток. Фотоэлементами являются кремниевые ФЭП квадратной формы со стороной 2 см.

После оптимизации конструкции датчика были получены следующие характеристики: угол между А и В  $20^\circ$ ; размеры элементов  $2 \times 2$  см; выходной ток от 100 мкА, который является достаточным для входного сигнала блока контроля.

На СЭС с применением системы контроля на базе данного датчика получен патент на изобретение № 2459156 «Солнечная энергоустановка» от 20 августа 2012 [93].

Особенности разработанного датчика:

1. Использование ФЭП в качестве активного элемента и добавление в конструкцию тылового ФЭП для измерения фонового излучения и запуска систем в утренние часы.

2. Для обеспечения единой температуры всех элементов датчика, они расположены на теплопроводящей конструкции. Данная конструкция обеспечивает электрические соединения тыловых контактов элементов датчика.

3. Для повышения чувствительности датчика лицевые элементы расположены под углом  $20^\circ$  относительно друг друга.

4. В качестве выходного сигнала используется ток КЗ ФЭП, зависящий от интенсивности солнечного излучения и не зависящий от температуры.

5. Компактные размеры датчика обеспечивают удобство его установки и эксплуатации.

## ГЛАВА 4. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ФМ

### 4.1 Эффективность работы ФМ с системой контроля его ориентации

Системы контроля, как было показано раньше, позволяют увеличить выработанную мощность ФМ, однако их использование приводит к затратам мощности поворотным устройством на ориентирование. Для получения максимальной мощности необходимо разработать эффективную методику работы системы контроля. Методика работы систем контроля заключается в двух действиях: определение положения яркого пятна на небосводе и ориентировании ФМ на яркое пятно.

Для выполнения первого действия разработан ФЭД, отличающийся от аналогов высокой чувствительностью, минимальной зависимостью выходного сигнала от температуры окружающей среды, возможностью определения восхода, измерения уровня фонового излучения для определения необходимости ориентирования. Подробное описание разработки и принципа работы ФЭД представлены в третьей главе.

Для эффективности выполнения второго действия методики необходимо выбрать такие параметры ориентирования, чтобы полученная мощность была максимальной.

Полученная среднемесячная мощность – это разница среднемесячной мощности ФМ и затраченной на ориентирование:

$$P_{\text{получ}} = P_{\text{ФМ}} - P_{\text{ориент}}, \quad (4.1)$$

где  $P_{\text{получ}}$  – среднемесячная полученная мощность;

$P_{\text{ФМ}}$  – среднемесячная дневная мощность, выработанная ФМ;

$P_{\text{ориент}}$  – среднемесячная дневная мощность, затраченная на ориентирование ФМ.

Расчет выработанной мощности  $P_{\Phi M}$  описан в первой главе. Мощность, затраченная на ориентирование ФМ, зависит от мощности потребления поворотного устройства и времени его непрерывной работы [94]:

$$P_{\text{ориент}} = P_{\text{ПУ}} \cdot t, \quad (4.2)$$

где  $P_{\text{ПУ}}$  – мощность потребления поворотного устройства;

$t$  – время непрерывной работы поворотного устройства.

Потребление мощности поворотного устройства будет максимальным, если система контроля будет работать непрерывно. Для уменьшения мощности потребления возможна непостоянная работа поворотного устройства путем использования «спящего режима». В таком случае потребляемая мощность поворотного устройства зависит от интервала между включениями системы, что в свою очередь влияет на угол отклонения Солнца от нормали ФМ, что важно для определения времени работы поворотного устройства. Также потребляемая мощность поворотного устройства зависит от его скорости и шага, т.к. это влияет на время его работы:

$$t = T / \omega, \quad (4.3)$$

где  $T$  – интервала между включениями системы;

$\omega$  – скорость поворотного устройства.

Использование «спящего режима» системы контроля уменьшит не только потребляемую мощность поворотным устройством, но и выработанную мощность ФМ по сравнению с непрерывной работой системы контроля. Поэтому необходимо рассчитать интервал времени между включениями, чтобы выигрыш мощности от ориентирования превышал мощность, затраченную поворотным устройством.

Параметрами, влияющими на потребляемую мощность поворотного устройства и выработанную мощность ФМ, являются: интервал времени между включениями системы и шаг поворотного устройства. Ниже приведен расчет оптимальных значений указанных параметров.

## 4.2 Шаг поворотного устройства

Для определения влияния отклонения Солнца от нормали плоскости ФМ построены диаграммы направленности ФМ, с использованием математической модели, приведенной в первой главе. На рисунке 4.1 приведена диаграмма направленности в условиях 15 июля. На представленной диаграмме направленности и в таблице 4.1 показаны потери мощности в зависимости от угла отклонения Солнца от нормали плоскости ФМ.

**Мощность ФМ, Вт**

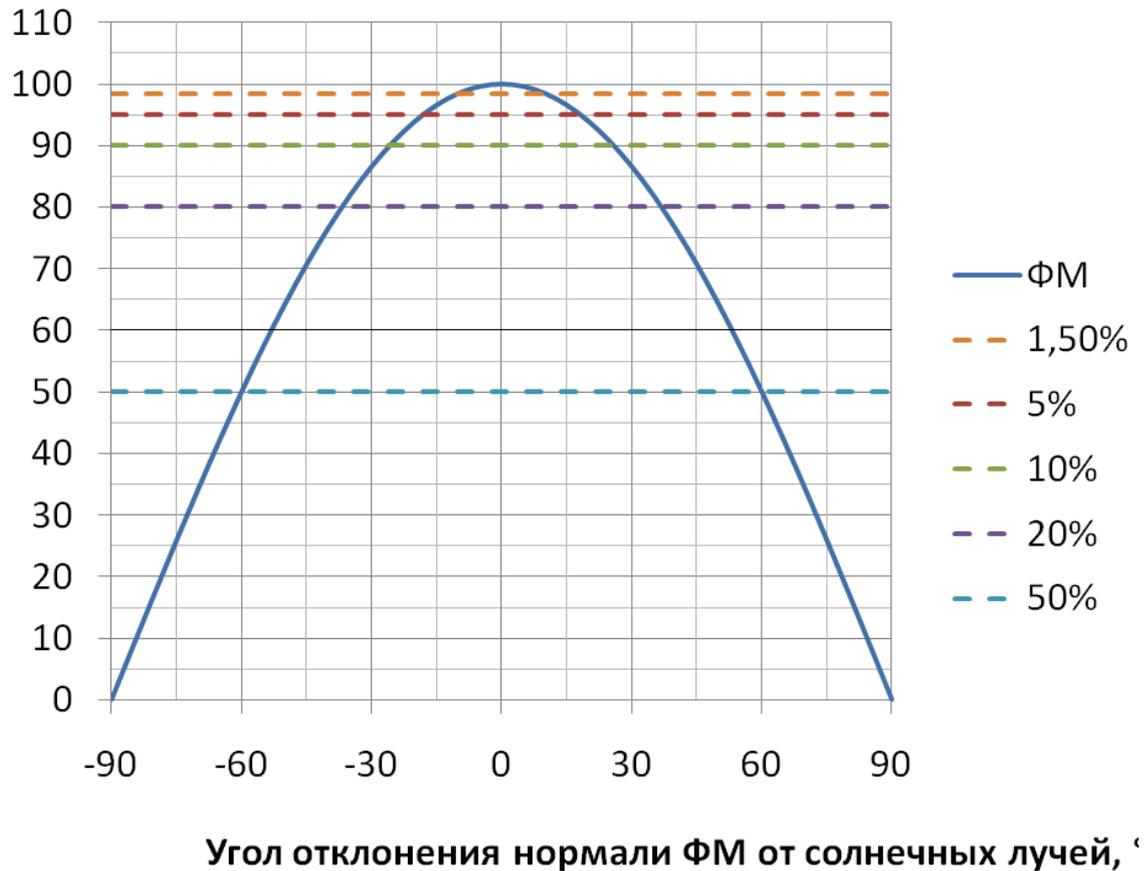


Рисунок 4.1. Диаграмма направленности ФМ (Результаты расчетов).

Таблица 4.1 Потери мощности ФМ от угла отклонения Солнца (расчетные значения).

Угол отклонения Солнца от нормали ФМ	Потери мощности
5°	0,5%
7°	1%
10°	1,5%
20°	5%
25°	10%
35°	20%
60°	50%

График на рисунке 4.1 демонстрирует, что отклонение Солнца от нормали ФМ на 5° приведет к потере выработанной мощности 0,5% по сравнению с ориентированным на Солнце ФМ, отклонение в 10° – к потере 1,5% мощности.

Расчетные данные подтверждены результатами натурных испытаний, проведенных в июле 2013 года, некоторые из них представлены на рисунке 4.2.

Мощность ФМ, Вт

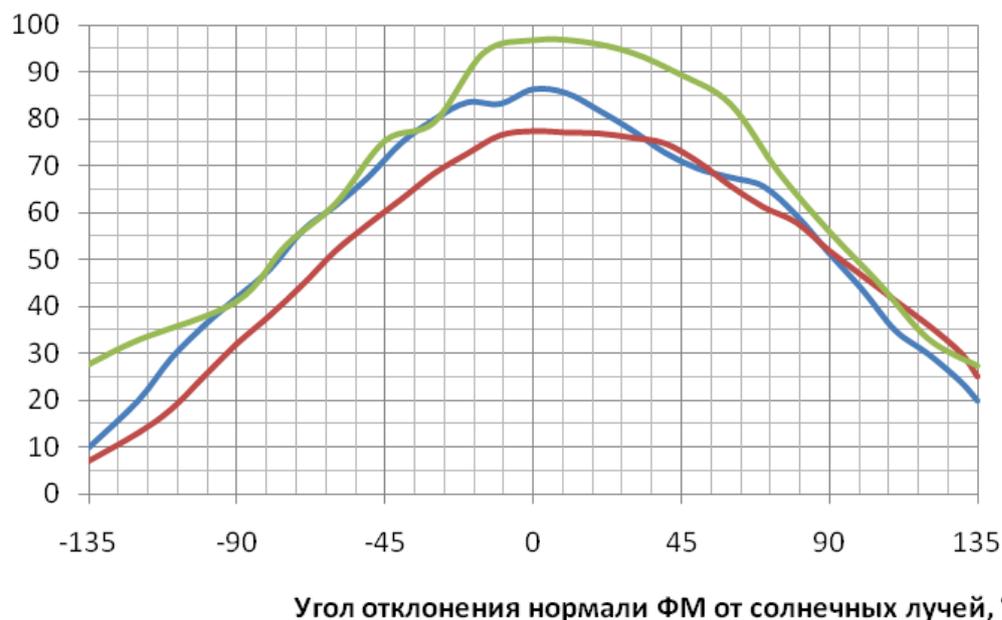


Рисунок 4.2. Диаграмма направленности ФМ (Результаты испытаний).

Таблица 4.2 Потери мощности ФМ от угла отклонения Солнца (экспериментальные данные).

Угол отклонения Солнца от нормали ФМ	Потери мощности
6°	0,5%
9°	1%
11°	1,5%
24°	5%
36°	10%
50°	20%
85°	50%

Потери мощности ФМ до 1,5% являются приемлемыми, поэтому максимальный допустимый угол отклонения Солнца от нормали ФМ при ориентировании ФМ не должен превышать 10°. По этой причине угол отклонения Солнца от нормали ФЭД при определении его максимальной чувствительности в третьей главе выбран 10°. Выбор данного угла подтвержден работами других авторов, например, в статье [74] сообщается, что отклонение нормали ФМ от солнечных лучей менее 10° не существенно влияет на выработанную мощность ФМ.

### 4.3 Интервал времени между ориентированием ФМ

С помощью математической модели работы ФМ, проведены расчеты выработанной мощности ФМ с применением систем контроля в течение года при интервалах между ориентированиями 5 мин, 10 мин, 30 мин, 1 ч, 2 ч, 3 ч и 4 ч. Расчеты проведены на примере Томска. Результаты представлены на рисунке 4.3.

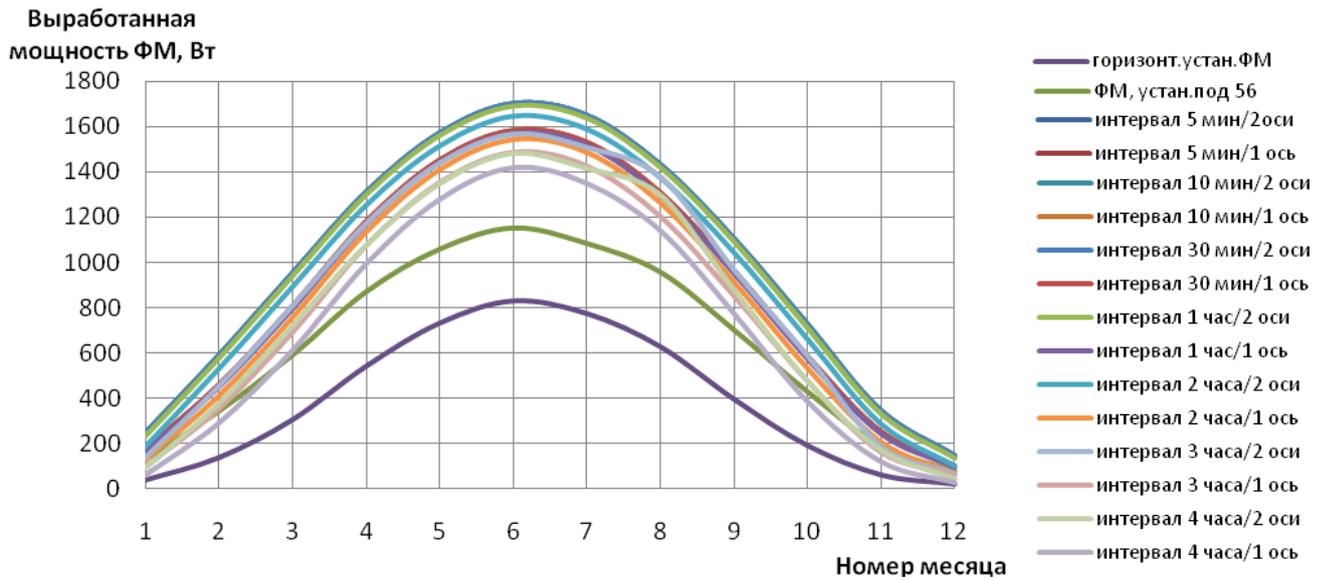


Рисунок 4.3. Выработанная мощность ФМ в течение года при различных интервалах между ориентированиями.

Из рисунка, приведенного выше видно, что характер графиков независимо от интервала между включениями системы контроля одинаков, максимальная мощность в каждом случае достигается в летние месяцы. При интервале между ориентированиями до 30 минут графики практически совпадают, на основании чего можно сделать вывод, что ориентирование ФМ в течение дня с интервалом времени менее 30 минут не имеет смысла.

Графики на рисунке 4.4 отображают выигрыш мощности ФМ с применением систем контроля с разными интервалами между включениями относительно стационарно установленного ФМ под углом к горизонту  $56^\circ$  в течение года. Как говорилось в первой главе, угол  $56^\circ$  является наиболее эффективным для Томска.

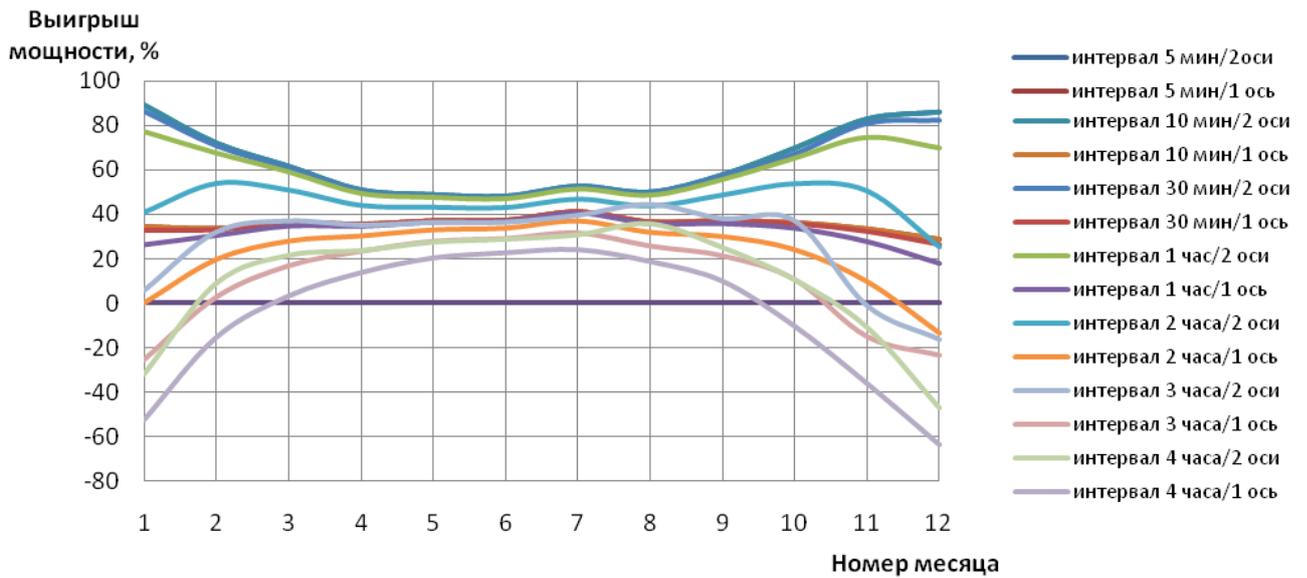


Рисунок 4.4. Выигрыш мощности ФМ с системой контроля в течение года при различных интервалах между ориентированиями.

Согласно рисунку 4.4, максимальный выигрыш мощности, выработанной ФМ с применением систем контроля, достигается в зимние месяцы при интервале времени до одного часа. При использовании большего значения интервала времени, выработанная мощность меньше мощности, выработанной ФМ, установленного под углом  $56^\circ$ . Это объясняется короткой продолжительностью зимних дней.

На рисунке 4.5 графики отображают зависимость годового выигрыша мощности ФМ относительно стационарно установленного ФМ под углом к горизонту  $56^\circ$  от интервала времени между ориентированиями.

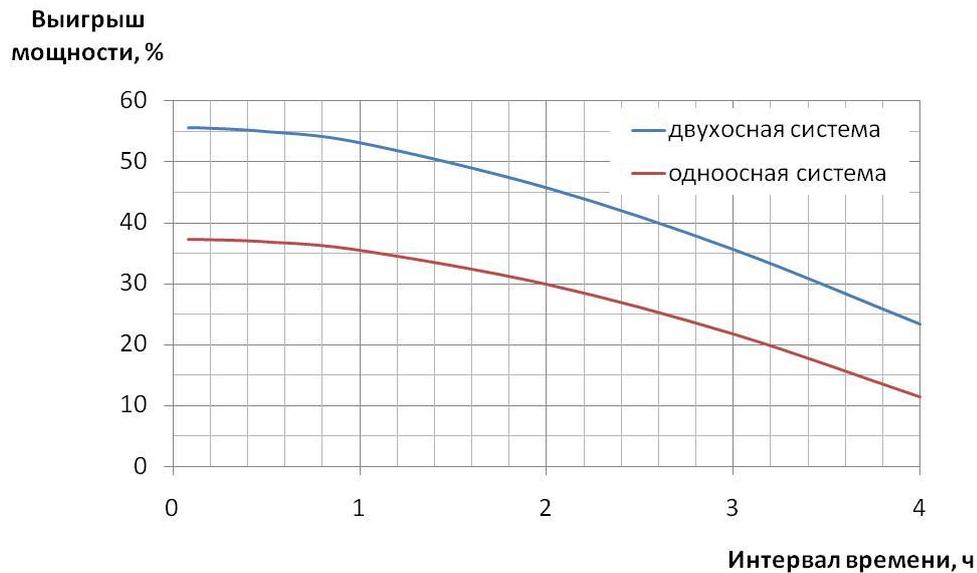


Рисунок 4.5. Среднегодовой выигрыш мощности ФМ с применением систем контроля от интервала между ориентированиями.

Из рисунка 4.5 видно, что максимальный выигрыш мощности ФМ с применением одноосной системы равен 37%, а с применением двухосной – 56%, что подтверждается результатами расчетов, представленных во второй главе. При интервале между включениями 30 минут выигрыш мощности меньше максимального значения на 1%. При использовании интервалов больше 30 минут выигрыш мощности уменьшается значительно. Однако даже ориентирование раз в четыре часа, как показывают графики, является выигрышным.

Проведенные расчеты мощности ФМ с применением систем контроля от интервала времени между ориентированиями произведены без учета потребления мощности поворотным устройством. Для определения влияния мощности потребления поворотного устройства проведен анализ рынка современных поворотных устройств, применяющихся для ориентирования ФМ [95-101]. В таблице 4.3 представлены технические характеристики наиболее популярных поворотных устройств.

Таблица 4.3. Технические характеристики поворотных устройств.

Фирма	Кол. осей	Мощность ФМ	Мин. шаг	Угол поворота по азимуту	Угол поворота по эклиптике	Макс. потреб. мощность
CY solar panel tracking system	2	5000 Вт	0,1°	270°	90°	160 Вт
SAIP	2	108000 Вт	≤0.1°	360°	180°	160 Вт
ST-1K	2	10800 Вт	≤1°	180°	70°	120 Вт
ST-20K	2	20160 Вт	≤1°	180°	70°	240 Вт
Solar Leading	1	5000 Вт	≤1°	90°	-	90 Вт
Селтек	1	560 Вт	≤1°	360°	-	36 Вт
TGF-ZZCF-1	1	1000 Вт	регул.	270°	-	36 Вт
01US10S	1	1000 Вт	регул.	180°	-	36 Вт

Анализ технических характеристик поворотных устройств позволил сделать вывод, что потребляемая мощность зависит от габаритов ФМ, следовательно, и его мощности. В среднем значение мощности потребления поворотного устройства составляет 3% от пиковой мощности ориентируемого ФМ.

По результатам анализа для системы контроля ФМ мощностью 500 Вт выбрано поворотное устройство фирмы Селтек. Согласно данным производителя, потребляемая мощность данного поворотного устройства 36 Вт. Используя формулу 4.2, рассчитаем значение мощности, затраченной на ориентирование ФМ по одной и двум осям в течение дня, при использовании данного поворотного устройства при непрерывной работе, с интервалами включения системы контроля 5, 10, 30 минут, 1, 2, 3, 4 часа. Расчеты проведены для каждого месяца года. Результаты расчетов для 15 июля приведены на рисунке 4.6.

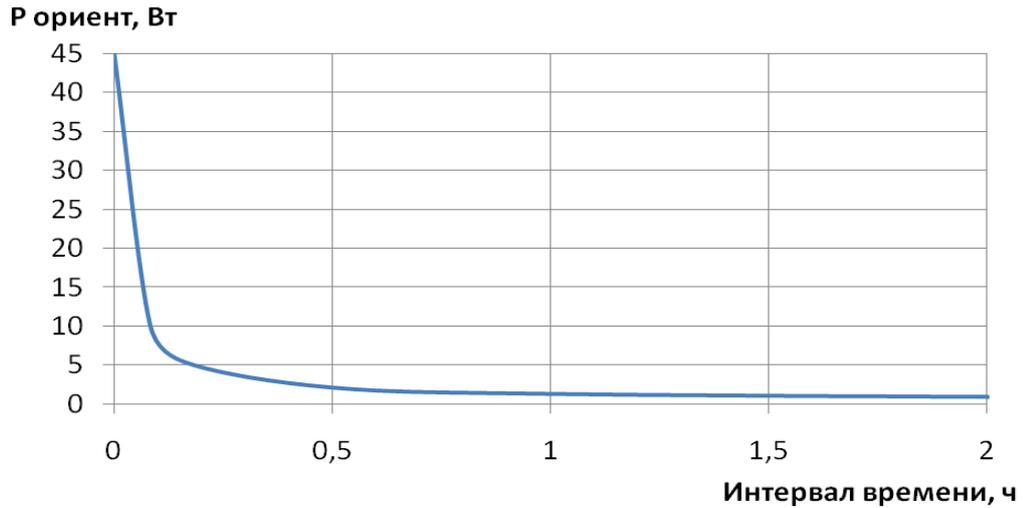


Рисунок 4.6. Зависимость потребляемой мощности одноосным поворотным устройством от интервала времени между ориентированиями.

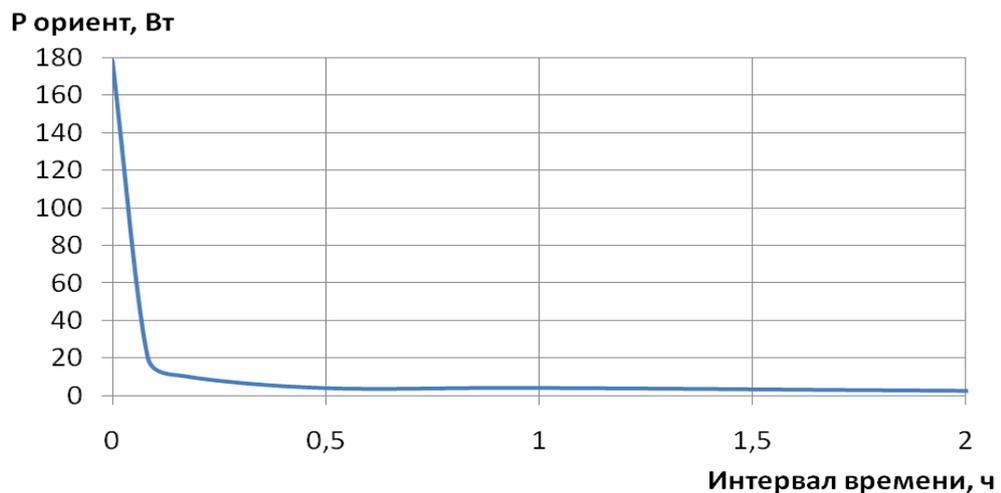


Рисунок 4.7. Зависимость потребляемой мощности двухосным поворотным устройством от интервала времени между ориентированиями.

Расчеты потребляемой мощности поворотным устройством доказывают, что при непрерывной работе поворотного устройства потребление максимально и в несколько раз превышает потребление при интервалах между включениями более пяти минут. Графики на рисунках 4.6 и 4.7 также наглядно демонстрируют, что потребление мощности поворотным устройством при интервалах времени его включения более 30 минут изменяется незначительно.

Однако рассчитанные значения мощности потребления не позволяют определить максимально эффективный интервал времени между включениями системы контроля. Необходимо определить интервал, при котором полученная мощность будет максимальна. По формуле 4.1 определена среднемесячная полученная мощность в течение года в зависимости от интервала времени между включениями системы контроля. На рисунке 4.8 представлены результаты расчетов для июля на примере ФМ мощностью 1000 Вт, установленного в Томске.

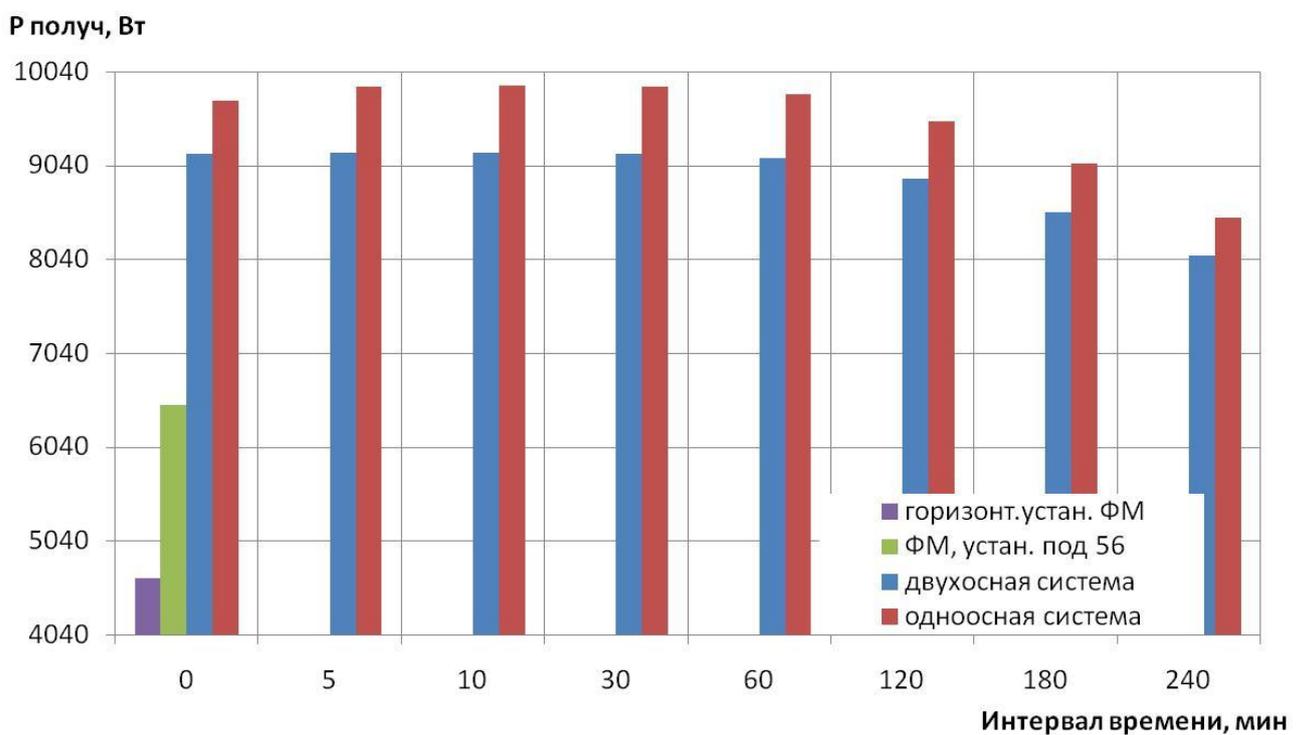


Рисунок 4.8 Зависимость среднемесячной полученной мощности от интервала времени между включениями (июль).

Как видно из графика на рисунке 4.8, максимальное значение полученной мощности ФМ с применением систем контроля достигается при интервале между ее включениями 5-30 мин. Для наглядности построен график выигрыша полученной мощности с применением систем контроля относительно мощности ФМ, установленного под углом  $56^\circ$ , от значения интервала времени между включениями (рисунок 4.9).

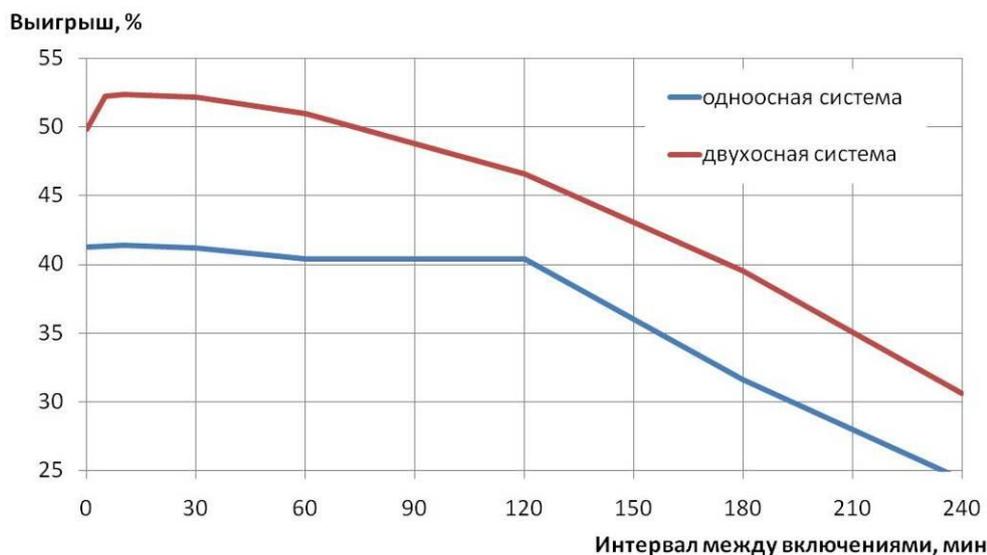


Рисунок 4.9. Выигрыш полученной мощности с применением систем контроля относительно мощности ФМ, установленного под углом  $56^\circ$  (июль).

Согласно графикам на рисунках 4.8 и 4.9, для июля при использовании одноосной системы контроля оптимальным интервалом между ориентированиями является два часа. Хотя непрерывное ориентирование и ориентирование с интервалом менее двух часов дают больший выигрыш, частое использование поворотного устройства способствует уменьшению срока эксплуатации поворотного устройства и увеличит вероятность отказа системы. При интервале два часа выигрыш полученной мощности составит более 40%. Использовать больший интервал не следует, т.к. это приведет к значительному уменьшению полученной мощности. Исходя из графика рисунка 4.9, для двухосной системы контроля наиболее приемлемым (по тем же причинам) будет ориентирование с интервалом между включениями, равным 30 минут.

Представленные выше результаты расчетов полученной мощности и заключение об оптимальном интервале ориентирования актуальны только для июля. Аналогичным образом были проведены расчеты для каждого месяца. Среднегодовой выигрыш полученной мощности с применением систем контроля относительно мощности ФМ, установленного под углом  $56^\circ$  к горизонту, представлен на рисунке 4.10.

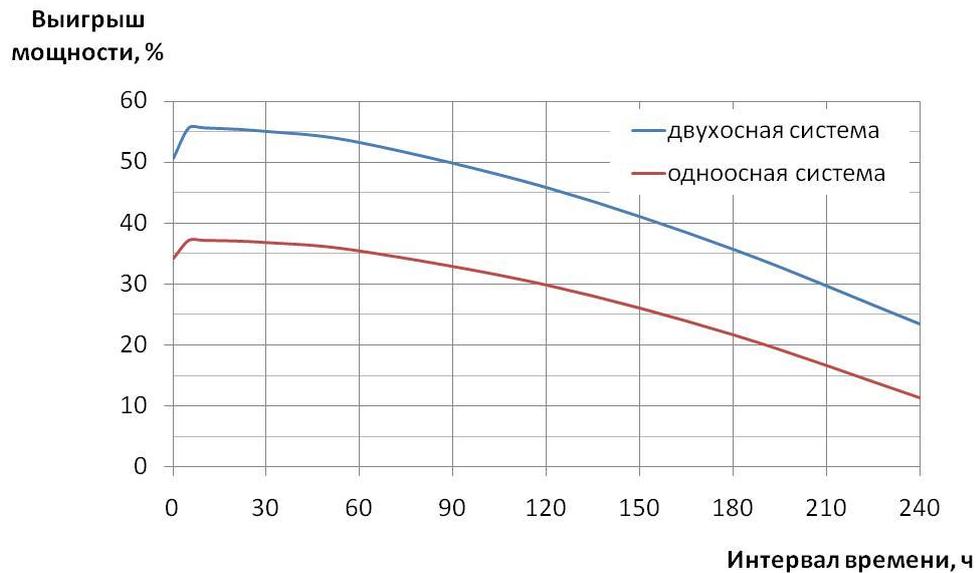


Рисунок 4.10. Выигрыш полученной мощности с применением систем контроля относительно мощности ФМ, установленного под углом  $56^\circ$  (год).

После анализа полученных данных, был сделан вывод, что оптимальным интервалом между ориентированиями ФМ (а значит и между включениями системы контроля) в течение года будет являться интервал 30 минут. Использование интервала 30 минут позволит максимально увеличить полученную мощность, а, следовательно, и эффективность работы СЭС. Использование меньшего интервала нерентабельно, т.к. выигрыш мощности составит менее 1%, а использование большего интервала приведет к более значительным потерям полученной мощности.

Используя расчетные значения приходящей солнечной радиации, приведенные во второй главе и значения полученной мощности ФМ с применением систем контроля, определим эффективность использования солнечной радиации в течение года при различных интервалах между включениями (2.2). Полученные данные представлены на рисунке 4.11.

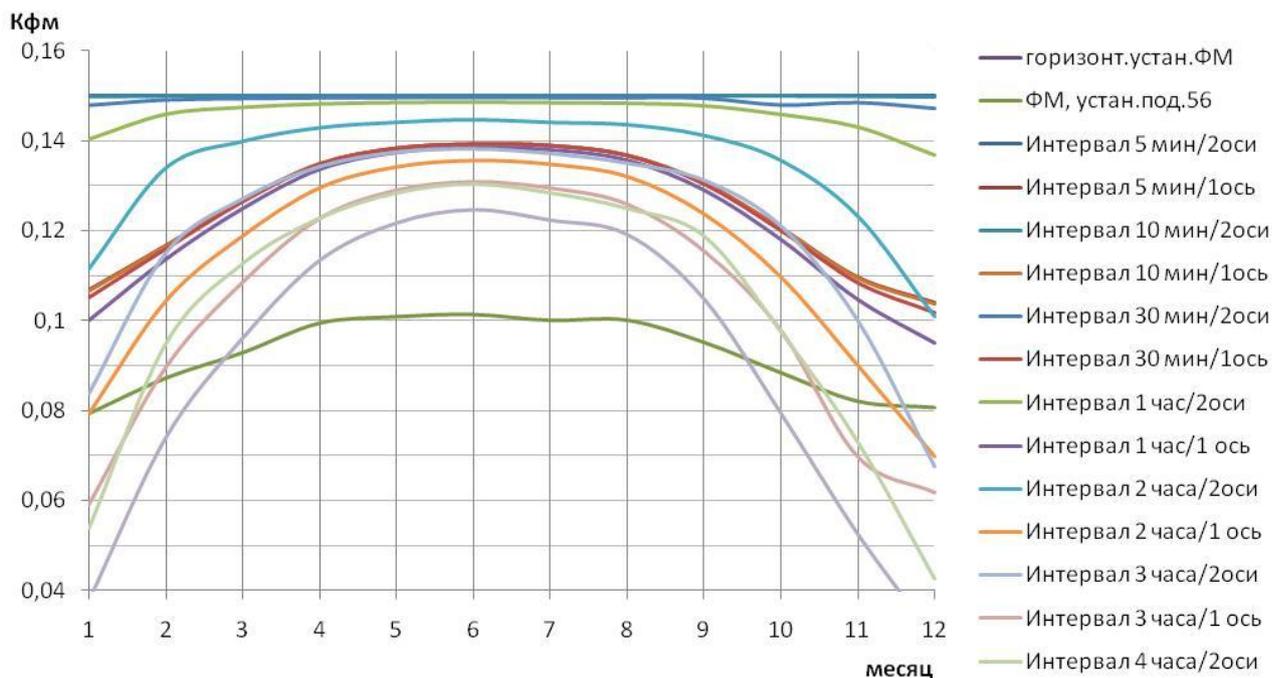


Рисунок 4.11. Эффективность использования солнечной энергии

На графике рисунка 4.11 видно, что значения энергетического критерия при использовании интервала до 30 минут, совпадают. При увеличении интервала эффективность использования солнечной радиации ФМ заметно уменьшается. Значит, максимально эффективным интервалом является время 30 минут, что подтверждено результатами расчетов среднемесячной полученной мощности и энергетического критерия работы ФМ в течение года.

На основе сказанного выше, можно сделать вывод, что для достижения максимальной эффективности необходимо использовать следующие характеристики работы поворотного устройства: шаг поворота не более  $10^\circ$ , интервал между включениями системы контроля 30 мин. Это приведет к потере выработанной мощности относительно непрерывно ориентируемого ФМ – 2%.

#### 4.4 Методика работы системы контроля ориентации ФМ

Для получения максимальной полученной мощности ФМ необходимо разработать эффективный алгоритм управления поворотным устройством. Для этого необходимо учесть следующие факторы:

1. После включения системы контроля, для начала следует определить необходимость ориентирования поверхности ФМ, т.е. определить уровень освещенности (т.к. ночью и в пасмурную погоду ориентирование не имеет смысла).

2. Для исключения поворота ФМ на  $360^\circ$  и запутывания проводов необходимо установить концевые выключатели в крайних положениях ФМ, сигналы с которых будут давать команду остановки поворотному устройству.

3. Для уменьшения энергопотребления необходимо ввести «спящий режим».

4. Для исключения вмешательства кратковременных факторов, таких как пролет птицы, кратковременное затенение облаком и пр. необходимо перед подачей команды поворотному механизму проводить несколько измерений сигналов датчика с некоторым интервалом.

Учитывая выше сказанное, был разработан алгоритм программы для микроконтроллера блока контроля, представленный на рисунке А.1 приложения А. Разработанный алгоритм является описанием *методики* работы одноосной системы контроля. Алгоритм состоит из трех основных блоков: блок определения необходимости ориентирования, блок определения восхода и блок ориентирования в течение дня.

Начинается алгоритм с блока определения необходимости ориентирования. Для этого проводятся измерения и запись сигналов каждого элемента датчика с интервалом 10 с три раза. В первый шаг получим значения А1, В1 и С1, следующий А2, В2 и С2, а в третий соответственно А3, В3 и С3. Затем, если значения, полученные с одного и того же элемента, расходятся между собой более

чем на 10%, то полученные записи удаляются, а измерения и запись проводятся заново. При необходимости цикл повторяется три раза. Если за три раза не удалось получить значения с расхождением менее 10%, это свидетельствует о переменной облачности, при которой ориентирование невозможно, т.к. положение яркого пятна меняется с большой скоростью. В таком случае подается команда перехода в «спящий режим» на 30 минут.

Если разница трех значений сигналов одного элемента менее 10%, то программа переходит к следующему действию. Средние значения сигналов каждого элемента сравниваются с пороговым, соответствующим сигналу в ночное время. Если хотя бы одно значение превышает пороговое значение, то осуществляется переход к блоку определения восхода. В противном случае (когда сигналы трех элементов ниже порогового) система переходит в режим ожидания на 30 мин.

Для определения восхода сигнал элемента С сравнивается с сигналами элементов А и В. Если в обоих случаях он больше, это свидетельствует о наступлении восхода и блок контроллера подает команду повернуть ФМ на восток до крайнего положения. Достижение крайнего положения регистрируется левым концевым выключателем.

Следующий блок отвечает за ориентирование плоскости ФМ в течение дня. Средние значения сигналов А и В датчика сравниваются между собой. Если одно значение превышает другое более, чем на 1,5%, подается команда поворота на один шаг в сторону большего. Так происходит, пока разница между А и В не станет менее 1,5%, что свидетельствует об ориентировании ФМ на самое яркое пятно. После этого система переходит в спящий режим на 30 мин.

Примечание: перед каждой командой поворота двигателя, происходит проверка сигнала с соответствующего концевого выключателя. При повороте на запад – проверка правого концевого выключателя, а на восток – левого. Таким образом, решена проблема поворота ФМ на 360° и запутывания проводов.

Описанная методика работы системы контроля положения Солнца позволяет определить необходимость ориентирования, решить проблему запуска системы утром, используемый спящий режим позволяет уменьшить потребление мощности блоком контроля и поворотным устройством, а проведение нескольких измерений сигналов датчика с интервалом 10 с позволяет исключить вмешательство кратковременных факторов.

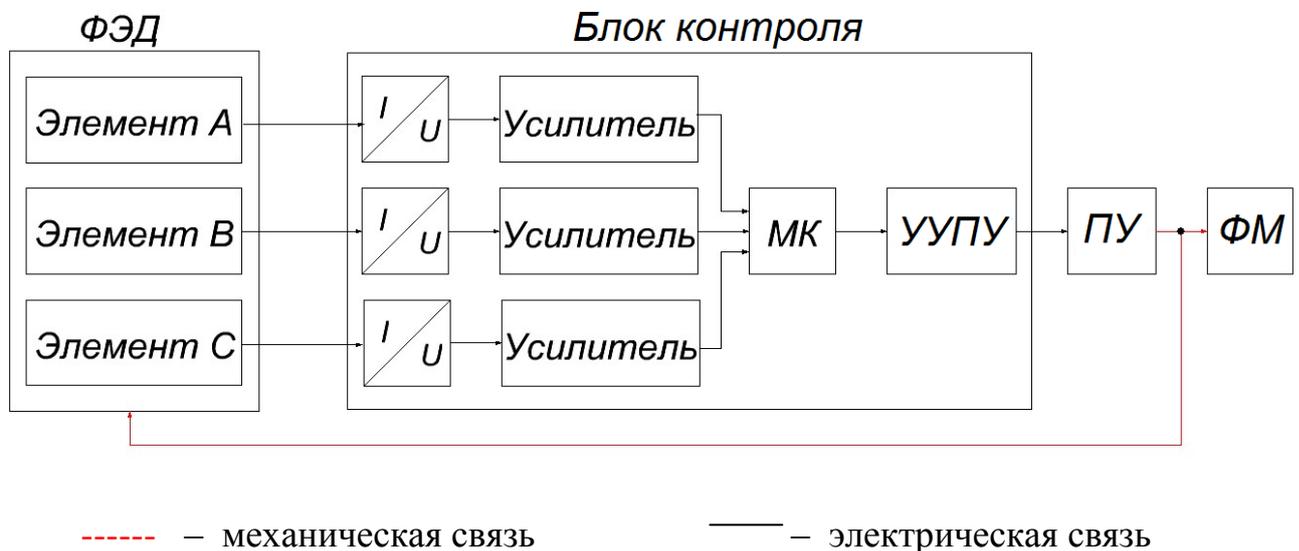
В второй главе также предложены два варианта двухосного датчика положения яркого пятна. Алгоритмы работы обоих двухосных датчиков представлены на рисунке Б.1 и Б.2 приложения Б.

Алгоритмы работы для двухосных систем контроля аналогичны описанному ранее для одноосной системы. Отличием является опрос дополнительных элементов датчика в блоке «определение необходимости ориентирования». В блоке «определение восхода» значение сигнала тылового элемента сравнивается со всеми лицевыми. Существенное отличие произошло в блоке «ориентирование в течение дня», где появились дополнительные операции для определения «яркого пятна» на небосводе и опрос двух дополнительных концевых выключателей.

#### **4.5 Блок контроля**

Для реализации аппаратно-программного комплекса оптимальной ориентации ФМ разработан блок контроля, считывающий сигналы ФЭД, обрабатывающий их по описанному ранее алгоритму и выдающий команду поворотному устройству. Структурная схема аппаратно-программного комплекса представлена на рисунке 4.12. Схема работает следующим образом. Элементы ФЭД, установленного на поверхности ФМ, преобразуют световой поток в токи, пропорциональные освещенности каждого элемента. Токи поступают в Блок контроллера, где преобразуются в напряжение, которое усиливается для согласования с диапазоном входных сигналов микроконтроллера (МК) с

помощью усилителей. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) МК преобразовывают напряжения всех трех сигналов в соответствующие цифровые коды. Все цифровые коды считываются в память МК и обрабатываются по заложенному алгоритму. МК подает на устройство управления поворотным устройством (УУПУ) код, соответствующий необходимому направлению и повороту ФМ. УУПУ по сигналам МК коммутирует сигналы для поворотного устройства, обеспечивая тем самым поворот в нужном направлении и на заданный угол.



ФЭД – фотоэлектрический датчик, I/U – преобразователь тока в напряжение, МК – микроконтроллер, УУПУ – устройство управления поворотным устройством, ПУ – поворотное устройство, ФМ – фотоэлектрический модуль.

Рисунок 4.12. Структурная схема аппаратно-программного комплекса.

Принципиальная схема блока контроля представлена в приложение В. Разработана программа для МК на языке СИ, обеспечивающая выполнение алгоритма, представленного на рисунке А.1. Текст программы представлен в приложение Г. Для разработанного блока контроля проведен расчет точности, подробно представленный в приложение Д. Согласно расчетам погрешность составляет 0,1%.

Разработанный аппаратно-программный комплекс обеспечивает наведение ФМ на яркое пятно, максимизируя полученную мощность. Система независима от географического местоположения и не нуждается в предварительной настройке и работе высококвалифицированного персонала.

#### 4.6 Экспериментальный макет аппаратно-программного комплекса

На рисунке 4.13 представлен экспериментальный макет аппаратно-программного комплекса оптимальной ориентации ФМ на максимальный поток солнечного излучения. Макет позволяет ориентировать ФМ мощностью 50 Вт в течение дня на яркое пятно.

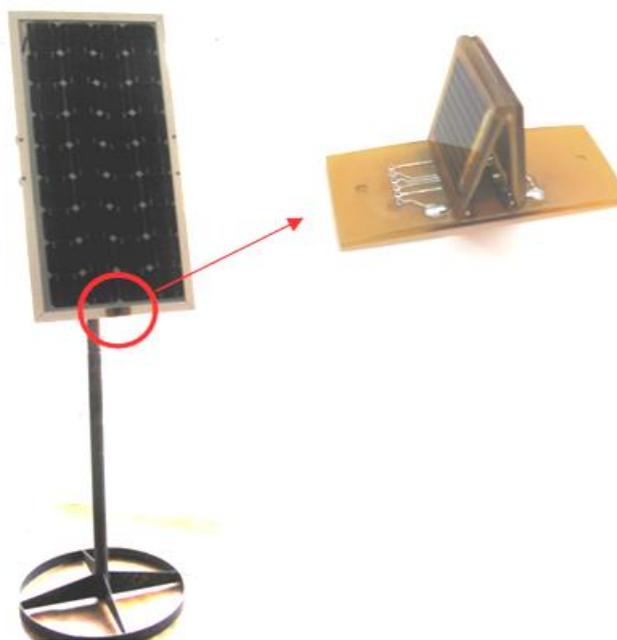


Рисунок 4.13. Экспериментальный макет аппаратно-программного комплекса

Совместно с ИОА СО РАН проведены многократные испытания макета в течение года, подтвердившие работоспособность разработанного комплекса и эффективность алгоритма его работы. Некоторые результаты испытаний представлены на рисунках 4.14-4.16

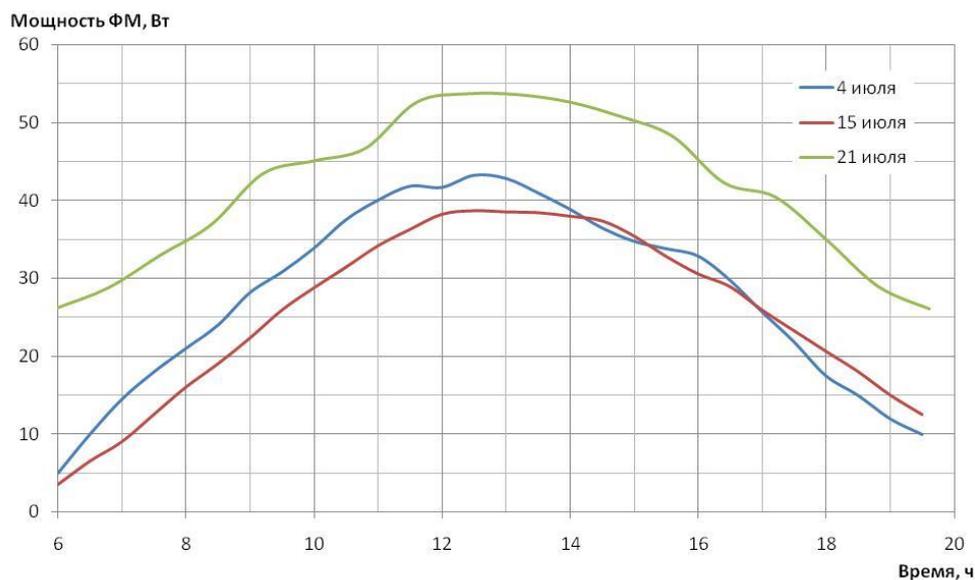


Рисунок 4.14. Мощность ФМ, выработанная в течение дня, с использованием аппаратно-программного комплекса (июль).

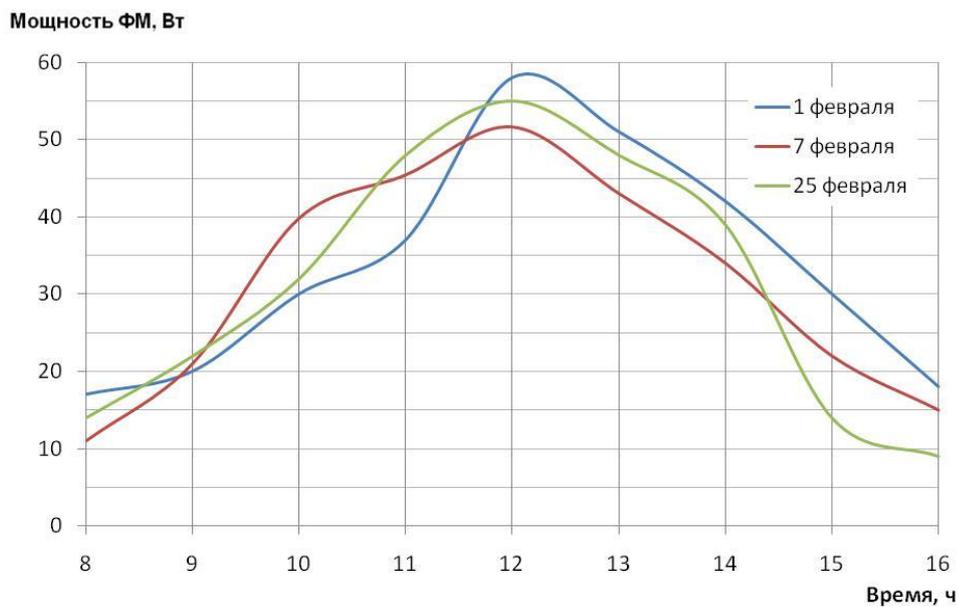


Рисунок 4.15. Мощность ФМ, выработанная в течение дня, с использованием аппаратно-программного комплекса (февраль).

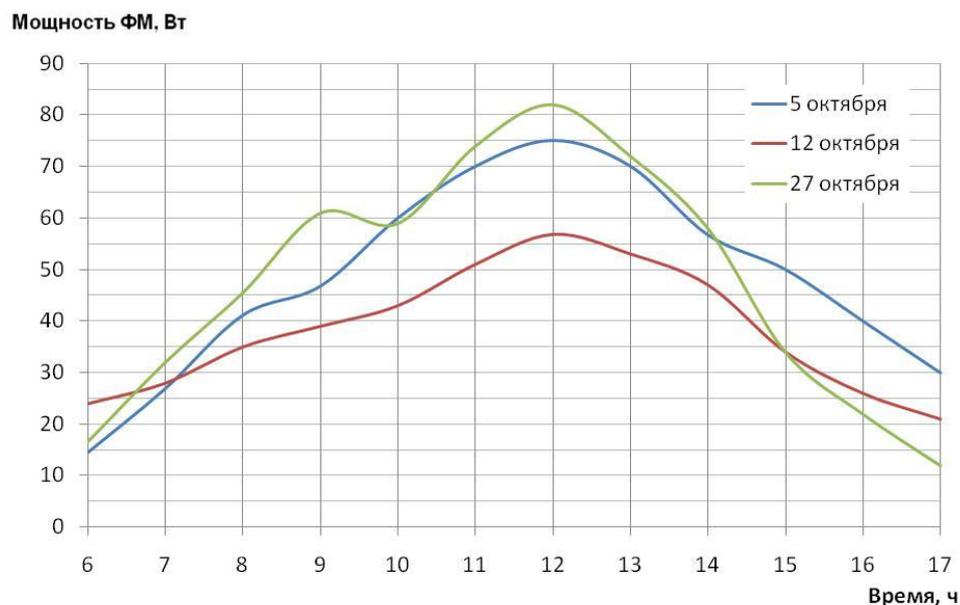


Рисунок 4.16. Мощность ФМ, выработанная в течение дня, с использованием аппаратно-программного комплекса (октябрь).

На основе результатов испытаний проведен расчет энергетического критерия эффективности работы ФМ с применением одноосной системы контроля. Полученные данные были сравнены с результатами испытаний ФМ, установленного под углом  $56^\circ$  к горизонту (рисунок 4.17)

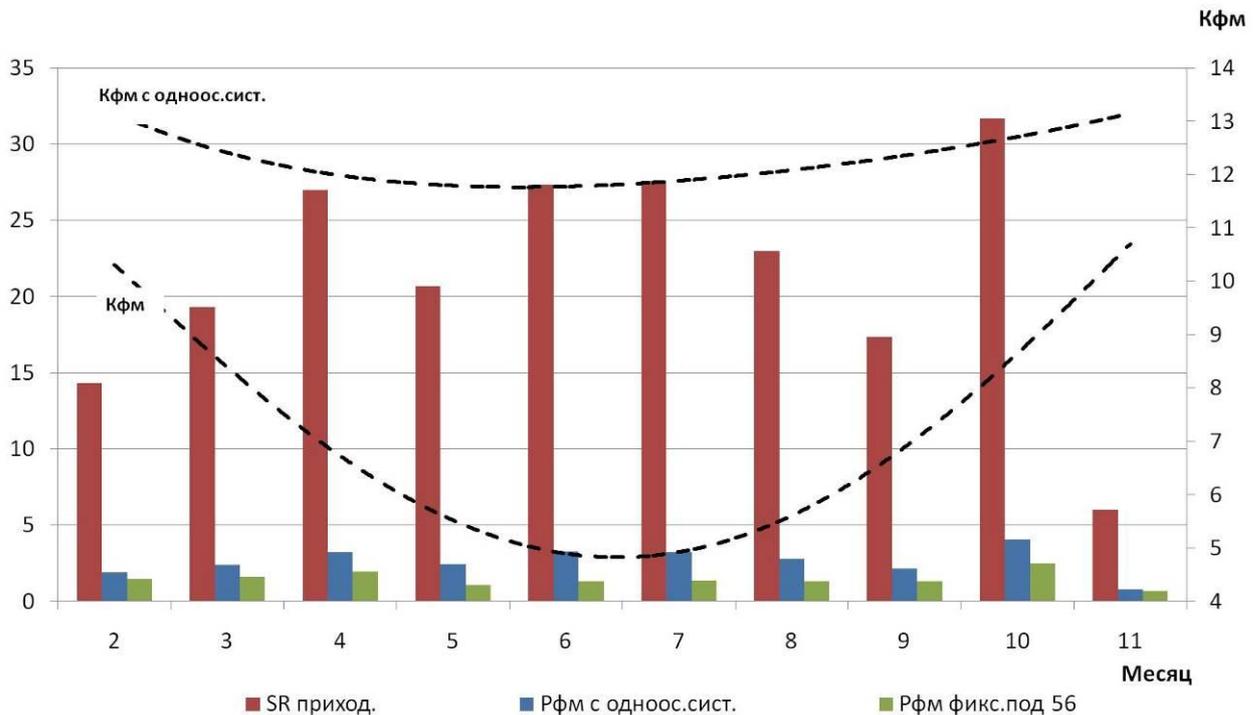


Рисунок 4.17. Результаты натурных испытаний и эффективность работы ФМ установленного под углом  $56^\circ$  и с применением одноосной системы контроля (Томск, 2013 год).

Результаты испытаний подтверждают работоспособность разработанного аппаратно-программного комплекса для контроля оптимальной ориентации ФМ. Как видно из рисунка 4.17, применение одноосной системы контроля позволяет значительно увеличить выработанную мощность по сравнению с мощностью ФМ без использования такой системы. Системы контроля позволяют сделать более равномерной генерацию энергии не только в течение дня, но и года. Значение эффективности использования солнечной радиации приближено к паспортному значению КПД ФМ.

Полученные значения эффективности использования солнечной радиации ФМ с системой контроля, позволяют заключить, что разработанный алгоритм работы аппаратно-программного комплекса является верным и позволяет максимально эффективно контролировать ориентацию ФМ в течение дня.

## Заключение

Основные научные результаты работы и выводы:

1. Установлена математическая совокупность соотношений, определяющих зависимость потока солнечного излучения на поверхность ФМ от угла наклона его поверхности; впервые для Томска проведен расчет приходящей солнечной радиации на поверхность ФМ в течение года без систем контроля положения и с применением одно- и двухосной систем; доказана эффективность применения одноосных и двухосных систем контроля на примере Томска, одноосное ориентирование в течение дня принесет дополнительно 37% мощности в год, а двухосное – 56%.

2. Проведен анализ существующих способов, методов и датчиков определения положения Солнца, позволивший разработать конструкцию датчика, исключающего недостатки прототипов; разработанный датчик позволяет определять положение максимального потока излучения относительно ФМ, отличается минимальным температурным дрейфом, возможностью определения необходимости ориентирования и запуска системы утром.

3. Построена математическая модель работы датчика и проведены натурные испытания его макета, по результатам которых проведена оптимизация конструкции датчика, выбран угол между элементами  $20^\circ$ , что позволило максимально увеличить чувствительность.

4. Используя математическую модель датчика, создана программа для моделирования его работы, подтверждающая работоспособность и эффективность конструкции датчика.

5. Предложен энергетический критерий работы ФМ, позволяющий оценить реальную эффективность использования им солнечной энергии, и обоснована эффективность применения одноосной и двухосной систем контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей.

6. Проведены расчеты оптимального шага поворотного устройства, доказавшие, что максимальный допустимый угол отклонения Солнца от нормали ФМ при ориентировании ФМ не должен превышать  $10^\circ$ . Расчеты интервала времени между включениями системы контроля позволили определить, что для получения максимальной мощности, наиболее оптимальным интервалом является 30 минут.

7. Разработаны аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации ФМ на максимальный поток солнечного излучения и алгоритм его работы для повышения эффективности использования солнечной энергии.

8. Проведены многократные натурные испытания экспериментального образца аппаратно-программного комплекса в течение года, подтвердившие его работоспособность и доказавшие, что разработанный алгоритм работы позволяет увеличить эффективность работы СЭС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.Н. Баранов. Прямое преобразование энергии для автономной энергетики. // Энергия: экономика, техника, экология.-2000.-№8.-С.23.
2. M. Hamakawa. Solar photovoltaics - recent progress and its new role // Optoelectronics-Dev.and.Tech.-1990.- v.5.- № 2.- p.113.
3. Д.Джаветски. Перспективы гелиоэнергетики // Электроника.-1979.-№15.-С.25.
4. Павел Безруких. Нетрадиционная энергетика // Деловой мир.-1993.-№235.- С.11.
5. Доводы в пользу использования энергии Солнца и других возобновляемых источников энергии // Возобновляемая энергия.-1998.-№4.-С.34.
6. Кадастр возможностей / Под ред. Б.В. Лукутина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 280 с.
7. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Е.Б. Шандарова. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
8. Попель О.С., Фортов В.Е. Возобновляемые источники энергии в мире и России // Материалы первого международного форума «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности» 22-23 октября 2013г. – г. Москва – С.12.
9. Попель О.С., Туманов В.Л. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы развития // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ №2(46), 2007. – С. 135.
10. Санеев Б.Г., И.Ю. Иванова, Т.Ф.Тугузова Что нам стоит возобновляемая энергия // Энергия: экономика, техника, экология.-2012.-№4.-С.23.
11. Попель О.С. Научно-технические проблемы разработки, создания и применения энергоустановок на ВИЭ в изолированных системах// Материалы

Международной конференции Возобновляемая энергетика в изолированных системах Дальнего Востока России 27-29 июня 2013 г., г. Якутск.

12. Markvart, T Practical handbook of photovoltaic: fundamentals and applications/ Tom Markvart, Luis Castaner. –ELSEVIER, NY, 2003. –Р. 8.

13. Deger [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.degerenergie.de>

14. Оршанский И.С. Фотоэнергетика: достоинства, недостатки, направления развития // Энергия: экономика, техника, экология.-2013.-№8.-С.13.

15. Solar tracker perphomance [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers>

16. TracStar [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.helmholz.us/smallpowersystems/Intro.pdf>

17. Rustu Eke, Sadan Ozden, Ali Senturk, Olaf Fleck and Sener Oktik The largest double-axis sun tracking pv systems with electronic control and photosensors in Turkey // Mugla Universit Clean Energy Research & Development Centre, Mugla, Turkey

18. The first French PV power plant equipped with 2 axis tracking “one year feedback”. Francois Paponneau. Exosun. Technopole Bordeaux Montesquieu

19. Санеев Б.Г. и др. Гелиоресурсы Байкальского региона: целесообразность использования для энергоснабжения // Энергия: экономика, техника, экология. - М., 2013. - № 1. - С. 20.

20. Попель О.С., Фрид С.Е. и др. Распределение ресурсов энергии солнечного излучения по территории России // Энергия: экономика, техника, экология.-2007.-№7.-С.15.

21. ГОСТ Р 51594-2000 Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 2000.–11 с.

22. Базарова Е.Г. Повышение эффективности использования солнечной энергии в энергетических установках с концентраторами: автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н./Базарова Е.Г. – М., 2008.-с.26.

23. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. Анализ показателей эффективности использования солнечных водонагревательных установок // Энергетика и ресурсосбережение – 2004г.

24. Попель О.С. исследование и разработка систем энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии: автореферат на автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н./ Попель О.С.– М.,2007.–с.30.

25. Попель О.С., Фрид С.Е., Шпильрайн Э.Э. Эффективность комплексного использования возобновляемых источников энергии и энергосберегающих мероприятий в России на конкретных примерах// Материалы Международного научно-технического «Энергосбережение и возобновляемая энергетика», Сочи, 23-24 июня 2005г.

26. Попель О.С. Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии // Энергоснабжение. НП «Авок»–2006.–№3–С.21.

27. Стребков Д.С. Российские технологии для солнечной энергетики // Энергия: экономика, техника, экология. - М., 2012. - № 11. - С. 3.

28. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок // Электроника, Измерительная Техника, Радиотехника и Связь. Доклады ТУСУРа, № 2 (22), часть 2, декабрь 2010 – С. 102.

29. Попель О.С., Фрид С.Е., Альварес Г.М. К расчету поступления солнечной радиации на земную поверхность // Гелиотехника–1986.–№1–С.56.

30. Плеханов С.И., Наумов А.В. Оценка возможностей роста производства солнечных элементов на основе CdTe, CIGS и GaAs/Ge в период 2010-2025 г.г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: AEnergy.ru

31. Наумов А.В., Плеханов С.И. Развитие солнечной энергетики на основе тонкопленочных CIGS-элементов // Энергия: экономика, техника, экология. - М., 2013. -№ 7. - С. 14.

32. Кузнецов Ф.А., Резниченко М.Ф. Кремний для солнечной энергетики// Материалы электронной техники. – 2008. – №4. – С.4.
33. Duryea S, Syed I, Lawrence W, An Automated Battery Management System for Photovoltaic Systems // International Journal of Renewable Energy Engineering– Vol 1– 1999–№ 2–P.18.
34. Baltas P., Tortoreli M., Russel P. Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays // Solar Energy –1986№37–P.63.
35. Abdallah S., Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control // Energy Conversion and Management –2004.–P.1931.
36. Comsit M., Visa I. Design of the linkages type tracking mechanisms of the solar energy conversionsystems by using Multi Body Systems Method //12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June18-21 2007 – p.1.
37. Fahrenburch, A., Bube, R. Fundamentals of solar cells // Academic Press– New York– 1983.
38. King, D.L. and Boyson, W.E. and Kratochvil, J.A. Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems // Photovoltaic Specialists Conference, 2002.
39. Gay, CF and Wilson, JH and Yerkes Performance advantages of two-axis tracking for large flat-plate photovoltaic energy systems // Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Spec. Conf 16.-1982.
40. Капля Е. В. Автоматическая система ориентации солнечной батареи в условиях переменной освещенности// Известия ВолгГТУ. – Волгоград – 2009.– № 8(56)–. С.88.
41. Weise E, Klockner R, Kniel R, Ma Sheng Hong, Qin Jian Ping Remote Power Supply Using Wind and Solar energy – a Sino-German Technical Cooperation Project // Beijing International Conference on Wind Energy, Beijing– 1995.
42. China C.S., Babub A., McBrideba W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink.

43. H. Mohring, F. Klotz and H. Gabler, Energy yield of PV tracking systems – claims and reality, 21st EUPVSEC, Dresden, September 4-8, 2006, 2691-2694.
44. Twidell J., Weir J. Renewable Energy Systems // Chapman and Hall –1994.
45. Centre for Resources and Environmental Studies, ANU, Sustainable Energy Systems – Pathways for Australian Energy Reforms, Cambridge University Press–1994
46. Fahrenburch, A., Bube, R. Fundamentals of solar cells // Academic Press–New York– 1983.
47. Александрович Н. Основы астрономии. Учебный курс на базе основ физики и математики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://hea.iki.rssi.ru/~nik/astro/>
48. Frolkis V.A., Rozanov E.V. Radiation code for climate and general circulation models. // Current problems in atmospheric radiation.–1993–P. 176.
49. Пригарин В.Е., Стенчиков Г.Л., Фролькис В.А. Расчет переноса излучения в замутненной и облачной атмосфере: описание модели. – М: ВЦ АН СССР, 1990, 14с.
50. Dunlop E., Wald L. and Šúri M., Solar Energy Resource Management for Electricity Generation from Local Level to Global Scale // Nova Science Publishers–2006.
51. Petrov L.A. Solar Tracking Strategies / BSc (Hons) Dissertation – University of DUNDEE 2010/2011 – 79p.
52. Пантелеев В.Л. Физика Земли и планет // Курс лекций–М.:МГУ–2001.
53. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации–Л.: Гидрометеиздат, 1968–234с.
54. Kondratjev K.Ya., Pivovarova Z.I., Fedorova M.P. Radiation calculation of the slope planes // Gidrometeoizdat – 1978.
55. Stine W., Geyer M.. Power From The Sun [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.powerfromthesun.net/index.html>
56. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный расчет наклонных поверхностей. - Л.: Гидрометеиздат, 1978.

57. Бринкворт Б.Дж. Солнечная энергия для человека, М.,1976.
58. Астрономические опыты [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://astroexperiment.ru/astro/utime.shtml>
59. Географический информационный проект [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gect.ru/astronomy.html>
60. Wichert B, Lawrance W, Friese T, First Experiences with a Novel Predictive Control Strategy for PV-Diesel Hybrid Energy Systems, Solar'99
61. Уравнение времени [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/Уравнение\\_времени](http://ru.wikipedia.org/Уравнение_времени)
62. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
63. Козлов А.В. Контроль влияния параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Козлов А.В–Томск – 2008.
64. Damm, J.. An active solar tracking system // HomeBrew Magazine – 1990
65. Рылов Ю. М. Описание изобретения к патенту РФ Параболоцилиндрический концентратор солнечной энергии с системой слежения за Солнцем, 2007.
66. Саврасов В.Ф., Юрченко А.В., Юрченко В.И. Информационно-аналитические аспекты использования солнечной энергии// Сборник материалов I Научно-практической конференции, / под ред. А.В. Юрченко - Томск, Томск: Изд. ТПУ, 2010. - с. 10-17.
67. Внутренний фотоэффект [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.vevivi.ru/best/Vnutrennii-fotoyeffekt-ref131087.html>
68. Прокопов О.И. Ярмухаметов У.Р. Описание изобретения к патенту РФ № 2280918// БИ 2006, №21.

69. Юрченко А.В. Планарная неоднородность фоточувствительных кремниевых фотоэлектрических преобразователей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Юрченко А.В.–Томск – 2001.

70. Эффект Саньяка [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/Эффект\\_Саньяка](http://ru.wikipedia.org/Эффект_Саньяка)

71. Тимошенко К. Концентрирующий параболический солнечный коллектор [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://delaysam.ru/>

72. Ярмухаметов У.Р. Солнечные энергетические установки с системой слежения за Солнцем для энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук:05.20.02/ Ярмухаметов У.Р.–С.-П., 2008–18с.

73. Intelligent Solar Tracking Control System Implemented on an FP [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.altera.co.jp/literature/dc/2007/t3c.pdf>

74. Solar tracking project [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ecorenovator.org/forum/solar-power/875-solar-tracker-project-14.html>

75. My solar tracker [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.zrimir.ru/wvbTHF0Hyno/My\\_Solar\\_Tracker.html](http://www.zrimir.ru/wvbTHF0Hyno/My_Solar_Tracker.html)

76. Arduino Solar Tracker [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Solar-Tracker/>

77. Щелевые солнечные датчики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.vniiem.ru/>

78. Байере Т. 20 конструкций с солнечными элементами. — М.: Мир, 1988

79. Двигатель Стирлинга [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.physicstoys.narod.ru/>

80. Сидоренко В.П., Ханин Е.В. Описание изобретения к патенту РФ № 2125686 – 1999.

81. Laboratory of atmospheric composition climatology [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://lop.iao.ru/activity/?id=sb>

82. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии. Учебное пособие—Томск: Издательство ТПУ, 2008—127с.

83. IEC 61853: Performance testing and energy rating of terrestrial photovoltaic (PV) modules 1.

84. IEC 60904-2:1989, Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for reference solar cells.

85. Экскурсия в лабораторию альтернативных источников энергии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://fs.nashaucheba.ru/docs/180/index-238103.html>

86. Batrinu F., Carpaneto E., Chicco G., Gagliano S., Spertino F. and Tina G. M., Assessing the performance of photovoltaic sites and grid-connected plants: a study case // Proc. 6th World Energy System Conference, Torino, Italy, July 10-12, 2006, P.386.

87. Прохоренок Н.А. Программирование на C++ в Visual Studio 2010 Express. Глава 1. Первые шаги.—2010.

88. LA-20USB. Многофункциональная плата аналогово-цифрового преобразования для IBM PC/AT совместимых компьютеров на шину USB. Руководство пользователя.

89. ГОСТ 28977-91(МЭК 904-1-87). Фотоэлектрические приборы. Часть 1. Измерение фотоэлектрических ВАХ. – М.:Издательство стандартов, 1991.

90. IEC 60904-1:1987, Photovoltaic devices – Part 1: Measurements of photovoltaic current-voltage characteristics

91. ГОСТ 17772-88 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 65с.

92. Определение интегральной чувствительности фотоэлемента и снятие вольт - амперных характеристик фотосопротивления. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.nnov.rgoutps.ru/files/uch\\_lit/dopmat/.htm](http://www.nnov.rgoutps.ru/files/uch_lit/dopmat/.htm)

93. Китаева М.В., Юрченко А.В., Скороходов А.В. Описание изобретения к патенту РФ № 2459156, 2012
94. Петрусёв А.С., Юрченко А.В., Китаева М.В., Охорзина А.В. Повышение эффективности работы фотоэлектрических модулей с помощью одноосной системы слежения // Ползуновский вестник – 2013 –№2.– С. 36
95. Статьи о двигателях [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.electroprivod.ru](http://www.electroprivod.ru)
96. Solar Tracking Systems & How They Work [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.solartrackingsystem.com/>
97. Tracking system 1KW-20KW [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://sograndind.en.alibaba.com/product//tracking\\_system.html](http://sograndind.en.alibaba.com/product//tracking_system.html)
98. Solar Leading [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.solarleading.com/>
99. Селтек [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.selteq.com/pp>
100. Solar panel tracker [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.eco-worthy.com/catalog/solar-panel-tracker-linear-actuator.html>
101. Промышленные актуаторы [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.aktuator.ru/Industrial\\_Actuator/01US10S.shtml](http://www.aktuator.ru/Industrial_Actuator/01US10S.shtml)
102. ГОСТ 28977-91 (МЭК 891-87). Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Часть 2. Методика коррекции по температуре и облученности результатов измерения ВАХ.– М.:Издательство стандартов, 1991
103. ГОСТ Р 7.0.11-2011 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления.–М.: Стандартинформ, 2012.–11с.
104. Рыжиков Ю.И. Работа над диссертацией по техническим наукам, 3-е издание – Спб: БХВ – Петербург, 2012. –512 с.

## Приложение А (обязательное)

### Алгоритм работы одноосной системы

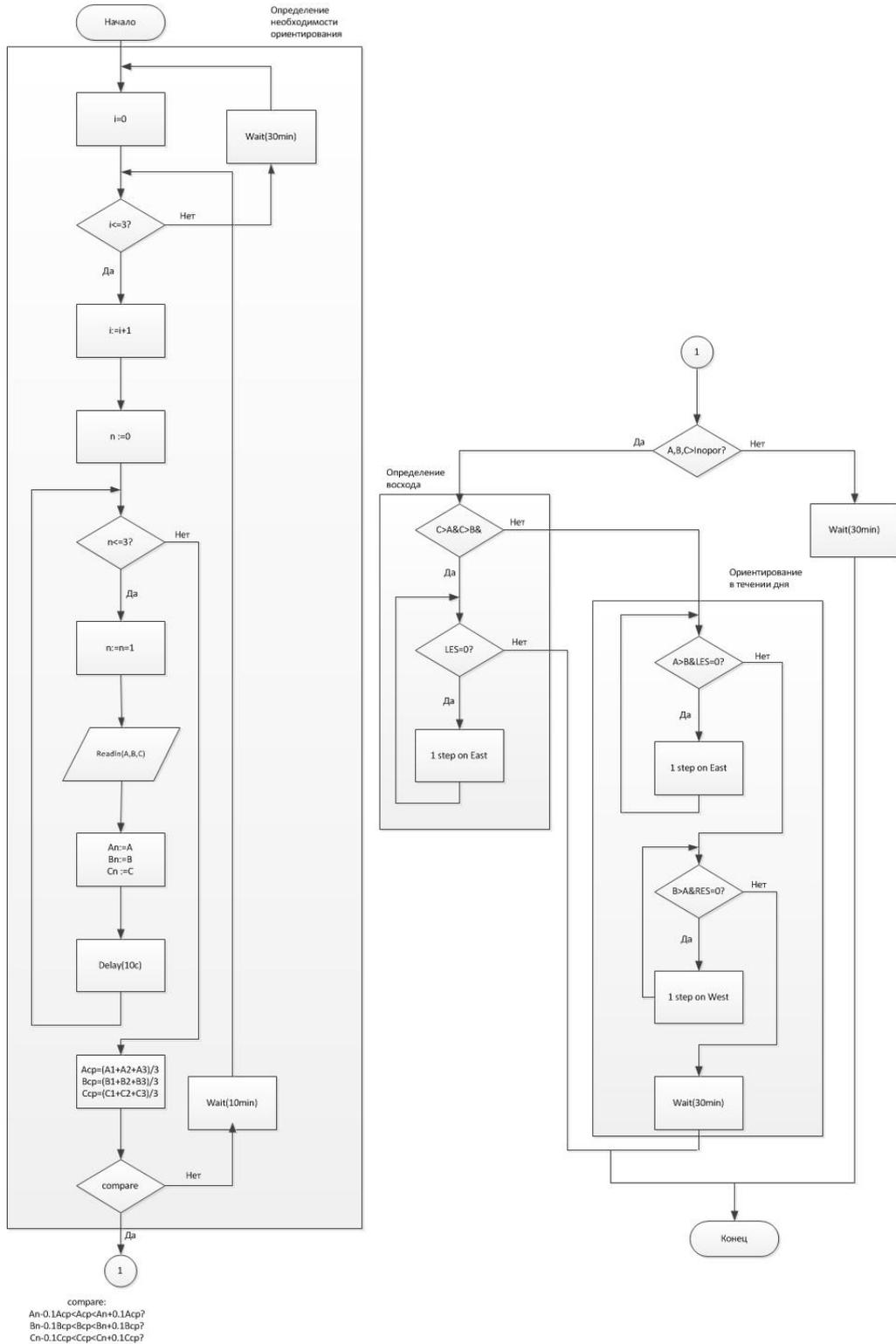


Рисунок А.1. Алгоритм работы одноосной системы.

## Приложение Б (рекомендуемое)

### Алгоритм работы двухосной системы

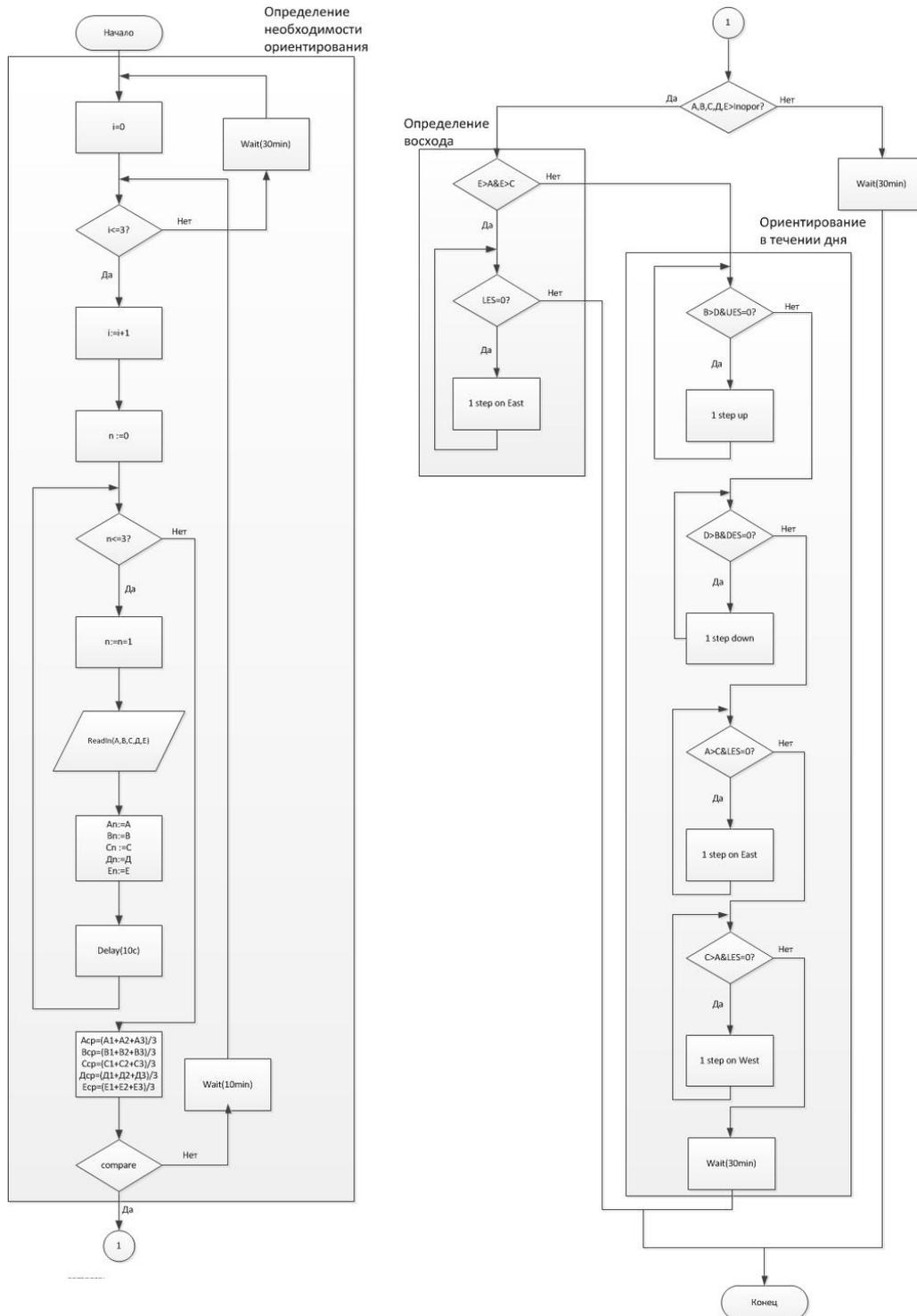


Рисунок Б.1. Алгоритм работы двухосной системы с датчиком ФЭД 2.1

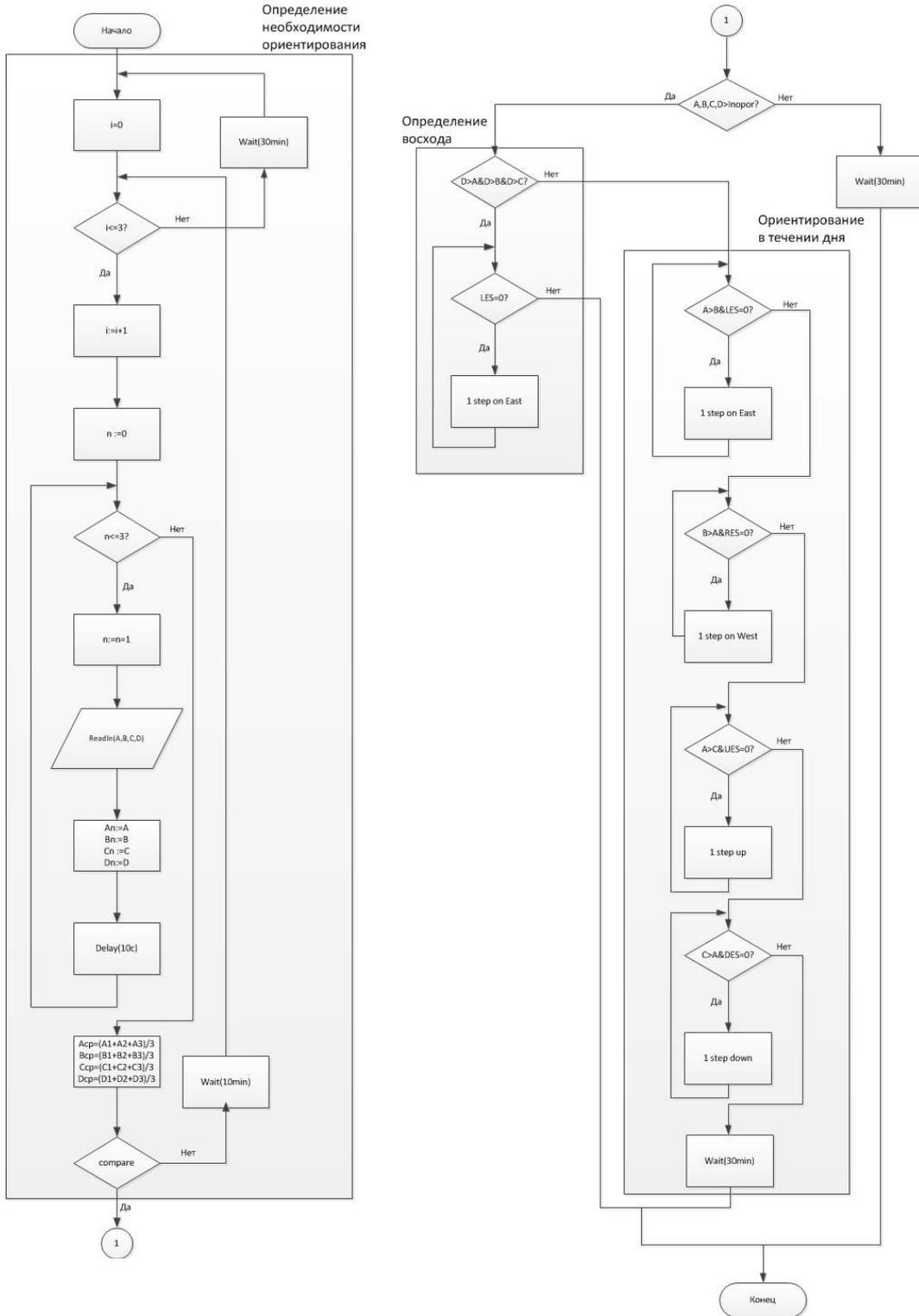


Рисунок Б.2. Алгоритм работы двухосной системы с датчиком ФЭД 2.2

## Приложение В

(рекомендуемое)

### Схема электрическая принципиальная блока контроля

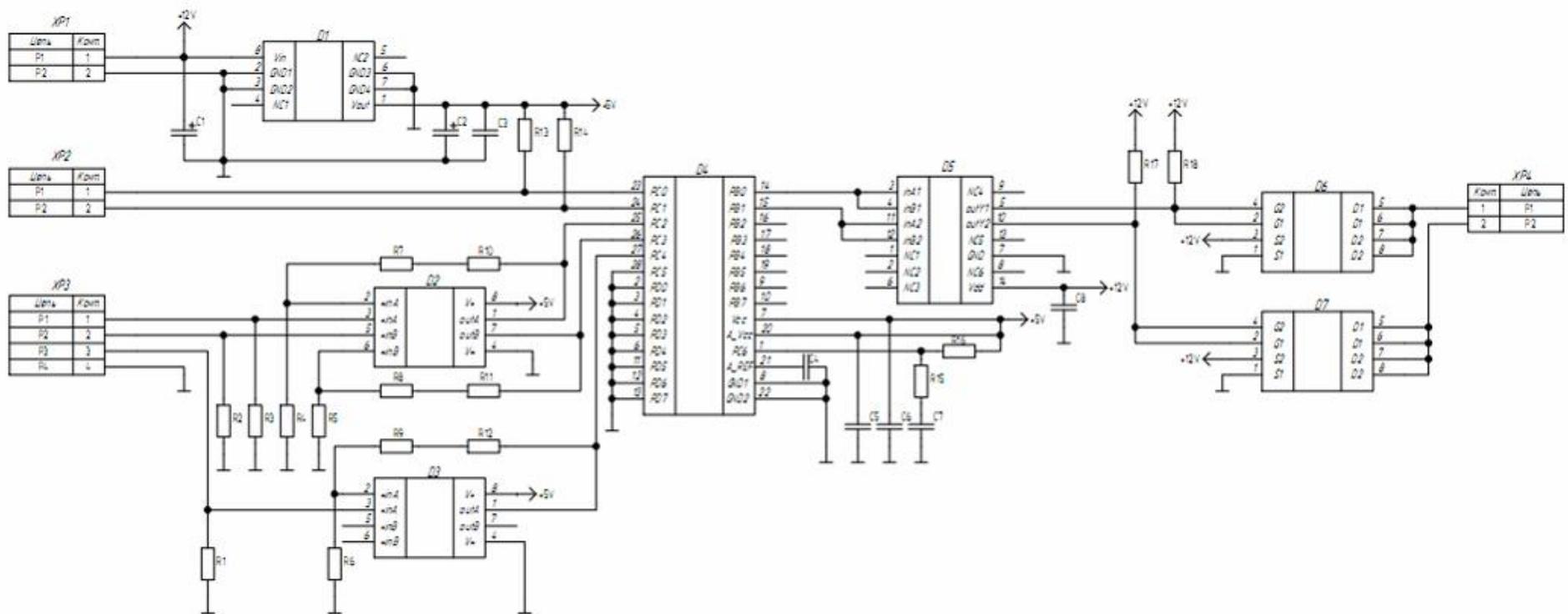


Рисунок В.1 Схема электрическая принципиальная блока контроля

Зона	Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
		<u>Конденсаторы АЖЯР.673511.004 ТУ</u>			
	C1	K10-79-100 В-0,33 мкФ±5%-МПО	1		
	C2..C5	K10-79-100 В-0,1 мкФ±5%-МПО	4		
	C6	K10-79-100 В-0,22 пФ±5%-МПО	1		
	C7,C8	K10-79-100 В-0,1 мкФ±5%-МПО	2		
		<u>Микросхемы</u>			
	D1	MC78L00	1	Vishay	
	D2,D3	AD8552	2	Analog Devices	
	D4	Atmega8	1	Atmel Corporation	
	D5	564/1A10	1	Микрон	
	D6,D7	IRF7105	2	International Rectifier	
		<u>Резисторы АЛЯР.434110.005 ТУ</u>			
	R1..R3	P1-12-0,062-1 0м±5%-У	3	Типоразмер 0402	
	R4..R6	P1-12-0,062-2 кОм±1%-Л	3	Типоразмер 0402	
	R7..R9	P1-12-0,062-39 кОм±1%-Л	3	Типоразмер 0402	
	R10..R12	P1-12-0,125-0 0м±5%-У	3	Типоразмер 0402	
	R13,R14	P1-12-0,062-1 кОм±1%-Л	2	Типоразмер 0402	
	R15	P1-12-0,062-100 0м±5%-У	1	Типоразмер 0402	
	R16	P1-12-0,062-10 кОм±1%-Л	1	Типоразмер 0402	
	R17,R18	P1-12-0,062-22 кОм±1%-Л	2	Типоразмер 0402	
		<u>Соединители</u>			
	XP1,XP2	Вилка СНП389-2ВП3-1-1 РЮМК.430420.033 ТУ	2		
	XP3	Вилка СНП389-4ВП3-1-1 РЮМК.430420.033 ТУ	1		
Инд. № подл.					Лист
	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
					2

**Приложение Г**  
(рекомендуемое)

**Текст программы микроконтроллера на языке СИ**

```
#include <mega8.h>

#include <delay.h>

unsigned int SA=0, SB=0, SC=0;

void avr_setup(void)
{
    #asm("CLI");
    PORTB=0x00;
    DDRB=0xFF;
    PORTC=0x00;
    DDRC=0x00;
    PORTD=0x00;
    DDRD=0xFF;
    #asm("SEI");
}

void main( void )
{
    avr_setup();
    ADCSR|=(1<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
    ADCSR|=(0<<ADFR);
    ADCSR|=(1<<ADEN);
    ADMUX|=(0<<REFS1)|(1<<REFS0);
```

```
while(1)
{
    SA=0; SB=0; SC=0;
    ADMUX=0x42;
    ADCSR|=(1<<ADSC);
    while((ADCSR&0x40));
    ADCSR|=(1<<ADIF);
    SA|=(ADCL);
    SA|=(ADCH<<8);
    SA=SA>>2;
    PORTD=~SA;
    delay_ms(1000);
    ADMUX=0x43;
    ADCSR|=(1<<ADSC);
    while((ADCSR&0x40));
    ADCSR|=(1<<ADIF);
    SB|=(ADCL);
    SB|=(ADCH<<8);
    SB=SB>>2;
    PORTD=~SB;
    delay_ms(1000);
    ADMUX=0x41;
    ADCSR|=(1<<ADSC);
    while((ADCSR&0x40));
    ADCSR|=(1<<ADIF);
```

```

SC|=(ADCL);
SC|=(ADCH<<8);
SC=SC>>2;
PORTD=~SC;
delay_ms(1000);
if (SC>(SA+SC/10) && SC>(SB+SC/10) && PINC.5==1)
{
    PORTB=0x01;
    PORTD=0xDE;
}
else
{
    if (SA>(SB+SA/10) && PINC.5==1)
    {
        PORTB=0x01;
        PORTD=0x7E;
    }
    else
    {
        if (SB>(SA+SB/10)&& PINC.4==1)
        {
            PORTB=0x02;
            PORTD=0xBD;
        }
        else

```

```
        {  
            Stop:  
            PORTB=0x00;  
            PORTD=0x1F;  
        }  
    }  
}  
delay_ms(1000);  
}  
}
```

## Приложение Д (рекомендуемое)

### Расчет точности

#### 1. Мультипликативная погрешность:

Мультипликативную погрешность составляет погрешность 10-разрядного АЦП микроконтроллера Atmega8:

$$\gamma_m = \frac{\Delta U_{on}}{U_{on}} \cdot 100\%$$

$$\Delta U_{on} = \frac{U_{on}}{2^N - 1}$$

$$\gamma_m = \frac{U_{on}}{U_{on} \cdot (2^N - 1)} \cdot 100\%$$

$$\gamma_m = \frac{1}{(2^{10} - 1)} = 0.0976\%$$

где  $\gamma_m$  - мультипликативная погрешность

$\Delta U_{on}$  - шаг квантования АЦП

$N$  – разрядность АЦП

#### 2. Аддитивная погрешность:

Аддитивная погрешность состоит из погрешности дискретизации АЦП и аддитивной погрешности усилителя.

##### 2.1 Погрешность АЦП:

$$\gamma_{addAЦП} = \frac{\Delta_{add}}{U_{ex}}$$

$$\Delta_{add} = 0,5LSB$$

$$LSB = \frac{U_{ex}}{2^N}$$

$$\gamma_{addAЦП} = \frac{0,5 \cdot U_{ex}}{U_{ex} \cdot 2^N}$$

$$\gamma_{addAЦП} = \frac{0,5}{1024} \cdot 100\% = 0,049\%$$

где  $\gamma_{addAЦП}$  - аддитивная погрешность АЦП

$\Delta_{add}$  - смещение опорного напряжения

$U_{\text{вх}}$  - входное напряжение

$LSB$  - уровень младшего разряда АЦП

$N$  – разрядность АЦП

2.2 Погрешность операционного усилителя связана с дрейфом нуля:

$$\gamma_{\text{ад.у.}} = \frac{e_{\text{см}} \cdot K_y}{U_{\text{вх}}} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{\text{ад.у.}} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 20,5}{0,2} \cdot 100\% = 0,051\%$$

где

$\gamma_{\text{ад.}}$  - аддитивная погрешность усилителя

$e_{\text{см}}$  - смещение нуля усилителя

$K_y$  - коэффициент усиления усилителя

$U_{\text{вх}}$  - входное напряжение

Общая аддитивная погрешность:

$$\gamma_{\text{ад}} = \sqrt{\gamma_{\text{адАЦП}}^2 + \gamma_{\text{ад.у.}}^2}$$

$$\gamma_{\text{ад}} = \sqrt{0,049^2 + 0,051^2} = 0,071\%$$

Общая погрешность блока контроля:

$$\gamma = \sqrt{0,071^2 + 0,0976^2} = 0.1\%$$