

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Юрченко Алексей Васильевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Осипов Юрий Мирзоевич**,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск,
заведующий кафедрой отделения ЮНЕСКО

Поллер Борис Викторович,
доктор технических наук,
ФГБУН СО РАН Институт лазерной физики,
г. Новосибирск, заведующий лабораторией
лазерных информационных систем

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Новосибирск

Защита состоится «02» декабря 2014 г. в 17.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Савиных, д.7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан « » октября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Васендина

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Высокие темпы развития солнечной энергетики и расширение географии использования солнечных электростанций (СЭС) в регионах, имеющих сложную метеорологическую и техногенную структуру атмосферы, характеризуют солнечную энергию, как одно из перспективных направлений.

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

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

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

Актуальность работ, нацеленных на разработку и 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, 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.

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° 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° 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 конференция 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 конференция 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 конференция «Измерение, контроль, информатизация» - Барнаул, АлтГТУ, 23 Апреля 2014.

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

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемых источников из 104 наименований. Диссертационная работа содержит 139 страниц машинописного текста, включает 12 таблиц, 83 иллюстрации.

Автор приносит благодарность ИОА СО РАН за содействие при проведении испытаний и ОАО «Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов» за помощь при создании датчика и аппаратно-программного комплекса.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе для оценки эффективности применения систем контроля построена модель расчета вырабатываемой ФМ энергии.

$$P_{\text{ФМ}} = КПД \cdot SR_{\text{пр}} \quad (1)$$

где $P_{\text{ФМ}}$ - вырабатываемая мощность ФМ; $КПД$ – коэффициент полезного действия ФМ; $SR_{\text{пр}}$ - мощность солнечного излучения, упавшая на ФМ.

Поток прямой солнечной радиации $Sr_{\text{пр}}$ на поверхность, расположенную под углом θ к этому потоку равен:

$$Sr_{\text{пр}} = Sr_{\text{max}} \cdot K_{\text{ам}} \cdot \cos \beta \quad (2)$$

где Sr_{max} - солнечная константа-количество тепла, которое поступает от Солнца на Землю. Эта величина равна $Sr=925\text{Вт/м}^2$; $K_{\text{ам}}$ - коэффициент поправки на воздушную массу, которую необходимо пройти лучу; β - приведенный угол падения солнечных лучей на поверхность инсоляции

$$\cos \beta = \sinh_c \cos \alpha + \cosh_c \sin \alpha \quad (3)$$

где α - угол наклона плоскости ФМ к горизонту; h_c - угол, который определяет высоту Солнца над горизонтом в данный момент времени.

Из формул 1 и 2 видно, что мощность ФМ зависит от угла наклона плоскости к горизонту и от угла, определяющего высоту солнцестояния. При использовании систем контроля возможно управление углом наклона плоскости ФМ к солнечному излучению, т.е. увеличение мощности ФМ.

В результате анализа способов контроля выявлены три способа контроля: ручной, пассивный и активный. В системах с ручной наводкой на Солнце выработанная мощность напрямую зависит от работы оператора: выбора им оптимального угла наклона ФМ, количества совершенных поворотов.

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. Существенным недостатком пассивных систем является необходимость корректировки алгоритма для каждого конкретного местоположения ФМ на основе данных метеослужб.

Активный способ контроля является наиболее распространенным в существующих системах. В отличие от ручного и пассивного способа, активные системы позволяют ориентировать поверхность ФМ на максимальный поток солнечного излучения (яркое пятно), который в ряде случаев не совпадает с положением Солнца на небосводе. Такое ориентирование позволяет наиболее эффективно использовать солнечную энергию.

Реализация датчиков активных систем возможна на основе разных методов. Однако проведенный анализ показал, что для ориентации ФМ наиболее подходящим является оптический метод. В результате анализа датчиков 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.

Во второй главе приведены результаты расчетов выработанной мощности ФМ в течение года с использованием систем контроля и без них, и построены графики зависимости среднемесячной мощности ФМ (рисунок 1).

Согласно расчетам, применение одноосной системы принесет дополнительно 37 % в год, а применение второй оси контроля увеличит выработанную мощность на 56%.

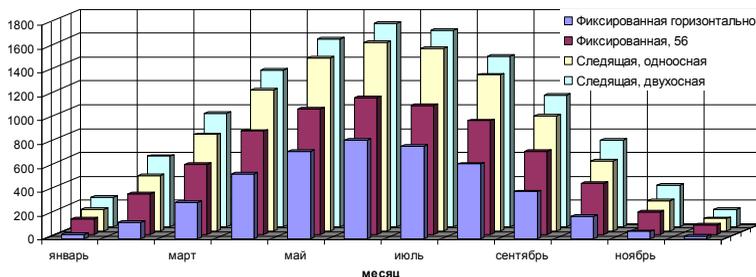


Рисунок 1. Эффективность применения систем слежения в Томске.

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

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.

$$K_{\text{ФМ}} = \frac{P_{\text{ФМ}}}{S_r \cdot S_{\text{ФМ}}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ФМ}}$ – энергетический критерий эффективности использования солнечной энергии ФМ; $P_{\text{ФМ}}$ – среднемесячная мощность ФМ, выработанная в течение дня; S_r – среднемесячная солнечная радиация, падающая на следящую поверхность в течение дня; $S_{\text{ФМ}}$ – площадь поверхности ФМ.

Совместно с ИОА СО РАН в течение года проведены испытания кремниевого ФМ, установленного стационарно под углом 56° в г. Томске. Испытания доказали, что реальный коэффициент преобразования ФМ солнечной энергии в электрическую 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, проведены

расчеты эффективности использования солнечной энергии ФМ с применением систем контроля (рисунок 2).

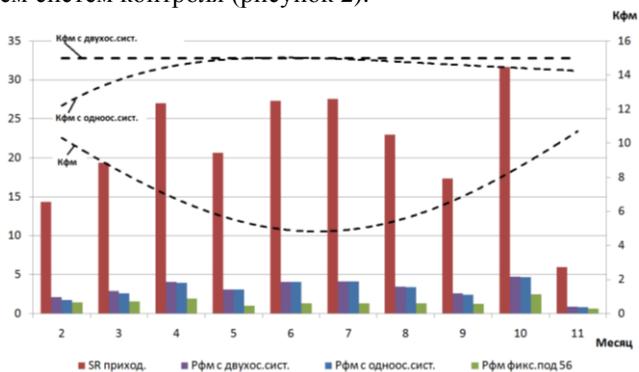


Рисунок 2. Результаты натурных испытаний ФМ в Томске и расчетная эффективность работы ФМ с использованием систем контроля.

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.

Третья глава посвящена разработке фотоэлектрического датчика (ФЭД) и модели его работы, натурным испытаниям и оптимизации его конструкции.

На основе проведенного анализа датчиков положения Солнца, разработан фотоэлектрический датчик (ФЭД), позволяющий исключить влияние фонового излучения, решить проблему запуска системы утром, простотой конструкции и использования (рисунок 3).

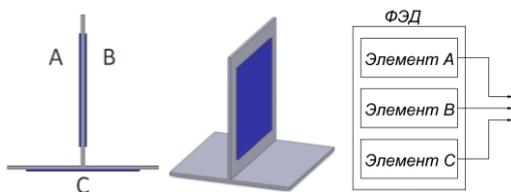


Рисунок 3. ФЭД. а) схематическое изображение, б) функциональная схема, в) реализация датчика.

В качестве фоточувствительных элементов выбран кремниевый фотоэлектрический преобразователь (ФЭП). В основе датчика два лицевых элемента для определения положения «яркого пятна», третий тыловой элемент – для исключения влияния рассеянного излучения и для запуска системы утром.

Особенности разработанного датчика:

1. Использование ФЭП в качестве активного элемента и добавление в конструкцию тылового элемента 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 ФЭП, т.к. ток зависит от интенсивности солнечного излучения и не зависит от температуры.

Построена модель ФЭД при различных значениях угла между элементами А и В (рисунок 4).

$$I_A = I_N \cdot \cos(90 - \alpha/2 + \beta); \quad I_B = I_N \cdot \cos(90 - \alpha/2 - \beta); \quad (5)$$

где I_A и I_B – значения тока элементов А и В соответственно, I_N – значение тока при $\beta=0$, α – угол между элементами А и В, β – угол отклонения Солнца от нормали ФЭД.

Ток I_N определяется по формуле:

$$I_N = K_{\text{инт}} \cdot E, \quad (6)$$

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

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

$$E = SR_{np} \cdot S. \quad (7)$$

Расчет SR_{np} представлен в первой главе. Используя полученную модель ФЭД, проведены расчеты оптимального размера чувствительных элементов с целью минимизации габаритов и упрощения электрической части блока контроля. Результаты расчетов разницы сигналов А и В от угла отклонения Солнца от нормали ФЭД при различных углах между элементами представлены на рисунке 4.

Чувствительность ФЭД $S_{\text{ФЭД}}$ определяется отношением разницы сигналов А и В к углу отклонения Солнца от нормали ФЭД.

$$S_{\text{ФЭД}} = (A - B) / \beta \quad (8)$$

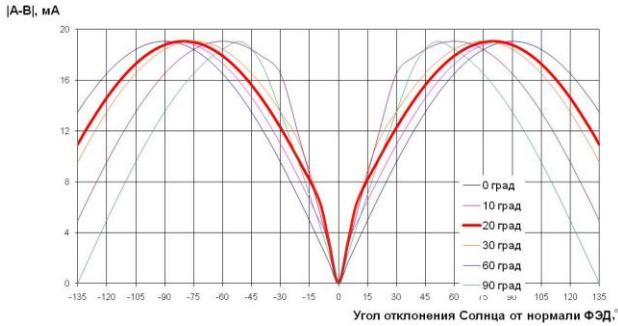


Рисунок 4. Зависимость разницы токов короткого замыкания элементов А и В от угла между этими элементами.

На рисунке 5 приведены графики зависимости чувствительности $S_{\text{ФЭД}}$ от угла между направлением солнечных лучей и нормалью ФЭД при различных значениях угла α между элементами А и В. Как видно из рисунка, максимальная чувствительность ФЭД при отклонении Солнца от нормали ФЭД до 10° достигнута при $\alpha=20^\circ$.

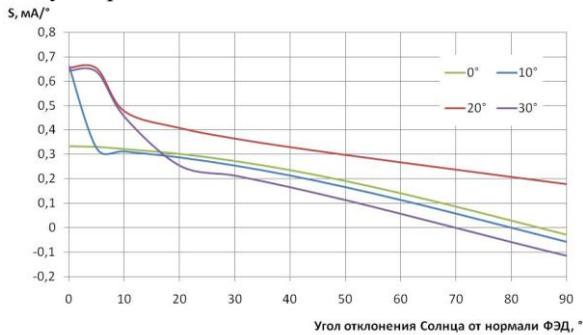


Рисунок 5. График чувствительности ФЭД при различных значениях угла α между элементами А и В.

Конструкция ФЭД и его установка на ФМ представлены на рисунке 6.

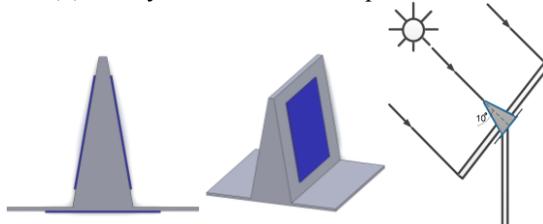


Рисунок 6. Конструкция ФЭД и его установка на ФМ.

Для подтверждения результатов оптимизации ФЭД полученных расчетным путем во второй главе были созданы макеты, аналогичные описанному ранее, отличающиеся значением угла α между элементами А и В и проведены их натурные испытания макетов на территории ИОА СО РАН. На рисунке 7 приведены результаты испытаний макетов при уровне солнечной радиации 1000 Вт/м^2 .

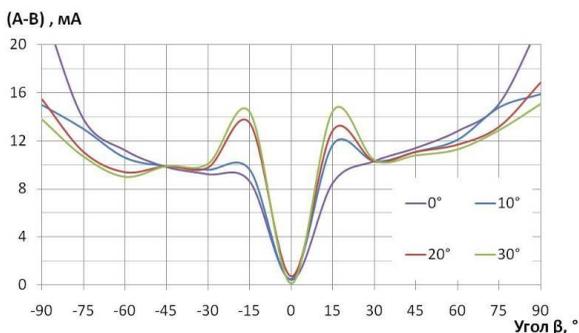


Рисунок 7. Зависимость разницы токов короткого замыкания элементов А и В от угла между этими элементами (уровень солнечной радиации 1000 Вт/м^2).

Из графика чувствительности макетов, представленного на рисунке 8, можно сделать вывод, что максимальная чувствительность ФЭД при отклонении нормали от Солнца до 10° достигается при угле α 20° .

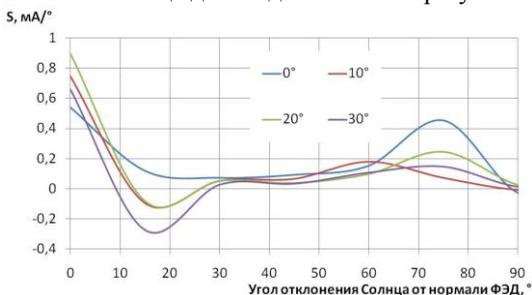


Рисунок 8. График чувствительности макетов ФЭД при различных значениях угла α между элементами А и В.

Сравнив полученные экспериментальным путем данные с расчетными, сделан вывод, что оптимальным значением угла α между элементами ФЭД А и В будет являться угол 20° . 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° достигнута при угле α 20° .

Четвертая глава посвящена разработке аппаратно-программного комплекса для контроля оптимальной ориентации ФМ и алгоритма его работы, позволяющего максимально увеличить полученную мощность.

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

$$P_{\text{получ}} = P_{\text{ФМ}} - P_{\text{ориент}}, \quad (9)$$

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.

Параметрами, влияющими на потребляемую мощность поворотного устройства и выработанную мощность ФМ, являются: интервал времени между включениями системы и шаг поворотного устройства.

Расчеты показали, 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. Потери мощности ФМ до 1,5% являются приемлемыми, поэтому максимальный допустимый угол отклонения Солнца от нормали ФМ при ориентировании ФМ не должен превышать 10° .

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. Результаты представлены на рисунке 9.

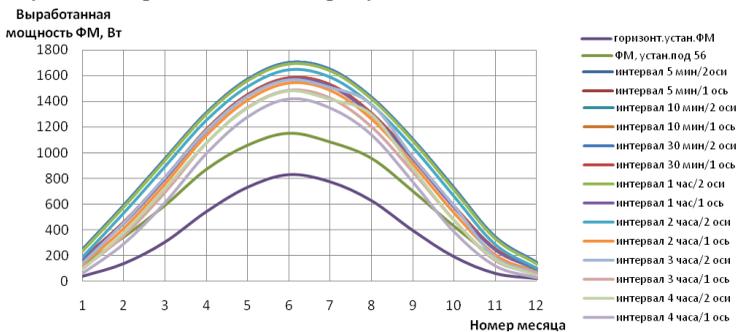


Рисунок 9. Выработанная мощность ФМ в течение года при различных интервалах между ориентированиями.

Проведены расчеты среднегодового выигрыша полученной мощности с применением систем контроля относительно мощности ФМ, установленного

под углом 56° к горизонту от интервала времени между ориентированиями (рисунок 10).

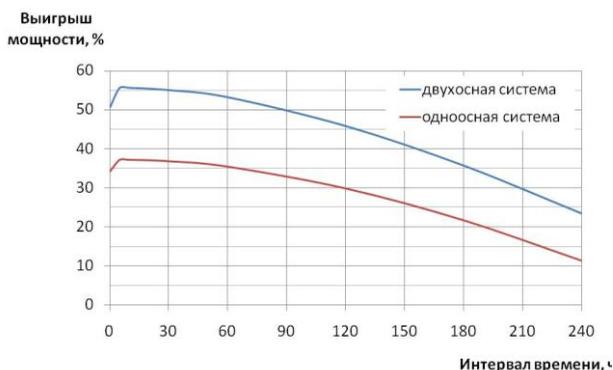


Рисунок 10. Выигрыш полученной мощности с применением систем контроля относительно мощности ФМ, установленного под углом 56° .

После анализа полученных данных, был сделан вывод, что использование интервала 30 минут между ориентированиями (включениями системы) позволит максимально увеличить полученную мощность, а, следовательно, и эффективность работы СЭС.

Определена эффективность использования солнечной радиации в течение года при различных интервалах между включениями. Полученные данные представлены на рисунке 11.

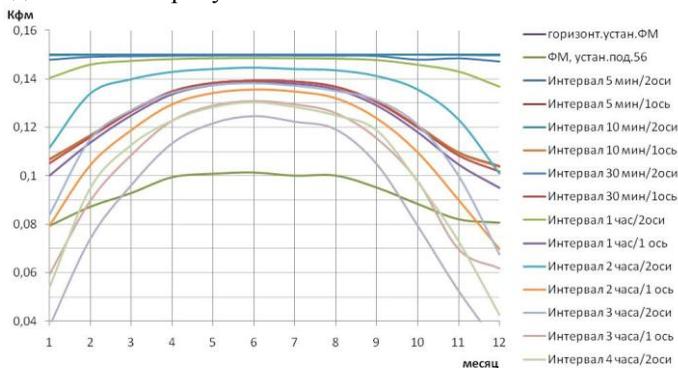


Рисунок 11. Эффективность использования солнечной энергии.

На графике рисунка 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.

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

Разработан алгоритм программы для микроконтроллера блока контроля. Данный 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.

Разработанная методика работы системы контроля 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.

Разработаны структурная и принципиальная схемы системы контроля, написан текст программы на языке Си для микроконтроллера, отвечающего за исполнение алгоритма работы системы контроля. Создан экспериментальный образец энергосистемы мощностью 50 Вт.

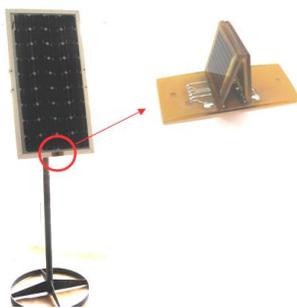


Рисунок 12. Экспериментальный макет системы контроля.

Совместно с ИОА СО РАН проведены многократные испытания макета в течение года, подтвердившие работоспособность разработанного комплекса и эффективность алгоритма его работы.

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° к горизонту (рисунок 13)

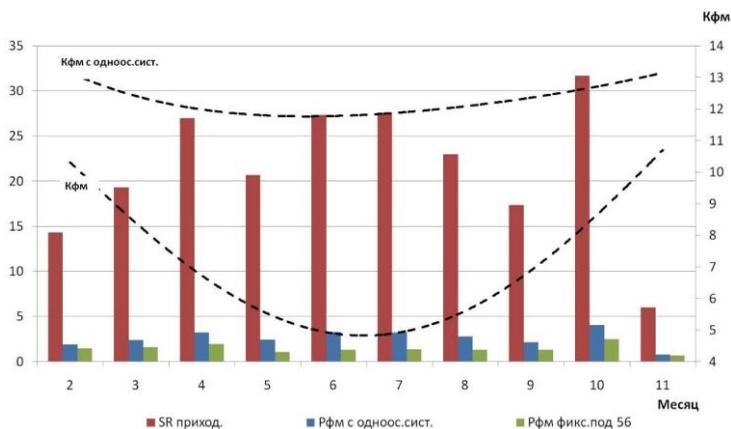


Рисунок 13. Результаты натуральных испытаний и эффективность работы ФМ установленного под углом 56° и с применением одноосной системы контроля (Томск, 2013 год).

Результаты испытаний подтверждают работоспособность разработанного аппаратно-программного комплекса для контроля оптимальной ориентации ФМ. Как видно из рисунка 13, 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.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 двухосных 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° , 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° . 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Китаева, М.В. Автономная система слежения для солнечной энергосистемы / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов // Ползуновский вестник. – 2011 – №. 3/1 – С. 196-199.

2. Китаева, М.В. Системы слежения за солнцем с применением ФЭД / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов // Ползуновский вестник. – 2012. – №. 2-1. – С. 213-217.

3. Китаева, М.В. Контроль эффективности работы фотоэлектрического устройства в природных условиях / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, Ф.В. Саврасов // Контроль. Диагностика. – 2012. – №. 13. – С. 78-83.

4. Китаева, М.В. Диагностика фотоэлектрических модулей в природных условиях / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Козлов // Контроль. Диагностика. – 2011. – Вып. специальный – С. 134-139.

Патенты:

5. Китаева, М.В. Патент № 2459156 РФ МПК F24J2/40 Солнечная энергоустановка / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Скороходов – № 2011123068/15(034175). заявл. 06.12.2010; опубл. 20.08.2012.

Монографии:

6. Китаева, М.В. Неразрушающий контроль в производстве и испытаниях кремниевых фотоэлектрических модулей / М.В. Китаева, А.В. Козлов, А.В. Охорзина – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 184 с.

Статьи и материалы конференций:

7. Kitaeva, M.V. Autonomous Power Systems Based on Renewable Energy Operating in the Climatic Conditions of Siberia and the Far East / M.V. Kitaeva, A.V. Yurchenko, A.V. Okhorzina // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2 – p. 107-111.

8. Kitaeva, M.V. Efficiency of PV systems with solar trackers for Russian regions / M.V. Kitaeva, A.V. Yurchenko, A.V. Okhorzina // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2 - P. 103-106.

9. Китаева, М.В. Системы слежения за Солнцем / Китаева М. В., Юрченко А. В., Скороходов А. В., Охорзина А. В. // Вестник науки Сибири. – 2012 – №. 3 (4). – С. 61-67.

10. Kitaeva, M.V. Efficiency of PV Systems with Solar Trackers for Russian Regions / M.V. Kitaeva, A.V. Yurchenko, A.V. Skorokhodov, A.V. Okhorzina // 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, September 5-9, 2011. – Hamburg: WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH and Co Planungs-KG, 2011. – P. 4360-4362.

11. Kitaeva, M.V. Autonomous Power Systems Based on Renewable Energy Operating in the Climatic Conditions of Siberia and the Far East / M.V. Kitaeva, A.V. Yurchenko, A.V. Kozlov // 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: proceedings, Hamburg, September 5-9, 2011. – Hamburg: WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH and Co Planungs-KG, 2011. – P. 4320-4322.

12. Kitaeva, M.V. Autonomous Power Systems Based on Renewable Energy Operating in the Climatic Conditions of Siberia and the Far East / M. V. Kitaeva, A.V. Okhorzina, A.V. Yurchenko, A.V. Kozlov // 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: proceedings, Frankfurt am Main, September 25-28, 2012. – Hamburg: WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH and Co Planungs-KG, 2012 – P. 4264-4268.

13. Китаева, М.В. Solar Tracker in Tomsk / M. V. Kitaeva, A.V. Okhorzina, A.V. Yurchenko // 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: proceedings, Paris, 30 September-4 October 2013. – Hamburg: WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH and Co Planungs-KG, 2013 – P. 3452-3454.

14. Китаева, М.В. Методика ориентирования фотоэлектрического модуля / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 16-18 Августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013 – С. 192-198.
15. Китаева, М.В. Диагностика фотоэлектрических модулей в натуральных условиях / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Козлов // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Методы и средства неразрушающего контроля", Томск, 29-31 Июля 2011. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 – С. 177-187
16. Китаева, М.В. Солнечные системы слежения на основе ФЭД / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина // Измерение, контроль, информатизация: материалы XIII Международной научно-практической конференции, Барнаул, 28-29 Марта 2012. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012 – Т. 2 – С. 166-170.
17. Китаева, М.В. Измерительный комплекс для натуральных испытаний фотоэлектрического модуля / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Козлов // Измерение, контроль, информатизация: материалы XV Международной научно-технической конференции, Барнаул, 23 Апреля 2014. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014 – С. 21-24.
18. Китаева, М.В. Диагностика фотоэлектрических модулей в натуральных условиях / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Козлов // Инновации в неразрушающем контроле SibTest: сборник научных трудов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле, Горно-Алтайск, 25-29 Июля 2011. - Томск: Изд-во ТПУ, 2011 - С. 273-277.
19. Kitaeva, M.V. The Analysis of Solar Power Complexes Functioning in Siberia and Far East / M.V. Kitaeva, A.V. Yurchenko, A.V. Kozlov, A.V. Volgin //25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: Proceedings - Spain, Valencia, 6-10 September 2010. - Spain, Valencia.
20. Kitaeva, M.V. Efficiency of PV Systems with Solar Trackers in the Russian Regions / . V. Kitaeva, A.V. Okhorzina, A.V. Yurchenko // 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) : proceedings, Франкфурт-на-Майне, September 25-28, 2012. - Гамбург: WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH and Co Planungs-KG, 2012 - p. 3591-3593.
21. Китаева, М.В. Системы мониторинга работы солнечных фотоэлектрических модулей / М.В. Китаева, А.В. Волгин, А.В. Юрченко, А.В. Козлов // Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых - Томск, ТПУ, 23-25 ноября 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - с. 186-188.
22. Китаева, М.В. Применение солнечной энергосистемы в Томске /М.В. Китаева, А.В. Охорзина // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9-13 Апреля 2012. - Томск: ТПУ, 2012 - Т. 1 - С. 207-208.
23. Китаева, М.В. Оптимизация двухосной системы слежения за солнцем/ М.В. Китаева, А.В.Охорзина, А.В. Скороходов, А.В. Юрченко // Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов III Научно-практической конференции/ под ред. А.В. Юрченко, Томск, 3-5 Мая 2012. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012 - С. 108-117.
24. Китаева, М.В. Автономная система слежения за Солнцем для солнечной энергосистемы / М.В. Китаева, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов, А.В. Юрченко // Измерение, контроль, информатизация: материалы XII Международной научно-технической конференции, Барнаул, 29-30 Марта 2011. - Барнаул: АлтГТУ, 2011 - С. 179-183.
25. Китаева, М.В. Модель работы фотоэлектрического модуля с системой слежения за Солнцем / М.В. Китаева, А.В. Охорзина, А.В. Скороходов, А.В. Юрченко // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы II Научно-практической конференции/ Под ред. А.В. Юрченко, Томск, 5-7 Мая 2011. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 - С. 26-27.
26. Китаева, М.В. Системы слежения за Солнцем для солнечной энергетики / М.В. Китаева, А.В. Волгин, В.И. Таханова // Современные техника и технологии: XV Международная

научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых / труды в 3-х томах - Томск, ТПУ, 4-8 мая 2009. - Томск: Изд. ТПУ, 2009. - с. 54-55.

27. Китаева, М.В. Система слежения за Солнцем для солнечной энергоустановки / М.В. Китаева, А.В.Охорзина, А.В. Юрченко //Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых - Томск, ТПУ, 23-25 ноября 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - с. 210-212.

28. Китаева, М.В. Оптимизация фотоэлектрического датчика для системы ориентации солнечных энергетических систем / М.В. Китаева, А.В. Охорзина, К.В. Суматохина // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 18-22 Апреля 2011. - Томск: ТПУ, 2011 - Т. 1 - С. 235-236.

29. Китаева, М.В. Оптимизация фотоэлектрического датчика для системы слежения за Солнцем / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, К.В. Суматохина // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы II Научно-практической конференции/ Под ред. А.В. Юрченко, Томск, 5-7 Мая 2011. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 - С. 29-30.

30. Китаева, М.В. Фотоэлектрический датчик для систем слежения за Солнцем / М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина, А.В. Волгин//Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета/ под ред. А.В. Юрченко - Томск, ТПУ, 25-26 февраля 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - с. 36-37.

31. Китаева, М.В. Система ориентации солнечных энергетических систем на основе фотоэлектрического датчика / М.В. Китаева, А.В. Охорзина //Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х томах - Томск, ТПУ, 12-16 апреля 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - с. 245-246.

32. Китаева, М.В. Станция мониторинга солнечной батареи / М.В. Китаева, А.В. Охорзина, К.В. Суматохина // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 18-22 Апреля 2011. - Томск: ТПУ, 2011 - Т. 1 - С. 251-252.

33. Китаева, М.В. Станция контроля параметров солнечной батареи / М.В. Китаева, А.В. Охорзина, К.В. Суматохина, А.В. Юрченко // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы II Научно-практической конференции/ Под ред. А.В. Юрченко, Томск, 5-7 Мая 2011. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 - С. 66-67.

34. Китаева, М.В. Таханова В.И., Китаева М.В., Волгин А.В. Модель солнечных батарей, работающих под воздействием климатических и аппаратных факторов / М.В. Китаева, В.И. Таханова В.И., А.В. Волгин //Современные техника и технологии: XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых / труды в 3-х томах - Томск, ТПУ, 4-8 мая 2009. - Томск: Изд. ТПУ, 2009. - с. 103-105.