

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ОСВЕЩЁННОСТИ ДЛЯ  
ОРИЕНТАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ  
(MAXIMUM ILLUMINATION CONTROL SYSTEM  
FOR PHOTOVOLTAIC PANELS ORIENTATION)**

М.В. Китаева, А.В. Охорзина, С.В. Таныгин, А.В. Юрченко\*  
M.V. Kitaeva, A.V. Okhorzina, S.V. Tanygin, A.V. Yurchenko

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
\* ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»  
E-mail: kitaevam@tpu.ru

В статье описана система слежения за Солнцем для фотоэлектрических модулей (ФМ) и энергетических систем на их основе. Представлены результаты расчетов эффективности применения систем слежения для солнечных энергетических установок и результаты натурных испытаний работы фотоэлектрических модулей с системой слежения в Томске.

(The article describes the solar tracker for photovoltaic modules and energy systems based on such devices. The authors introduce the results of calculations of the solar tracker application effectiveness for solar energy systems and the results of the field testing in Tomsk.)

**Ключевые слова:**

Фотоэлектрический модуль, система слежения за солнцем, одноосевая система, двухосевая система.

(Photovoltaic module, solar tracking, single-axis tracker, two-axis tracker.)

Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности наиболее перспективна.

Актуально применение солнечных энергетических установок (СЭУ) в регионах без стационарной сети электропитания. Замена дизельных генераторов на СЭУ в таких регионах не только помогает облегчить энергетические и экологические проблемы, но и является экономически выгодной.

Основным фактором, ограничивающим широкое применение солнечной энергетики на практике, является стоимость энергетических систем на его основе [1].

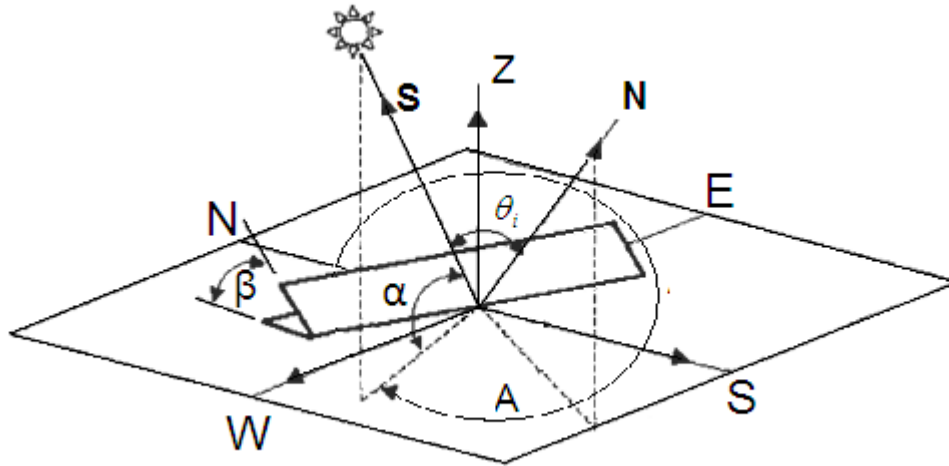
**Расчет приходящей мощности**

На основе двенадцатилетнего анализа работы ФМ в Сибири и на Дальнем Востоке проведены расчеты приходящей солнечной радиации, и построена модель работы ФМ с применением одно- и двухосевых систем слежения.

Величиной, оказывающей влияние на интенсивность облучения ФМ, является *угол падения* солнечных лучей на её поверхность. Применение *систем слежения* позволит изменять угол в зависимости от положения Солнца, что увеличит количество приходящей мощности на поверхность ФМ.

Для удобства расчета будем считать, что Солнце вращается вокруг неподвижной Земли, Не смотря на то, что на самом деле Земля вращается вокруг Солнца.

Проведем расчет эффективности применения систем слежения. Для этого определим количество солнечной радиации, поступающей в течение дня [2].



**Рис.1.** Движение солнца по небосводу

При прохождении атмосферы потоком солнечного излучения он теряет свою интенсивность из-за поглощения озоном, углекислым газом и водяным паром, а также рассеянием твердыми частицами и Релея. Рассеяние и поглощение увеличиваются с увеличением пути потока солнечных лучей, поэтому вводится поправочный коэффициент для аппроксимации [4]:

$$K_{AT} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - солнечная высота.

Определим основные солнечные углы и их соотношения для различных способов слежения за солнцем.

—  $\omega$  – часовой угол, измеряется в градусах. Часовой угол увеличивается на 15 градусов каждый час и равен нулю в солнечный полдень.

$$\omega = 15(t_s - 12),$$

где  $t_s$  – солнечное время в часах.

—  $\delta$  – склонение, равняется угловому расстоянию на небесной сфере от плоскости небесного экватора до светила и выражается в градусах дуги. Склонение положительно к северу от небесного экватора и отрицательно к югу.

$$\sin \delta = 0.39795 \cos[0.98563(N - 173)],$$

где  $N$  – номер дня.

—  $\alpha$  – солнечная высота, определяется как угол между падающими лучами от солнца и горизонтальной плоскостью.

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi),$$

—  $A$  - солнечный азимут. Это угол, измеренный по часовой стрелке в горизонтальной плоскости с севера. Измеряется в градусах.

$$A' = \sin^{-1}\left(\frac{-\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}\right)$$

$$\text{если } \dots \cos \omega \geq \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi}\right), \text{ то } A = 180^\circ - A'$$

$$\text{если } \dots \cos \omega < \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi}\right), \text{ то } A = 360^\circ + A'$$

Для определения количества излучения приходящегося на произвольно ориентированную площадку введем понятия угла отслеживания  $\theta_i$ , выражающего угол между направлением солнечных лучей и нормалью к площадке.

Косинус угла между падающими солнечными лучами и нормалью есть скалярное произведение этих двух единичных векторов:

$$\cos \theta_i = \mathbf{S} \cdot \mathbf{N}$$

Выражение для косинуса угла падения при фиксированной панели:

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma - A) \quad (2)$$

бывает полезно записать уравнение (2) с точки зрения широты, склонение и часовой угол

$$\begin{aligned} \cos \theta_i = & \cos \beta (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) - \cos \delta \sin \omega \sin \beta \sin \gamma + \\ & + \sin \beta \cos \gamma (\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \cos \omega \sin \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

Для горизонтального положения, угол наклона  $\beta$  равен нулю, а уравнение (3) становится

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \quad (4)$$

и для наклонной плоскости с южной стороны, у нас есть

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta \cos A \quad (5)$$

Некоторые виды ФМ предназначены для работы с отслеживанием вращения вокруг только одной оси. Падающие лучи ( $\mathbf{S}$ ) и нормаль ( $\mathbf{N}$ ) лежат в одной плоскости. В общем случае слежение по единой горизонтальной оси:

$$\cos \theta_i = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 (A - \gamma)}$$

Частный случай этого уравнения часто встречается в практике, когда отслеживание оси ориентированы в направлении восток-запад, именно этот случай представляет интерес для расчетов.

$$\cos \theta_i = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 A} \quad (6)$$

С двумя осями слежения, ФМ всегда будет нормальна к солнцу. Поэтому эффект косинуса не вступает в игру:

$$\cos \theta_i = 1 \quad (7)$$

Приходящая мощность может быть рассчитана по формуле [3]

$$I_h = Am \cdot I_0 \cdot \cos \theta_i, \quad (8)$$

где  $I_0$  – солнечная константа, равная 1367 Вт/м<sup>2</sup>.

Подставляя поочередно формулы (2), (3), (6), (7) в уравнение (8), мы получим значения приходящей мощности для ФМ расположенного горизонтально и под углом к горизонту, с использованием систем слежения.

### Результаты расчетов

На основе данного алгоритма расчета построим графики, отображающие эффективность применения систем слежения для Томска и других городов России [2]. Расчеты показали, что применение одноосевой системы слежения позволит увеличить эффективность отбора мощности ФМ на 30 %, а применение двухосевой - на 40 % для Западной Сибири. Хотя введение второй оси слежения и увеличивает вырабатываемую мощность ФМ на 7...10 %, это значительно усложняет механику конструкции и ощутимо увеличивает стоимость системы. Угол перемещения Солнца относительно горизонта в течение года изменяется незначительно, в отличие от эклиптики, меняющейся в течение дня, поэтому рентабельнее использовать одноосную систему и раз в 2–3 месяца вручную устанавливать угол наклона относительно горизонта.

Для оценки эффективности применения систем слежения построена модель работы энергосистемы с использованием системы слежения в Томске в течение года. Результаты приведены на рис. 2. Также была определена эффективность применения систем слежения в различных городах, находящихся на различных широтах (рис. 3).

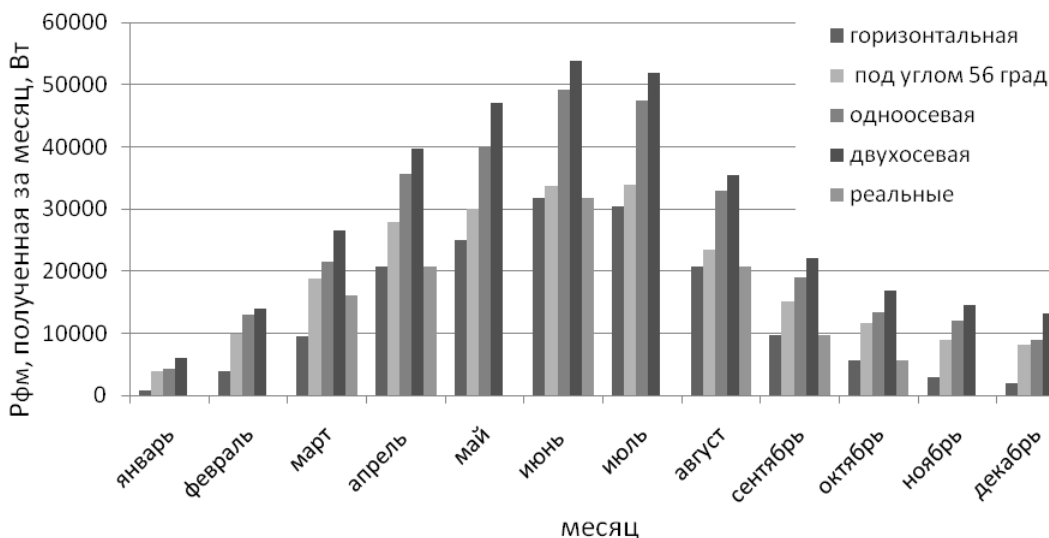


Рис. 2. Эффективность применения систем слежения в Томске

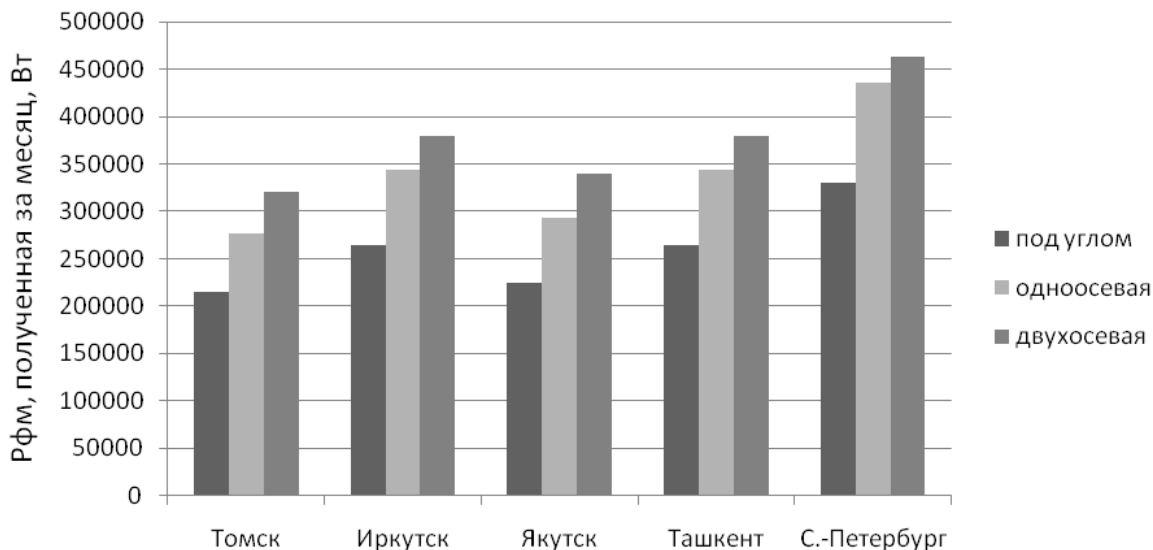


Рис. 3. Эффективность применения систем слежения в разных городах

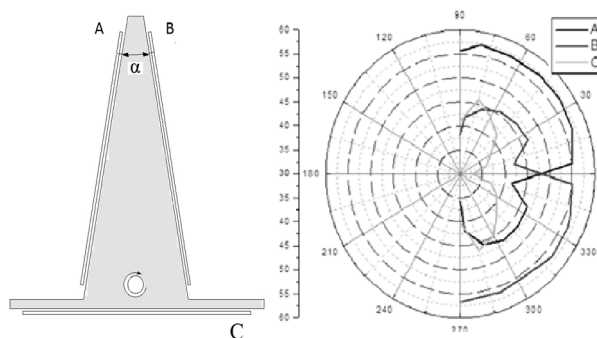
**Фотоэлектрический датчик**

Был создан фотоэлектрический датчик (ФЭД) для систем слежения за солнцем (рис. 4), позволяющий исключить влияние фонового излучения, решить проблему запуска системы утром, отличающийся низкой ценой и простотой конструкции. Проведены математические расчеты конструкции датчика, которые были подтверждены его натурными испытаниями в г. Томске. Результаты позволили оптимизировать датчик и увеличить его чувствительность.

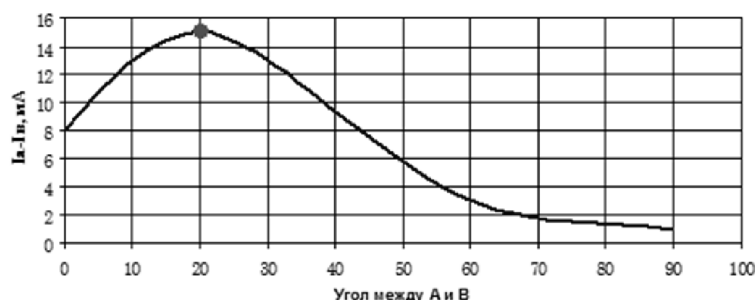
Элементы *A* и *B* установлены на разные стороны перегородки, что позволяет скомпенсировать влияние разности температур. Также перегородка служит токопроводящим элементом. Элемент *C* необходим для измерения рассеянного излучения, исключения его влияния на два других датчика и запуска системы в утренние часы. В качестве регулирующего сигнала используется ток короткого замыкания  $I_{кз}$  фотоэлектрических преобразователей, т. к. зависит от интенсивности солнечного излучения и не зависит от температуры.

Для оптимизации конструкции датчика проведены математические расчеты и его натурные испытания при использовании разных углов между элементами *A* и *B*, которые показали, что максимальная чувствительность датчика достигнута при угле  $20^\circ$ , что видно на приведенной диаграмме направленности и графике зависимости чувствительности датчика от угла на-

клона между элементами (рис. 5). Как мы видим, при выбранном угле разница между сигналами *A* и *B* максимальна [3].



**Рис. 4.** Фотоэлектрический датчик и его диаграмма направленности



**Рис. 5.** Зависимость отклика ФЭД в зависимости от угла между элементами *A* и *B*

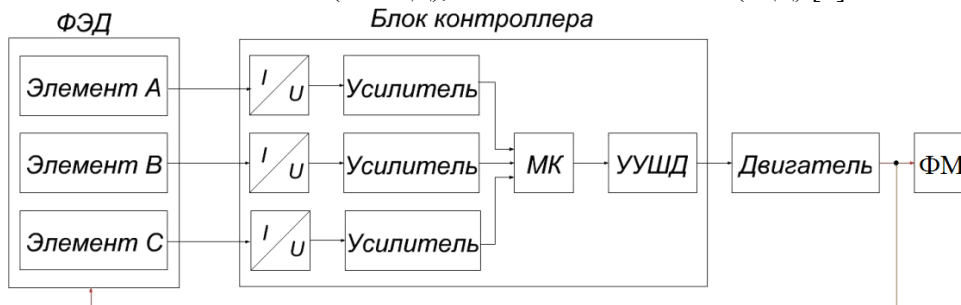
#### Система слежения на основе ФЭД

На основе ФЭД разработана система слежения за Солнцем. Создан пилотный образец энергосистемы мощностью 50 Вт и проведены ее натурные испытания в течение года.

Система слежения за Солнцем должна иметь в своём составе:

- первичный преобразователь светового потока в ток (ФЭД);
- устройства обработки сигналов с датчика и выработки управляющих сигналов для двигателя (блок контроллера);
- двигатель, обеспечивающий поворот ФМ.

Схема системы слежения за Солнцем (рис. 6) состоит из ФЭД, преобразователя ток–напряжение (*I/U*), операционного усилителя (ОУ), микроконтроллера (МК) Atmega8L, устройства управления шаговым двигателем (УУШД), и шагового двигателя (ШД) [5].



**Рис. 6.** Структурная схема системы слежения

На основе структурной схемы разработана принципиальная схема блока контроллера. По принципиальной схеме разработана печатная плата блока контроллера с возможностью питания от аккумулятора ФМ, сконструирован корпус для блока контроллера. Создан алгоритм работы программы МК, позволяющий ориентировать систему на Солнце.

Работоспособность системы слежения подтверждена практически: создан экспериментальный макет систем для ФМ мощностью 5 Вт. Были проведены натурные испытания одноосевой системы и двухосевой (рис. 7).



Рис. 7. Экспериментальный макет системы слежения

Результаты работы сравнены с результатами работы ФМ, установленного стационарно. Графики приведены на рисунках 9 и 10.

Применение одноосной системы увеличили сбор мощности на 23%, а двухосной на 32%, относительно установленной под углом стационарно.

#### Расчет шага системы

Расчет шага системы необходим для экономичной работы системы слежения. Исходя из анализа диаграмм направленности ФМ [5], видно, что в пределах отклонения  $15^\circ$  от нормали не происходит заметного снижения вырабатываемой мощности. Таким образом, дискретная работа системы обеспечит снижение энергопотребления движущимися частями системы слежения.

Зафиксируем ФМ в одном положении на длительное время и рассчитаем изменение вырабатываемой мощности со временем.

$$P_{\text{ФМ}} = \text{КПД}_{\text{ФМ}} \cdot I_0 \cdot K_{\text{АТ}} \cdot \cos \theta_i \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

Формула отображает количество выработанной мощности со времени, где  $\cos(\alpha_2 - \alpha_1)$  путь пройденный солнцем за промежуток времени.

Из рисунка 8 видно, что, не изменяя направление ориентирования, система функционирует без значительного снижения мощности: для двухосевой системы в течение 1 часа, для одноосевой - полчаса.

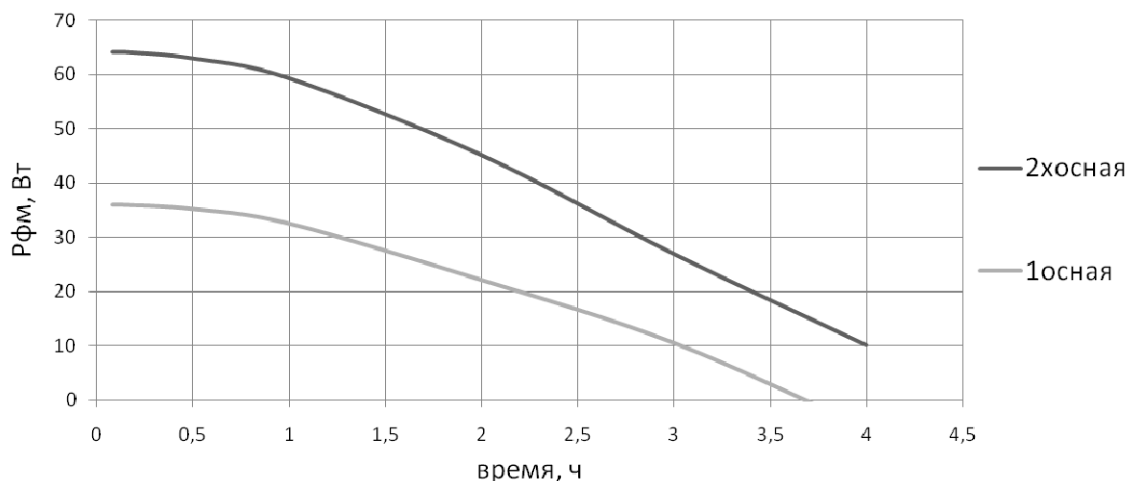


Рис. 8. Динамика вырабатываемой мощности ФМ, когда система слежения не ориентируется на солнце

### Выводы

Результаты работы сравнены результатами работы ФМ, установленного стационарно. Графики приведены на рисунках 9 и 10.

Применение одноосной системы увеличили сбор мощности на 23%, а двухосной на 32%, относительно установленной под углом стационарно.

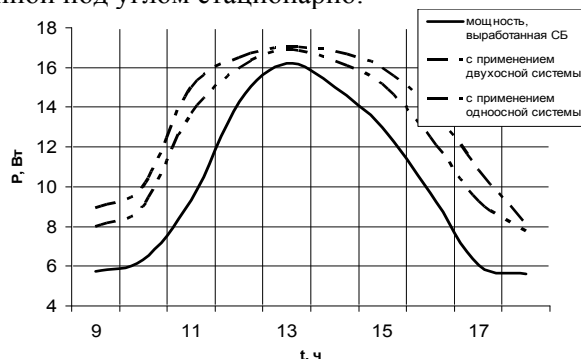


Рис. 9. Результаты работы систем слежения

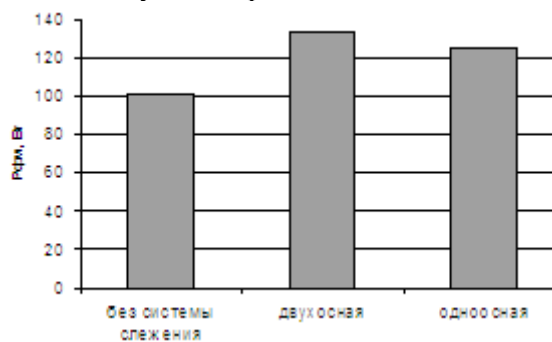


Рис. 10. Суммарная мощность за день, собранная без системы слежения, с одноосной и двухосной

1. Построена модель работы энергосистемы с использованием системы слежения в Томске в течение года. Рассчитана эффективность применения систем слежения.

2. Сконструирован ФЭД, создан макет и проведена его оптимизация, разработаны структурная и принципиальная схемы блока контроллера для системы слежения, его печатная плата, разработан алгоритм программы для МК.

3. Создан экспериментальный образец разработанной системы, доказавший работоспособность разработанной системы, проведены натурные испытания.

4. Произведена оптимизация систем слежения.

*Работа при поддержке грантом президента РФ МД-5352.2013.8.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко А.В., Саврасов Ф.В., Юрченко В.И. Реальная стоимость энергии - от ресурсов до потребителя // Известия Томского политехнического университета, 2009 - Т. 314. - № 3. - С. 43-46.
2. W. Stine, M. Geyer. Power From The Sun // PowerFromTheSun.net. – URL: <http://www.powerfromthesun.net/index.html> (date of access 25.04.2012).
3. Кидрук М.И. Расчет потока солнечной радиации // Progress XXI – Режим доступа: <http://progress21.com.ua/ru/articles/solarradiation> (дата обращения 23.04.2012).
4. Охорзина А.В., Китаева М.В., Волгин А.В., Юрченко А.В. Фотоэлектрический датчик для систем слежения за солнцем // Информационно-измерительная техника и технологии: Сборник материалов I Научно-практической конференции посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

V Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии», 19–23 мая 2014 г.

ского университета/ под ред. А.В. Юрченко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - С. 37-38

5. Охорзина А. В, Китаева М. В., Суматохина К. В. Оптимизация фотоэлектрического датчика для системы ориентации солнечных энергетических систем // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х частях. - Томск: Издательство ТПУ, 2011. - Т. 1 - С. 235-236

**Сведения об авторах:**

**Китаева М.В.:** г. Томск, аспирант Института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: [kitaevam@tpu.ru](mailto:kitaevam@tpu.ru). Область научных интересов: солнечная энергетика, системы слежения за Солнцем.

**Охорзина А.В.:** г. Томск, магистрант Института неразрушающего контроля ТПУ, e-mail: [ameba\\_89@mail.ru](mailto:ameba_89@mail.ru), область научных интересов: системы слежения за Солнцем.

**Таныгин С.В.:** г. Томск, магистрант Института неразрушающего контроля ТПУ, e-mail: [svt7@tpu.ru](mailto:svt7@tpu.ru), область научных интересов: солнечная энергетика.

**Юрченко А.В.:** г. Томск, заведующий лабораторией «физики солнечных элементов», профессор кафедры ИИТ Института неразрушающего контроля ТПУ, e-mail: [niipp@inbox.ru](mailto:niipp@inbox.ru), область научных интересов: физика солнечных элементов, возобновляемая энергетика.