

# Устройство слежения за Солнцем в фотоэлектрических энергетических установках

О. Пчельникова-Гротова, к. т. н.<sup>1</sup>, А. Иванов<sup>2</sup>, В. Латыпов<sup>3</sup>

УДК 620.4:621.311.25:62-52 | ВАК 05.11.07

В первой статье авторского коллектива по данной тематике [1] был рассмотрен порядок расчета автономных фотоэлектрических энергетических установок, не привязанный к количеству солнечной энергии, падающей на солнечные панели; для справки были приведены источники, содержащие данные по количеству солнечного излучения, падающего на горизонтальную приемную площадку определенного размера в разных районах мира. Однако понятно, что фиксированное горизонтальное расположение панелей существенно ограничивает потенциал солнечной энергетической установки (СЭУ); обеспечив ориентацию панелей в направлении на Солнце, можно получить до 50% повышения эффективности ее работы. В данной статье приведено описание системы слежения за Солнцем для СЭУ, разрабатываемой коллективом специалистов Московского авиационного университета.

Одним из главных критериев, по которому оцениваются эффективность и уровень производительности СЭУ, является КПД солнечных панелей. Повысить этот показатель можно несколькими способами. Можно применять многослойные панели, состоящие из набора материалов, расположенных так, чтобы улавливались кванты всех спектров солнечного излучения<sup>\*</sup>. Но такие материалы слишком дороги для стационарных станций гражданского и общетехнического назначения. Использование различного вида концентраторов в виде линз, фоконов или фоклинов сопровождается повышением температуры панелей, что снижает их КПД, и для возвращения его к номинальным значениям требуется введение устройств принудительного охлаждения. Поэтому наиболее эффективным является применение систем непрерывного слежения за Солнцем, обеспечивающих существенное увеличение вырабатываемой мощности (на 20–60%, в зависимости от того, в какой точке мира установлена солнечная электростанция) и более равномерное генерирование электроэнергии в течение дня (рис. 1) [2, 3].

В течение дня выработка энергии солнечными панелями падает на 10% и более из-за их нагрева [1]. Поэтому очень важно увеличить выработку панелей в утренние часы, что наилучшим образом выполняется при помощи следящей системы. Дополнительным преимуществом, существенным для нашего климата, является отсутствие необходимости очищать панели от снега в зимний период, так как значительную часть времени они находятся в положении, близком к вертикальному. Использование следящих устройств позволяет при равной мощности

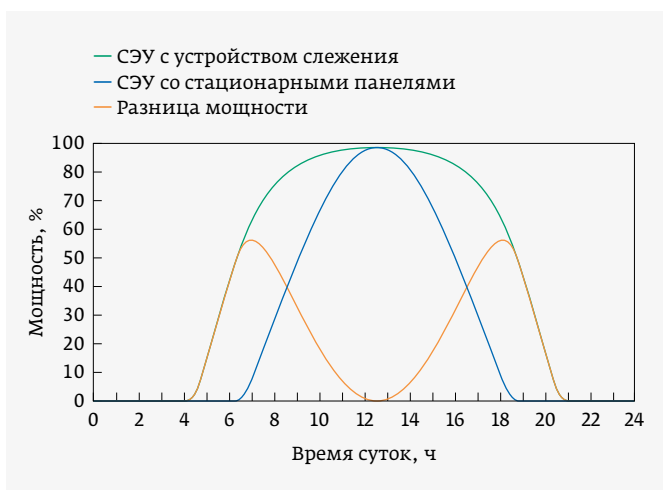


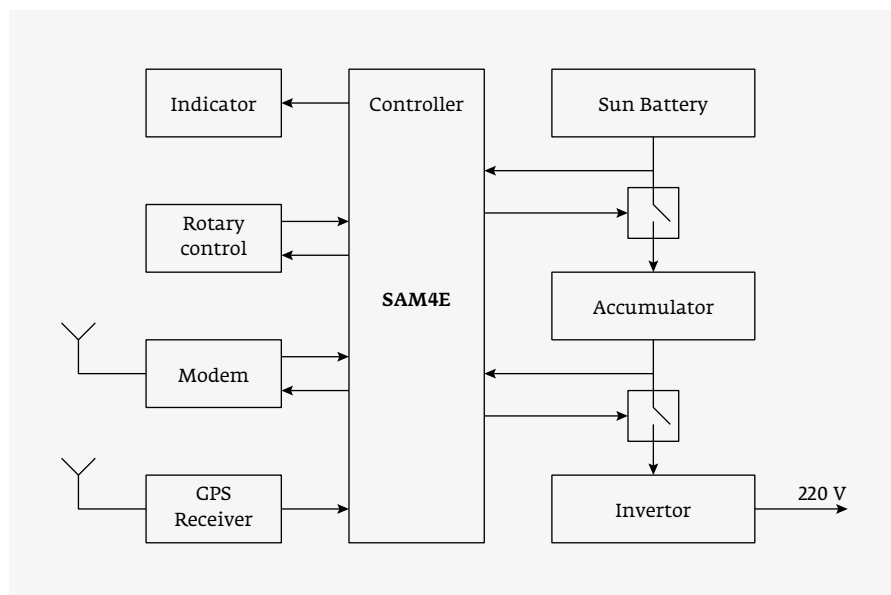
Рис. 1. Суточный график мощности СЭУ в летний день (данные для трекера ТСВ-3500 производства компании ГК РосПромМаш [4])

<sup>1</sup> МАИ (НИУ), доцент, grotova@mail.ru.

<sup>2</sup> МАИ (НИУ), магистр, aleksey.ivanov.1995@mail.ru.

<sup>3</sup> МАИ (НИУ), магистр, tapor27.1994@mail.ru.

<sup>\*</sup> Например, компанией Sharp разработаны трехслойные фотоэлементы, состоящие из слоев фосфида индия-галлия, арсенида галлия и арсенида индия-галлия, разделенных диэлектриком, служащим для получения туннельного эффекта. КПД таких элементов составляет 44%.



**Рис. 2.** Схема взаимодействия контроллера с приборами и агрегатами солнечной станции

уменьшить габаритные размеры СЭУ и сэкономить площадь земельного участка.

Коллективом авторов Московского авиационного университета разрабатывается система слежения за Солнцем, состоящая из поворотного механизма и блока управления. Поворотный механизм состоит из гидроцилиндров, гидронасоса, системы циркуляции жидкости, преобразователя линейного движения штоков гидроцилиндров в угловое перемещение панелей и двух электромагнитов, фиксирующих положение осей вращения панелей.

Включение насоса подачи гидравлической жидкости и управление направлением движения гидравлического механизма выполняется по командам, поступающим с блока управления. Логика выполнения основных функций блока управления реализована в контроллере, который получает информацию от ряда датчиков и каналов связи и выдает команды на исполнительные устройства. Помимо аппаратуры и программ, необходимых для выполнения основной задачи, контроллер содержит также схемы защиты аккумуляторной батареи от превышения допустимого уровня зарядки и отключения инвертора (нагрузки) при неприемлемом снижении напряжения на его входе. В составе блока управления имеются средства для отображения информации о текущей ориентации панелей и модем для передачи диагностических данных и приема команд в виде SMS на телефон пользователя или по электронной почте (SMTP) – в зависимости от настройки модема.

Связи контроллера с другими устройствами блока управления и агрегатами солнечной энергетической установки схематически показаны на рис. 2. Можно видеть, что

контроллер (Controller) получает сигналы точного времени и географических координат объекта с приемника (GPS receiver), формирует команды для силовых цепей управления поворотным механизмом и получает сигналы обратной связи по положению панелей (Rotary control), передает и принимает информацию от модема (Modem), управляет отключением/подключением аккумуляторной батареи (Accumulator) и инвертора (Inverter). Информация о режиме работы устройства выдается на светодиодную панель (Indicator).

Разработанный контроллер позволяет управлять поворотом фотоэлектрических панелей в двух режимах. В облачную погоду панели поворачиваются через равные промежутки времени на углы, рассчитанные по программе, введенной в память контроллера.

В ясную погоду панели непрерывно разворачиваются в направлении Солнца в соответствии с информацией, полученной от фотодатчиков; точность их ориентации в этом случае выше, чем в программном режиме.

Для постоянной ориентации панелей перпендикулярно к потоку солнечных лучей необходимо изменять их положение в двух плоскостях, учитывая вращение Земли вокруг Солнца и вокруг своей оси [5]. В горизонтальной системе координат (рис. 3) в зависимости от широты местности ( $\varphi$ ) определяются высота солнцестояния  $h$  (угол между направлением на Солнце и горизонтальной плоскостью) и азимут  $A$  (угол между плоскостью меридиана и вертикальной плоскостью). В экваториальной системе координат (рис. 4) в соответствии со временем суток рассчитываются склонение светила  $\delta$  (угол между направлением на Солнце и экваториальной плоскостью) и часовой угол  $\tau$  (угловое смещение Солнца от полудня).

Угловые параметры расположения Солнца рассчитываются по формулам [6, 7]

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 81) \right],$$

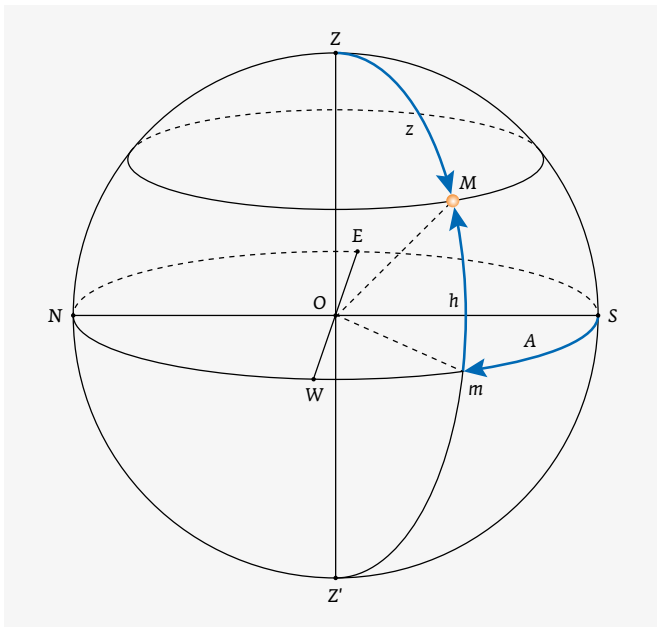
$$\tau = 15^\circ \cdot (T_c - 12),$$

$$h = \arccos(\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \tau \cdot \cos \varphi),$$

$$A = \arcsin \left( \cos \delta \cdot \frac{\sin \tau}{\cos h} \right),$$

где  $n$  – порядковый номер дня года,

$T_c$  – местное солнечное время.

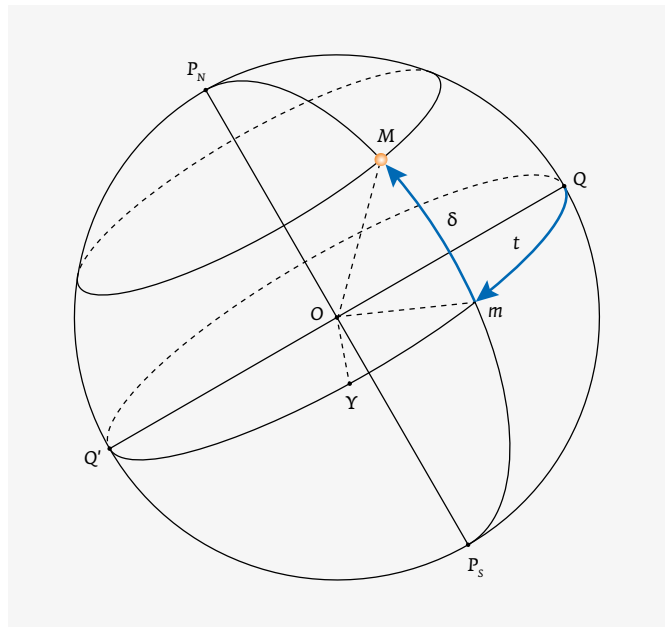


**Рис. 3.** Горизонтальная система координат:  $h$  – высота светила  $M$  над горизонтом;  $z$  – зенитное расстояние;  $A$  – азимут

Приведенные формулы лежат в основе заложенной в память контроллера программы, которая через определенные интервалы времени по полученным приемником GPS географической широте местности, местному времени и дате рассчитывает высоту  $h$  и азимут  $A$  Солнца. После этого исполнительные устройства переориентируют фотоэлектрические панели в расчетное положение, в котором они фиксируются до следующего цикла управления.

В таком режиме система слежения работает в облачную погоду. Для организации обратной связи по углу поворота в конструкцию поворотного устройства введены пружины, закрепленные параллельно со штоками гидроцилиндров. Сила растяжения этих пружин, пропорциональная углу поворота панелей, измеряется тензометрическими датчиками силы EMS20 фирмы EMSYST [8]. По сравнению с датчиками других типов, которыми можно измерять угол поворота, EMS20 имеет невысокую цену и сравнительно просто устанавливается в конструкцию поворотного механизма.

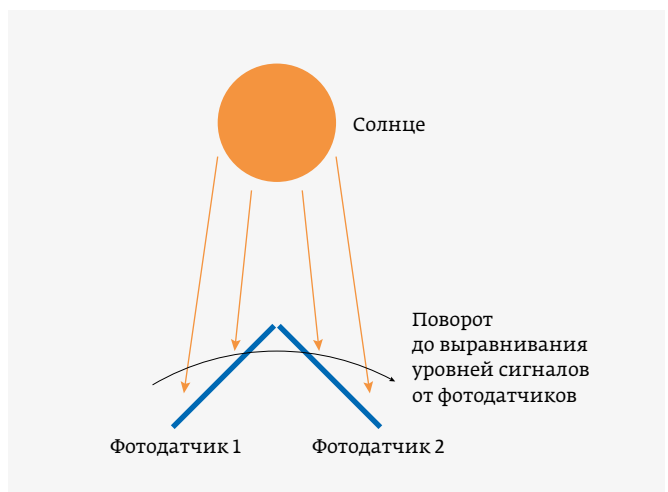
Во втором режиме система слежения начинает работать при поступлении через модем команды «Солнечный день». В этом случае для точного наведения панелей на Солнце используется механически связанная с ними сборка из двух расположенных под углом друг к другу фотодатчиков (рис. 5). Роль последних выполняют фоторезисторы на основе сульфида кадмия – ФСК-Г7, изменяющие величину сопротивления при облучении светом. Система регулирования



**Рис. 4.** Экваториальная система координат:  $\delta$  – склонение светила  $M$ ;  $\tau$  – часовой угол

поворачивает панели до выравнивания уровней сигналов от этих датчиков.

При отсутствии сигнала рассогласования с фотодатчиков и остановке механизма на определенный период времени программа принимает решение о наличии облачности и начинает работать по алгоритму первого режима: рассчитывается текущее значение требуемого положения панелей в соответствии со временем суток, и механизм поворачивает панели в правильном направлении.



**Рис. 5.** Принцип управления положением панелей по разности сигналов фотодатчиков

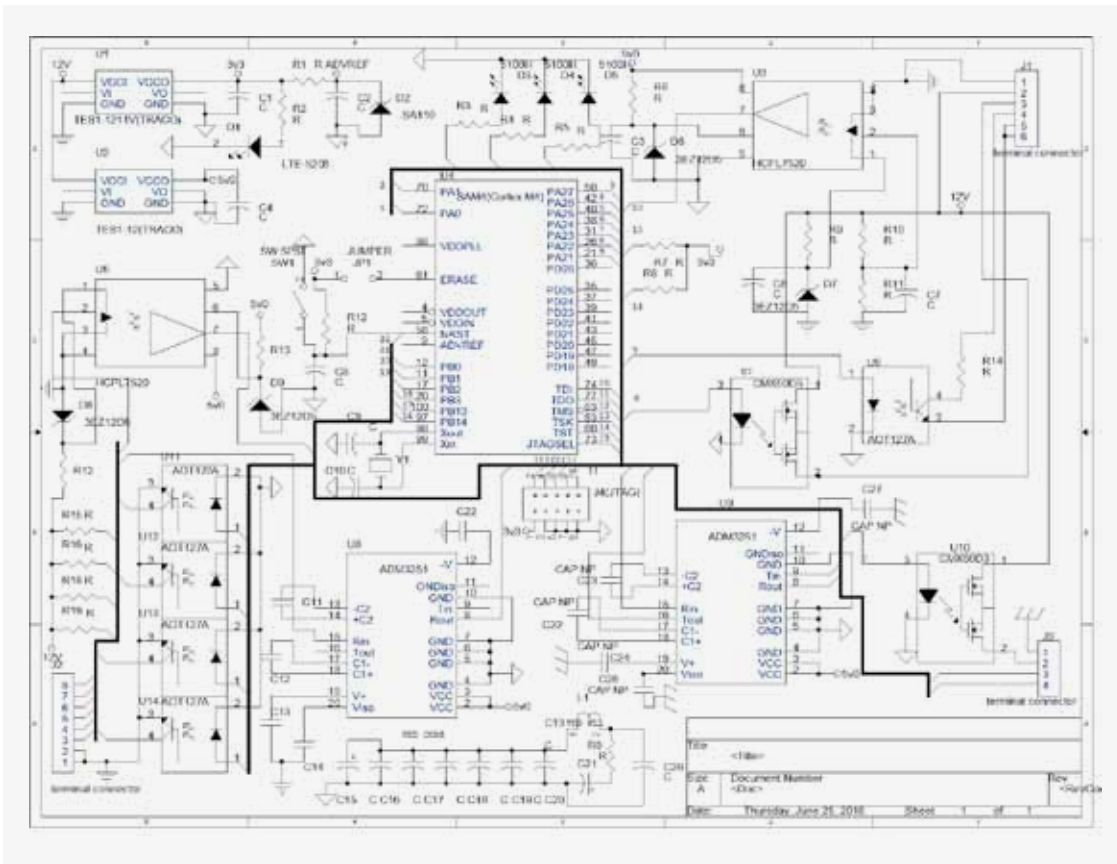


Рис. 6. Электрическая схема контроллера блока управления

Основным управляющим элементом контроллера является быстродействующий 16-разрядный

микроконтроллер SAM4E (Cortex M4 Atmel) [9]. Электрическая схема контроллера приведена на рис. 6.

Таблица 1. Назначение микросхем контроллера

Микросхема	Назначение
U1, U2	Обеспечение гальванически развязанного питания платы
U3	Гальваническая развязка аналогового сигнала «Уровень заряда аккумулятора» и входа АЦП микроконтроллера
U4	Микроконтроллер SAM4E
U5	Отключение солнечной батареи от аккумулятора
U6	Отключение инвертора от аккумулятора
U7	Гальваническая развязка аналогового сигнала с фотодатчиков и входа АЦП микроконтроллера
U8	Приведение уровня сигнала с приемника GPS к уровню сигналов на входе микроконтроллера
U9	Преобразование уровней RS-232 и управление модемом
U10	Подключение питания к модему перед передачей информации
U11, U12	Управление электромагнитами, фиксирующими оси поворота батареи
U13, U14	Включение насоса подачи гидравлической жидкости и управление направлением движения гидравлического механизма

Таблица 2. Назначение разъемов контроллера

Разъем	Подсоединяемые устройства
J1	Солнечная батарея, аккумулятор и инвертор
J2	Приемник GPS и система наведения солнечной панели на Солнце
J3	Модем
J4	Отладчик JTAG

Выводы микроконтроллера SAM4E (микросхема U4) сконфигурированы следующим образом: PB0, PB1 – как входы АЦП, выводы PA23-PA27, PD18-PD27 – как выходы, предназначенные для управления механизмом поворота панелей, вывод PB14 – как выход отладочного ЦАП, выводы PA9, PA10, PA21, PA22 – как два порта RS-232. Функции микросхем контроллера приведены в табл. 1, назначение разъемов – в табл. 2.

Поворот панелей является сложным динамическим процессом, и ему будет посвящена отдельная статья. Здесь же мы приводим фрагмент написанной на языке C программы управления агрегатами СЭУ, предназначенный для управления подключением нагрузки и отключением солнечных панелей от аккумуляторных батарей.

Для отладки программного обеспечения был изготовлен макет контроллера. Приведенная программа проверена и отлажена; алгоритмы и программы отладки будут рассмотрены в следующих публикациях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Пчельникова-Гротова О.** Проектирование и расчет автономных фотоэлектрических энергетических установок // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 1. С. 120–127.
2. **Акулинин А., Смыков В.** Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации // Проблемы региональной энергетики. 2008. № 1.
3. **Пчельникова-Гротова О.Н., Мин М.Т.** Оценка ресурсов солнечной энергии для снабжения наземных систем обеспечения полетов в республике Мьянма // Труды МАИ. 2016. № 91. <http://trudymai.ru/published.php?ID=75619>.
4. Интернет-ресурс <http://mirvetra.com.ua/suntracker.html>
5. **Жаров В. Е.** Сферическая астрономия. – Фрязино: Век 2, 2006.
6. **Фалеев Д. С.** Возобновляемые и ресурсосберегающие источники энергии. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2005.
7. Solar Position Algorithm (SPA) Электронный ресурс <https://midcdmz.nrel.gov/spa/>.
8. **Чукан Й., Костиков К.** Тензометрические датчики силы // Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 16–18.
9. ADSP-21990: Implementation of PI Controllers. Analog Devices Inc., December, 2001. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/PI\\_ctrl.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/PI_ctrl.pdf)

```

g_afec_sample_data.value = *cntr_data;//real level from channel A ADC
switch(batt_level)
{
    case 1 : //if the battery is not charged
        if(g_afec_sample_data.value < 1300)
        {
            ioport_set_pin_level(LED1_GPIO, 0);
            ioport_set_pin_level(LED2_GPIO, 1);
            batt_level = 1;
        }
        else
        {
            ioport_set_pin_level(LED1_GPIO,1);//the battery is charged
            ioport_set_pin_level(LED2_GPIO,1);
            batt_level = 2;
        }
        break;
    case 2://battery in normal
        if(g_afec_sample_data.value < 1200)//check that the battery is in the village
        {
            ioport_set_pin_level(LED1_GPIO,0);
            ioport_set_pin_level(LED1_GPIO,1);
            batt_level = 1;
        }
        if(g_afec_sample_data.value > 1600)//check that the battery has a very high
        level of charge
        {
            ioport_set_pin_level(LED2_GPIO,0);
            ioport_set_pin_level(LED1_GPIO,1);
            batt_level = 3;
        }

        break;
    case 3://the battery has a very high level of charge
        if(g_afec_sample_data.value < 1500)//transition to normal mode
        {
            ioport_set_pin_level(LED1_GPIO,1);
            ioport_set_pin_level(LED2_GPIO,1);
            batt_level = 2;
        }
        else
        {
            ioport_set_pin_level(LED1_GPIO,1);
            ioport_set_pin_level(LED2_GPIO,0);
            batt_level = 3;
        }
        break;
    default:
    {
        batt_level = 1;
    }
}

```