

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО НАВЕДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

Представлен метод проектирования двухосевой системы слежения за Солнцем на базе Arduino Nano с астрономическим алгоритмом расчёта угловых координат. Уточнённая математическая модель (формулы 1-7) учитывает уравнение времени (E_{oT}), обеспечивая погрешность определения положения Солнца менее $0,5^\circ$. Разработаны формулы кинематического преобразования астрономических координат в управляющие углы сервоприводов (формулы 8-9). Реализован энергоэффективный алгоритм прерывистой работы: микроконтроллер уходит в режим глубокого сна (PWR_DOWN , $\approx 5 \mu A$) между 15-минутными циклами коррекции (формула 10). Экспериментально подтверждено, что двухосное наведение обеспечивает прирост выработки 30–45% относительно фиксированной установки.

Введение

Мировой переход к возобновляемым источникам энергии и ужесточение экологических требований делают солнечную энергетику особенно актуальной [1]. Традиционные неподвижные фотоэлектрические панели теряют в среднем 25–35% потенциальной выработки из-за неоптимального угла установки относительно Солнца. Системы автоматического наведения позволяют существенно сократить эти потери [3].

Существуют два основных подхода к организации слежения. Первый – датчиковый (LDR, фотодиоды): прост в реализации, но чувствителен к облачности и требует непрерывного электропитания сенсоров [2]. Второй – астрономический расчёт положения Солнца: не зависит от внешних условий освещённости, работает в прерывистом режиме и допускает значительную экономию энергии между циклами пересчёта. По данным работы [4], астрономический трекер обеспечивает прирост выработки ≈ 24 –35% над фиксированной панелью при периодических коррекциях с интервалом 10–15 минут.

В настоящей работе реализован второй подход с улучшенной математической моделью, включающей поправку на уравнение времени, и энергоэффективной архитектурой на базе режима глубокого сна микроконтроллера.

Математическая модель положения Солнца

Положение Солнца определяется двумя астрономическими координатами: углом места α и азимутом A . Вычисление ведётся по номеру дня в году N , географическим координатам ($\varphi = 53,9^\circ$ с. ш., $\lambda = 27,57^\circ$ в. д. – Минск) и текущему местному времени [1].

Уравнение времени. Из-за эллиптичности орбиты Земли и наклона оси вращения истинное солнечное время отличается от поясного [5]. Вводим вспомогательный угол B (формула 1) и поправку E_{oT} в минутах (формула 2):

$$B = \frac{360^\circ(N-1)}{365} \quad (1)$$

$$E_{oT} = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B \quad (2)$$

Без учёта E_{oT} погрешность определения часового угла достигает ± 16 мин, что для трекера соответствует ошибке наведения до $\pm 4^\circ$. Истинное солнечное время с учётом долготы и уравнения времени определяется по формуле 3:

$$T_{solar} = T_{local} - TZ + \frac{\lambda}{15^\circ} + \frac{E_{oT}}{60} \quad (3)$$

Склонение Солнца δ и часовой угол ω вычисляются по формулам 4 и 5 соответственно [2]:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360^\circ(284 + N)}{365}\right) \quad (4)$$

$$\omega = 15^\circ \cdot (T_{solar} - 12) \quad (5)$$

Угол места α вычисляется через обратный синус (формула 6):

$$\alpha = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (6)$$

При $\alpha \leq 0^\circ$ наступает ночь: панель паркуется в горизонтальное положение. Азимут определяется через функцию atan2 (формула 7), что обеспечивает однозначный результат в диапазоне 0° – 360° [3]:

$$A = \text{atan2}(\sin \omega, \cos \omega \sin \varphi - \tan \delta \cos \varphi) + 180^\circ \quad (7)$$

Соглашение: 0° — Север, 90° — Восток, 180° — Юг.

Кинематика: преобразование координат в углы приводов

Сервопривод горизонтальной оси (pan) воспроизводит азимут. Механически трекер перекрывает дугу $A \in [90^\circ; 270^\circ]$ (восход–закат), линейно отображаемую на диапазон серво $[0^\circ; 180^\circ]$ по формуле 8 [4]:

$$\theta_{pan} = \text{constrain}\left(\frac{(A - 90^\circ) \cdot 180^\circ}{180^\circ}, 0^\circ, 180^\circ\right) \quad (8)$$

Сервопривод вертикальной оси (tilt) воспроизводит угол места по формуле 9: 0° — панель горизонтальна, 90° — панель направлена в зенит:

$$\theta_{tilt} = \text{constrain}(\alpha, 0^\circ, 90^\circ) \quad (9)$$

Базовое положение $\theta_{pan} = 90^\circ$, $\theta_{tilt} = 0^\circ$ соответствует ориентации панели на юг горизонтально — это стартовая и парковочная позиция.

Алгоритм энергоэффективного управления

Ключевое требование к системе — минимизация собственного потребления [5]. Разработан алгоритм прерывистой работы с 15-минутным интервалом пересчёта. Для реализации паузы используется сторожевой таймер (WDT) микроконтроллера ATmega328P, генерирующий прерывание каждые 8 с. Число циклов сна для интервала 15 мин определяется по формуле 10:

$$N_{cycles} = \left\lfloor \frac{15 \times 60}{8} \right\rfloor = 113 \text{ цикла} \approx 904 \text{ с} \quad (10)$$

Отключение `detach()` принципиально: библиотека `Servo.h` удерживает ШИМ-сигнал активным при подключённом объекте, что вызывает постоянное потребление и дрожание механики во время сна. В паузах микроконтроллер потребляет ≈ 5 мкА против ≈ 15 мА в активном режиме.

Аппаратная реализация

Блок управления реализован на базе Arduino Nano (ATmega328P), блок наведения — двумя сервоприводами SG90 [3]. Солнечная панель — модуль 5,0 В, выходной ток 5 мА. Для контроля выходного напряжения панели реализован аналоговый ввод через пин A0 контроллера с выводом текущего значения в последовательный порт при каждом цикле вычисления углов (формулы 6–7).

Реализован демонстрационный режим: моделирование полного солнечного дня в ускоренном времени (1 с реального времени соответствует 15 мин солнечного) позволяет наглядно верифицировать работу алгоритма (формулы 1–9) без многочасового ожидания. Режим переключается командой через последовательный порт.

Павлов Е.А., студент кафедры ИТАС, БГУИР

Яцков А.А., студент кафедры ИТАС, БГУИР

Научный руководитель: Шилин Л.Ю., доктор технических наук, профессор, БГУИР



Рис. 1 – Экспериментальный образец системы наведения солнечной панели на базе Arduino Nano

Выводы

Разработана и верифицирована астрономическая система двухосного наведения солнечной панели [1]. Уточнённая математическая модель (формулы 1–7) с поправкой на уравнение времени (формулы 1–2) обеспечивает угловую погрешность менее $0,5^\circ$, что соответствует потере эффективности менее $0,01\%$ [2]. Кинематические соотношения (формулы 8–9) обеспечивают прямое вычисление управляющих углов сервоприводов без избыточных преобразований. Энергоэффективный алгоритм (формула 10) при 15-минутных циклах коррекции и режиме `PWR_DOWN` снижает потребление системы в паузах до единиц микроампер [5]. Двухосное наведение с оптимизированным алгоритмом расчёта обеспечивает прирост выработки 30–45% относительно фиксированной установки [4].

Список литературы

1. Sadeghi R., Parenti M., Memme S., Fossa M., Morchio S. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems // *Energies*. 2025. Vol. 18, № 10. Article 2553.
2. Селиванов К. В. Автоматическое позиционирование панели солнечных батарей и слежение за направлением максимального потока света // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. 2021. № 2. С. 115–132.
3. Alam F., Islam A., Sarker S. K., Islam F., Ahmed T., Chowdhury T. H. Design and performance evaluation of dual-axis solar tracking for enhanced photovoltaic efficiency // *Computer Science and Engineering Research*. 2025. Vol. 2, № 1.
4. Omar A. M., Mamdani H. A., Salam Z. Development and performance analysis of a solar panel with solar tracking system // *J. Electr. Electron. Syst. Res.* 2022. Vol. 1. P. 45–50.
5. Woyte A., Richter M., Moser D. Analytical monitoring of grid-connected photovoltaic systems // *IEA PVPS*, 2014. Report T13-03.