

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII MOLDOVA**  
**Universitatea Tehnică a Moldovei**  
**Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică**  
**Departamentul Ingineria Software și Automatică**

**Admis la susținere**  
**Șef departament:**  
**FIODOROV Ion dr., conf.univ.**

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025

# **ANALIZA DISPOZITIELOR DE ORIENTARE A PANOURILOR SOLARE PENTRU EFICIENTIZAREA ACESTORA**

**Teza de master**

**Student:** \_\_\_\_\_ **Godunov Maxim TI-231M**  
**Coordonator:** \_\_\_\_\_ **Cernei Irina, asist. univ.**  
**Consultant:** \_\_\_\_\_ **Cojocaru Svetlana, asist. univ.**

**Chișinău, 2025**

## АННОТАЦИЯ

В данной магистерской работе рассмотрены технологии слежения за Солнцем, направленные на повышение эффективности солнечных панелей. Основное внимание уделено анализу одноосных и двухосных солнечных трекеров, их принципам работы, а также сравнительным характеристикам. Были рассмотрены современные тенденции в использовании солнечных трекеров на мировом рынке, их преимущества и недостатки, а также особенности применения в зависимости от климатических условий.

В работе представлены принципы работы как одноосных, так и двухосных систем, их роль в оптимизации выработки энергии и эффективность в различных климатических зонах. Приведен детальный анализ производительности систем, обоснована целесообразность применения тех или иных трекеров в зависимости от их стоимости и производительности.

Кроме того, работа содержит сравнительный анализ производительности одноосных и двухосных систем на основе реальных данных, что позволило выявить ключевые различия и преимущества каждой из технологий. На основе проведенного анализа даны рекомендации по выбору трекеров для различных типов солнечных ферм.

Отдельное внимание в работе уделено реализации собственной двухосной системы слежения за Солнцем на базе Arduino. Уникальность данной системы заключается в применении кнопочного управления для регулировки скорости поворота панели, что обеспечивает большую гибкость в эксплуатации. Были подробно описаны алгоритмы работы системы, включая обработку данных с датчиков освещенности, температуры и влажности, а также логика управления сервоприводами.

В последней части работы представлены результаты тестирования разработанной системы. Показано, как изменение углов ориентации солнечной панели влияет на интенсивность освещения и, соответственно, на её производительность. Были построены графики изменения параметров работы системы, что позволило провести детальный анализ её эффективности в реальных условиях эксплуатации.

Результаты исследования могут быть полезны для дальнейшей оптимизации солнечных установок, способствуя развитию возобновляемых источников энергии и повышению рентабельности солнечных энергетических проектов.

## REZUMAT

Această lucrare de masterat examinează tehnologiile de urmărire a Soarelui, orientate spre creșterea eficienței panourilor solare. Accentul principal este pus pe analiza trackere-lor solare uniaxiale și biaxiale, principiile lor de funcționare, precum și caracteristicile comparative. Au fost analizate tendințele moderne în utilizarea trackere-lor solare pe piața globală, avantajele și dezavantajele lor, precum și caracteristicile aplicării acestora în funcție de condițiile climatice.

Lucrarea prezintă principiile de funcționare ale sistemelor uniaxiale și biaxiale, rolul lor în optimizarea producției de energie și eficiența acestora în diferite zone climatice. Este oferită o analiză detaliată a performanței acestor sisteme și este justificată aplicarea anumitor trackere în funcție de costul și performanța lor.

De asemenea, lucrarea include o analiză comparativă a performanței trackere-lor uniaxiale și biaxiale pe baza datelor reale, ceea ce a permis identificarea principalelor diferențe și avantaje ale fiecărei tehnologii. Pe baza analizei realizate, au fost oferite recomandări pentru selectarea trackere-lor în funcție de diferite tipuri de ferme solare.

Un aspect distinct al lucrării îl constituie realizarea unui sistem biaxial propriu de urmărire a Soarelui bazat pe Arduino. Unicitatea acestui sistem constă în utilizarea unui control prin buton pentru reglarea vitezei de rotire a panoului, ceea ce oferă o flexibilitate crescută în utilizare. Au fost descriși în detaliu algoritmi de funcționare a sistemului, inclusiv procesarea datelor de la senzori de iluminare, temperatură și umiditate, precum și logica de control a servomotoarelor.

În ultima parte a lucrării sunt prezentate rezultatele testării sistemului dezvoltat. A fost demonstrat modul în care modificarea unghiurilor de orientare a panoului solar influențează intensitatea luminii și, implicit, performanța acestuia. Au fost realizate grafice ale variației parametrilor de funcționare ai sistemului, ceea ce a permis o analiză detaliată a eficienței acestuia în condiții reale de exploatare.

Rezultatele cercetării pot fi utile pentru optimizarea ulterioară a instalațiilor solare, contribuind la dezvoltarea surselor de energie regenerabilă și la creșterea rentabilității proiectelor de energie solară.

## **ABSTRACT**

This master's thesis examines solar tracking technologies aimed at increasing the efficiency of solar panels. The main focus is on the analysis of single-axis and dual-axis solar trackers, their principles of operation, and their comparative characteristics. Modern trends in the use of solar trackers in the global market, their advantages and disadvantages, as well as their application features depending on climatic conditions, were reviewed.

The study presents the principles of operation for both single-axis and dual-axis systems, their role in optimizing energy production, and their efficiency in various climatic zones. A detailed analysis of system performance is provided, and the feasibility of using specific trackers based on their cost and performance is justified.

Additionally, the thesis includes a comparative analysis of the performance of single-axis and dual-axis trackers based on real data, which allowed for the identification of key differences and advantages of each technology. Based on the conducted analysis, recommendations were made for selecting trackers for different types of solar farms.

A unique aspect of this work is the implementation of a custom dual-axis solar tracking system based on Arduino. The uniqueness of this system lies in the use of button-based control to adjust the panel's rotation speed, which provides greater flexibility in operation. The system's operating algorithms, including data processing from light, temperature, and humidity sensors, as well as servo motor control logic, are described in detail.

The final part of the thesis presents the results of testing the developed system. It was demonstrated how changes in the orientation angles of the solar panel affect light intensity and, consequently, its performance. Graphs of system parameter variations were constructed, allowing for a detailed analysis of its efficiency under real operating conditions.

The results of the research can be useful for further optimization of solar installations, contributing to the development of renewable energy sources and improving the profitability of solar energy projects.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>9</b>
<b>1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Актуальность выбранной темы.....	10
1.2 Современные тенденции в области слежения за Солнцем .....	11
1.3 Применение солнечной энергии в мировой практике .....	12
1.4 Применение солнечных трекеров в мировой практике .....	18
<b>2 ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ.....</b>	<b>23</b>
2.1 Общие сведения о системах слежения за солнцем .....	23
2.2 Принцип работы одноосных трекеров .....	25
2.3 Принцип работы двухосных трекеров .....	30
2.4 Сравнительный анализ одноосных и двухосных систем .....	36
<b>3 МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ.....</b>	<b>41</b>
3.1 Регулировка угла наклона и ориентации панелей .....	41
3.2 Охлаждение солнечных панелей .....	42
3.2.1 Методы охлаждения солнечных панелей.....	43
3.3 Использование дополнительных датчиков слежения за солнцем.....	45
3.4 Использование алгоритмов для точного слежения за солнцем.....	47
3.4.1 Solar Position Algorithm .....	47
3.4.2 Алгоритмы на основе предсказания .....	48
3.5 Сравнительный анализ методов оптимизации эффективности солнечных трекеров .....	49
<b>4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ .....</b>	<b>52</b>
4.1 Описание аппаратной части .....	52
4.2 Программное обеспечение .....	54
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>59</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЯ.....</b>	<b>60</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>63</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>64</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время развитие возобновляемых источников энергии становится одной из ключевых задач человечества. Среди всех возобновляемых источников солнечная энергия занимает лидирующую позицию благодаря своей доступности, экологической чистоте и потенциалу для дальнейшего использования на глобальном уровне. Преимущество солнечной энергии заключается в её неисчерпаемости, возможности применения на любом этапе жизненного цикла и относительно низких эксплуатационных затратах. В то же время важной проблемой остаётся повышение эффективности её использования.

Технологии слежения за Солнцем, известные как солнечные трекеры, представляют собой современные решения, позволяющие повысить производительность фотоэлектрических панелей. Эти устройства отслеживают движение солнца на протяжении дня, автоматически поворачивая панели таким образом, чтобы солнечные лучи попадали на поверхность панели под оптимальным углом. Солнечные трекеры могут быть одноосными и двухосными в зависимости от числа осей вращения, обеспечивая разный уровень производительности в зависимости от климатических условий и особенностей местности.

В данной дипломной работе будет описано исследование принципов работы, классификации и сравнительного анализа систем слежения за Солнцем. Основное внимание уделяется технологическим особенностям, преимуществам и недостаткам каждой системы, а также их влиянию на производительность фотоэлектрических панелей. Исследование актуально в контексте глобального перехода на устойчивые и возобновляемые источники энергии, где максимизация производительности солнечных панелей играет ключевую роль. Важность данного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности использования солнечных ресурсов в условиях растущего спроса на чистую энергию и стремления к снижению воздействия на окружающую среду.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] EMBER-CLIMAT: Global solar power capacity - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://ember-climate.org/insights/in-brief/2023s-record-solar-surge-explained-in-six-charts/>
- [2] CLEAN TECHNICA: Tracking The Sun Makes Solar Panels More Efficient - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://cleantechnica.com/2023/09/30/tracking-the-sun-makes-solar-panels-more-efficient-on-land-on-water/>
- [3] PV-MAGAZINE: Solar tracker market - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.pv-magazine.com/2024/09/18/innovation-driving-change-in-solar-tracker-market/>
- [4] GRAND VIEW RESEARCH: Solar Tracker Market Size Analysis Report - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/solar-tracker-industry>
- [5] SOLAR FEEDS: Advanced Insights into Tracking Systems in Solar Mounting - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.solarfeeds.com/mag/advanced-insights-into-tracking-systems-in-solar-mounting/>
- [6] Energy Technologies Area: Tracking the Sun - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://energy.lbl.gov/publications/tracking-sun-pricing-and-design-2>
- [7] BOSTAN I., DULGHERU V., BOSTAN V., & SOBOR I., „Renewable energy and sustainable development of society” *Meridian Ingineresc*, (4), 67-83, 2015 – [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ibn.idsi.md/vizualizare\\_articol/43535](https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/43535)
- [8] Solar Power: Global Market Outlook For Solar Power 2023 – 2027 - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail>
- [9] BOSTAN Ion, „Resilient energy systems: renewables: wind, solar, hydro”, *Springer Science & Business Media*, vol. 19, pp, 55-56, 2012 - [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&user=8m8XSicAAAAJ&citation\\_for\\_view=8m8XSicAAAAJ:u-x6o8ySG0sC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=8m8XSicAAAAJ&citation_for_view=8m8XSicAAAAJ:u-x6o8ySG0sC)
- [10] Global Market Insights: Solar Tracker Market - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/solar-tracker-market-report>

- [11] BOSTAN Ion, Valeriu DULGHERU, Ion DICUSARĂ. „Instalație solară cu autoorientare”, 2007 - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://repository.utm.md/handle/5014/21497>
- [12] Market Research: Solar Tracker Market Size-Analysis - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://wemarketresearch.com/reports/solar-tracker-market/193/>
- [13] Mordor Intelligence: Global Solar tracker Market - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/solar-tracker-market>
- [14] RatedPower: How do solar trackers work? - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://ratedpower.com/glossary/solar-trackers/>
- [15] SINO VOLTAICS: Single Axis trackers - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/single-axis-trackers/>
- [16] Mibet Energy: Principles and Advantages of Single-Axis Solar Trackers - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.mbt-energy.com/news/industry/2405291.html>
- [17] The Concord Consortium: Choose solar trackers: HSAT, VSAT, or AADAT. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://concord.org/blog/choose-solar-trackers-hsat-vs-at-or-aadat/>
- [18] Mathematics: Dual-Axis Solar Tracking Mechanism - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/7/1034>
- [19] Electroduino: Dual Axis Solar Tracker - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.electroduino.com/dual-axis-solar-tracker-using-lm339-and-l293d-motor-driver-ic/>
- [20] MDPI Energies: Performance Analysis of Solar tracking Systems - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/16/5869>
- [21] Солнечный трекер - устройство, позволяющее следить за движением солнца по небосводу - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://albaavis.kz/a40308-solnechnyj-treker-ustrojstvo.html>
- [22] CYBERLENINKA: Анализ производительности солнечных панелей – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-proizvoditelnosti-solnechnyh-paneley-v-razlichnyh-klimaticheskikh-usloviyah>



- [23] SOLARPATH: Калькулятор угла наклона солнечных панелей – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://solarpath.com.ua/ru/kalkulyator-ugla-naklona-solnechnyh-panelej>
- [24] SOLARPOWER: Влияние температуры на солнечные панели – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://e-solarpower.ru/stati/kak-rabochaya-temperatura-solnechnyh-paneley-vliyaet-na-ih-effektivnost-i-metody-ohlazhdeniya-dlya-povysheniya-proizvoditelnosti>
- [25] Ecotechnica: Как лучше всего охлаждать солнечные батареи – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/kak-luchshe-vsego-okhlazhdat-solnechnye-batarei-novoe-issledovanie>
- [26] BITKIT: Фоторезистор – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bitkit.com.ua/ru/fotorezistor>
- [27] Радиоэлемент: Что такое фотодиоды – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.radioelementy.ru/articles/fotodiody>
- [28] Mirmarine: Энкодеры – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mirmarine.net/elektromekhanik/sudovaya-avtomatika/975-enkodery>
- [29] NREL: Solar position algorithm – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://midcdmz.nrel.gov/spa/>
- [30] MathWorks: NREL's Solar Position Algorithm – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/59903-nrel-s-solar-position-algorithm-spa>
- [31] Arduino Uno – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arduino.ru/hardware/arduinoboarduno>
- [32] Работа с сервоприводами – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://developer.alexanderklimov.ru/arduino/servo.php>
- [33] Arduinomaster: Подключение дисплея LCD [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/lcd-i2c-arduino-displey-ekran/>