

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_

Ігор ЧИЧУРА

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему:

**МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧНОЇ СТАНЦІЇ МОНІТОРИНГУ ІНТЕНСИВНОСТІ  
СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Виконав:

Микола СОРОЧИНСЬКИЙ

(ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник:

проф. Валентин ІВАНИЦЬКИЙ

(вчене звання, ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної магістерської роботи:  
71 сторінка, 6 таблиць, 24 рисунки, 5 додатків, 22 джерела посилань

### ОРІЄНТАЦІЯ НА СОНЦЕ, МОНІТОРИНГ ІНТЕНСИВНОСТІ, ТРЕКЕРИ

Об'єкт дослідження – модель станції моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання з трекерною системою та алгоритмом на основі астрономічно-географічних координат руху Сонця по небесній сфері.

Мета роботи - розробити електронний модуль автоматичного керування станцією моніторингу сонячного випромінювання з використанням трекерної системи, яка працює на основі астрономічної математичної моделі програмування мікроконтролера даного модуля.

Методи дослідження - математичне моделювання, проектування електронної схеми, розробка алгоритму та програми мікроконтролера астрономічного електронного модуля, експериментальні дослідження функціонування мікроконтролера.

Проаналізовано астрономічно-географічну математичну модель створення програм мікроконтролерів та промислових контролерів для керування наземними автоматичними станціями моніторингу сонячного випромінювання.

Розроблено електричні схеми та просту модель станції. Створено алгоритм для практичного програмування мікроконтролера астрономічного модуля. Проведені експериментальні дослідження часових діаграм функціонування мікроконтролера згідно розробленого алгоритму.

## ABSTRACT

The magister's thesis contains: 71 pages, 6 tables, 24 figures, 5 additions, 22 reference sources.

### ORIENTATION TO THE SUN, INTENSITY MONITORING, TRACKERS

The research object is a model of a solar radiation intensity monitoring station with a tracker system and an algorithm based on the astronomical and geographical coordinates of the Sun's movement in the celestial sphere.

The purpose of the work is to develop an electronic module for automatic control of a solar radiation monitoring station using a tracker system that works on the basis of an astronomical mathematical model for programming the microcontroller of this module.

Research methods are mathematical modeling, electronic circuit design, algorithm and program development of the microcontroller of the astronomical electronic module, experimental studies of the functioning of the microcontroller.

An astronomical-geographical mathematical model for creating programs of microcontrollers and industrial controllers for controlling terrestrial automatic solar radiation monitoring stations is analyzed.

Electrical diagrams and a simple model of the station were developed. An algorithm for practical programming of the microcontroller of the astronomical module has been created. Experimental studies of time diagrams of microcontroller operation according to the developed algorithm were carried out.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПИТАНЬ МОНІТОРИНГУ ІНТЕНСИВНОСТІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	11
1.1 Методи вимірювання параметрів сонячного випромінювання.....	11
1.2 Прилади для вимірювання параметрів сонячного випромінювання та їх використання в метеорології.....	14
1.3 Аналіз результатів моніторингу та метеорологічні бази даних сонячної інсоляції.....	22
1.4 Трекери в сучасних системах автоматичної орієнтації.....	25
2 ДОСЛІДЖЕННЯ АСТРОНОМІЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ НА СОНЦЕ.....	28
3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОДЕЛІ ТРЕКЕРА.....	35
3.1 Структурна схема моделі.....	35
3.2 Початкова інсталяція всієї системи при її встановленні та налаштуванні.....	37
3.3 Етап підготовки параметрів керування орієнтацією на даний текучий день.....	39
3.4 Етап періодичної переорієнтації поворотної основи моделі в напрямку на Сонце протягом світлового дня.....	40
3.5 Аналіз перспектив використання спроектованої системи орієнтації.....	44
4 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОДЕЛІ СТАНЦІЇ...	48
5 ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	52
5.1 Годинник сонячного адміністративного часу.....	52
5.2 Узгодження модуля годинника з модулем мікроконтролера.....	56
5.3 LCD дисплей для відображення інформації.....	58

КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ					
		Прізвище ім'я	Підпис	Дата	
Розробив	Сорочинський				
Перевірив	Іваницький ВП.				
Т. контроль					
Н. контроль					
Затвердив					
Модель автоматичної станції моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання Пояснювальна записка			Літера	Аркуш	Аркушів
			у	6	71
			ІТФ, кафедра ПБ, 2 курс магістри денна форма		

6 НАЛАШТУВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ФУНКЦІЙ МОДЕЛІ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	62
6.1 Встановлення параметрів годинника реального часу.....	63
6.2 Узгодження модуля мікроконтролера та годинника реального часу.....	63
6.3 Електрична принципова схема системи керування .....	64
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	69
Додаток А ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ РОЗРАХУНКІВ ТЕКУЧИХ КУТІВ ВИСОТИ ТА АЗИМУТУ ЗА РОЗРОБЛЕНОЮ АСТРОНОМІЧНОЮ МАТЕМАТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ	
Додаток Б АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ	
Додаток В СТРУКТУРНА СХЕМА МОДЕЛІ СТАНЦІЇ МОНІТОРИНГУ	
Додаток Г ЗАГАЛЬНА СХЕМА ЗОВНІШНІХ КОМУТАЦІЙ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ ВИХОДІВ МОДУЛЯ ARDUINO UNO R3	
Додаток Д ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА СХЕМА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	
Додаток Е ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ	
Додаток Ж ВІДОМІСТЬ ДОКУМЕНТІВ	

АКТ 2023

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$D_L$  - географічна довгота точки розміщення панелі

$J$ - загальна інтенсивність потоку сонячного випромінювання

$J_d$ - прямий потік

$J_s$ - розсіяний потік

LST - local solar time- місцевий сонячний час

LSTM - local standard time meridian

$N$  – кількість днів, які минули від початку календарного року до моменту спостереження

$N_T$  - номер часового поясу

$P$ - величина потужності прямого сонячного випромінювання

$\Delta T$  – різниця між середнім місцевим сонячним часом даної географічної точки і середнім сонячним часом на Гринвічі в годинах на даний момент

$\Delta T_E$  – поправка

$\Delta T_L$ -стаціонарний локальний поправочний коефіцієнт

$\Delta \psi$  - поправочний доданок

$\alpha$  - це кут між точкою півдня та вертикальним кругом небесної сфери

$\delta_e$  - кут схилення

$\Psi$  - часовий кут

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

Сонячне випромінювання, яке потрапляє на різні об'єкти на земній поверхні, характеризується двома основними характеристиками: інтенсивністю (irradiance), яка є миттєвою повною потужністю на одиницю площі, і сонячною інсоляцією (insolation) – енергією на одиницю площі, яка приходить протягом певного періоду часу від Сонця [1]. Інтенсивність сонячного випромінювання сильно залежить від географічного місця розташування, часу та місцевої погоди, а, відповідно, змінюється протягом дня від 0 кВт/м<sup>2</sup> вночі до максимуму близько 1 кВт/м<sup>2</sup> опівдні. Такого ж типу зміни характерні і для сонячної інсоляції. Крім інших застосувань, ці дані є також дуже важливими для оптимального проектування сонячних енергетичних систем. Вказані параметри сонячного випромінювання переважно контролюються відповідними метеорологічними станціями, які розміщені по всій земній кулі.

Основним технічним фактором є орієнтацією поверхні фотоелектричних елементів, а саме забезпечення оптимального вертикального й азимутального кутів падіння сонячних променів на батарею. Дану умову забезпечують двома основними методами. Перший із них - періодична сезонна ручна переорієнтація панелей відповідно до змін максимальної висоти Сонця над площиною горизонту. Другий метод полягає у використанні різних автоматичних систем орієнтації або так званих трекерних систем [2].

Найімовірнішими місцями розміщення сонячних електрогенеруючих елементів для малої енергетики є переважно нерухомі важко доступні конструкції (дах, вікна, напівпрозорі перекриття тощо), для яких, у більшості випадків, ручна зміна кутового орієнтування сонячних панелей утруднена або неможлива. Тому для таких систем є доцільним застосування надійних систем орієнтації. Їх проектування вимагає розробки точного алгоритму керування даними системами. А для цього необхідний детальний аналіз взаємозв'язку технічних параметрів таких систем із географічними особливостями місця їх встановлення та

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

астрономічними параметрами руху Сонця по небесній сфері. Дослідженню цих питань і присвячена дана робота.

Питання визначення та оптимального застосування астрономічних величин залишаються актуальними також і при вирішенні багатьох інших різноманітних практичних задач геодезії, сонячної енергетики, маркшейдерської справи тощо [3, 4]. Їх використання лежить в основі нових поколінь електронних теодолітів, роботизованих геодезичних систем, автоматизованих систем сонячного орієнтування, автоматичних астрометричних приладів і пристроїв. Вони дозволяють підвищити як точність, так і продуктивність вимірювань і обробки їх результатів. Це потребує створення нових ефективних методів і алгоритмів автоматичного обчислення астрономічних величин та їх застосування в сучасних системах орієнтації на Сонце. Дослідження параметрів та характеристик моделі трека для моніторингу сонячного випромінювання було основним завданням нашої магістерської роботи.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1 АНАЛІЗ ПИТАНЬ МОНІТОРИНГУ ІНТЕНСИВНОСТІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Сучасний моніторинг інтенсивності сонячного випромінювання складається з глобальних прямих вимірювань параметрів світлової енергії від Сонця, які проводяться неперервно або періодично протягом дня. З цією метою на метеорологічних та спеціальних станціях використовують складне високоточне і досить дороге обладнання (рис.1.1). Такі вимірювання систематично ведуться по всій земній кулі вже біля 50 років. Розглянемо основні аспекти проведення даних досліджень.



Рисунок 1.1 – Обладнання метеорологічної станції для моніторингу параметрів сонячного випромінювання [5]

## 1.1 Методи вимірювання параметрів сонячного випромінювання

Основними сучасними методами вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання є піранометрія та піргеліометрія. Першим методом вимірюється інтенсивність глобального випромінювання, наявного в околі сенсора, а другим – інтенсивність лише прямого випромінювання від Сонця.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Для метеорологічного моніторингу з точки зору розвитку сонячної енергетики основне значення має другий метод. Для нього використовуються два найпоширеніші види сенсорів:

- піранометри, які мають високу здатність поглинати енергію сонячного випромінювання і перетворювати її в теплову енергію (сенсор при цьому нагрівається до температури, яка пропорційна інтенсивності падаючого випромінювання);
- еталонні фото комірки, які вимірюють кількість фотонів, які досягають поверхні сенсора.

Найпростішим піранометром може бути набір термопар, які разом вимірюють різницю температур між опроміненою частиною сенсора та тією його частиною, яка знаходиться в затінку. Такі піранометричні давачі більш доцільно застосовувати для метеорологічного моніторингу теплового ресурсу сонячного випромінювання – наприклад, для дослідження ефективності функціонування сонячних теплових колекторів або для порівняння продуктивності сонячних теплових і сонячних фотоелектричних систем.

Найпростішою еталонною фотокоміркою зазвичай є кремнієві сонячні фотоелектричні перетворювачі (ФЕП). При дії на них потоку фотонів від Сонця відбувається генерація вільних електронно-діркових пар, які створюють необхідні умови для протікання в зовнішньому електричному колі сенсора певного фотоструму. За величиною такого фотоструму можна судити про інтенсивність сонячного випромінювання, яке потрапляє на сенсор. Переваги еталонних комірок у вигляді ФЕП найбільш повно проявляються в сонячній електроенергетиці, де вони можуть забезпечити повну імітацію реакції сонячних панелей на сонячне випромінювання.

Слід відмітити, що обидва типи сенсорів є спектрально чутливими. Тобто, їхня реакція може бути різною на світлові потоки з різним спектральним складом. Тому дуже важливим завданням при проведенні моніторингу є врахування спектральних характеристик відповідних сенсорів.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Альтернативний метод вимірювання параметрів сонячного випромінювання для сонячної енергетики – це використання сенсорів сонячного світла, які відомі як реєстратори Кемпбелла-Стокса. Такі прилади вимірюють інтервали часу, протягом яких сонячне світло перевищує певний рівень (зазвичай  $200 \text{ Вт/м}^2$ ). Такі дослідження можна використовувати для визначення кількості достатньо сонячних днів і, відповідно, економічної ефективності встановлення сонячних енергетичних станцій у різних географічних точках земної поверхні. Зрозуміло, що такий метод моніторингу є менш точним, але й менш дорогим.

Хоча найчастіше вимірюється інтенсивність сонячного випромінювання, однак, досить поширеним методом моніторингу для проектування сонячних електростанцій є й дослідження сонячної інсоляції – загальної кількості сонячної енергії, отриманої в певному географічному місці протягом певного періоду часу. Найчастіше сонячну інсоляцію вимірюють в одиницях  $\text{кВт-год/м}^2$  за один день або в  $\text{Дж/м}^2$ .

Одиниці вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання та сонячної інсоляції є еквівалентними, оскільки обидві виражають просторову густину енергетичної потужності (для сонячної інсоляції «години» в чисельнику є мірою часу, так само як і «день» у знаменнику). Однак сонячна інсоляція суттєво відрізняється від інтенсивності сонячного випромінювання, оскільки сонячна інсоляція – це миттєва сонячна інтенсивність, усереднена за певний період часу (зокрема, за день, за місяць чи за рік).

Дані щодо сонячної інсоляції зазвичай використовуються при первинному ескізованому проектуванні фотоелектричних станцій. Результати ж моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання використовуються для більш точного передбачення продуктивності сонячних електростанцій протягом окремих днів чи навіть тижнів.

При проектуванні використовуються й інші метеорологічні параметри даної місцевості:

- типові усереднені дані для конкретного місяця року;
- середня денна інсоляція для даного місяця;

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- глобальні контури ізофлюксу для цілого року, кварталу або окремого місяця;
- дані про кількість сонячних годин у різних частинах року;
- сонячна інсоляція на основі даних супутникового хмарного покриву;
- теоретично розраховані дані про інтенсивність випромінювання;
- тощо.

Таким чином, як і для будь-якого вимірювання, основним є питання про те, що саме нам необхідно виміряти. Дане питання ускладнюється тим фактом, що термін «сонячне випромінювання» використовується в багатьох різних застосуваннях із дещо різними значеннями. Сонячне випромінювання найчастіше визначається через енергію, яка досягає Землі від Сонця. При цьому дана енергія охоплює видиме сонячне світло, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання.

Крім того, сонячне випромінювання потрапляє в точку вимірювань різними шляхами: безпосередньо від сонця (пряма сонячна радіація), через розсіювання в атмосфері (дифузна сонячна радіація) або через відбиття. Ці величини можна вимірювати окремо або сумарно. Але найчастіше в галузі енергетики цікавляться загальним потоком випромінювання на горизонтальній поверхні певного перетворюючого пристрою.

Для моніторингу фотоелектричних установок використовують як глобальну горизонтальна освітленість, так і освітленість у площині окремих панелей. Перша є базовим параметром для оцінки ККД сонячних енергетичних пристроїв, а друга – важлива характеристика для прогнозування ефективності роботи енергогенеруючих пристроїв у конкретних метеорологічних умовах.

## **1.2 Прилади для вимірювання параметрів сонячного випромінювання та їх використання в метеорології**

Для вимірювання сонячної радіації існує багато типів радіометрів, якими користуються кліматологи та метеорологи. Ідеальний тип приладу залежить від

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

того параметру сонячної радіації, яку ми збираємося вимірювати. Але основними є три типи використовуваних інструментів.

**Піранометр.** Це прилад для точного вимірювання сумарного сонячного випромінювання, яке потрапляє із області простору у формі півсфери. Тобто, такий прилад має робоче поле зору біля 180 градусів. При цьому фіксується енергія широкосмугового сонячного випромінювання у всьому спектральному діапазоні.

Піранометр стандартного типу має термоелектричні сенсори, розміщені за скляним півсферичним куполом. Позитивною рисою таких сенсорів є те, що вони не потребують для своєї роботи зовнішніх джерел живлення.

Піранометри часто розміщують біля сонячних панелей фотоелектричних станцій. У такому разі вони допомагають забезпечити оптимальне розташування панелей, а також вказують на забруднення поверхні панелей чи на деякі неполадки в їх функціонуванні.

Сучасними приладами даного типу є цифрові піранометри, які використовуються не тільки для фіксації, але й одночасно для аналізу даних про сонячне випромінювання. Такі піранометри мають малі розміри і їх можна просто тримати в руках під час проведення польових вимірювань.

**Піргеліометр** працює подібно до піранометра, але вимірює лише пряме сонячне випромінювання, яке падає на поверхню сенсора під прямим кутом. Сонячні промені проникають у піргеліометр через його вбудовані лінзи. При цьому лінза проектує сонячне світло на термопару, яка розташована всередині пристрою. Такі пристрої також широко використовуються в сонячній енергетиці.

**Квантові сенсори.** Це спеціалізовані пристрої, які вимірюють інтенсивність сонячного випромінювання у ділянці видимої спектральній області активного фотосинтезу. Такі датчики вимірюють фотосинтезуючу густину потоку фотонів (photosynthetic photon flux density – PPFD) сонячного світла. Ця інформація корисна в сільському господарстві, оскільки допомагає вибрати оптимальні місця розташування сільськогосподарських угідь. Такі дані також потрібні в океанографії для розрахунку зон сонячного освітлення океану. Ці датчики

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

використовують і в сонячній енергетиці, оскільки фотоелектричні перетворювачі працюють саме у видимому діапазоні сонячного спектру.

При виборі конкретного приладу для вимірювання сонячної енергії слід враховувати сутність тієї задачі, яку маєте розв'язати, оскільки для кожного застосування є свій оптимальний метод вимірювання. Зокрема, основними умовами, які мають враховуватися є:

- глобальне всепросторове вимірювання чи направлене;
- пряму, відбиту чи розсіяну інтенсивність ви маєте міряти;
- навколишнє оточення того місця, де ви збираєтеся встановити вимірювальний прилад;
- траєкторія руху Сонця на небесній сфері протягом року;
- місце та характер монтажу приладу;
- який метод реєстрації та передачі даних є оптимальним для даного випадку;
- чутливість, точність, стабільність та інші технічні й експлуатаційні характеристики приладу.

У наведеній нижче табл. 1.1 міститься перелік приладів, які використовуються для різних завдань у галузі моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання, та особливості їх конкретного застосування.

Іноді в метеорології разом з геліометрією також поєднують вимірювання прихованих теплових потоків не сонячної природи, а також теплових потоків від поверхні ґрунту.

Різні моделі піранометрів мають різну точність вимірювань, діапазон потужності вимірюваних енергетичних потоків, технічні характеристики та ціни. Зокрема, піранометри класифікуються за різними класами точності відповідно до міжнародного стандарту ISO 9060.

Загальна точність вимірювання піранометрами визначається низкою факторів: особливостями місця встановлення, рівнем технічного та метрологічного обслуговування, інтервалами повторного калібрування.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Наприклад, якщо немає регулярного чищення оптичних поверхонь приладу, то навіть піранометр високого класу не дасть точних вимірювань.

Таблиця 1.1 – Особливості вимірювання різних величин сонячного випромінювання

Вимірювальна величина	Оптимальний прилад	Примітки
Глобальне горизонтальне освітлення	Піранометр	Можна використовувати окремі вимірювання прямої та розсіяної сонячної радіації із послідуєчим їх додаванням
Глобальне освітлення похилої поверхні	Піранометр	
Пряме сонячне випромінювання	Піргеліометр з трекером	
Розсіяне сонячне випромінювання	Піранометр із затіненням	Затінюють піранометр за допомогою тіньового кільця або за допомогою трекера з механізмом затінення
Відбите сонячне випромінювання	Піранометр	
Альbedo	Два піранометри	Альтернативою є альбедометри, які об'єднують в одному приладі два піранометри
Повний енергетичний баланс	Два піранометри та два піргеліометри	Альтернативою є повний радіометр, який вимірює необхідні чотири незалежні величини.

Коротко розглянемо ті обставини, які особливо впливають на точність вимірювання параметрів сонячного випромінювання.

1. Місце розташування, де буде встановлено піранометр, має дуже важливе значення. Як уже відмічалось, піранометри мають повне напівсферичне поле зору,

тобто мають «бачити» усю нічим не затінену небесну сферу. Це означає, що в ідеалі область над чутливою поверхнею термосенсора не повинна містити жодних перешкод. При цьому інструмент повинен залишатися доступним для повсякденного обслуговування. Досвід показує, що вибрати таке місце, особливо в регіонах з розвиненим сучасним виробництвом та у великих містах, не просто. На практиці хорошим місцем для встановлення піранометрів є дахи висотних будівель. У будь-якому випадку, для точних вимірів не повинно бути жодних перешкод у полі зору інструментів по азимуту в  $360^\circ$ , які перевищують кут підйому  $5^\circ$ . Ті ж перешкоди, які потрапляють у вказаний кут  $5^\circ$ , повинні бути розміщені якнайдалі від точки встановлення піранометра.

Для визначення оптимального місця встановлення піранометрів зазвичай досліджують траєкторію руху Сонця на небесній сфері протягом року (рис.1.2) для свого регіону. Приклад таких траєкторій наведені в деяких онлайнресурсах, наприклад [5].

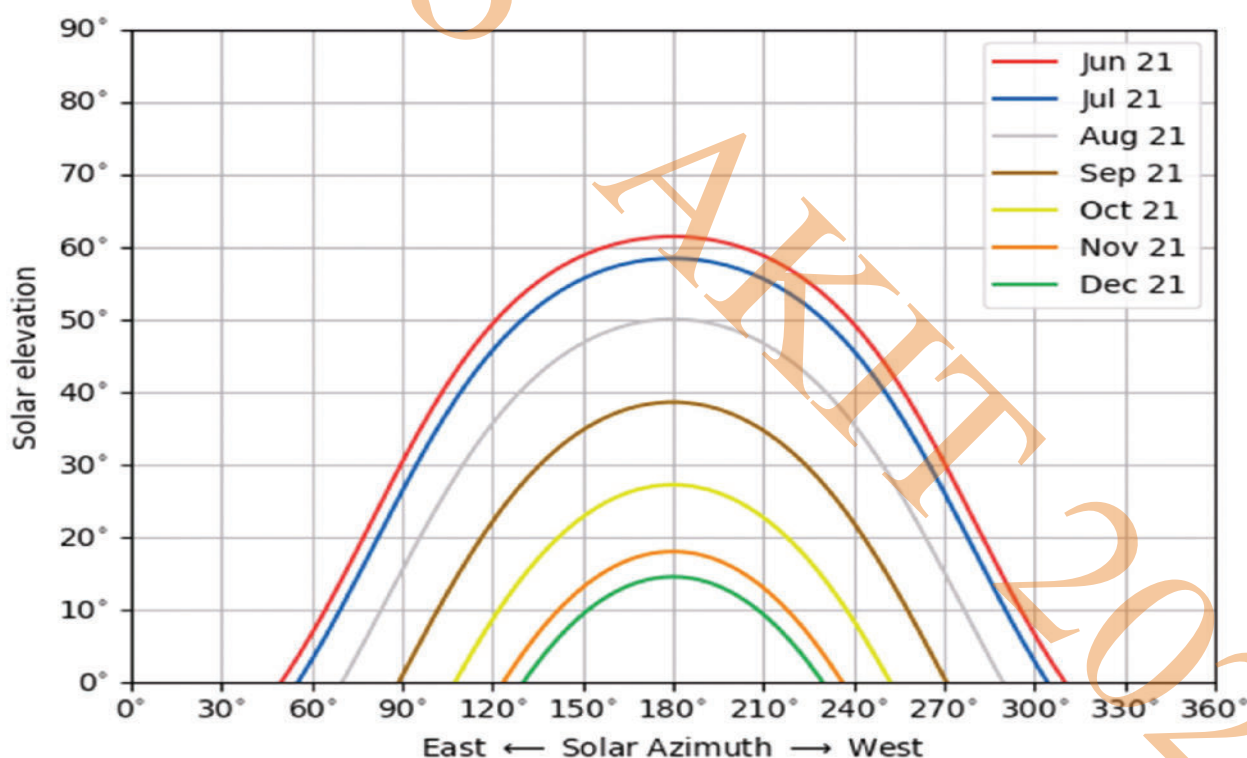


Рисунок 1.2 – Траєкторія руху Сонця з 21 червня по 21 грудня для Нідерландів [5]  
(країна із середніми північними широтами)

2. На місці встановлення не мають бути тривалі перешкоди, які можуть блокувати пряме надходження випромінювання від будь-якої частини небесної сфери до піранометра.

3. Забороняється встановлення піранометра поблизу будинків із світлими стінами або в місцях із відбиваючими поверхнями (наприклад, великі річки, озера, тощо).

4. Не встановлюються піранометри і в місцях, де на них часто може впливати випромінювання штучних джерел світла, наприклад, прожекторів.

5. Сам піранометр має бути встановлений строго на горизонтальній площині.

6. Прилад реєстрації отриманих аналогових результатів вимірювань має мати хорошу роздільну здатність у вузькому діапазоні низьких напруг, характерних для термопарних сенсорів. Використання неточного реєструючого пристрою може нівелювати точні вимірювання якісним піранометром.

7. Більш доцільно використати сучасний цифровий піранометр або піргеліометр, які мають вбудований аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) і можуть бути підключені безпосередньо до комп'ютера або системи SCADA (системи диспетчерського контролю та збору даних).

8. Як аналогові, так і цифрові піранометри не мають внутрішнього годинника. Тому всі математичні обчислення та визначення параметрів випромінювання Сонця необхідно виконувати на комп'ютері або інших подібних пристроях у режимі реального часу.

9. Важливим є належне заземлення приладів. Прилад, який не заземлений належним чином, може давати хибні показання вимірювань, повністю вийти з ладу під дією природних явищ і навіть стати загрозою безпеці обслуговуючого персоналу.

На закінчення підрозділу наведемо порівняння двох типів сучасних простих піранометрів (табл. 1.2). Один із них SMP-21 – спектрально плоский піранометр класу А ISO-9060 із термоелектричними сенсорами. Він рекомендується для наукових досліджень і високотехнічного моніторингу енергії сонячного

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

випромінювання за стандартом Всесвітньої метеорологічної організації. Цей прилад має індивідуальну для кожного зразка температурну компенсацію та обладнаний термісторним давачем для контролю температури корпусу. Крім того, SMP-21 має внутрішній осушувач, який слугуватиме не менш ніж 10 років, що суттєво скорочує обсяг технічного обслуговування.

Інший тип приладу – навчальний піранометр PYR-ВТА, обладнаний термочутливим сенсором із анодованого алюмінію. Основна сфера застосування – освіта та сонячна енергетика.

Таблиця 1.2 – Порівняння параметрів двох типових піранометрів

Параметр	PYR-ВТА [6]	SMP-21 [7]
Спектральний діапазон	Від 370 нм до 1140 нм	Від 285нм до 2800 нм
Час відгуку (63 %)	-	< 0,7 с
Час відгуку (95 %)	< 3 с	< 2 с
Зміщення нуля	-	< 7 Вт/м <sup>2</sup>
Температурна залежність чутливості (від -40 °С до +70 °С)	-	< 1 %
Похибка вимірювань	± 5 %	± 2 %
Аналоговий вихід (ампери/вольти)	-	(Від 4 до 20 мА) / (від 0 до 1 В)
Цифровий вихід	-	2-дротовий RS-485
Ціна	Біля 150 Євро	Біля 2000 Євро

Порівнюючи наведені дані можна зробити висновок, що професійні піранометри мають хороші експлуатаційні характеристики, але й коштують дорого.

Оскільки для повсякденної сонячної енергетики більш актуальними є вимірювання за допомогою піргеліометра з трекером, то наведемо вимоги до параметрів і характеристик таких приладів вищого і середнього класів (табл.1.3).

Таблиця 1.3 – Параметри піргеліометрів двох основних класів якості [8]

Параметр	Вищий клас	Середній клас
Час відгуку (з імовірністю 95 %)	< 15 с	< 30 с
Нульове зміщення (відповідає зміні температури навколишнього середовища на 5 К протягом години)	2 Вт м <sup>-2</sup>	4 Вт м <sup>-2</sup>
Роздільна здатність (найменша виявлена зміна густини потоку)	0,5 Вт м <sup>-2</sup>	1 Вт м <sup>-2</sup>
Стабільність (зміна у відсотках повної шкали за рік)	0,1 %	0,5 %
Реакція на зміну температури (максимальна похибка при зміні температури навколишнього середовища на 50 К)	1 %	2 %
Спектральна чутливість (відхилення спектру поглинання і спектру пропускання від середнього у всьому робочому спектральному діапазоні від 300 нм до 3000 нм)	0,5 %	1,0 %
Зміни показів при нахилі приладу відносно горизонтальної осі від 0° до 90° при інтенсивності випромінювання 1000 Вт м <sup>-2</sup>	0,2 %	0,5 %
Сумарна похибка визначення соляризації протягом однієї хвилини	0,56кДж м <sup>-2</sup>	1 кДж м <sup>-2</sup>
Сумарна похибка визначення соляризації протягом однієї години	21 кДж м <sup>-2</sup>	54кДжм <sup>-2</sup>
Сумарна похибка визначення соляризації протягом однієї доби	200 кДж м <sup>-2</sup>	400 кДж м <sup>-2</sup>

### 1.3 Аналіз результатів моніторингу та метеорологічні бази даних сонячної інсоляції

Як уже відмічалось, найточніші метеорологічні вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання можна отримати за допомогою піранометра, розміщеного в певному географічному місці, який проводить виміри з інтервалом у кілька хвилин протягом тривалого часу (зазвичай від кількох років до кількох десятиліть). Однак обсяг даних, отриманих таким методом, є дуже великим і непрактичним для використання в сонячній енергетиці. Тому отримані при метеорологічному моніторингу дані представляють у кількох інших скорочених форматах.

Найбільш концептуально прямим методом скорочення набору даних є їх усереднення за певний період вимірювання. У результаті отримують бази даних щодо середньодобових, середньомісячних або середньорічних рівнів інтенсивності сонячного випромінювання. Такі дані корисні для базового проектування енергетичних сонячних систем тривалого використання. Однак при цьому втрачається важлива інформація про зміни сонячної інтенсивності протягом кожного конкретного дня (рис.1.3). У випадках же прогнозування на невеликі періоди часу такі втрати можуть бути критичними. Наприклад, середня інтенсивність 5 кВт·год/день дає суттєво інші результати сумарної виробленої сонячної енергії, ніж використання точних даних 8 кВт·год/день протягом одного дня, після якого слідує кілька хмарних днів з інтенсивністю 2 кВт·год/добу.

Тому додатковими корисними, хоча й менш поширеними даними, є ймовірність наявності певної кількості хмарних днів за вибраний проміжок часу. За визначенням, хмарним зазвичай вважається день, протягом якого сонячна інсоляція менша на 50% від теоретично очікуваної величини. Ще важливим параметром є ймовірність повторення кількох хмарних днів підряд протягом року. Наприклад, у певному географічному місці 4 похмурих дні поспіль можуть виникати раз на рік, а 5 похмурих днів поспіль – раз на 5 років. Така інформація особливо корисна для оцінки технічних вимог до акумулюючих електричну

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

енергію пристроїв. Однак така інформація рідко уводиться до метеорологічних баз даних. Якщо вона потрібна для використання, то визначається з вихідних наборів баз даних про інтенсивність сонячного випромінювання.

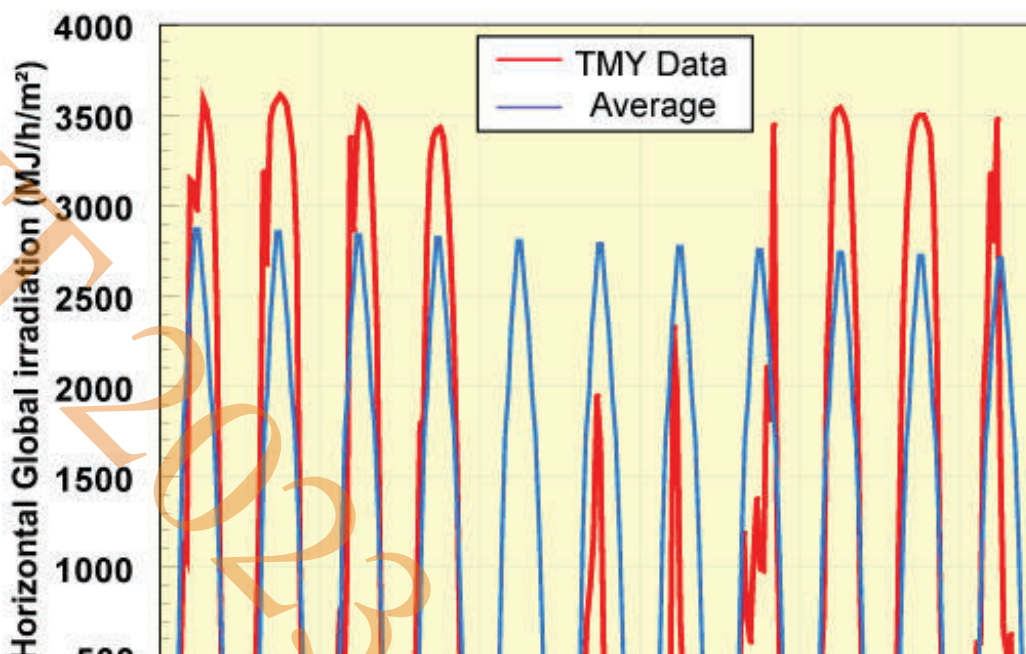


Рисунок 1.3 – Порівняння точних та середньодобових значень інтенсивності сонячного випромінювання [5]

Найпоширенішим форматом для даних про інтенсивність сонячного випромінювання є дані типового метеорологічного року (Typical Meteorological Year Data – TMY). Зокрема, такий формат використовується Національними лабораторіями відновлюваної енергії США. Однак середні добові дані та середні місячні дані про сонячне випромінювання також широко використовуються для приблизних оцінок параметрів сонячних енергетичних станцій.

Для визначення даних за форматом TMY проводяться тривалі метеорологічні вимірювання з інтервалом в одну годину протягом кількох років, щоб створити загальну картину місцевого клімату. Потім за сукупними даними досліджень для кожного місяця року вибирається найбільш репрезентативний варіант для місця розташування метеостанції. Це необхідно для правильної оцінки ступеню хмарної мінливості даної місцевості.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Процедура вибору репрезентативного варіанту місяця досить тривала. Протягом кількох років для кожного місяця визначається середня інсоляція. Потім розраховується для цього місяці середня інсоляція за весь кількарічний період вимірювання. У результаті метеорологічні дані для місяця, для якого середня інсоляція є найближчою до середнього значенню за весь період вимірювання, вибираються як дані ТМУ для цього місяця. Так отримуються дані у форматі ТМУ для кожного місяця в році.

У цілому слід зазначити, що не існує суворого світового стандарту для даних ТМУ. Тому користувач метеорологічними базами даних повинен самостійно налаштувати свої дані відповідно до досліджуваної проблеми або прикладного використання.

Проводячи моніторинг інтенсивності сонячного випромінювання, потрібно постійно контролювати достовірність та якість отримуваних даних. Для цього варто постійно застосовувати різні методи:

- порівняння результатів своїх вимірювань з розрахунками за простою теоретичною моделлю ясного неба (наприклад, модель Bird [5]);
- перевірка спостережуваних часів сходу та заходу Сонця з астрономічними даними;
- контроль відповідності спостережуваного сонячного полудня із реальним часом його настання;
- порівняння своїх даних з метеорологічними базами даних щодо ступіню хмарності над місцем встановлення станції за знітками та вимірами, отриманих супутниками.

Слід тут також відмітити, що значна частина доступних онлайн даних про сонячні енергетичні ресурси була зібрана саме із супутникових даних.

Одночасно, вимірювання високої якості вимагає постійних дій з технічного обслуговування приладів:

- ретельного очищення оптики приладів (вікон і куполів);
- візуального й приладового контролю рівня розміщення приладів;
- наявність і стан осушувача в робочому об'ємі сенсора;

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

- щорічне калібрування приладу (для приладів високої якості – не рідше рази на два роки).

Якісно зібрані таким чином метеорологічні дані можна використовувати для визначення сонячної інсоляції не лише при проектуванні фотоенергетичних систем, але і в сільському господарстві, кліматології, мореністиці та інших сучасних напрямках людської діяльності. На їх основі можна створювати моделі для теоретичних розрахунків, включаючи до них кілька поправочних коефіцієнтів.

Отже, бази даних моніторингу сонячного випромінювання мають містити кілька найбільш важливих параметрів. Основним із них є середнє значення освітленості за 1 хвилину. Вважається хорошою практикою також зберігати мінімальні та максимальні значення опромінення протягом однієї хвилини разом із відносним відхиленням опромінення від середнього. Крім того, рекомендується обробляти щохвилинні вимірювання та усереднювати сонячну інтенсивність протягом кожної години, протягом доби та протягом місяці шляхом інтегрування результатів моніторингу за різними інтервалами часу.

#### **1.4 Трекери в сучасних системах автоматичної орієнтації**

Фотоелектричні джерела енергії все інтенсивніше впроваджуються по всьому світу. Однак їх переривчаста вихідна потужність створює різні проблеми для планування, експлуатації та контролю мереж енергосистеми. Для часткового вирішення цієї проблеми перспективними вважаються різні системи стеження за Сонцем. Зокрема, питання автоматизації та ефективності одноосьових трекерів розглядаються в публікаціях [9–10], а двовісних – обговорюються в [11–12]. Їхні автори показали, що двовісні системи стеження забезпечують виробництво на 30–40 % більше електроенергії. Близький до цього ефект дають також одноосьові системи стеження, якщо їх переорієнтовувати на оптимальне положення 4 рази на рік.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Однак автоматичні трекери знаходять більш ширше застосування – вони конче необхідні в любых системах, де необхідно забезпечити точну орієнтацію не тільки на Сонце, а й на інший певний об'єкт (наприклад, супутник, радіостанцію, точку спостереження тощо). Особливо це стосується тих випадків, коли точка спостереження постійно рухається, наприклад, встановлена на певному транспортному засобі. Наша робота якраз спрямована на дослідження використання трекерів в метеорологічному моніторингу параметрів випромінювання Сонця.

Більшість систем стеження за Сонцем використовують метод на основі фотосенсорів або метод на основі астрономічних розрахунків положення Сонця протягом доби [13]. Показано, що системи стеження на основі оптичних датчиків дозволяють стежити за Сонцем лише за ясного неба та хороших погодних умов [14]. Другий тип керування системами стеження за Сонцем базується на різних алгоритмах і математичних розрахунках [15] рівнянь руху Землі навколо Сонця для визначення її точного положення в просторі.

Результати проектування та розробки різних автоматичних сонячних трекерів проаналізовано в [16], а алгоритми роботи сонячних трекерів досліджено в [17]. Результати цих публікацій показують, що створені трекерні системи та їх робочі алгоритми можуть бути легко інтегровані в сучасні автоматичні системи за допомогою швидкого прототипування на основі попередньо розроблених універсальних блоків. Такі пристрої є значним кроком для швидкого розвитку різних робототехнічних систем орієнтації у просторі, у тому числі автоматизованої дистанційної прокладки ліній мобільного зв'язку. Але найбільшою проблемою для його широкого використання є економічні показники. Зокрема, що стосується енергетики, то огляд літератури показує, що в умовах помірних географічних широт широке впровадження двовісних трекерних систем сьогодні стає економічно вигідним лише для малопотужних сонячних електростанцій з проектною потужністю до 10 кВт, якщо виконуються дві основні умови: а) їх вартість буде меншою. понад 30 % вартості сонячної електростанції; б) використання таких систем дозволяє автоматизувати весь процес налагодження

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

та позиціонування реєструючих сенсорів з мінімальною участю людини. Остання умова є важливою і для автоматичних систем моніторингу сонячного випромінювання. Розробці та дослідженню однієї з таких систем і надавалася основна увага даної роботи. У сонячній енергетиці автоматична система керування трекером одночасно забезпечує ряд додаткових сервісних функцій під час роботи сонячної електростанції як в автономному режимі, так і у взаємозв'язку з накопичувачами (наприклад, для генерації «зеленого» водню).

**Висновок.** Для розв'язання поставленої в завданні до магістерської роботи задачі, у якості давача оптимальним варіантом буде використати піргеліометр або кремнієвий фотоелектричний перетворювач (ФЕП). Автоматичну роботу проектованого пристрою може забезпечити двовісна трекерна система просторової орієнтації із електронним модулем автоматичного керування.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ АСТРОНОМІЧНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ НА СОНЦЕ

У наш час існує два основні підходи до проектування систем керування трекарами: на основі фотоелектричних сенсорів та на основі математичних рівнянь, які описують траєкторію руху Сонця на небесній сфері. Фотооптичний підхід передбачає введення в систему контролю кількох фотосенсорів, розміщених у різних частинах поворотної основи. За співвідношенням сигналів на цих сенсорах робиться висновок про напрямок переміщення поворотної основи в текучий момент часу. Численні дослідження, огляд результатів яких зроблено в [14], показують, що системи стеження на основі оптичних датчиків дозволяють надійно стежити за Сонцем лише за ясного неба, за хороших погодних умов та при відсутності різного виду оптичних завад. Таким чином, такі системи мають цілий ряд недоліків, які не дозволяють розробляти на їх основі якісні пристрої неперервного моніторингу параметрів сонячного випромінювання.

Враховуючи проведений критичний аналіз ми зупинили свій вибір на астрономічно-географічному методі контролю положення Сонця. Він використовує систему рівнянь, які пов'язують між собою астрономічні кутові координати миттєвого положення Сонця на небесній сфері з географічними координатами місця розміщення пристрою моніторингу.

Аналіз наявної інформації показує [18], що астрономічні моделі, які використовують пряме відстеження кутових координат розташування Сонця на небесній сфері в реальному часі, описуються системою досить складних тригонометричних рівнянь. Практичне використання такої моделі вимагає постійних обчислень кількох десятків значень тригонометричних функцій. Тому пристрої орієнтації досить складно розробити з використанням стандартних мікроконтролерів (МК) і навіть промислових логічних контролерів, оскільки вони не мають достатньої обчислювальної потужності для швидкого виконання подібних математичних операцій у режимі реального часу. А контролери з

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

вбудованим спеціальним мікропроцесором для виконання складних математичних операцій є дорогими для досліджуваних нами пристроїв. Це робить більш актуальним застосування набагато простіших астрономічних моделей для мікроконтролерних пристроїв керування трекерами.

У нашій роботі [19] була створена проста математична та астрономічна модель видимого руху Сонця на небесній сфері. Цей рух описується лише двома змінними координатами: астрономічним місцевим сонячним часом  $t$  (у хвилинах) і широтою  $\varphi$  (у градусах) точки на земній кулі, де працює система орієнтації. За цими двома вихідними координатами розраховується часовий кут положення Сонця  $\psi = (t \pm 720)/4$  і кут схилення Сонця в  $N$ -ту добу року  $\delta = \varphi + 23,45^\circ \cdot \sin[0,986 \cdot (N + 284)]$ . У наведених співвідношеннях знак «мінус» відповідає проміжкам часу до полудня, а знак «плюс» – після полудня. Це пов'язано з різним нульовими точками відліку астрономічного часу (опівночі) і часового кута (опівдні). У результаті координати азимута Сонця  $\alpha$  до полудня будуть від'ємними, а після полудня додатними. Таке вираження азимутів Сонця дуже незручне для програмування систем наземного орієнтування на базі МК. Тому ми пропонуємо використовувати більш простий алгоритм програмування, який базується на розрахунках моментів сходу та заходу Сонця для конкретної географічної зони.

Наші математичні розрахунки та аналіз показують, що з високою точністю для систем моніторингу часові кути сходу та заходу Сонця  $\psi_{EW}$  можна обчислити за простим співвідношенням:

$$\cos\psi_{EW} = \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta, \quad (1)$$

де  $\varphi$  – географічна широта точки роботи приладу.

Наведене рівняння дає два значення часового кута: для моменту сходу сонця  $\psi_E$  (в діапазоні від 0 до  $-180^\circ$ ) і його заходу  $\psi_W$  (в діапазоні від 0 до  $+180^\circ$ ). Проте в наземних системах орієнтування зручніше вважати, що протягом доби поточний часовий кут  $\psi$  може змінюватися від початкового значення на сході

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

сонця  $\psi_E$  до значення  $2\psi_W$ . Цей діапазон кутів  $\psi$  відповідає тривалості сонячного дня для кожної доби  $i$ , відповідно, визначає інтервал часу надходження інтенсивного сонячного випромінювання на сенсор системи моніторингу. Таким чином, запропонована нами математична модель керування трекером базується на визначенні МК положення сенсора для кожної точки поточного значення сонячного кута  $\psi$  в діапазоні від 0 до  $2\psi_W$ . При цьому значення кута  $\psi_W$  розраховується МК тільки один раз на добу.

Часовий кут  $\psi$  однозначно задає географічні координати положення Сонця на небесній сфері відносно точки розташування станції моніторингу на поверхні Землі. Однією з таких координат є кут висоти Сонця  $h$ , який легко обчислити за співвідношенням [18]:

$$\sin h = \cos \psi \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta. \quad (2)$$

Друга координата – кут азимута положення Сонця  $\alpha$ . Існує простий математичний зв'язок між азимутом і часовим кутом Сонця:  $\sin \alpha = \cos \delta \cdot \sin \psi / \cos h$  [11]. Однак наше дослідження показало, що у випадку систем наземної орієнтації це співвідношення не працює добре для часових кутів, близьких до кутів сходу та заходу Сонця. На рис. 2.1 наведено залежність кута  $\alpha$  від змінної  $\psi$ , розраховану за вказаним співвідношенням та за точними астрономічними даними [18] для географічної точки м. Ужгород. Як видно із цих графіків, для досить тривалих періодів часу після сходу та перед заходом Сонця наявні суттєві відхилення між двома залежностями, які досягають  $15^\circ$ . Такі відхилення від оптимальної орієнтації площини сенсорів будуть призводити до великих похибок вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання.

Аналіз показує, що для програмування МК більш адекватним є трохи складніше математичне співвідношення [19]:

$$\cos \alpha = (\sin \varphi \cdot \sin h - \sin \delta) / (\cos \varphi \cdot \cos h). \quad (3)$$

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Такий висновок підтверджується результатами розрахунків за рівнянням (3), наведеними на рис. 2.1 (графік 3).

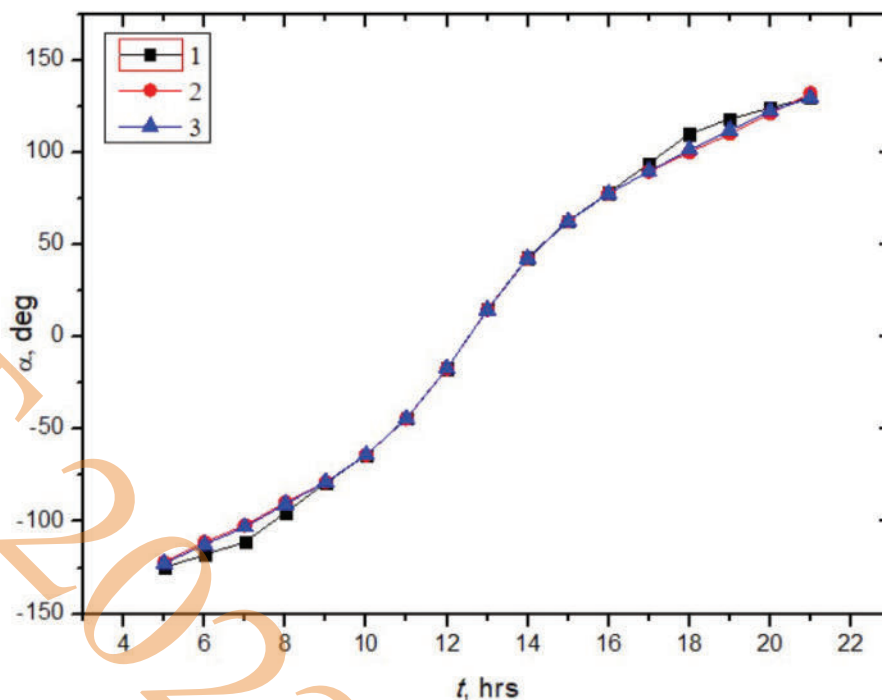


Рис. 2.1. Зміни азимутального кута положення Сонця на небесній сфері протягом доби 21 червня для Ужгородської області, розраховані: за математичною моделлю [11] (крива 1), за точною астрономічною моделі [18] (крива 2) та за нашою математичною моделлю [19] (крива 3)

Таким чином, запропоновані рівняння (2) і (3) є достатньо точним відображенням математичної моделі орієнтації на Сонце наземних трекерних систем з малопотужними МК. Така модель потребує розрахунку лише восьми незалежних значень тригонометричних функцій на кожному кроці переорієнтації трекера. Такі розрахунки повинні займати менше хвилини часу роботи мікропроцесора МК, оскільки саме такий інтервал часу між двома послідовними положеннями сенсора рекомендується для проведення точного метеорологічного моніторингу сонячного випромінювання [20]. За даний час вектор падіння випромінювання на поверхню сенсора зміниться не більше ніж на  $1^\circ$ . Таким чином, запропонована нами математична модель може бути успішно використана в системах керування наземними трекерами для точного моніторингу сонячного

випромінювання з відхиленням площини сенсора від оптимального положення менше ніж на  $1^\circ$ .

Для сонячної енергетики дослідження показують [9], що у випадку двовісних трекерних систем для досягнення максимальної виробленої потужності переорієнтацію сонячних панелей слід проводити через інтервал часу не більше 5 хвилин. За такий проміжок часу кут орієнтації панелей на Сонце відхиляється від оптимального значення не більше ніж на  $2^\circ$ . Це відповідає втратам виробленої електроенергії близько 1%. Таким чином, за 5 хвилин система стеження повинна виконати всі дії, пов'язані з переміщенням панелей на нове положення. Такі дії містять врахування інерції механічних модулів трекера, оцінку МК початкового стану системи, керування механізмами, реалізацію самого процесу переорієнтації, введення необхідних інтервалів затримки між операціями та контроль кінцевого стану системи. Щоб забезпечити такі показники МК повинен витратити менше 2 хвилин на розрахунок кутових параметрів нового положення сонячних панелей.

Для досліджень точного часового інтервалу, який необхідний для розрахунку МК кутів орієнтації  $\alpha$  та  $h$ , ми розробили невелику програму, лістинг якої наведено нижче. У основу роботи програми покладено принцип відображення часу в мілісекундах, який проходить між двома подіями в емуляторі порту МК у програмній оболонці Arduino IDE. Результат роботи програми відображається безпосередньо на відеотерміналі комп'ютера, до якого підключений відповідний МК)

```
Void setup() {  
    // на дане місце програми ставиться початковий фрагмент програми  
    serial.begin(9600);  
    long int t1 = millis();  
    task_whose_time_to_be_measured();  
    long int t2 = millis();  
    serial.print(«Час затрачений на виконання завдання =»);  
    serial.print(t2-t1);  
    serial.print(«мс»);  
}
```

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

```

    }
    Void loop() {
        // на дане місце ставиться базовий фрагмент програми, тривалість якого
        // слід періодично розрахувати
    }

```

Програмні коди для конкретних розрахунків та отримані при їх виконанні кількісні результати наведені в додатку А. Для експериментальних досліджень ми писали окремі невеликі програми на мові C++, кожна з яких відповідала одному окремому кроку розрахунків наведених вище тригонометричних функцій. Оскільки виконання коду даних програм моделювалось в оболонці Arduino IDE із підключенням до комп'ютера через USB-порт модуля МК Arduino Uno, то тривалість виконання кожної такої програми визначалась у реальному часі МК. Узагальнення отриманих нами у процесі досліджень результатів наведено на рис.2.2. На ньому вказано номери конкретних операцій переорієнтації та їх тривалість. Вказані номери одночасно відповідають і пунктам алгоритму роботи трекерної системи, які будуть розглянути нами в наступному розділі.

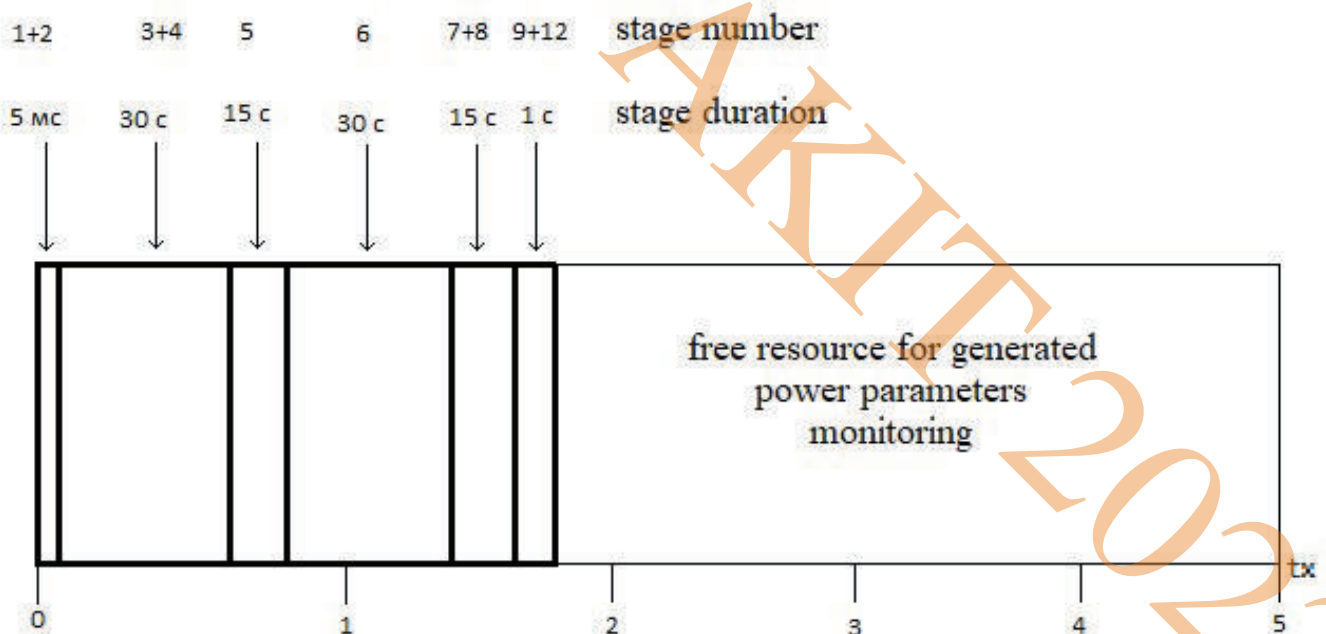


Рисунок 2.2 – Часова діаграма виконання МК ATmega 328R операцій одного кроку переорієнтації двовісного трекера

Результати наших досліджень показали, що звичайний 8-розрядний МК АТМega 328R з тактовою частотою 16 МГц приблизно за 1 хвилину встигає виконати всі необхідні математичні операції розрахунку кутів координат Сонця, які містять до 15 значень тригонометричних функцій. Виконання ж всіх практичних дій одного кроку переорієнтації трекера такий МК повинен здійснювати менше, ніж за 2 хвилини.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

# 3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОДЕЛІ ТРЕКЕРА

## 3.1 Структурна схема моделі

Процес орієнтації на Сонце полягає в регулюванні положення основи датчика сонячної інтенсивності таким чином, щоб їх площина завжди була перпендикулярна напрямку падіння прямих сонячних променів. МК має керувати моделлю двовісної системи орієнтації. Розроблена нами структурна схема даної системи наведена на рис.3.1.

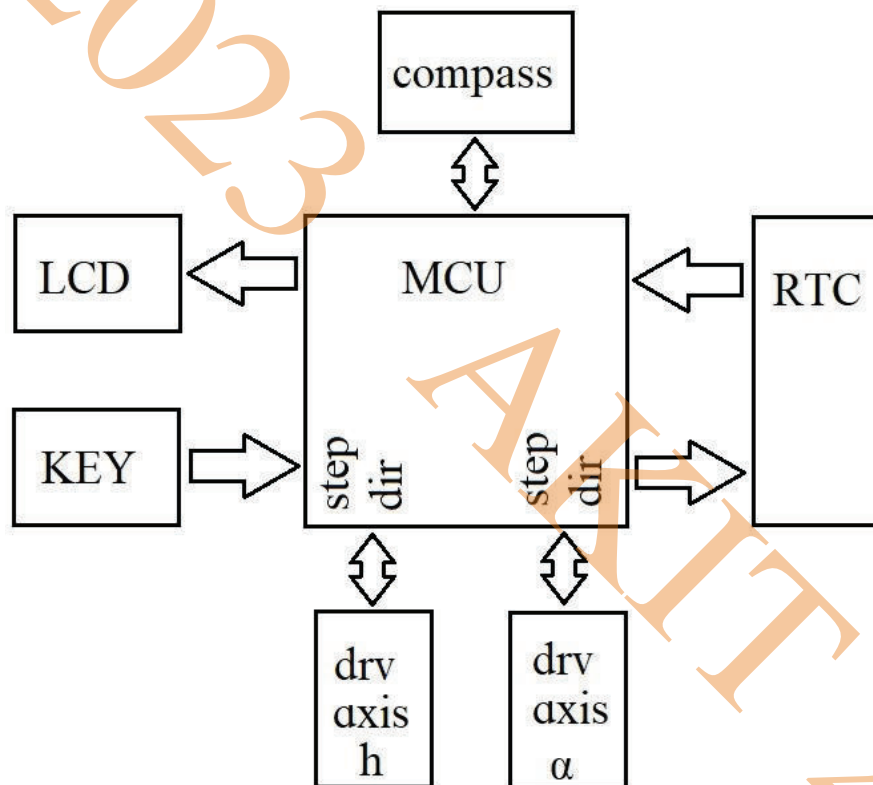


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі трекерної системи орієнтації на Сонце

Відповідно до наведеної структурної схеми електронна частина моделі містить лише три автоматичні модулі: електронний компас (блок compass), електронний годинник реального часу (блок RTC) і МК (блок MCU). На першому

етапі налаштування МК активно співпрацює з оператором трекерної системи. Для цього використовуються сервісні модулі світлодіодного дисплея (блок LED) і клавіші управління (блок KEY).

У відповідності із завданням на проектування, електронна частина моделі періодично генерує серію імпульсів на своїх двох вихідних каналах (step dir), які керують драйверами орієнтації трекера за кутом висоти (блок drv axis h) та кутом азимута (блок drv axis  $\alpha$ ). При цьому відносно горизонтальної осі поворотна площина моделі обертається відповідно до висоти Сонця, а відносно вертикальної осі – відповідно азимутальної орієнтації Сонця.

Тепер розберемо послідовність і математичну чи фізико-технічну сутність кожного кроку тих дій, управління якими має визначати МК і реалізацію яких повинні забезпечувати механізми приводу двовісної системи орієнтації. Розробка таких механізмів здійснюється з урахуванням підходів до створення кутових переміщень з використанням лінійних математичних описів у часовій та частотній областях. Зауважимо, що згідно з нашою математичною астрономічною моделлю процесу орієнтації, усі значення часу повинні вводитися та використовуватись у розрахунках МК у хвилинах, а всі кутові значення – у градусах.

Згідно із створеною нами астрономічною математичною моделлю, існують кілька базових вихідних параметрів, які необхідні для встановлення та початкової інсталяції трекерів у заданій географічній точці місцевості. На їхній основі програма МК здійснює керування системою орієнтації при її технічній експлуатації.

Згідно із завданням на проектування ми маємо керувати конкретною моделлю двовісної системи постійної орієнтації на Сонце. Проаналізуємо логічну послідовність та фізико-технічну сутність кожного кроку тих дій, керування якими має визначати МК та виконання яких мають забезпечувати виконуючі механізми приводу вибраної двовісної системи орієнтації. При цьому весь створений алгоритм буде представлений у вигляді кількох етапів з окремих дій оператора або самого МК.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

### 3.2 Початкова інсталяція всієї системи при її встановленні та налаштуванні

На початку інсталяції слід перевірити правильність монтажу всіх конструктивних, механічних, електричних та електронних модулів системи орієнтації. При цьому поворотна площина має знаходитися у вихідному початковому положенні. У цьому положенні кінцеві датчики будуть генерувати для МК спеціальні сигнали дозволу розпочинати роботу.

Потім проводиться початкова установка всієї системи моделі трекера. Для цього модель розміщується і закріплюється на несучій основі в початковому стандартному положенні.

Також під час початкової інсталяції в пам'ять вводиться кілька локальних констант, які встановлюють зв'язок внутрішнього таймера МК з поточною датою і поточним місцевим часом. Це дозволяє МК обчислювати точні значення сонячного кута в будь-який час кожного дня календарного року відповідно до розглянутої вище астрономічної моделі руху Сонця.

У послідуєчому перший етап роботи з моделлю трекера містить такі наступні основні дії.

1. Перевірка розташування поворотної основи моделі у вихідному стандартному початковому положенні за сигналами відповідних кінцевих датчиків і геомагнітного датчика.

2. Оператор налаштовує годинник реального часу на місцевий середній сонячний час і вводить дату початку функціонування моделі.

3. Організація передачі реального сонячного часу та дати текущего дня від годинника до МК.

4. Введення в пам'ять системи значення параметра  $p$  переходу на літній чи зимовий час у вигляді константи.

5. Введення в пам'ять системи дат осіннього та весняного переходів з одного часу на інший.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

6. Введення в пам'ять системи константи номера  $N_T$  часового поясу місцевості, де встановлюється модель. При цьому слід врахувати знак цього номера: він від'ємний для західної півкулі, та додатній - для східної.

7. Виконання прив'язки моделі до географічних координат точки встановлення на земній кулі. Для цього вводиться в пам'ять системи у вигляді константи географічної довготи  $D_L$  місцевості встановлення моделі. Ця константа вводиться у градусах із врахуванням її знаку: від'ємна для західної півкулі, та додатна - для східної).

8. Аналогічно до попереднього пункту вводиться константа широти ( $\varphi$ ) місця розташування моделі у градусах.

9. Задання технічних топографічних координат площини основи, на якій монтується модель. Такими топографічними координатами є кут нахилу площини основи відносно площини горизонту ( $\beta$ ) і кут орієнтації цієї основи відносно напрямку на астрономічний південь ( $\alpha_0$ ). Ці два кути також вводяться як дві константи в пам'ять МК.

10. При необхідності оператор вводить у пам'ять системи середні поправки впливу топографії оточуючої модель місцевості на час сходу  $\Delta t_E$  та заходу  $\Delta t_W$  Сонця у хвилинах.

11. Розрахунок МК константи часової поправки на географічну довготу місця встановлення моделі як  $\Delta\psi = 4 \cdot (15^\circ \cdot N_T - D_L)$  у хвилинах. Даний параметр також заноситься у пам'ять МК.

12. Введення в пам'ять системи інтервалу часу  $T$  (у хвилинах), який задає періодичність сеансів переорієнтації поворотної площадки моделі (як правило, величина  $T$  має бути не меншою 2 хвилин).

Як видно із описаної послідовності дій, всі базові астрономічні та географічні величини задаються оператором при початковій інсталяції системи в місці експлуатації і зберігаються в енергонезалежній пам'яті. Наше моделювання показало, що лише 1 кБ пам'яті МК достатньо для розміщення всіх цих даних. Якщо з якихось причин час енергонезалежного годинника збивається, то операцію його введення в систему слід виконати заново.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

### 3.3 Етап підготовки параметрів керування орієнтацією на даний текучий день

Даний етап містить два кроки: короткий стартовий на початку кожного дня і послідує періодичну роботу.

Короткий стартовий крок визначає дії МК, коли розпочинається кожний новий календарний день. Він полягає в обчисленні ряду величин для даного дня на основі відображення дати годинника реального часу та інших параметрів-констант із системної пам'яті. У цьому режимі МК виконує такі основні дії:

1. Обчислює та запам'ятовує порядковий номер  $N$  дня роботи системи орієнтування в поточному році, вважаючи перше січня першим днем року, а також розраховує добовий кут  $B = 0,986 \cdot (N - 81)$ .

2. Розраховує та запам'ятовує поправку на місцевий сонячний час  $\Delta t_E = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B)$ .

3. Обчислює та запам'ятовує астрономічний кут нахилу Сонця  $\delta = 23,45^\circ \cdot \sin[0,986 \cdot (N + 284)]$ .

4. Розраховує та запам'ятовує часовий кут сходу сонця на поточний день  $\psi_{EW} = \arccos(\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)$ .

5. Обчислює та запам'ятовує кількість хвилин, які проходять від початку поточної доби до моменту сходу Сонця  $t_E = 4 \cdot (180 - \psi_{EW})$ .

6. Розраховує час запуску системи орієнтування поточної доби у вигляді кількості хвилин, які відраховуються від початку доби до початку наступного сеансу системи орієнтування  $t_B = t_E + \Delta t_E$ . Цей параметр вноситься до спеціального реєстру RB МК.

7. МК переходить в режим очікування.

8. У режимі очікування МК починає відраховувати загальну кількість хвилин  $t$ , які минули з початку нової поточної доби.

9. Як тільки значення  $t$  перевищує значення параметра  $t_B$ , записане в реєстрі поточного стану RB, програма в МК формує внутрішнє переривання. За

						Арк.
						39
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	

згенерованим перериванням МК переходить до наступного етапу реалізації свого алгоритму роботи.

Короткий стартовий етап не обмежений інтервалом часу, необхідним для його виконання, оскільки його можна проводити вночі. Зокрема, виконання цього кроку МК можна логічно «прив'язати» до моменту переходу годинником реального часу на нову добу. На цьому етапі МК виконує лише математичні операції розрахунків необхідних даних.

### **3.4 Етап періодичної переорієнтації поворотної основи моделі в напрямку на Сонце протягом світлового дня**

Алгоритм роботи системи трекара на цьому етапі наведено в додатку Б. Саме ця частина алгоритму МК є критичною до часових інтервалів виконання окремих операцій трекаром. Тому, одночасно з аналізом кожної з операцій, ми також розглянемо часові рамки, протягом яких цю операцію може виконати простий МК. Для цього також використаємо робочі дані [21], які є оптимальними щодо часових режимів виконання різноманітних технічних операцій автоматичними системами на базі 8-розрядних МК.

Під час періодичного режиму роботи трекара у світлий час доби МК контролює виконання наступних пунктів алгоритму.

1. Перевіряє сигнали датчиків, які визначають межі переміщення поворотної площадки давача інтенсивності. Якщо всі вони генерують сигнал «true», то МК переходить до наступної операції. Якщо на виході датчиків з'являється сигнал «falsh», то МК генерує процедуру для запуску переорієнтації поворотної площадки по двох осях і пошуку іншого крайнього положення площадки до появи сигналу «true». Ця дія можлива в екстрених ситуаціях або при первинному монтажі поворотної площадки сонячного давача. Подальше орієнтування поворотної площадки давача здійснюється за даними датчика геомагнітного положення. Якщо протягом встановленого часу (часу переорієнтації площадки з одного крайнього положення в інше) сигнал «true» не надходить, система

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

переходить в аварійний режим з наступним повідомленням про це оператора.

Двовісна система стеження повинна бути оснащена щонайменше чотирма датчиками кінцевого положення з аналоговим або цифровим виходом. Виконання МК коду операції «опитування» стану одного такого датчика за результатами моделювання займає менше 1 мс, що для чотирьох датчиків за відсутності нештатних ситуацій дає тривалість операції біля 4 мс.

2. МК розраховує часовий кут  $\psi = 0,25 \cdot [t - 4 \cdot (15^\circ \cdot N_T - D_L) + \Delta T_E + p \cdot 60]$ , за відомими величинами зі своєї пам'яті. Під час обчислень МК виконує близько 10 різних арифметичних операцій. При цьому виконання практично кожної дії супроводжується зверненням до пам'яті для читання тієї чи іншої константи. У таких умовах на виконання кожної арифметичної операції в середньому виділяється кілька сотень тактів мікропроцесора, що в цілому визначає тривалість цього етапу близько 1 мс. Моделювання виконання програмного коду цієї операції на реальному МК також дає її тривалість менше 1 мс.

3. Проводиться розрахунок МК кута висоти Сонця  $h = \arcsin(\cos\psi \cdot \cos\varphi \cdot \cos\delta + \sin\varphi \cdot \sin\delta)$  для даного моменту часу. Моделювання на МК АТМega 328 показало, що тривалість цих обчислень визначається необхідною точністю результату. Для нашої системи ми обмежилися абсолютною похибкою  $\pm 0,1^\circ$ . При цьому тривалість розрахунку для будь-якого набору вхідних даних не перевищувала 30 секунд.

4. Розраховується кут висоти поворотної площадки відносно несучої основи для крокового двигуна орієнтації сонячного давача відносно горизонтальної осі  $\omega = h - \beta$ . Тривалість таких розрахунків може бути проігнорована в нашому аналізі через їх невеликий розмір.

5. МК генерує керуючі імпульси для сервоприводу крокового двигуна висоти поворотної площадки, який орієнтує площину давача на цей кут  $\omega$  по висоті. Час виконання цієї операції неможливо адекватно змоделювати без наявності трекерної системи в реальних умовах роботи. Але для надійного виконання комплексу дій цього етапу слід очікувати середній час не менше 15 с, оскільки він включає реалізацію багатьох активних і пасивних функцій керування

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ				41

з виділенням інтервалів «загасання» інерційних механічних та електричних збурень, які виникають при імпульсній переорієнтації поворотної площадки сонячного давача з одного положення в інше. Тому тривалість цього етапу суттєво залежить від конкретних технічних властивостей усіх задіяних пристроїв трекерної системи.

6. Розраховується азимут положення Сонця на поточний час  $\alpha = \arccos[(\sin\varphi \cdot \sinh - \sin\delta)/(\cos\varphi \cdot \cosh)]$ . Аналогічно до пункту 3, цей процес триває до 30 секунд.

7. Визначається азимутальний кут орієнтації поворотної площадки, який буде рівний:

- $(125^\circ - \alpha)$ , якщо  $t < 720$  хвилин;
- $(125^\circ + \alpha)$ , якщо  $t > 720$  хвилин.

Тривалість таких дій дуже коротка і нами не враховується.

8. МК генерує керуючі імпульси для сервоприводу крокового двигуна азимута поворотної площадки, який орієнтує її площину на необхідний кут азимутальної орієнтації. Тривалість такого процесу становить близько 15 с, аналогічна пункту 5.

9. МК записує у свій реєстр  $R_B$  нове значення параметра стану, яке дорівнює  $t_B + T$ .

10. МК переходить в режим очікування, поки триває процедура розрахунку координат для наступного кроку переорієнтації поворотної площадки ( $\Delta t = 5$  хв.). Як тільки його величина перевищить нове значення параметра  $t_B$ , записаного в реєстрі текучого стану  $R_B$ , то програма МК генерує внутрішнє переривання. За даним перериванням МК переходить до чергового кроку переорієнтації поворотної площадки сонячного давача в оптимальне положення згідно з розрахунками, контролюючи поточне положення відповідно до даних геомагнітного датчика.

11. Кроки переорієнтації здійснювати до того моменту, поки для змінної  $t$  виконуватиметься умова:  $t < (1440 - t_E - \Delta t_w)$ . Якщо дана умова більше не

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

виконується, то МК переводить поворотну площадку у стан «паркування», а систему орієнтації в режим очікування.

12. Режим очікування зберігається до тих пір, поки годинник реального часу не передасть МК сигнал досягнення моменту «опівночі». За цим сигналом МК обнулює змінну  $t$  і розпочинає її новий рахунок для нової доби, яка наступила. Одночасно переводиться виконання програми на позицію 1 другого етапу даного алгоритму.

Моделювання показало, що виконання дій МК за пунктами: від 9 до 12 триває менше 1 секунди реального часу.

Аналіз часової діаграми рис. 2.2 та результатів досліджень тривалості етапів описаного вище алгоритму показує, що використання запропонованої спрощеної математичної моделі руху Сонця на небесній сфері дозволяє простим МК скоротити час одного кроку переорієнтації системи трекером до 1 хвилини без зниження точності встановлення позиційних кутів.

### **3.5 Аналіз перспектив використання спроектованої системи орієнтації**

Проведений в нашій роботі аналіз показує, що для цілей моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання в сонячній енергетиці економічно і технічно невиправдано проводити етапи переорієнтації поворотної площадки сонячного давача частіше одного разу на 5 хвилин. Це означає, що розробники систем моніторингу можуть мати вільний ресурс часу для забезпечення у програмі МК додаткових важливих сервісних функцій. Зокрема, це може бути: постійний моніторинг електроенергії, яка виробляється сонячною електростанцією, періодичне вимірювання температури, запис результатів моніторингу в базу даних, встановлення різких відхилень від оптимального режиму роботи сонячного давача та повідомлення про це оператора. Крім того, вільні ресурси МК можна використовувати для оптимальної координації роботи трекерних систем з іншими базовими модулями сонячних електростанцій: пристроями МРРТ, інверторами, акумуляторними батареями тощо. Такі функції

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

значно підвищують маркетингові параметри трекерних систем без значних додаткових економічних витрат на їх виробництво, установку та експлуатацію.

Як показали результати нашого дослідження, прості 8-розрядні МК мають достатній часовий ресурс для розширення функціональних можливостей системи трекера із запропонованим нами алгоритмом. Однак такий МК також повинен мати достатню кількість аналогових і цифрових портів введення/виведення даних, необхідних для організації ефективної взаємодії між різними пристроями трекера та додатковими зовнішніми приладами.

На нашу думку, використання трекерних систем із розробленим нами алгоритмом функціонування є особливо ефективним також для повністю автономних сонячних електростанцій невеликої потужності близько 10 кВт, які забезпечують енергією окремі домогосподарства чи невеликі підприємства. Це особливо актуально, коли ці об'єкти розташовані далеко, коли вартість прокладання стандартної електромережі до них може перевищувати вартість будівництва автономної електростанції. Таке використання трекерних систем має й ряд інших переваг: короткий термін окупності (до 10 років); екологічна безпека і тиша; значна економія фінансових коштів у майбутньому при підвищенні тарифів на енергоносії; енергетична незалежність від локальних і глобальних економічних і політичних змін.

Однак, основним недоліком сонячних електростанцій із системами орієнтації залишається добова та сезонна нерівномірність вироблення енергії. Вони не можуть постійно забезпечувати енергетичні потреби відповідного домогосподарства протягом року. Визначальним параметром тут є середньодобова сонячна інсоляція протягом різних місяців і всього року. Цей параметр особливо важливий для зимових місяців, оскільки в цей період енергетичні потреби максимальні, а тривалість дня мінімальна. Крім того, зимова погода в географічних умовах Закарпаття переважно хмарна з дощами (рис.3.2). Наш спрощений аналіз погодних даних у 2022 та 2023 роках для цього регіону у зимовий період показує, що приблизно третина днів сонячна, третина днів малохмарна, третина повністю хмарна з дощем та снігом. Відповідно,

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

середньодобовий рівень вироблення електроенергії в зимовий період не перевищує 10% від проектної потужності сонячної електростанції.

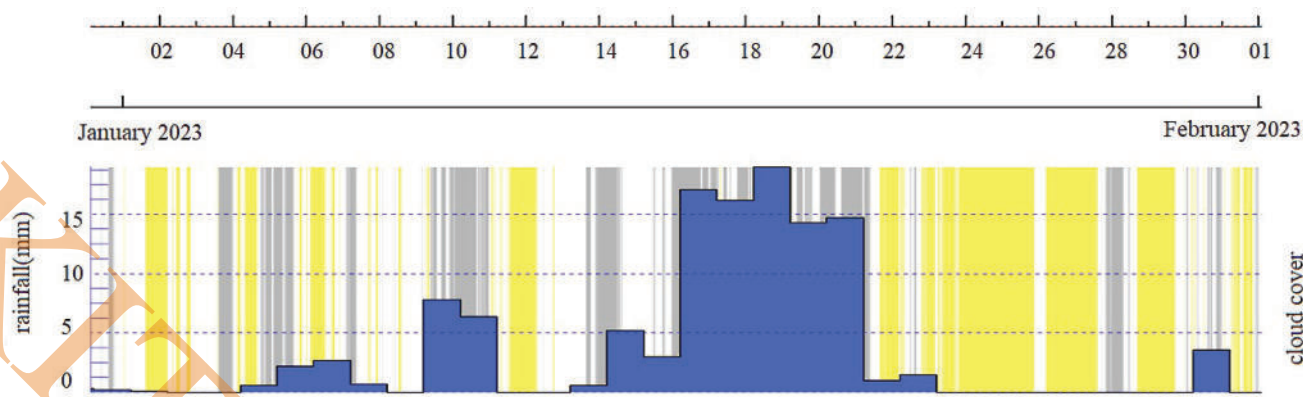


Figure 5. Statistical meteorological data for cloudiness and precipitation during January 2023

У цьому випадку використання трекерів повинно забезпечити значно більшу потужність генерації залишкової електричної енергії, яка може накопичуватися різними пристроями. Сьогодні основними накопичувальними пристроями є хімічні акумуляторні батареї. Проте концепція розвитку енергетики Європейського Союзу передбачає стратегічний перехід на «зелений» водень як основний екологічно чистий енергоносіє. Тому в перспективі доцільно передбачити будівництво автономних сонячних електростанцій у комплексі з трекерами та пристроями для виробництва «зеленого» водню. При цьому забезпечується максимальне використання електростанцією сонячної інсоляції та створення необхідних запасів палива для обігріву приміщень у зимовий період у вигляді «зеленого» водню. Малопотужні системи виробництва та зберігання «зеленого» водню сьогодні мають вартість, порівнянну з вартістю самої електростанції, тоді як встановлення системи орієнтації з астрономічним алгоритмом роботи не перевищує 10% цієї вартості. Таким чином, для комплексних автономних енергетичних систем типу «електрична енергія + зелений водень» використання трекерів з алгоритмом роботи на основі астрономічної моделі орієнтації за Сонцем є вигідним як технічно, так і

економічно.

### Висновки до розділу 3

1. Створений алгоритм, який дозволяє розробляти прості та дешеві системи автоматичної орієнтації на Сонце різних типів пристроїв, у тому числі і систем моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання.

2. Одним із шляхів вирішення проблем ресурсозбереження є максимально ефективно використання матеріально-технічних об'єктів тих сонячних електростанцій, які будуються. Це пов'язано з тим, що виробництво таких об'єктів потребує значних витрат сировини та енергії. Тому їх експлуатація повинна давати максимально можливий позитивний ефект. У зв'язку з цим досить перспективним є використання автономних автоматичних систем орієнтації на Сонце для підвищення ефективності роботи малих сонячних електростанцій. Але застосування таких систем буде економічно вигідним, якщо собівартість їх виробництва не перевищуватиме 30% вартості сонячної електростанції. Виконання цієї умови можливе при використанні в таких системах простих дешевих МК, які працюють за дуже надійним і в той же час досить простим алгоритмом. Запропонована астрономо-географічна модель і розроблений на її основі наш алгоритм повністю відповідають цим умовам. Таким чином, результати проектування даного розділу можуть бути корисними і для розробки високоефективних автономних сонячних електростанцій.

3. Результати наших досліджень розробленого алгоритму показують наступні основні переваги його використання в трекерах сучасних систем орієнтації:

- систему можна використовувати для обладнання, встановленого в будь-якій точці поверхні земної кулі;
- можливість застосування в системах керування простих 8-розрядних МК;
- навіть для таких простих МК математичний розрахунок координат нового положення Сонця на небесній сфері та процес переорієнтації сонячних панелей на нове положення системою керування в реальному часі займає менше двох хвилин;

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

- процес переорієнтації сонячних панелей може здійснюватися з інтервалом менше 5 хвилин, що забезпечує практично повне використання сонячної інсоляції протягом світлового дня;

- МК має достатньо вільного робочого часу для введення в систему керування додаткових важливих функцій керування режимами роботи різних пристроїв (наприклад, для сонячної електростанції це моніторинг параметрів генерованої потужності та дистанційна передача даних про ненормальні режими роботи);

- для більш повної автоматизації процесу налаштування трекера в електронний блок керування доцільно ввести вбудований гравітаційно-магнітний датчик;

- на базі єдиного МК можна створювати системи керування цілими автоматичними енергетичними комплексами, наприклад – сонячною електростанцією та модулем генерації «зеленого» водню.

Таким чином, розроблений нами в даному розділі алгоритм дає можливість створювати системи керування орієнтацією на Сонце з близькими до граничних техніко-економічними параметрами.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

#### 4 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОДЕЛІ СТАНЦІЇ

Використаємо результати проведеного вище комплексного аналізу процесів функціонування автоматичної станції моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання та основних етапів розробленого алгоритму програми її МК для проектування структурної схеми електронної системи автоматичного керування нашої моделі. Кінцеві результати процесу проектування наведено в додатку В.

Відповідно з проведеними вище експериментальними дослідженнями керуючим пристроєм моделі цілком може служити сучасний МК малої або середньої функціональної потужності. При використанні будь-якого МК у вигляді «чистої» мікросхеми завжди виникає не проста конструктивна задача здійснити його електронну зовнішню обв'язку різними допоміжними та обслуговуючими компонентами. Розв'язання даної задачі вимагає додаткових суттєвих затрат часу, матеріалів і коштів. На нашу думку, більш простим і економічно вигідним є рішення застосувати у складі нашого електронного пристрою замість окремого МК вже готового функціонально завершеного модуля. Результати проведених нами досліджень свідчать, що за технічними параметрами даним модулем може бути один із приладів сучасної платформи італійської фірми Arduino. Розроблені даним виробником модулі містять усі необхідні компоненти зовнішньої комутації МК, а їх проектування виконане на хорошому професійному рівні. Тому саме такий електронний модуль Arduino виберемо в якості центрального керуючого пристрою моделі автоматичної станції моніторингу (додаток В). Такий підхід значно спрощує нам всі етапи розробки системи керування станції та процесу програмування її МК.

Розроблений нами алгоритм функціонування моделі станції моніторингу в своїй логічній основі будується на використанні реального сонячного (або астрономічного) часу. Тому у склад системи контролю необхідно ввести

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

обов'язковий модуль, який буде забезпечувати точний неперервний відлік такого часу. – блок «Годинник реального часу» в додатку В.

Для збереження всіх необхідних для роботи системи керування базових даних, слід використати енергонезалежну постійну пам'ять. При цьому мікросхему такої пам'яті можна ввести у блок годинника реального часу, оскільки такі сучасні модулі вже мають у своїй структурі дані чіпи. На структурній схемі це блок «Пам'ять годинника».

Необхідно додатково відмітити, що сучасні МК мають власний вбудований у внутрішню електронну структуру лічильник-таймер. При цьому його роботу можна легко ініціалізувати, використовуючи спеціальну програмну функцію *millis ()* в комп'ютерній оболонці Arduino IDE. З моменту свого запуску такий таймер-лічильник розпочинає відлік свого внутрішнього часу в мілісекундах. Але такі таймери можуть обслуговувати процеси, тривалістю лише до кількох годин, що є недостатньо для нашої системи керування. Звичайно, можна підібрати МК з вбудованими в чіп годинником, який відстежує значні проміжки часу до кількох діб. Але у складі нашої системи керування використання МК з внутрішнім годинником є недоцільним із-за кількох причин:

- такі МК не придатні для неперервного відліку часу протягом кількох років, що є обов'язковим для нашої моделі станції;
- відлік часу в таких МК розпочинається заново після кожного відключення джерела живлення;
- у чіпі МК відсутнє автономне внутрішнє живлення – тому при будь-якому відключенні зовнішнього джерела живлення всі покази годинника обнулюються і втрачаються;
- у таких МК не передбачається просте використання важливих для нашої системи керування змінних типу «день тижня», «місяць» чи «календарний рік».

Таким чином, внутрішні таймери-лічильники МК дозволяють вести відлік лише кількості мілісекунд, секунд, хвилин або годин з моменту подачі електричного живлення на МК (або з моменту ініціалізації функції *millis ()*). Із-за такої особливості використання вбудованого в МК годинника зовсім не придатне

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

для автоматизації систем керування не основі астрономічних моделей тривалого функціонування. Такі обставини вимагають уведення в проєктовану систему керування моделі автоматичної станції моніторингу окремого автономного високоточного годинника реального часу.

З точки зору поставленого перед нами завдання, використання зовнішнього годинника цілком виправдано. Це обумовлено необхідністю функціонування нашої моделі протягом тривалих проміжків часу із великими календарними інтервалами зчитування дат року та генерування керуючих сигналів протягом тижнів і місяців. Використання внутрішніх власних ресурсів більшості сучасних МК для такої роботи є практично неможливим. До того ж, застосування спеціалізованого модуля годинника в нашій розробці є виправданим ще й тому, що системі керування станцією необхідно постійно знати точну календарну дату та поточний календарний час для вчасного запуску та виконання різних етапів переорієнтації сенсора згідно з програмою МК кожної доби. Додатковим позитивним аргументом застосування автономного річного годинника реального часу є розвантаження постійної пам'яті та внутрішніх висчислювальних ресурсів МК, які потрібні системі керування для виконання математичних розрахунків тригонометричних функцій, які є основою астрономічної моделі визначення поточних координат руху Сонця по небесній сфері.

Важливою частиною системи керування є канали інформаційного обміну між її складовими модулями та блоками. Основні потоки даних нашої розробки пов'язані із завантаження робочої програми до МК та із періодичним введенням астрономічних, географічних та технічних параметрів станції. Для виконання таких операцій у складі системи керування необхідно мати спеціальні порти вводу-виводу інформації. У проєктованому пристрої ми вважаємо за доцільне використати стандартний послідовний USB порт модуля МК Arduino як блок «Порт вводу інформації». Через нього буде організовуватися інформаційний зв'язок МК із зовнішнім керуючим комп'ютером. При цьому комп'ютер ми плануємо використати як для сеансів запису програми до МК, так і для

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

проведення початкової та періодичних інсталяцій параметрів роботи моделі станції моніторингу.

При функціонуванні станції моніторингу в оператора може виникнути необхідність введення певних коректив у деякі параметри роботи програми безпосередньо на місці встановлення станції. Для забезпечення такої можливості контролю поточних режимів функціонування моделі, у систему введемо простий «Блок керування» у вигляді ручного доступу до програми за допомогою набору кнопок. Кожна із кнопок відповідатиме за проведення певних операцій з МК шляхом генерації відповідних команд. Такий «кнопочний» блок керування дозволить проводити невеликі оперативні втручання в алгоритм роботи моделі станції без підключення до неї комп'ютера.

Для забезпечення керування механізмами електричного приводу орієнтації сенсорів інтенсивності сонячного випромінювання використаємо один із стандартних цифрових портів модуля МК Arduino (блок «Вихідний порт керування» в додатку В). Через даний порт керуючі цифрові сигнали будуть подаватися на контролер драйверів крокових двигунів, які забезпечують переорієнтацію несучої площадки сенсорів у необхідний напрямок.

Важливим інформаційним приладом нашої системи є модуль відображення параметрів текучого режиму роботи моделі станції моніторингу, у якості якого застосуємо сучасний світлодіодний дисплей.

Живлення нашого електронного модуля системи керування забезпечимо від зовнішньої акумуляторної батареї («Блок живлення» в додатку В). Величина ЕРС такого блоку живлення може варіюватися у широких межах від +6 В до + 20 В. Таку ЕРС доцільно подати на вхід Vin модуля МК. А необхідні для роботи інших компонент системи керування стабілізовані ЕРС +5 В можна відвести від піна «+5В» модуля МК Arduino.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

## 5 ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 5.1 Годинник сонячного адміністративного часу

Годинники та різні часозадаючі електронні компоненти знаходять широке застосування в сучасних системах автоматизації. Вони стають обов'язковими модулями для тих автоматичних пристроїв, які мають працювати в режимі реального часу. Наша модель станції моніторингу відтворює один із таких пристроїв для автоматичної орієнтації сенсора інтенсивності випромінювання на Сонце за його астрономічними координатами. Відповідно, годинник сонячного часу тут є важливим компонентом.

Враховуючи сучасні модульні підходи до розробки систем автоматизації, ми вибрали інтегральний чіп DS-1307 (виробник - фірма Maxim) в якості точного годинника реального часу із вбудованим календарем на кілька років. Аналіз літератури показує, що даний модуль широко застосовується на сьогодні в різноманітних побутових й промислових інформаційних та технічних електронних пристроях. Зовнішній вигляд вибраного модуля DS-1307 з обох сторін наведена на рис. 5.1.

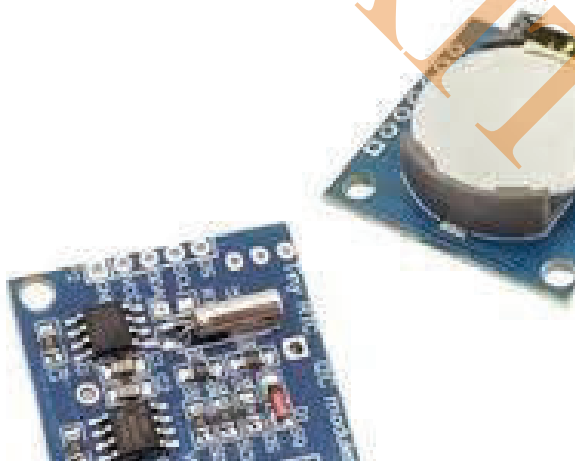


Рисунок 5.1 - Сторона джерела живлення та сторона монтажу компонентів модуля DS-1307

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Проаналізуємо основні технічні параметри та характеристики, які наводить фірма виробник для модуля DS-1307 (див. табл. 5.1). Їх перегляд свідчить, що обраний нами модуль цілком задовольняє базовим вимогам завдання даної кваліфікаційної роботи.

Таблиця 5.1 – Основні параметри та характеристики модуля DS-1307

Параметр	Значення параметра
Тип джерело живлення	Гальванічний літієвий елемент
ЕРС живлення для автономної роботи	3 В
ЕРС зовнішнього джерела живлення	5 В
Автоматичне встановлення наявності джерела зовнішньої ЕРС	Присутнє
Сумісність з МК типу AVR та з модулями Arduino	Легка
Об'єм постійної внутрішньої пам'яті	56 байт
Інтерфейс обміну даними з МК	I2C
Проміжок часу автономної роботи від внутрішнього літієвого елемента	До 5 років
Діапазон температур оточуючого середовища	Від -40 °C до + 85 °C

Відмітимо основні позитивні якості використання модуля DS-1307 для систем автоматизації:

- алгоритм роботи реалізовано без програмних внутрішніх переривань;
- почергово відстежує всі дні календарного року завдяки інформації, яка закладена в його постійній пам'яті;
- простота у використанні з іншими функціональними модулями;
- широка технічна та інформаційна підтримка завдяки наявності бібліотеки готових програм та різних прикладів застосування;

- можливість легкої організації електричного живлення від акумуляторної батареї із її підзарядженням;
- зберігання поточних даних тривалий час (місяці й навіть роки) у власній пам'яті.

Використовуючи годинника сонячного часу DS-1307 у практичних розробках, слід мати на увазі, що в ньому не запрограмовано автоматичні переходи на літнього на зимній адміністративний час та навпаки. Відповідно, цю функцію ми повинні ввести у програму МК нашої системи керування, що вже враховано в розробленому вище алгоритмі роботи станції моніторингу інтенсивності випромінювання.

Для надійного використання модуля годинника слід грамотно провести його комутацію з керуючим МК. Для цього застосуємо електричну принципову схему модуля DS-1307 із зовнішньою «обв'язкою», яка взята із сайту [22] й наведена нами на рис. 5.2 та 5.3.

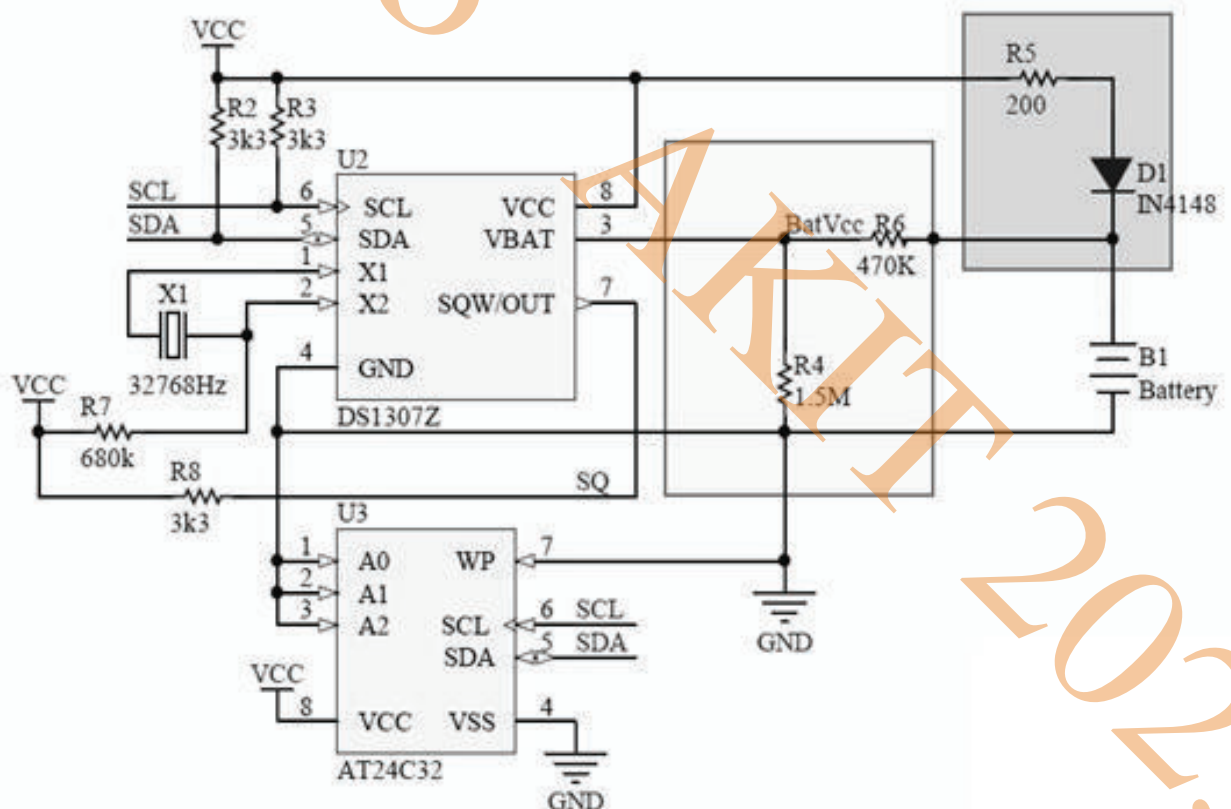


Рисунок 5.2 - Схема годинника реального часу DS-1307 [22] із компонентами його зовнішньої комутації

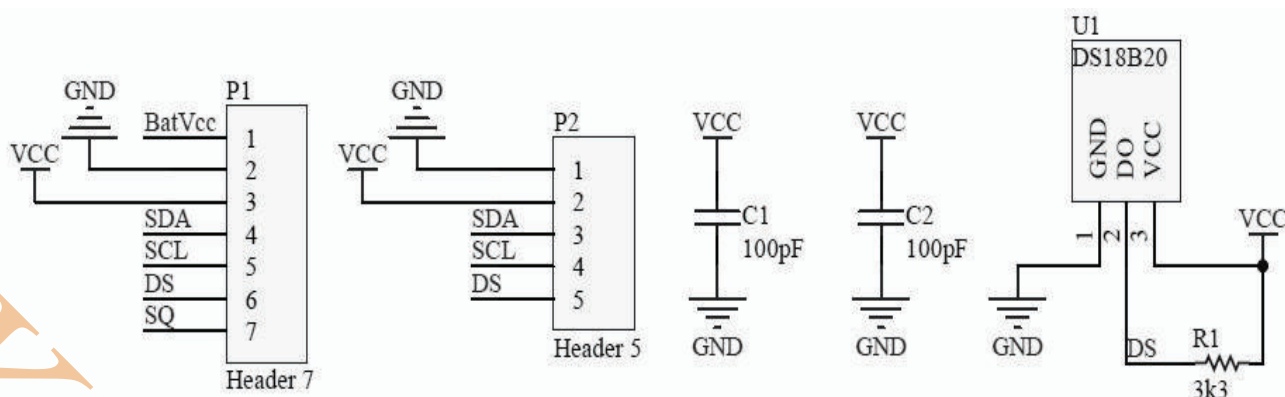


Рисунок 5.3 - Можливі варіанти зовнішньої «обв'язки» модуля DS-1307 [22]

Важливо врахувати процеси обміну інформацією годинника із зовнішніми пристроями. Відповідно із рис.5.2, основою модуля DS-1307 є спеціалізована інтегральна мікросхема відліку часу U2. Дані від цієї мікросхеми можна «знімати» через простий інтерфейс I2C, використовуючи виводи 5 та 6 (із сигналами SCL і SDA) чіпа U2. Вказані сигнали SCL і SDA є стандартними для протоколу обміну через послідовний інтерфейс I2C. Перший із цих сигналів – SCL (Serial Clock) є тактовим у процесі обміну даними, а другий – SDA (Serial Data) несе дані про текучий час та дату.

Логічні рівні сигналів SCL і SDA мають відповідати КМОП-логіці. Для забезпечення таких рівнів у схему введені «підтягуючі» резистори R2 і R3 малої потужності з номіналом 3,3 кОм. Тактова частота генератора імпульсів мікросхеми DS-1307 генерується генератором та стабілізується кварцовим резонатором X1 на частоті 32768 Гц).

Для метрологічного контролю та перевірки модуля годинника передбачено його спеціальний вивід 7. На ньому має бути присутній імпульсний тестовий сигнал SQW з частотою 1 МГц.

Живлення електричною енергією годинник може забезпечуватися за допомогою зовнішнього джерела постійної ЕРС через пін Vcc, від вбудованої внутрішньої гальванічної батареї B1 або поєднанням цих обох джерел. При цьому процес перемикання електричного живлення із одного джерела на інше

проводиться автоматично простим діодним ключем на базі діода D1. У кола електропостачання також введено три резистори R4, R5 та R6. Вони регулюють силу струму підзарядки літійового елемента при підключенні до модуля зовнішнього додаткового джерела. Конденсатори C1 і C2 різної ємності в енергетичних колах модуля служать для зниження завад, які можуть проходити по лініях живлення.

Збереження текучої дати та часу в модулі DS-1307 проходить у комірці енергонезалежної мікросхеми пам'яті AT24C32 (U3 на рис.5.2). Її виробник – фірма Intel гарантує збереження інформації протягом 5 років. Особливістю введення цієї мікросхеми в модуль годинника є утримання постійного під'єднання входів A0, A1, A2 адресної шини до контакту "земля". Такий підхід забезпечує постійний дозвіл на зчитування дати й часу годинника зовнішніми пристроями.

## 5.2 Узгодження модуля годинника з модулем мікроконтролера

Модуль годинника реального часу DS-1307 може бути під'єднаним до будь-якого сучасного МК, який працює з напругою живлення +5 В. Можливим варіантом є також формування інформаційного зв'язку годинника із різними зовнішніми пристроями через інструментальний протокол обміну даними за послідовним інтерфейсом I2C. Забезпечення виконання обох відмічених умов можливе при використанні для нашої системи керування модулів МК платформи Arduino.

При виборі типу модуля Arduino ми врахували необхідність проведення МК досить складних математичних розрахунків кутів орієнтації сенсора на Сонце та можливість у майбутньому розширення функцій електронного блоку автоматичної системи керування. Тому для проектованої моделі станції моніторингу ми зупинили свій вибір на досить потужному модулі Arduino Uno R3 із сучасним МК ATmega 328. Основні параметри та характеристики вибраного модуля наводимо в таблиці 5.1.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Таблиця 5.1 – Основні параметри та характеристики модуля МК Arduino Uno R3

Параметр	Значення параметра
ЕРС живлення МК	+5 В
Діапазон зовнішніх ЕРС живлення	Від + 7 В до +12 В
Кількість входів/виходів цифрових сигналів	14
Кількість виходів імпульсних ШІМ сигналів	6
Кількість входів для аналогових сигналів	6
Максимальна сила струму споживання з одного цифрового виходу	40 мА
Об'єм Flash пам'ять	32 КБ, із яких 0.5 кб займає Bootloader
Об'єм SRAM	2 КБ
Об'єм EEPROM	1 КБ
Частота тактового генератора	16 МГц

Для розробки електричної принципової схеми необхідна інформація про організацію зовнішніх комутацій та функціональне призначення всіх виводів модуля МК Arduino Uno R3. Така інформація наведено для довідок у додатку Г нашої роботи.

Використовуючи наведену вище інформацію, ми використали для підключення модуля годинника реального часу до плати Arduino його 4 контакти 5-ти пінового рознімча, як це наведено на рис. 5.4. Таке технічне рішення дозволяє просто реалізувати подачу живлення до модуля годинника від більш потужного зовнішнього джерела ЕРС, яке використовує МК (на рис.5.4 це чорний

та червоний провідники). Такий підхід суттєво збільшує період експлуатації внутрішнього гальванічного елемента годинника.

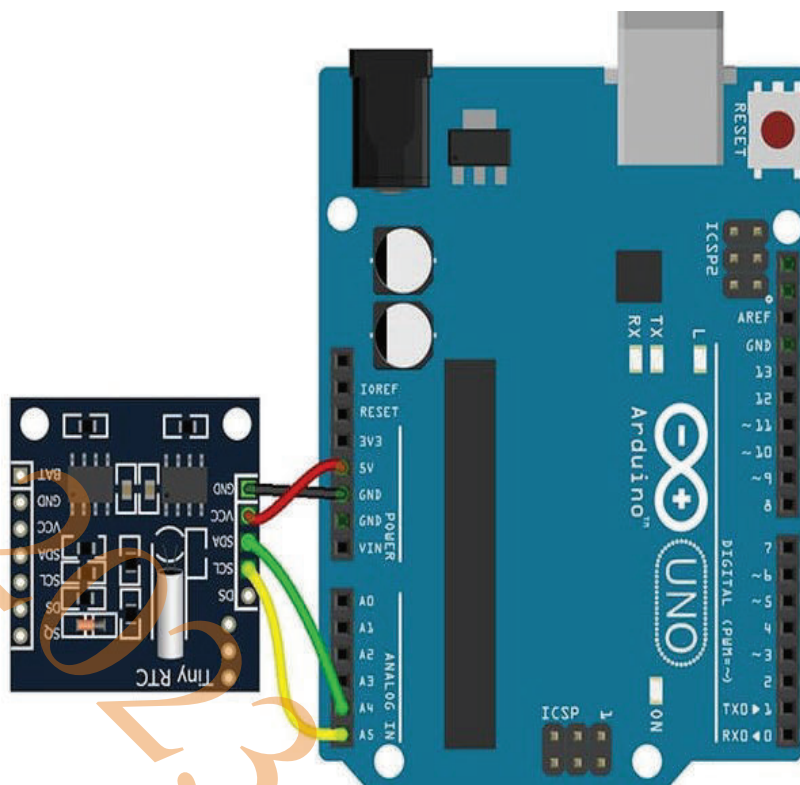


Рисунок 5.4 - Схема з'єднання модуля DS-1307 із платою Arduino Uno R3

Зеленому та жовтому провідникам на схемі рис.5.4 відповідають лінії передачі даних від модуля годинника до модуля Arduino. З цією метою використані два окремі аналогові входи під номерами A4 та A5 модуля МК. Відмітимо, що при програмуванні МК для даних двох пінів слід буде встановити статус на приймання цифрових сигналів, а саме текучої календарної дати та текучого часу. Таку операцію дозволяє зробити структура МК ATmega 328.

### 5.3 LCD дисплей для відображення інформації

Для відтворення поточної інформації про процес функціонування станції використаємо сучасний символний LCD дисплей типу WH1602C з керуванням вхідним потоком даних через 8-ми розрядну паралельну шину. Фронтальний зовнішній вигляд та геометричні параметри вибраного дисплею наведено на

										Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ					58

рисунку 5.5. Даний дисплей дозволяє відобразити інформацію у двох символічних рядках із розміщенням 16 символів у кожному рядку.

У нашій моделі використаємо мінімальний за об'ємом інтерфейсу зв'язку МК із даним дисплеєм. Для цього достатньо з'єднати лише 4 інформаційні входи дисплея з відповідними пінами керуючого МК. У нашій станції передбачається виводити на екран дисплея значну кількість даних. Тому для інформаційного потоку, який виводиться на дисплей, застосуємо всі 8 двійкових розрядів наявного паралельного порту. Призначення відповідних пінів LCD дисплея наведено в таблиці 5.2.

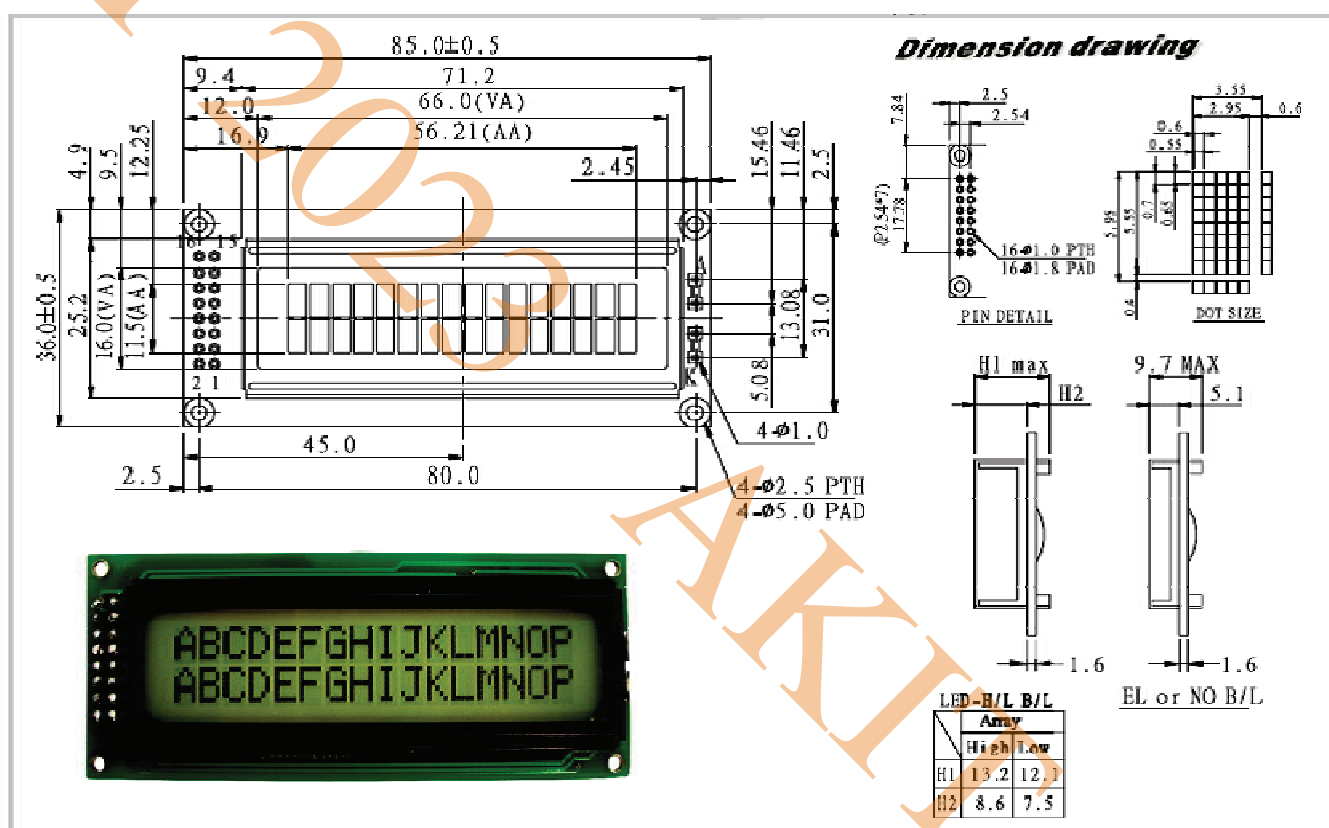


Рисунок 5.5 – Зовнішній вигляд та геометричні параметри символічного дисплея WH1602C

Як слідує із наведеної таблиці керування всіма процесами виведення інформації на екран дисплея здійснюється за допомогою спеціальних керуючих сигналів RS (сигнал вибору регістра) та R/W (сигнал зчитування/запису). Програму керування виводом даних на даний дисплей запозичимо із бібліотеки

вільного доступу LiquidCrystal програмного середовища Arduino IDE. Ця бібліотека містить необхідний для нас набір функцій, щоб організувати взаємодію МК з дисплеєм.

Відповідно з проведеним аналізом, для підключення інформаційного каналу LCD дисплея WH1602C до МК розробленої станції необхідно використати один 8-ми піновий цифровий паралельний порт МК. Крім того, нам необхідно постійно передавати два керуючі сигнали RS та R/W. Тому ми застосуємо для цієї функції 10 цифрових виходів модуля плати Arduino, 8 із цих виходів служитимуть для обміну даними, а 2 - для передачі керуючих сигналів комутування обміну. Крім того, відмітимо, що можна легко здійснювати налаштування контрасту екрану за допомогою змінного резистора, який введений в електричну схему дисплея. Для цього величиною даного резистора задається електричний потенціал сигналу  $V_0$  (пін 3 дисплея в табл 5.6).

Таблиця 5.2 – Назви сигналів відповідних виводів дисплея WH1602C

Pin NO.	Symbol	Function
1	Vss	GND
2	Vdd	+3V or +5V
3	$V_0$	Contrast Adjustment
4	RS	H/L Register select signal
5	R/W	H/L Read / write signal
6	E	H→L Enable signal
7	DB0	H/L Data bus line
8	DB1	H/L Data bus line
9	DB2	H/L Data bus line
10	DB3	H/L Data bus line
11	DB4	H/L Data bus line
12	DB5	H/L Data bus line
13	DB6	H/L Data bus line
14	DB7	H/L Data bus line
15	A/Vee	4.2V for LED (RA=0Ω) / Negative Voltage output
16	K	Power supply for B/L (0V)

На закінчення розділу необхідно визначити джерела живлення електричною енергією всіх елементів моделі метрологічної станції. На нашу думку, оптимальним рішенням тут буде вибір сучасного інтегрального джерело постійного струму із стандартною стабілізованою електрорушійною силою  $E = +5$  В. Оскільки проєктована нами модель станції споживає невелику потужність електричного струму, то для процесу досліджень моделі можна використати канал живлення від стандартного USB порту комп'ютера. Цей порт одночасно будемо використовувати для програмування МК модуля Arduino та для отримання потоку даних вимірювань інтенсивності сонячного випромінювання. Такий порт може неперервно надавати зовнішнім споживачам постійний струм сумарною силою 0,5 А (при необхідній нам ЕРС + 5В).

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## 6 НАЛАШТУВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ФУНКЦІЙ МОДЕЛІ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СТАНЦІЇ

### 6.1 Встановлення параметрів годинника реального часу

Налаштування показників поточного часу для модуля годинника найпростіше можна здійснити, використовуючи програму його функціонування. Для цього візьмемо із відповідного розділу штатної бібліотеки програмного забезпечення платформи Arduino IDE готову програму керування модулем годинника DS-1307. Таке програмне забезпечення розраховане на вільний доступ широкого кола дослідників та користувачів. У результаті налаштування часу зводиться до простого редагування програми модуля DS-1307. Конкретне редагування полягає у проведенні процедури "розкоментування" – у скетчі того рядка програми, який розпочинається із запису *RTC.adjust*, необхідно видалити відповідний знак текстового коментарю `"/`". У результаті даний рядок програми із функції коментарю переходить у розряд процедури налаштування поточних годин та хвилин.

«Розкоментований» текстовий рядок-функція програми модуля DS-1307 матиме такий вигляд: *RTC.adjust (DateTime ( \_\_DATE\_\_ , \_\_TIME\_\_ ))*. Тепер встановлення текучої дати та текучого часу годинника реалізується надзвичайно просто. Спочатку у модуль годинника слід змонтувати надійне мініатюрне джерело живлення, яке «оживляє» годинник та запускає у ньому відлік часу. Після цього перед компіляцією коду програми до модуля DS-1307 у відповідні поля відміченого рядка вносяться точні дані автоматично з персонального комп'ютера в момент проведення компіляції. Отримані таким чином дані й використовуються у процесі «прошивки» відповідних комірок пам'яті модуля годинника реального часу. Цілком зрозуміло, що на момент компіляції дата та час на персональному комп'ютері повинні бути налаштовані точно. Тому перед компіляцією слід провести узгодження цих параметрів на комп'ютері із точними

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

астрономічними даними. Лише після цього можна програмувати годинник DS-1307 та мікроконтролер модуля Arduino.

Після проведення налаштування годинника він розпочинає свій власний відлік часу, синхронізований із нашим адміністративним часом. При цьому також ведеться і відлік днів тижня та місяців року. Такий відлік продовжується поки на модулі забезпечуються необхідні параметри його живлення електричною енергією.

При необхідності точність відліку часу в будь-який момент роботи станції моніторингу сонячного випромінювання можна перевірити. Для цього з комп'ютера слід ввійти в оперативну пам'ять мікроконтролера через його послідовний порт і за допомогою відповідних функцій переконатися, чи дані годинника DS-1307 налаштовано коректно.

Відмітимо також, що ресурс джерела живлення модуля DS-1307 розраховано на декількох років неперервної роботи. Однак слід періодично перевіряти параметри джерела живлення і при необхідності вчасно замінювати його. Зрозуміло, що після кожної заміни джерела живлення, необхідно проводити налаштовувати поточного часу та дати модуля DS1307.

## 6.2 Узгодження модуля мікроконтролера та годинника реального часу

Мікроконтролер модуля Arduino має свій власний внутрішній таймер. Тому його внутрішній час слід узгоджувати із відліком часу модуля DS-1307. Така процедура легко реалізується за допомогою спеціальної функції Arduino. Дана функція дозволяє зчитувати текучі дату та час з модуля годинника реального часу і використовувати їх для відповідних служб мікроконтролера. При цьому програмно встановлюється і частоту такого опитування, наприклад, один раз за хвилину. Процес опитування можна організувати використовуючи бібліотеку OneWire.h програмного середовища Arduino IDE.

Найпростішим методом надсилання необхідних запитів МК до модуля годинника для отримання інформацій про текучі дату й час є використання

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

простої функції *now ()*. У процесі її виконання годинником надсилається програмі МК особливий об'єкт *DateTime*. Цей об'єкт містить у собі весь комплекс даних про рік, місяць, день, годину, хвилини і секунди текучого моменту часу. Крім того для модуля годинника є ряд програм для служб реального часу, у яких наявні окремі функції типу *RTC.year ()* та *RTC.hour ()*. Дані функції можуть з годинника окремо зчитувати текучий рік або час. Однак використання таких часткових функцій пов'язане з деякими проблемами. Одна з них пов'язана з тим, що у деякі моменти часу надіслані запити обробляються годинником із певними похибками, які можуть досягати однієї хвилини. Тому застосовувати у програмі МК окремі функції для виклику текучого часу або текучого року допустиме тільки в тих випадках, коли точність задання часу з похибкою біля однієї хвилини для автоматичного обладнання не є критичним. Але в більшості випадків для уникнення неконтрольованих помилок в обліку часу МК, для його програмування бажано використовувати функцію *now ()*. Особливо це відноситься до програмістів початківців.

### 6.3 Електрична принципова схема системи керування

Наведений вище матеріал та результати досліджень дозволяють нам спроектувати електричну принципову схему розробленого пристрою. Для цього скористаємося технічною документацією та рекомендаціями фірм-виробників використаних нами електронних компонентів. Відповідно з цими матеріалами легко здійснити зовнішнє комутування між собою всіх електронних елементів системи керування.

Розпочнемо з найбільш складною частини проектування – підключення інформаційного дисплея. Логічна організація такого підключення для обраного нами приладу WH1602C повинна забезпечувати оперативне виведення різних даних від МК у два рядки тексту із групуванням по шістнадцять різних текстових (й інших символічних) знаків у кожному рядку. Для обслуговування такого потоку інформації мінімальна провідна шина повинна містити вісім ліній зв'язку МК з

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

дисплеєм. Застосуємо для цього вільні 4 піни порту D МК та 4 піни порту В дисплея (рис.6.1 та додаток Д).

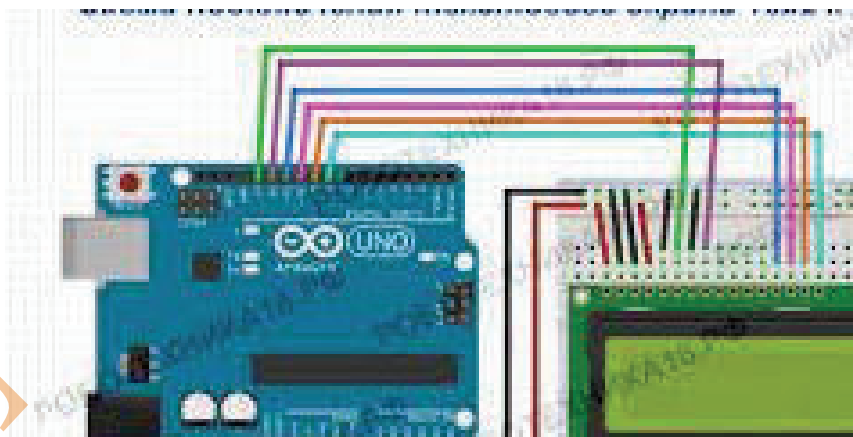


Рисунок 6.1 – Особливості електричного комутування між собою модуля МК та дисплея

Обмін даними між МК та дисплеєм організовується з участю додаткових двох описаних раніше службових сигналів R/W (read/write signal) та RS (register select signal). Відповідно, ще два цифрових виходи модуля МК Arduino слід виділити для обслуговування даних службових сигналів.

Модуль годинника реального часу DS1307, згідно з рекомендаціями виробника, підключимо до модуля МК через 2 окремі піни порту програмованих аналогових входів даного модуля. У додатку Д цьому відповідають сигнали А2 та А3 модуля Arduino та сигнали SDA та SCL модуля годинника DS1307.

Інформаційний зв'язок нашої системи керування із контролером трекера системи орієнтації будемо здійснювати через рознімач Х3. Через піни цього рознімача на лінії керування подаються два службові сигнали DA та DH. Вони задають текучі кути просторової орієнтації сенсора інтенсивності сонячного випромінювання для кожного моменту часу.

Стандартний USB порт Х2 модуля МК використаємо для програмування розробленої системи керування.

При необхідності оперативне керування МК на місці встановлення станції моніторингу можна буде здійснювати через окремі 5 механічних кнопок, які

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

зкомутовані нами із відповідними цифровими входами модуля МК Arduino. Як слідує із схеми додатку Д, текучий логічний стан цих входів можна просто змінювати шляхом перемикання ЕРС джерела живлення системи на загальну шину. Для процесів такої комутації ми використали відповідні резистори з номіналом 1 кОм та номінальною розсіюваною потужністю 0,125 Вт.

Живлення системи керування необхідно ЕРС забезпечимо від зовнішнього джерела стабілізованої напруги через рознімач Х4. Дане живлення будемо подавати на спеціальний пін модуля МК. За технічними параметрами величина зовнішньої ЕРС на цьому піні може варіюватися від +6 В до +12 В.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи:

1. Проведено короткий аналіз перспектив та проблем розвитку пристроїв моніторингу сонячного випромінювання для сучасної сонячної енергетики. Встановлено, що технічною основою таких систем можуть бути системи автоматичної орієнтації на Сонце.

2. Досліджено особливості застосування простої астрономічно-географічної моделі руху Сонця по небесній сфері для створення алгоритмів керування наземними пристроями орієнтації на Сонце.

3. Проведені експериментальні дослідження технічних можливостей реалізації алгоритму астрономічно-географічної моделі на базі сімейства найпростіших сучасних мікроконтролерів. Основна увага приділена дослідженню внутрішніх ресурсів, необхідних мікроконтролеру для виконання основних етапів такого алгоритму.

4. Показано, що прості 8-ми бітні мікроконтролери мають достатні технічні ресурси для забезпечення переорієнтації трекерної системи на один крок протягом 1 хвилини. Такий показник цілком достатній для створення автоматичних систем моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання.

5. Розроблено простий алгоритм автоматичного керування процесом наземної орієнтації на Сонце, який:

- можна реалізувати простими дешевими електронними пристроями;
- максимально автоматизує процес встановлення та експлуатації обладнання в будь-якій точці земної кулі;
- дозволяє запровадити додаткові сервісні функції роботи модуля моніторингу в автономному режимі;
- забезпечує мінімальне власне споживання електроенергії самою системою трекера;

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

- може бути реалізований на простій моделі, створеній за допомогою сучасних стандартних модулів.

6. Розроблена структурна схема моделі станції моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання на базі наземної трекерної системи.

7. Спроектована й виконана методами комп'ютерної графіки електрична принципова схема моделі станції моніторингу. Підібрані сучасні електронні компоненти для системи керування моделі станції моніторингу.

8. Основні технічні параметри моделі станції моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання на базі наземної трекерної системи:

- ввід географічних координат розміщення станції - при початковому налаштуванні системи керування;

- тривалість розрахунку одного кроку переорієнтації сенсора - не більше 1 хвилини;

- форма вихідного сигналу для контролера трекера – два байти послідовного коду (один – для визначення азимутального кута, другий – для визначення кута висоти);

- інформаційне забезпечення відображення режимів функціонування станції моніторингу - за допомогою 16-ти символного дисплея;

- живлення електричною енергією – від зовнішнього джерела з ЕРС постійного струму від +6 В до +12 В.

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1/ Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO-No. 8. Seventh edition. 2008 - Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO). Geneva 2, Switzerland.
2. Вербицький Є. В. Енергозбереження і енергоефективність. Конспект лекцій для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи». - К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 106 с.
3. Alistair, B. S. Derivation of the solar geometric relationships using vector analysis. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32(7), pp. 1187–1205.
4. Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., Donner, H. J. *Fundamental Astronomy* (5th ed.), 2006.
5. Інтернет ресурс. Режим доступу: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html/>
6. Piranometer PYR-BTA. / Інтернет ресурс. Режим доступу: <https://www.vernier.com/files/manuals/pyr-bta.pdf>
7. SMP21 піранометр / Інтернет ресурс. Режим доступу: <https://data-lufft.com/ua/p911990789-smp21-piranometr.html>
8. *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition* Edited by Manajit Sengupta, Aron Habte, Christian Gueymard, Stefan Wilbert, Dave Renné, and Thomas Stoffel / National Technical Information Service 5301 Shawnee Road Alexandria, VA 22312
9. Li, Z., Liu, X., Tang, R. Optical performance of inclined south-north single-axis tracked solar panels. *Energy*, 2010, vol. 35, pp. 2511–2516.3.
10. Singh, R., Kumar, S., Gehlot, A., Pachauri, R. An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018, vol. 82, pp. 3263–3278.
11. Saymbetov, A. K., Nurgaliyev, M. K., Tulkibaiuly, Y., Toshmurodov, Y. K., Nalibayev, Y. D., Dosymbetova, G. B., Kutybay, N. B., Gylymzhanova, M. M.,

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Svanbayev, Y. A. Method for Increasing the Efficiency of a Biaxial Solar Tracker with Exact Solar Orientation. *Appl. Sol. Energy*, 2018, vol. 54, pp. 126–130.

12. Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu, L., Chen, X. Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018, vol. 81, pp. 250–279.

13. Sefa, I., Demirta, S., M., Çolak, I. Application of one-axis sun tracking system. *Energy Convers. Manag.*, 2009, vol. 50, pp. 2709–2718.

14. Hoffmann, F. M., Molz, R. F., Kothe, J. F., Nara, E. O. B., Tedesco, L. P. C. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renew. Energy*, 2018, vol. 115, pp. 750–759.

15. Sidek, M., Azis, N., Hasan, W., Ab Kadir, M., Shafie, S., Radzi, M. Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. *Energy*, 2017, vol. 124, pp. 160–170.

16. Tharamuttam, J. K., Ng, A. K. Design and Development of an Automatic Solar Tracker. *Energy Procedia*, 2017, vol. 143, pp. 629–634.

17. Nurgaliyev, M., Saymbetov, A., Yashchyshyn, Y., Kuttybay, N., Tukymbekov, D. Prediction of energy consumption for LoRa based wireless sensors network. *Wirel. Netw.*, 2020, vol. 26, pp. 3507–3520.

18. Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., Donner, H. J. *Fundamental Astronomy* (5th ed.), 2006.

19. Ivanitsky, V. P., Ryaboschuk, M. M., Stojka, M. V., Tiutiunnykov, S. V. Astronomical and geographical model for programming microcontrollers of ground-based trackers. *Science and education a new dimension. Natural and Technical Sciences*, 2021, no. 255, pp.

20. Ivanitsky, V. P., Chychura I.I., Tiutiunnykov, S. V. Controlling the Terrestrial Systems of the Sun Orientation of the “green” hydrogen generation power plant. 2023, no. 1, p255 - 263..

21. M. Mazidi, Sa. Naimi, Se. Naimi, ”The AVR microcontroller and embedded systems: using Assembly and C, 2009..

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

22. Інтернет ресурс. Режим доступу: <https://robotchip.ua/obzor-chasov-realnogo-vremeni-ds1307/>

АКІТ 2023

АКІТ 2023

					КМР.АКІТ.10550641.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71