

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 636.5252/58:62 503.51

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ННІ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

_____ В.В. Каплун
(підпис) (ПІБ)

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

«__» _____ 2024 р.

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

02.06.-КМР.1664"С".2024.09.26.020.ПЗ

на тему «**РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ
СОНЯЧНОЮ СТАНЦІЄЮ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**»

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Гарант освітньої програми

(підпис)

І.М. Болбот, д.т.н., професор

(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав

(підпис)

М.Ю. Лукач

(П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи

(підпис)

В.В. Івашук, д.т.н., доцент

(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

КИЇВ-2024

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	4
Вступ	5
РОЗДІЛ 1. Технологічна характеристика процесу отримання електроенергії за допомогою ФЕС	9
1.1. Класифікація систем стеження за сонцем	9
1.2. Переваги використання динамічних систем стеження за сонцем	15
1.3. Будова сонячного трекера	17
РОЗДІЛ 2. Розробка імітаційної моделі режимів роботи автономної ФЕС із урахуванням реальних умов експлуатації	21
2.1. Об'єкт дослідження і постановка задачі	21
2.2. Математичні моделі компонентів ФЕС	23
2.2.1. Модель сонячної радіації	23
2.2.2. Модель сонячної батареї	28
2.2.3. Модель добового ходу температури повітря	30
2.2.4. Модель температури поверхні фотоелектричного модуля	32
2.2.5. Модель акумуляторної батареї	33
2.2.6. Моделі перетворювачів	36
2.2.7. Модель електричного навантаження	37
2.2.8. Модель фотоелектричної станції	38
2.2.9. Результати моделювання	40
РОЗДІЛ 3. Розробка системи позиціонування сонячних панелей	44
3.1. Розробка алгоритму функціонування системи	44
3.2. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування позиціонуванням сонячних панелей	46
3.3. Вибір елементної бази	51
3.3.1. Мікроконтролер	51
3.3.2. Дисплей LCD	52
3.3.3. Схема перетворювача інтерфейсу	55
3.3.4. Датчик прискорення і нахилу	56
3.3.5. Модуль годинника реального часу	57
3.3.6. Магнітний компас	59
3.3.7. Виконавчий механізм повороту панелей	60
3.4. Розробка схеми електричної принципової	64
Висновки	68
Література	69
Додатки	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПДЕ	– поновлювані джерела енергії
ФЕС	– фотоелектрична станція
ССС	– система стеження за сонцем
СЕС	– сонячна електростанція
СБ	– сонячна батарея
ФМ	– фотоелектричний модуль
ВАХ	– вольт-амперна характеристика
АБ	– акумуляторна батарея
SAT	– single axis trackers – одноосьовий сонячний трекер
DAT	– dual axis trackers – двоосьовий сонячний трекер
TTDAT	tip-tilt dual axis tracker – трекер із віссю обертання на несучому стовбі
AADAT	azimuth-altitude dual axis tracker – трекер із опорною площиною, або азимут-орієнтований трекер

ВСТУП

В наш час все більшого значення набувають проблеми охорони природного середовища та його поновлення одночасно із надійним забезпеченням людства паливом і енергією. Ця глобальна проблема пов'язана насамперед із обмеженістю найважливіших органічних та мінерально-сировинних ресурсів планети та негативним впливом традиційних способів отримання паливно-енергетичних ресурсів на навколишнє середовище. Використання альтернативних джерел енергії розглядається на сучасному етапі розвитку людства як один із головних шляхів вирішення енергетичної проблеми.

Зміни в структурі використання енергетичних ресурсів та зростання виробництва електроенергії від поновлюваних джерел енергії (ПДЕ), які розпочалися на початку 2000-х років, переконливо підтверджують той факт, що світова енергетика знаходиться на порозі глобальних змін. Незворотність переходу до наступного технологічного укладу обумовлена ще і тим, що одночасно із наростаючим зносом основних фондів у енергетичній галузі динамічно розвивається розподілена та локальна енергетика, попит на енергію зростає, а модель поведінки споживачів поступово змінюється [1].

Як вважають експерти, у найближчі роки передові енергетичні та інформаційні технології, у результаті конвергенції, будуть повністю домінувати на ринку енергетичного обладнання, інжинірингу, програмних та інших технічних систем. У перспективі це дозволить не тільки вирішити проблеми розвитку та ефективного функціонування енергетики України, але і забезпечити національну безпеку у цій сфері.

Аналіз стану і динаміки розвитку існуючих нових і перспективних енергетичних технологій дозволяє зробити висновок про те, що найбільш динамічно в останні роки розвивається сонячна енергетика [2,3].

Згідно з даними Міжнародної агенції з поновлюваної енергії (IRENA), сонячна енергетика продемонструвала надзвичайну динаміку зростання, збільшивши виробництво електроенергії за 2008-2017 р.р. у 25,7 рази. Знижуються ціни на обладнання для сонячних електростанцій (СЕС), що веде до зниження вартості електроенергії, яка вже до 2025 р., згідно з очікуваннями IRENA, здешевіє на 57% [4].

До конкурентних переваг фотоелектричних технологій відносять тривалий строк служби основних енергетичних компонентів, мінімальні експлуатаційні витрати, можливість створення генеруючих установок на широкий діапазон потужностей із максимальним наближенням до об'єктів електроспоживання.

Однак, незважаючи на наочні переваги, стримуючими факторами впровадження фотоелектричних станцій (ФЕС) залишається висока вартість обладнання та низька ефективність перетворення енергії у порівнянні з іншими типами енергетичних установок. Це змушує розробників фотоелектричних систем шукати нові та удосконалювати існуючі технічні рішення, що забезпечують підвищення ефективності, продуктивності та зниження собівартості генерованої енергії. Одним з таких рішень є використання систем слідкування за положенням сонця – сонячних трекерів.

Досвід експлуатації систем стеження за сонцем (ССС) у різних країнах світу показав, що їх використання забезпечує підвищення продуктивності ФЕС в середньому від 15 до 72% в залежності від типу трекера, географічного положення електростанції, кліматичних умов та пори року [5].

Графік (рис. В1) наочно показує, що трекер при точності $\pm 5^\circ$ надає панелі вловлення більше 99% енергії прямо падаючих променів та 100% розсіяного світла.

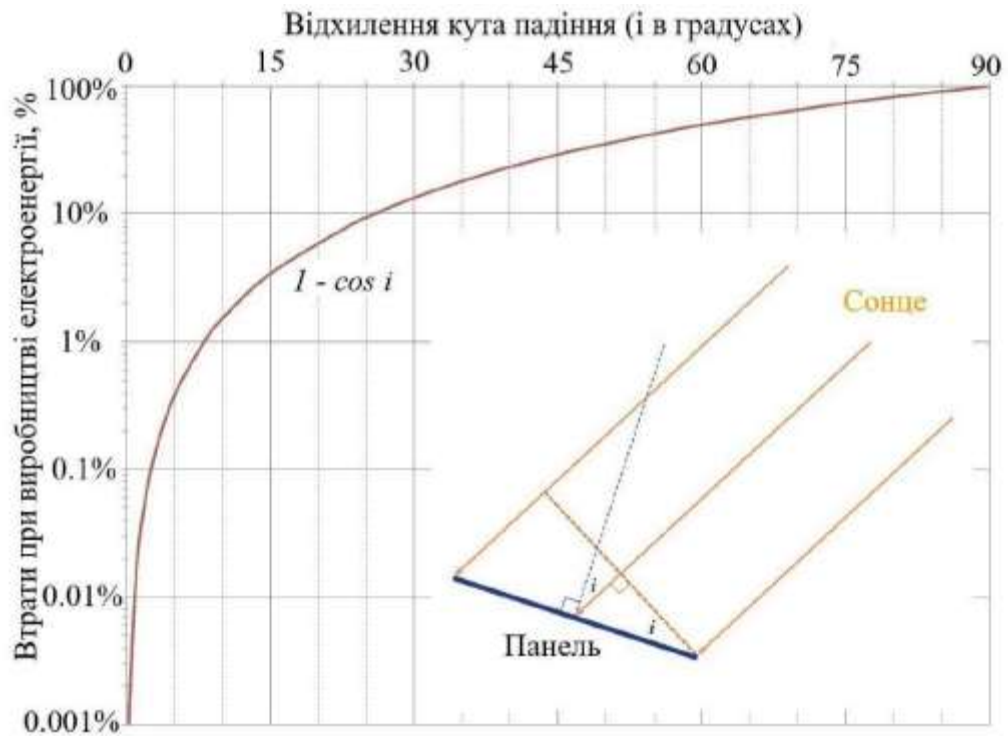


Рис. В1. Залежність втрат при виробництві електроенергії від відхилення кута падіння променів Сонця

Позитивний досвід використання ССС стимулює розвиток даної технології сонячної енергетики. За даними досліджень GTM Research "Global PV Tracker Landscape 2018", на той час у світі було встановлено 12,6 ГВт ФЕС, оснащених сонячними трекерами, а до кінця 2021 р. кількість установок для трекерів зросте до 37,7 ГВт, що складе майже половину усіх наземних сонячних станцій.

Необхідно відмітити, що існує цілий ряд технічних та економічних обмежень у використанні ССС, які повинні бути достеменно проаналізовані при проектуванні ФЕС з метою визначення оптимальної конфігурації сонячного трекера для кожного окремого випадку використання. До економічних обмежень слід віднести додаткові капітальні затрати на купівлю і монтаж ССС, більш високі витрати на обслуговування електростанції внаслідок наявності рухомих механічних частин, необхідність у додатковій площі ділянки для розміщення сонячних батарей порівняно зі станціями із жорстко закріпленими сонячними

панелями. Технічні обмеження визначаються порівнянням заявлених виробником характеристик сонячного трекера із прогнозованими умовами його експлуатації: робочий діапазон кутів слідкування за азимутом і нахилом, максимальне повітряне навантаження, використовуваний метод слідкування за сонцем, тип кліматичного виконання та ін.

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення ККД роботи фотоелектричних станцій, є актуальним питанням для енергетичного комплексу України.

Об'єктом дослідження є процес отримання електроенергії при використанні фотоелектричних станцій.

Предметом дослідження є підвищення ефективності процесів та удосконалення алгоритмів отримання електроенергії фотоелектричними станціями.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розробка системи автоматичного керування орієнтацією сонячних панелей, яка у режимі реального часу за значенням зенітного кута і азимуту здатна забезпечити максимальну продуктивність роботи сонячної батареї.

Задачі кваліфікаційної магістерської роботи:

1. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування орієнтацією сонячних панелей.
2. Розробка електричних принципових схем системи керування сонячним трекером.
3. Вибір елементної бази для технічної реалізації системи керування.
4. Розробка алгоритму керування сонячним трекером.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЕС

1.1. Класифікація систем стеження за сонцем

Фотоелектричні станції конструктивно виконуються із нерухомими фотоелектричними панелями, які жорстко закріплені на каркасі, або із рухомими панелями, оснащеними системами стеження за сонцем, або *сонячними трекерами*.

Сучасні сонячні трекерні системи є дуже різноманітними і можуть суттєво розрізнятися за вартістю, конструкцією та використаними принципами керування. Основні вимоги до ССС визначаються міжнародним стандартом ІЕС 62817-2014 [6], де встановлені основні характеристики систем стеження за положенням Сонця, їх класифікаційні ознаки та методи випробовування.

За кількістю та напрямком висей обертання сонячні трекери поділяються на *одноосьові* (рис. 1.1) (single axis trackers – SAT) та *двохосьові* (dual axis trackers – DAT) [6].

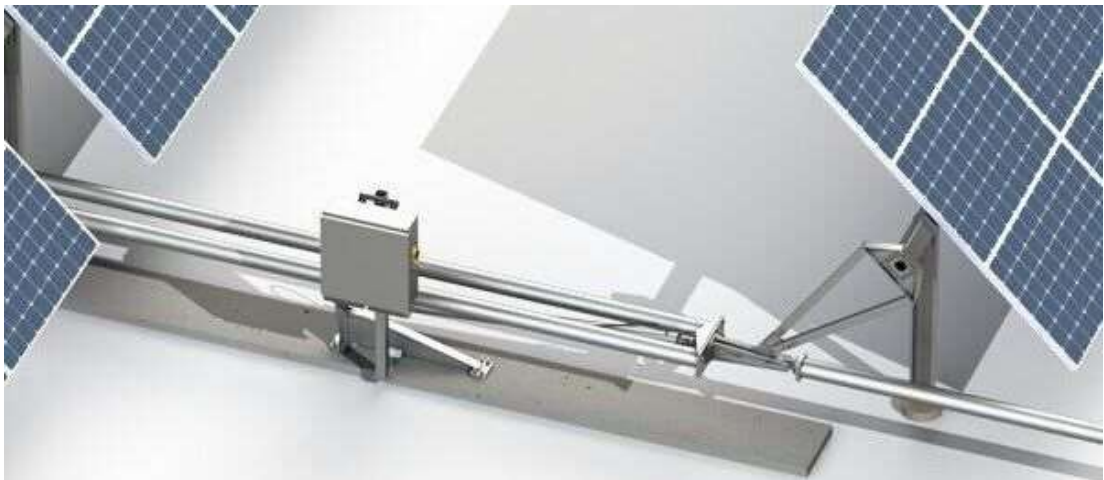


Рис. 1.1. Один із варіантів конструкції приводу трекера із горизонтальною віссю обертання

У порівнянні із двохосьовими системами, одноосьові сонячні трекери мають більш просту конструкцію, і відповідно низьку вартість, завдяки чому набули найбільшого розповсюдження. В залежності від конструктивного виконання одноосьові трекери поділяються на трекери із горизонтальною (HSAT) (рис. 1.2), вертикальною (VSAT) (рис. 1.3), похилою (TSAT) (рис. 1.4) та із полярно-орієнтованою (PSAT) осями обертання.

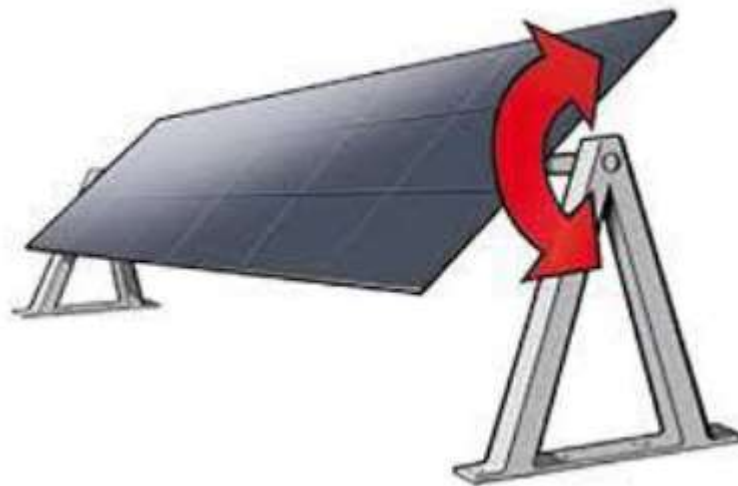


Рис. 1.2. Сонячний трекер із горизонтальною віссю обертання



Рис. 1.3. Сонячний трекер із вертикальною віссю обертання

Кожна з конструкцій має свої переваги і недоліки, і переважну область використання. Для високих широт, які характеризуються значними змінами тривалості світлового дня і невеликими кутами висоти Сонця, доцільно використовувати трекери із вертикальною або похилою осями

обертання, для районів поблизу екватора більш ефективними є трекери із горизонтальною віссю обертання [7].

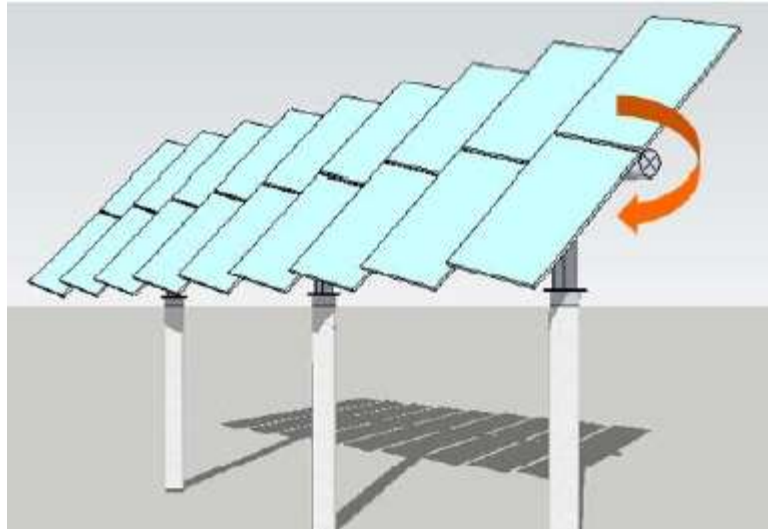


Рис. 1.4. Сонячний трекер із похилою віссю обертання

Максимальну ефективність використання сонячної енергії забезпечують двохосьові трекери, конструкції яких розрізняються за напрямком основної вісі. Із двохосьових систем стеження найбільшого поширення набули трекери із віссю обертання на несучому стовпі (tip-tilt dual axis tracker – TTDAT) (рис. 1.5) та трекери із опорною площиною (azimuth-altitude dual axis tracker – AADAT) (рис. 1.6), де головна вісь є вертикальною.



Рис. 1.5. Двохосьовий трекер із віссю обертання на несучому стовпі



Рис. 1.6. Двохосьовий сонячний трекер із опорною площиною

Перевагою ТТДАТ трекерів є простота конструкції та велика гнучкість територіального розміщення, що дозволяє використовувати їх для побудови ФЕС як невеликої потужності для індивідуального використання, так і у великих енергетичних проектах. В ААДАТ трекерах як опорна конструкція використовується кільце, яке встановлюється на ролики або велику платформу з підшипниками. Перевагою такого конструктивного рішення є рівномірний розподіл ваги сонячної батареї за частинами кільця, на відміну від однієї точки навантаження, як у ТТДАТ системах. Це дозволяє використовувати трекери даного типу в ФЕС із сонячними батареями великої потужності, а також в районах із великими повітряними навантаженнями, однак такі системи є більш коштовними та вимагають більшої території.

Ще однією ознакою, за якою поділяються трекери, є алгоритм слідування за сонцем – *астрономічний* та *по датчикам освітлення* [8].

Внаслідок простоти технічної реалізації частіше використовується алгоритм слідування по сонячним датчикам (рис. 1.7), принцип дії якого полягає у позиціюванні сонячної батареї на максимальну інтенсивність світла на небосхилі, яка визначається за поточними показами фотоприймачів. Істотним недоліком трекерних систем із датчиками

освітленості є їх непрацездатність у похмуру погоду, при інтенсивних опадах або забрудненні фотоприймачів.

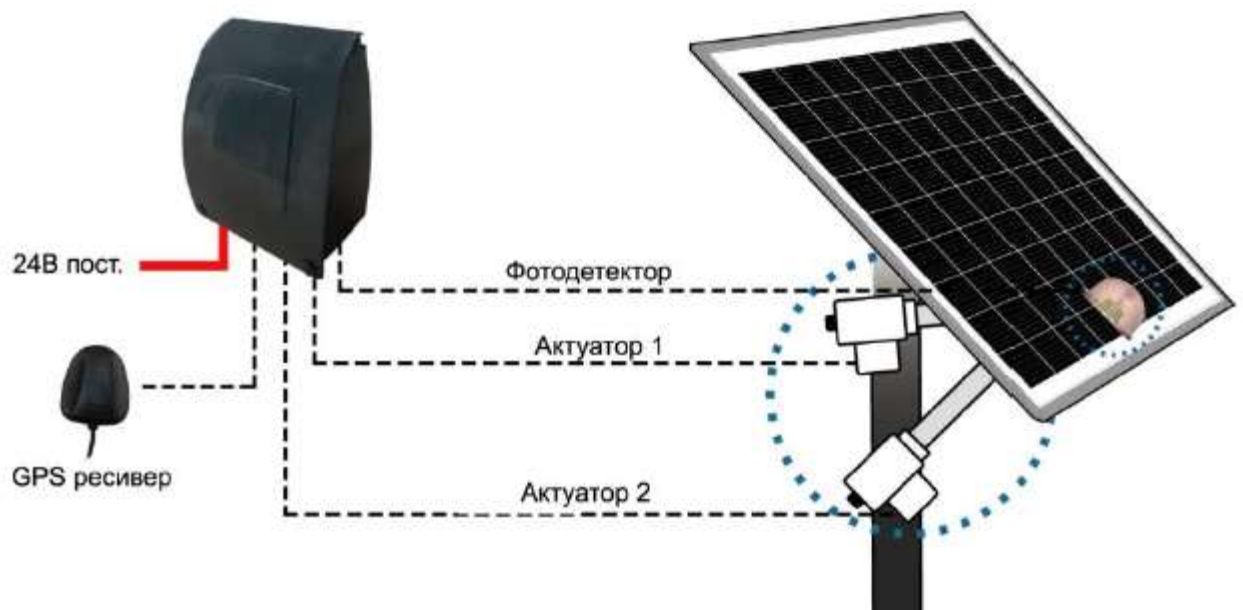


Рис. 1.7. Конструкція трекера на фотоприймачах

Більш надійними є астрономічні алгоритми (рис. 1.8), які у найпростішому випадку можуть бути реалізовані шляхом дискретної зміни положення сонячної батареї за добовою програмою таймера.

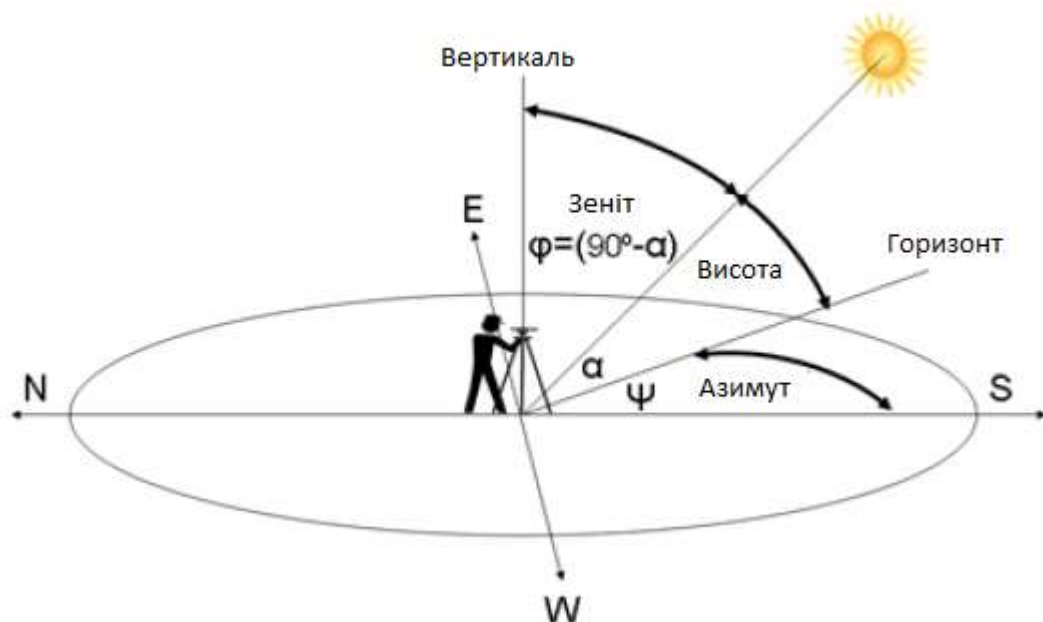


Рис. 1.8. Визначення положення Сонця по азимуту та висоті для північної півкулі

Недоліком такого рішення для ФЕС, які територіально розташовані у районах із високими широтами, є необхідність постійного коригування добової програми, оскільки значення азимутних кутів сходу і заходу Сонця, а також зенітний кут, схильні до значних сезонних змін.

Найбільшу ефективність забезпечують алгоритми сонячної позиції (solar position algorithm – SPA) принцип дії яких заснований на програмному розрахунку оптимальних кутів позиціонування сонячної батареї по заданим параметрам розташування (рис. 1.9) сонячного трекера: широта, довгота, висота над рівнем моря [9].

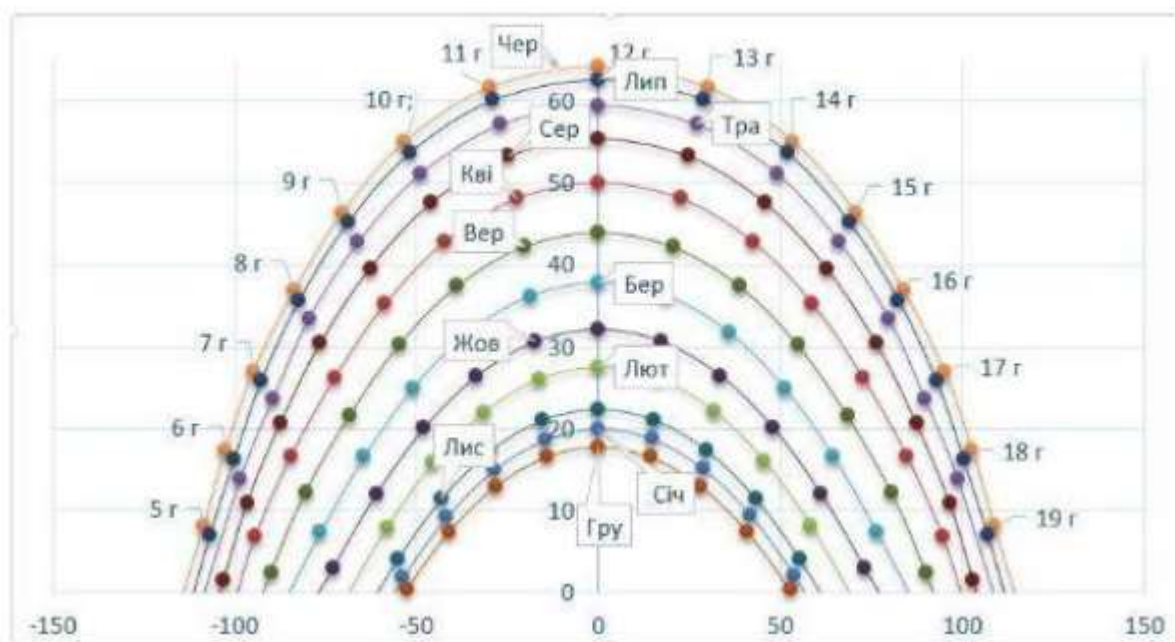


Рис. 1.9. Середні значення для сонячного шляху для одного дня кожного місяця на широті м. Києва 50°27'

Необхідно зазначити, що у наведеному вище огляді коротко представлена класифікація тільки основних ознак ССС, на які слід звернути першочергову увагу при виборі моделі для конкретного використання. Однак існують і інші характеристики ССС, які необхідно враховувати при виборі, монтажі і експлуатації, наприклад місце встановлення (земля, дах та ін.), тип фундаменту, режим і час приведення у штормове положення, маса, розміри, характеристики надійності тощо.

1.2. Переваги використання динамічних систем стеження за сонцем

Основними перевагами у використанні динамічних систем для СЕС є:

- збільшення вироблення електроенергії до 40% у порівнянні з нерухомими конструкціями;
- збільшення прибутків від продажу електроенергії у довгостроковій перспективі;
- можливість керувати площиною з панелями при сильних поривах вітру, що дозволить запобігти руйнування конструкції.

Для підтвердження ефективності використання трекерів, для прикладу, розглянемо дані про виробіток електроенергії ФЕС із різним типом кріплення протягом року. Дані взяті для ФЕС потужністю 10 кВт, з урахуванням втрат в 24,3%, розташовану під кутом 34° до поверхні Землі на території м. Києва [26].

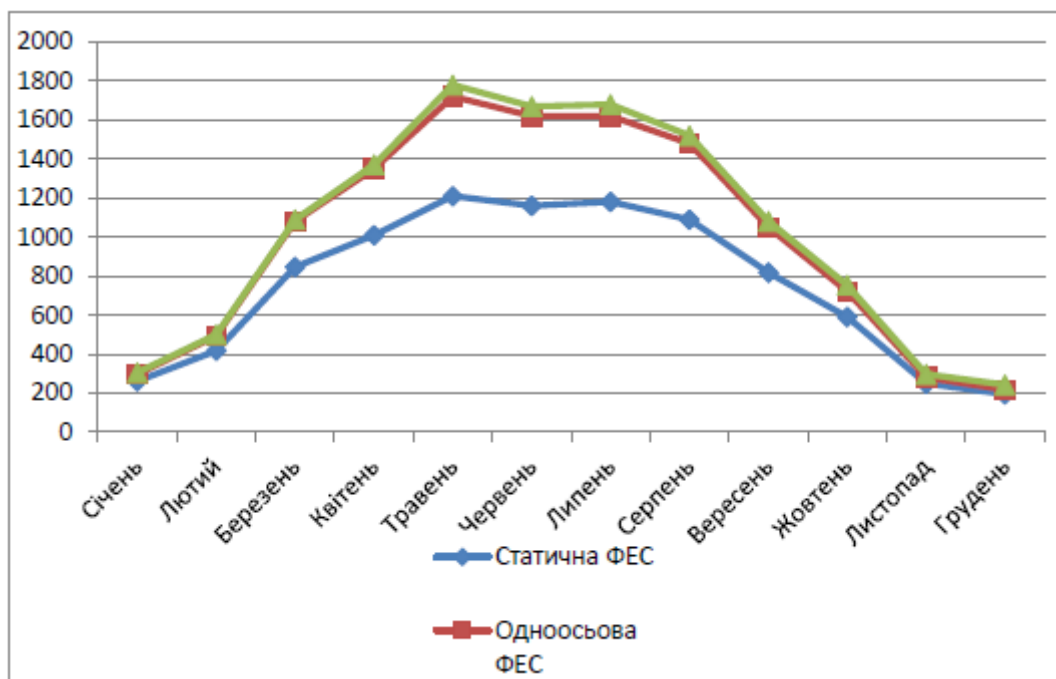


Рис. 1.10. Виробіток електроенергії ФЕС із різним типом кріплення

Аналізуючи дані з таблиці 1.1 та рис. 1.10 очевидно, що енергетична ефективність ФЕС із використанням сонячних трекерів із осями обертання є суттєво вищою за статично встановлену. В даному випадку виробіток електроенергії збільшився на 36,1% за рік у порівнянні з ФЕС без використання сонячного трекера.

Таблиця 1.1.

Кількість кВт·год., вироблених кожного місяця для ФЕС
з різним типом кріплення

Місяць	Статична ФЕС	Одноосьова ФЕС	Двоосьова ФЕС
Січень	262	297	306
Лютий	417	494	501
Березень	847	1080	1090
Квітень	1010	1350	1370
Травень	1210	1720	1780
Червень	1160	1620	1670
Липень	1180	1620	1680
Серпень	1090	1480	1520
Вересень	817	1050	1080
Жовтень	591	721	753
Листопад	250	281	297
Грудень	195	218	243
Всього за рік	9029	11931	12290

1.3. Будова сонячного трекера

Зазвичай, створення будь-яких систем, що використовують сонячну енергію, завжди починається із *визначення ймовірної або фактичної інсоляції*, визначення ефективності сонячної електростанції (СЕС) для конкретних географічних умов. Останнім часом у науковому співтоваристві існують різні, деколи прямо протилежні, думки з приводу рентабельності (ERoEI – Energy Return on Energy Invested) СЕС, розміщених у регіонах із помірною інсоляцією [25]. Оскільки частина території України знаходиться у географічних широтах із помірною інсоляцією, то при розрахунках сонячної енергії, що надходить на поверхню, визначальними є метеорологічні умови і положення Сонця над горизонтом, яке змінюється в достатньо широких межах залежно від пори року. Тому розрахунок інсоляції вимагає особливої уваги, оскільки навіть невеликі похибки на даному етапі проектування можуть негативно відбитися на кінцевому результаті, різко знизивши ефективність СЕС або збільшивши витрати на її будівництво.

Наступним важливим етапом досліджень – *вибір потужності СЕС*. Для мікрогенерації потужність може знаходитися у межах 0,01–15 кВт, а для експериментальної установки вона може бути вибрана у межах 50-60Вт.

Потужність створюваного фотоелектричного модуля (ФМ) буде залежати від двох головних параметрів: площі активної поверхні та ККД фотоелементів, з якої він складається. Сьогодні найбільшого поширення набули фотоелементи, виготовлені на основі моно- та полікристалічного кремнію, які здатні генерувати напругу близько 0,5 В. Відповідно, струм і потужність фотоелементів визначаються їх геометричними розмірами та особливістю технології виготовлення, наприклад, кількістю струмозйомних шин ВВ (bus bar) (рис. 1.11). Основні параметри і характеристики деяких фотоелементів наведені в таблиці 1.2.

Характеристики фотоелементів

Вихідний матеріал, кремній Source material, silicon	Розміри, мм Dimensions, mm	К-ть ВВ Number of bus bar	Струм, А Electric current, A	Потужність, Вт Power, W	ККД, % Efficiency, %
Монокристалічний Monocrystalline	156×156	4	9,6	4,8	19,4
	156×156	3	8,9	4,6	19,0
	125×125	2	5,4	2,7	17,6
Полікристалічний Polycrystalline	156×156	4	8,8	4,4	18,8
	156×156	3	8,4	4,2	18,0
	152×52	3	2,8	1,4	17,5
	52×52	1	0,86	0,43	17,0

В автономних СЕС номінальна напруга ФМ повинна відповідати напрузі накопичувачів електроенергії, у ролі яких використовуються різні типи акумуляторних батарей, напруга яких найчастіше дорівнює 12 В. Акумулятори можуть з'єднуватися паралельно, збільшуючи ємність, або послідовно, збільшуючи напругу з 12 до 24, 36, 48 В, і т.д. Саме ці значення і визначають значення напруги масиву або поодинокого ФМ.

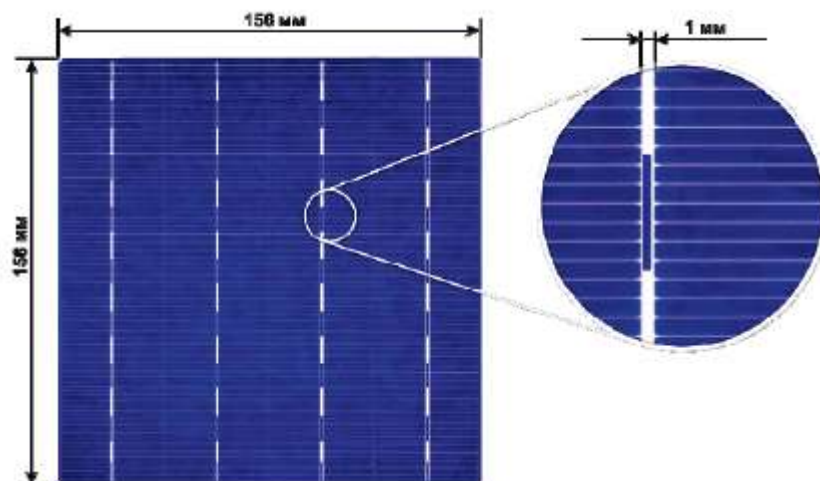


Рис. 1.11. Полікристалічний фотоелемент 4,4 Вт (4ВВ)

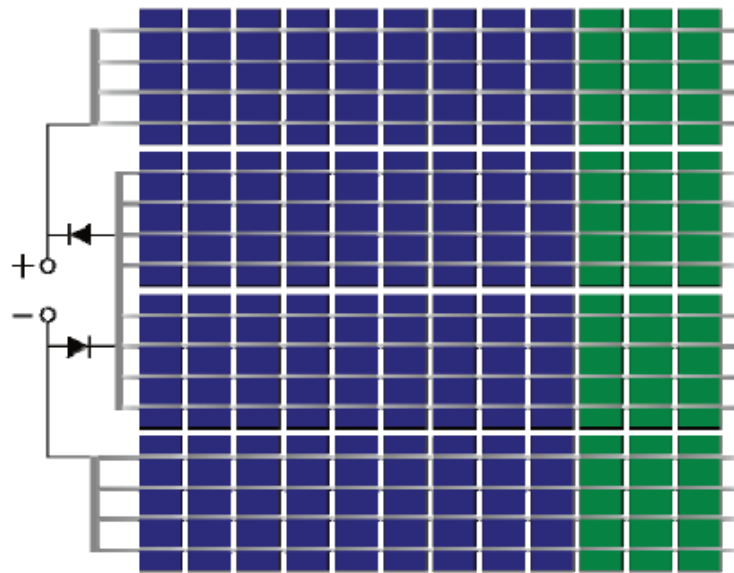


Рис. 1.12. Схема підключень сонячних елементів у модулі

Наступним етапом визначається структура СЕС. На рис. 1.14 зображено будову типової СЕС із використанням трекера.

Сонячний трекер у повній своїй комплектації складається з:

- несучої конструкції, яка складається із фіксованої та рухомої частини з одною або двома осями обертання;
- системи позиціонування, яка складається із актуаторів (рис. 1.13) або електродвигунів приводу несучої конструкції сонячних панелей та пристроїв, що керують ними;

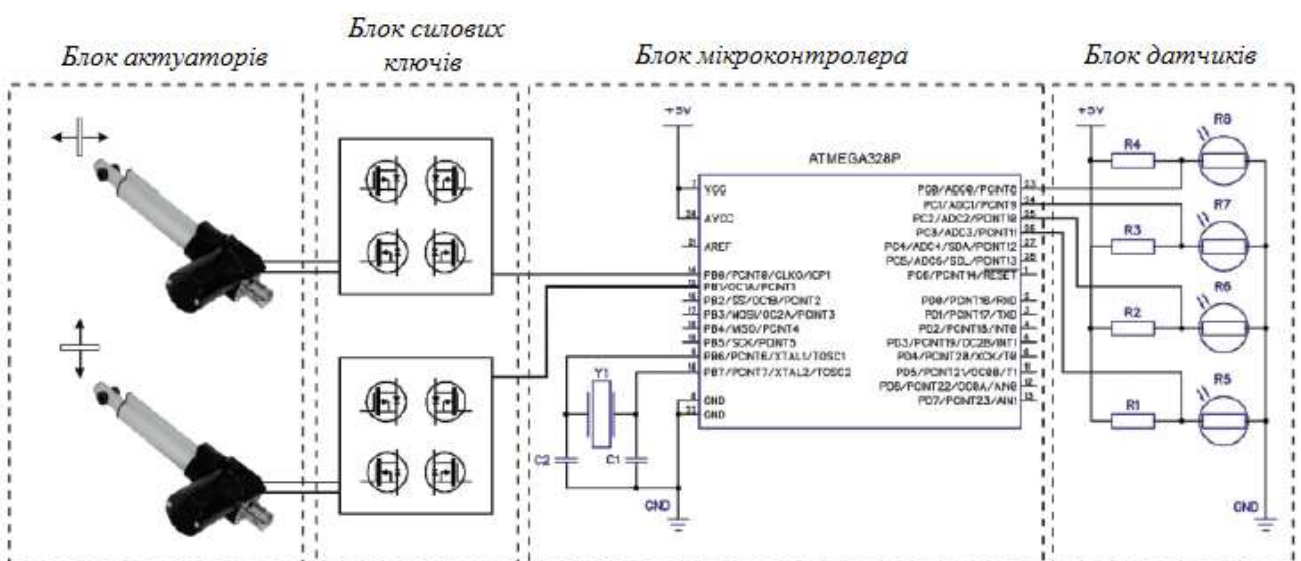


Рис. 1.13. Варіант схеми керування сонячним трекером із актуаторами

- системи безпеки від перевантажень, блискавок та системи аналізу даних про погодні умови;
- системи керування та інтерфейсу, призначеного для обслуговування енергосистеми;
- системи віддаленого доступу, яку забезпечує роутер, що підключений до інтернету;
- системи навігації для визначення географічного положення станції (для стаціонарних трекерів не є обов'язковою);
- інвертора DC-AC для перетворення постійного струму на синусоїдальний змінний струм напругою 220 В та передачі його споживачеві або на приймаючу станцію.

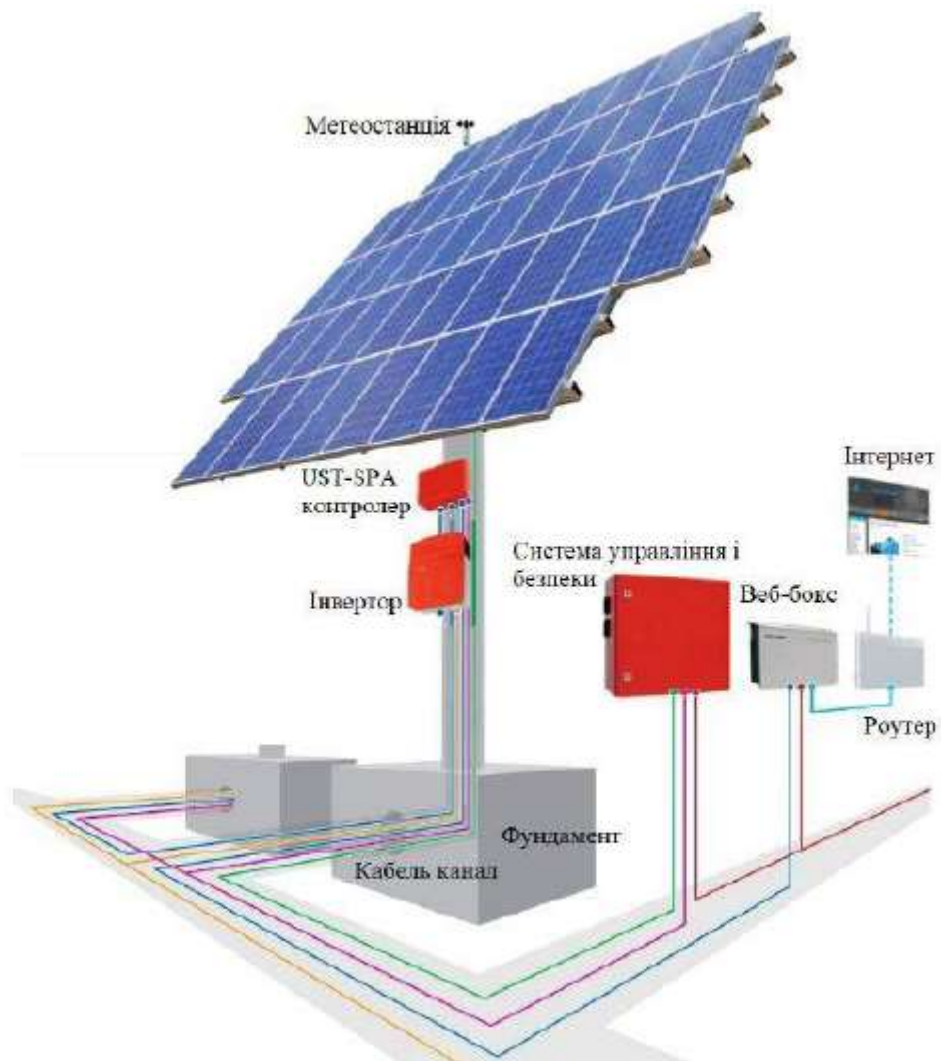


Рис. 1.14. Будова типової СЕС із сонячним трекером

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ФЕС ІЗ УРАХУВАННЯМ РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1. Об'єкт дослідження і постановка задачі

Типова схема побудови автономної ФЕС представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Схема побудови автономної ФЕС

Основними елементами автономної ФЕС є:

- сонячна батарея (СБ), яка складається з набору послідовно-паралельно з'єднаних фотоелектричних модулів (ФМ);
- перетворювач постійної напруги, що працює під керуванням контролера пошуку точки максимальної потужності;
- накопичувач енергії на базі акумуляторних батарей;
- вихідний інвертор напруги.

Для підвищення енергетичної ефективності ФЕС додатково комплектується системою стеження за Сонцем. У цьому випадку до складу ФЕС також входить блок керування сонячним трекером та виконавчий механізм, побудований на базі електродвигуна із редукторами.

Необхідною умовою побудови комплексної моделі електростанції є узгодження моделей елементів у складі єдиної енергетичної системи, що визначає вибір єдиного універсального інструменту моделювання. У цьому проєкті моделі усіх компонентів сонячної електростанції реалізовані у середовищі MatLab/Simulink у вигляді окремих підсистем, що дозволяє використовувати їх для дослідження режимів ФЕС довільної конфігурації.

При розробці математичної моделі ФЕС було враховано, що її функціонування характеризується великим розкидом швидкості протікання процесів в окремих елементах (підсистемах). Так, для напівпровідникових перетворювачів постійні часу складають долі секунди, для акумуляторної батареї – хвилини, для електричного навантаження години. Ця обставина обумовлює, з одного боку, проблеми побудови і реалізації адекватних математичних моделей компонентів, з іншого боку, показує можливість розгляду процесів у цих підсистемах окремо. При цьому взаємозв'язок між окремими підсистемами виражається у співвідношеннях між пов'язаними параметрами і організовується на основі вихідних характеристик або показників, виявлених у результаті моделювання підсистем.

Далі розглядаються спрощені модифікації моделей компонентів гібридної системи, які забезпечують відображення їх основних енергетичних характеристик. Даний клас моделей дозволяє використовувати чисельні методи вирішення з ітераційним кроком порядку 1 сек., і відповідно, забезпечується можливість дослідження енергетичних характеристик системи на тривалих інтервалах часу до десятків годин та діб.

2.2. Математичні моделі компонентів ФЕС

2.2.1. Модель сонячної радіації

Величина первинної сонячної енергії, яка доступна для перетворення ФЕС, визначається інтенсивністю сумарного сонячного випромінювання у місці її встановлення і залежить від географічних координат місця розташування ФЕС, просторової орієнтації СБ, а також від зовнішніх метеорологічних факторів: температури повітря, рівня захмареності, коефіцієнта відбиття земної поверхні.

Більшість метеорологічних факторів мають стохастичну природу, а їх коливання у часі містять від часток секунди і, принаймні до декількох десятиріч, що практично виключає можливість їх достовірного визначення теоретичними методами. У наш час при проектуванні ФЕС переважне поширення набули ймовірнісні (статистичні) методи розрахунку радіаційних характеристик [10], які використовують як вихідні дані спеціальні кліматичні довідники та електронні бази, які складені за результатами багатолітніх метеорологічних спостережень.

Сумарна сонячна радіація на довільно-орієнтовану за кутом нахилу β і азимуту γ приймальну поверхню розраховуються за методикою, яка запропонована В.У.Н. Liu, R.C. Jordan [11]

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{расс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma} =$$

$$= I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{\text{расс}}^{\text{гор}} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (2.1)$$

де $I_{\text{сум}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{пр}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{расс}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{отр}}^{\beta\gamma}$ - відповідно значення сумарної, прямої, розсіяної від хмар та аерозолів і відбитої від земної поверхні радіації на похилу поверхню;

$I_{\text{пр}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{расс}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{отр}}^{\text{гор}}$ - значення прямої, розсіяної і сумарної сонячної радіації, що потрапляє на горизонтальну поверхню;

θ – кут між напрямком потоку сонячного випромінювання на поверхню і нормаллю до неї;

θ_z – зенітний кут Сонця;

ρ – альbedo земної поверхні.

Величина кута θ визначається при розв'язку рівняння

$$\cos \theta = (A - B) \sin \delta + [C \sin \omega + (D + E) \cos \omega] \cos \delta. \quad (2.2)$$

Коефіцієнти A, B, C, D, E розраховують за виразами

$$\begin{aligned} A &= \sin \varphi \cos \beta; \quad B = \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma; \\ C &= \sin \beta \sin \gamma; \quad D = \cos \varphi \cos \beta; \quad E = \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де φ – широта місцевості у точці встановлення СБ;

δ – кут нахилу Сонця;

β – кут нахилу СБ до горизонтальної площини;

γ – азимутний кут встановлення СБ (при напрямку на Південь $\gamma = 0^\circ$, при відхиленні до Сходу γ вважається додатним, при відхиленні до Заходу – від'ємним);

ω – годинний кут Сонця.

Зенітний кут Сонця θ_z визначається за виразом

$$\theta_z = \arccos[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega], \quad \text{град} \quad (2.4)$$

Кут висоти підйому Сонця над горизонтом h розраховують за виразом

$$h = 90^\circ - \theta_z. \quad (2.5)$$

Азимутний кут положення Сонця A_z є розв'язком рівняння

$$\cos A_z = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi}. \quad (2.6)$$

Годинний кут визначають за виразом

$$\omega = 15(t - 12 - T_{\text{yB}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi, \quad \text{град.} \quad (2.7)$$

де t – поточний офіційний місцевий час, год.;

ΔT_{UTC} – різниця між місцевим офіційним часом і середнім часом за Гринвічем, год.;

ψ – географічна довгота точки розміщення СБ, град.

Годинна поправка на рівняння часу визначається як

$$T_{\text{ув}} = \frac{1}{60} [9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B)], \quad (2.8)$$

де $B = B_0 (N - 81)$, град.;

$B_0 = 360/365$;

N – номер календарного дня з початку року (для 01.01 – $N=1$, для 02.01 – $N=2$ і т.д.).

Кут нахилу Сонця визначають за формулою Купера [12]

$$\delta = 23,45 \sin[B_0(N + 284)], \text{ град} \quad (2.9)$$

Кути сходу ω_{sr} і заходу ω_{ss} Сонця за сонячним часом визначають із виразів

$$\begin{aligned} \omega_{sr} &= 0 - \arccos[-\text{tg} \varphi \text{tg} \delta]; \\ \omega_{ss} &= 0 + \arccos[-\text{tg} \varphi \text{tg} \delta]. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Для урахування реальних характеристик сонячної радіації, що потрапляє на певну територію, при моделюванні використовуються середні для заданого місяця значення індексу прозорості атмосфери K_T , отримані з бази даних космічної агенції США NASA SSE [13] за 22-річний період спостережень з 1983 по 2004 р.р. При цьому вважається, що індекс прозорості для поточних добових значень сонячної радіації дорівнює його середньодобовому значенню для даного місяця:

$$K_T = I_{\text{сум}}^{\text{гоп}} / I_0, \quad (2.11)$$

де I_0 – зовнішньо-атмосферна радіація на горизонтальну поверхню, що визначається за формулою Спенсера [12]

$$I_0 = I_{\text{сум}} [1 + 0,033 \cos(B_0 N)] \cos \theta_z, \quad (2.12)$$

де $I_{sun} = 1367 \text{ Вт/м}^2$ – сонячна постійна.

Величина розсіяної радіації, що потрапляє на горизонтальну поверхню, визначається через дифузний коефіцієнт K_D , який характеризує долю розсіяної радіації в сумарному випромінюванні

$$K_D = I_{\text{расс}}^{\text{гор}} / I_{\text{сум}}^{\text{гор}}. \quad (2.13)$$

Для знаходження K_D використовується методологія NASA [13], за якою доля розсіяної радіації визначається з системи поліноміальних рівнянь в функції від широти місцевості, індексу прозорості, годинного кута заходу та кута висоти Сонця у полудень над горизонтом.

Модель виконана у вигляді підсистеми, що складається з 9 основних функціональних блоків, що забезпечують розв'язок рівнянь 2.1 – 2.13: 1 – введення даних; 2,3 – розрахунок кутів висоти і азимуту Сонця; 4 – розрахунок сонячного часу сходу і заходу Сонця; 5 – розрахунок кута θ ; 6 – розрахунок дифузного коефіцієнту; 7,8 – розрахунок прямого і розсіяного сонячного випромінювання; 9 – розрахунок часового кута за місцевим офіціальним часом.

Можливість дослідження швидкоплинних процесів вимірювання сонячної радіації забезпечується за допомогою додаткового блоку імітації розірваної хмарності, який може бути включений до складу моделі опційно. Блок побудований на базі стандартного генератора випадкових чисел і передатної функції з бібліотеки MatLab/Simulink.

Блок-схема моделі розрахунку сонячної радіації із вікном введення даних представлена на рис. 2.2.

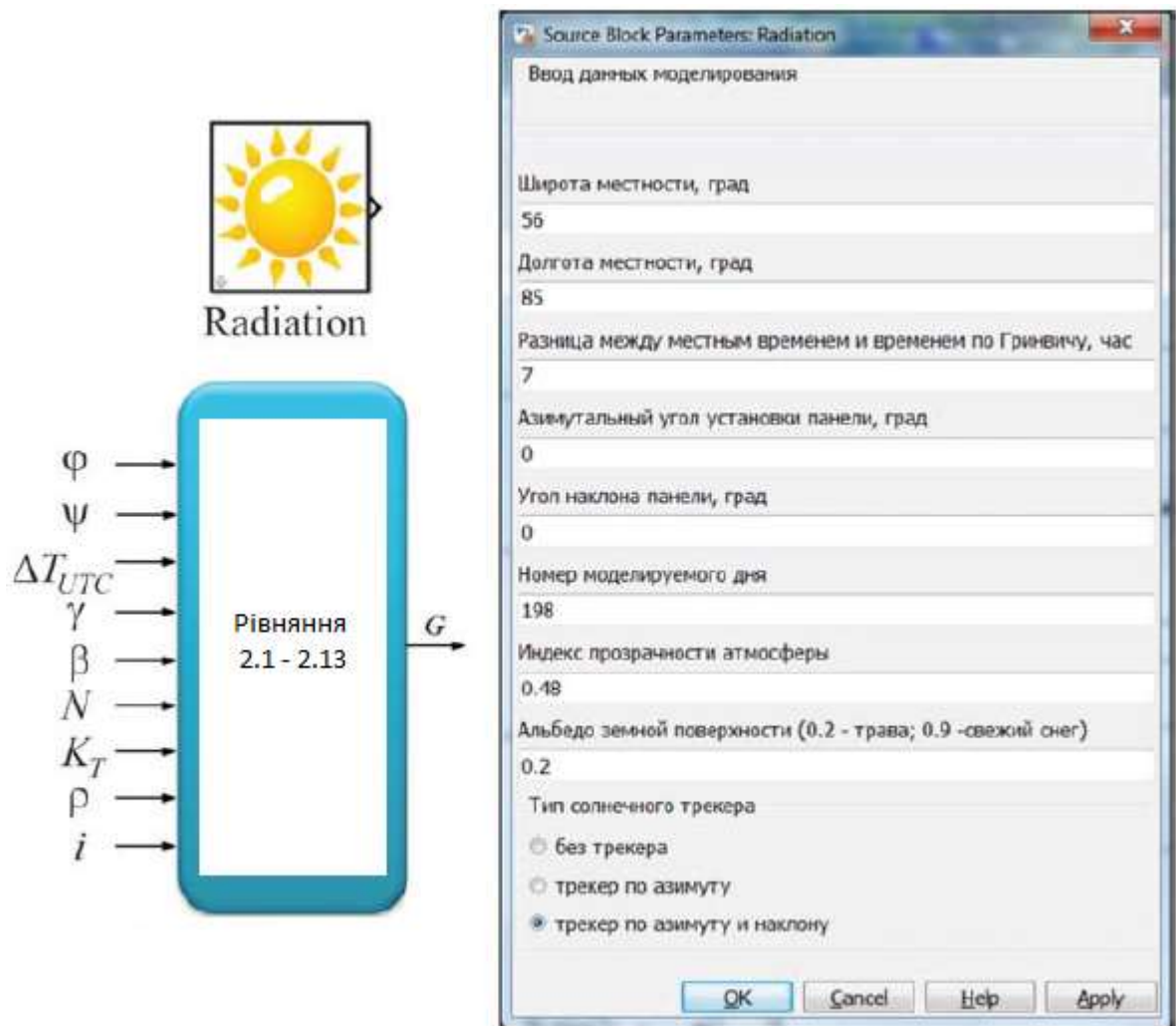


Рис. 2.2. Модель розрахунку сонячної радіації у MatLab/Simulink

Модель дозволяє визначити поточні значення величини сонячної радіації G , що приходить, для будь-якого дня року в довільному місці розміщення ФЕС на довільно орієнтовані поверхні, виконати аналіз ефективності використання сонячних трекерів різних типів, провести порівняльну оцінку продуктивності ФЕС по сезонам року.

Для верифікації моделі використовувалися багаторічні статистичні характеристики сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню для різних населених пунктів України, що представлені у вільному доступі на сайті Світового центру радіаційних даних [14] по станціям, що входять до складу мережі Всесвітньої метеорологічної організації (WMO). Проведена серія розрахунків показала, що модель приходу сонячної радіації забезпечує адекватне відображення результатів розрахунку сонячних енергетичних

ресурсів: середня відносна похибка моделі не перевищує 12%, що є прийнятним для виконання інженерних розрахунків.

2.2.2. Модель сонячної батареї

Для побудови моделі сонячної батареї використана методика, що запропонована A.D. Jones, C.P. Underwood [15], згідно з якою максимальна потужність СБ визначається за виразом

$$P_{PV} = C_{FF} N_{FM} \eta_{conv} G \ln(10^6 G) / T_{FM}, \quad (2.14)$$

де N_{FM} – кількість ФМ у складі СБ;

C_{FF} – постійний коефіцієнт СБ;

η_{conv} – ККД перетворювача із контролером максимальної потужності;

G – поточний рівень сонячної радіації, Вт/м²;

T_{FM} – поточна температура ФМ.

На відміну від оригінальної методики [15], для розрахунків величини C_{FF} була використана більш точна формула

$$C_{FF} = \frac{FF T_{ref}}{G_{ref}} \times \frac{[I_{SC} + k_I (T_{FM} - T_{ref})][V_{OC} + k_V (T_{FM} - T_{ref})]}{\ln(10^6 G_{ref})}, \quad (2.15)$$

де FF – коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики (ВАХ) ФМ;

T_{ref} , G_{ref} – значення температури і освітленості ФМ при стандартних умовах;

k_I , k_V – відповідно температурні коефіцієнти струму короткого замикання і напруги холостого ходу ФМ.

Коефіцієнт заповнення ВАХ ФМ визначається за даними технічної специфікації

$$FF = I_{MPP}V_{MPP} / I_{SC}V_{OC} , \quad (2.16)$$

де I_{MPP} , V_{MPP} – паспортні значення струму і напруги ФМ у точці максимальної потужності при стандартних умовах;

I_{SC} , V_{OC} – паспортні значення струму короткого замикання і напруги холостого ходу ФМ при стандартних умовах.

Модель СБ, реалізована у вигляді підсистеми у MatLab/Simulink, представлена на рис. 2.3.

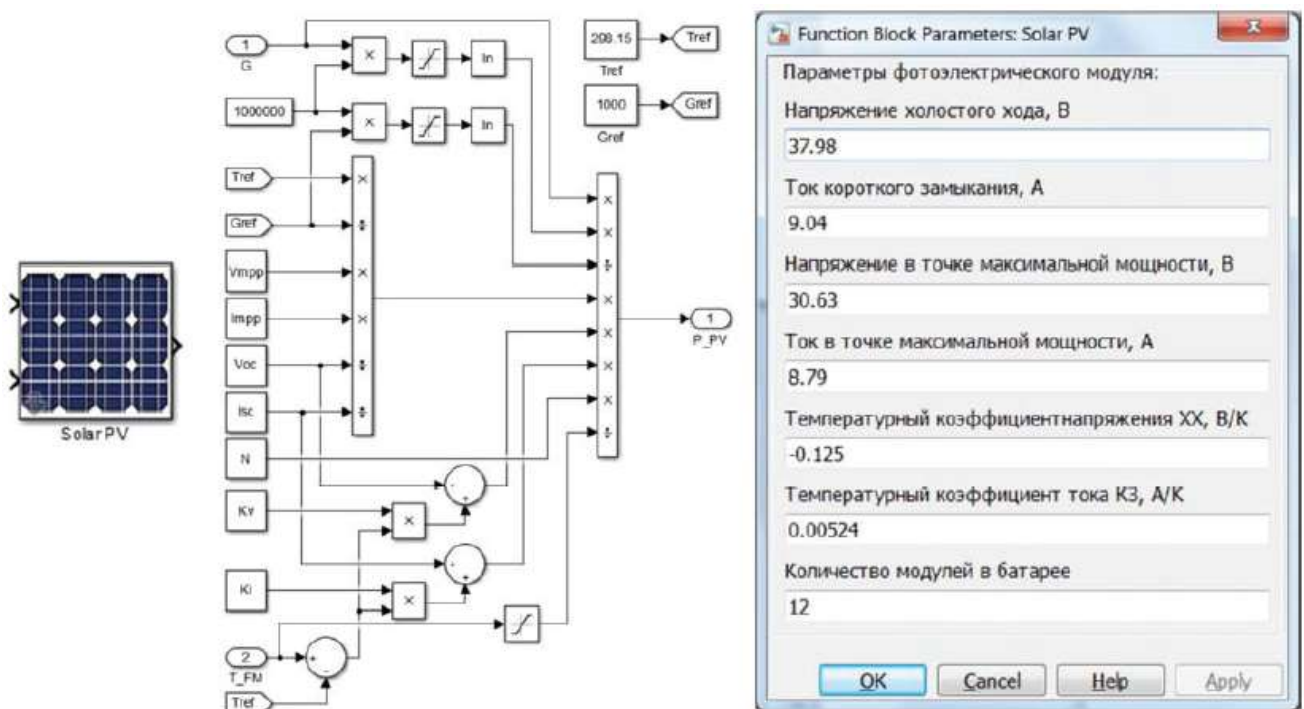


Рис. 2.3. Модель сонячної батареї у MatLab/Simulink

Внутрішні параметри моделі СБ визначаються даними технічної специфікації ФМ та їх кількістю, входними змінними моделі є поточне значення сонячної радіації G і температури поверхні ФМ T_{FM} , єдина вихідна змінна визначає максимальну активну потужність P_{PV} , яку можна зняти з СБ в поточних умовах експлуатації.

Для верифікації запропонованої моделі СБ використана модель фотоелектричного перетворювача, представлена у роботі [16], і дані технічної специфікації ряду ФМ моно- та полікристалічного типів.

Модель показала гарну відповідність результатів розрахунків із даними виробників, що забезпечує високу точність імітації в області точки максимальної потужності. Це дозволяє використовувати модель СБ для розробки ефективних алгоритмів контролерів ФЕС, удосконалення схемотехніки перетворювачів, прогнозування вироблення електроенергії, аналізу робочих режимів фотоелектричних систем.

2.2.3. Модель добового ходу температури повітря

Домінуючий вплив на енергетичні характеристики фотоелектричних перетворювачів спричиняє величина електричного навантаження, інтенсивність сонячного випромінювання, температура навколишнього середовища, швидкість вітру.

Для ФЕС, розташованих у північних широтах, зовнішні метеорологічні фактори можуть спричиняти суттєвий вплив на продуктивність СБ, тому їх необхідно враховувати. Найпростіше визначаються середньомісячні та середньодобові значення температури навколишнього середовища та швидкість вітру, які є незалежними величинами від параметрів проектованої електроустановки. Вихідними даними для їх визначення є статистичні дані метеорологічних спостережень, які можна отримати із архівів метеорологічних сайтів [17].

Слід зазначити, що на відміну від швидкості руху повітря, зміни температури у широтах України мають більш явно виражений добовий хід, для визначення якого можна використати наступний вираз

$$T(t) = \bar{T} + 0,5\Delta T \cos[2\pi(t_{\text{мест}} - t_{\text{max}})/t_{\text{пер}}], \quad (2.17)$$

де \bar{T} - середньодобова температура повітря, °С;

ΔT – добова амплітуда температури повітря, °C;

$t_{пер}$ – період зміни температури повітря, год.;

t_{max} – місцевий час максимуму температури, год.;

$t_{мест}$ – локальний (місцевий) сонячний час, год.

Модель добового ходу температури є використаною для будь-якого дня року і будь-якого населеного пункту із використанням статистичних даних метеоспостережень найближчої метеостанції. Модель реалізована у вигляді підсистеми і дозволяє за 3 вхідними параметрами отримати часову залежність варіації температури повітря для дня року, що розглядається (рис. 2.4).

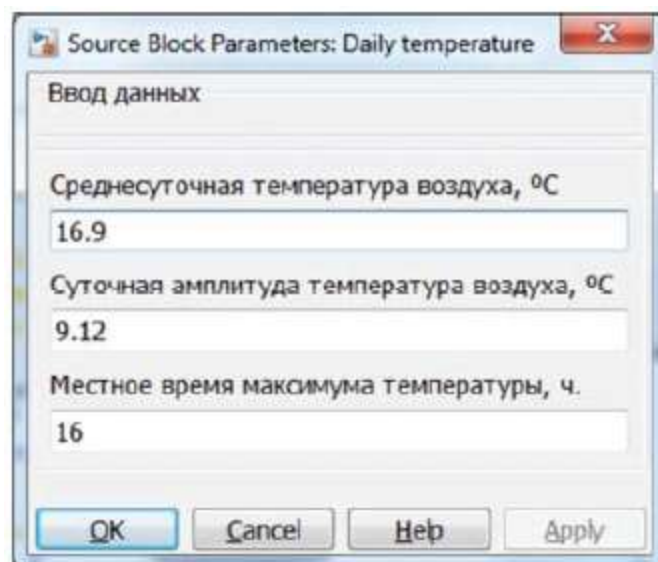
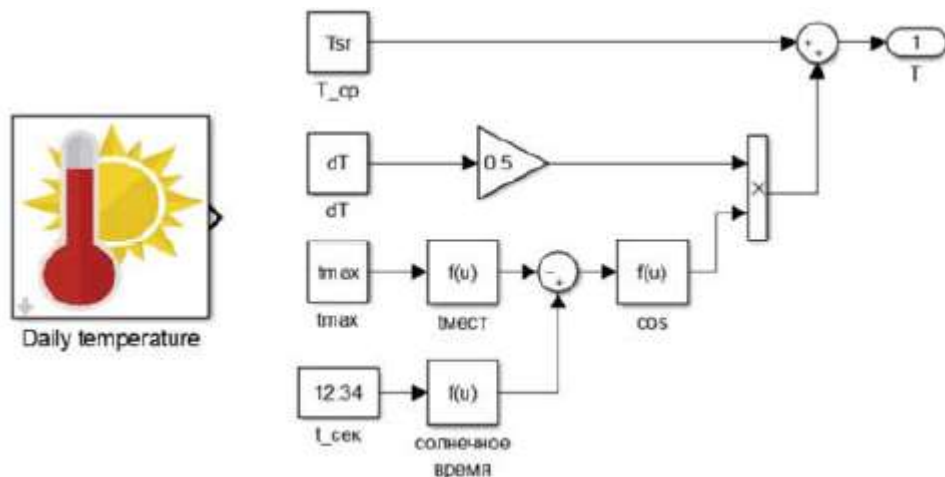


Рис. 2.4. Модель добового ходу температури у MatLab/Simulink

2.2.4. Модель температури поверхні фотоелектричного модуля

Крім навколишнього повітря на температурний режим ФМ безпосередній вплив спричиняють: енергія випромінювання, що потрапляє на поверхню ФМ разом із сонячними променями; внутрішні джерела теплоти, які утворюються за рахунок електричних втрат у сонячних елементах і контактних опорах. Робоча температура ФМ при експлуатації встановлюється у результаті теплообміну його поверхні із навколишнім середовищем, який має конвективно-променевиий характер. Визначення поточної температури ФМ теоретичними методами є практично неможливим внаслідок впливу на процес багатьох дуже різноманітних факторів: коефіцієнтів тепловіддачі та поглинання матеріалів модуля, сили і напрямку руху повітря, співвідношення передньої і задньої поверхонь модуля і т.п. Результати експлуатації ФЕС показують, що підвищення температури ФМ над температурою зовнішнього середовища при високих значеннях сонячної інсоляції може досягати 30°C, тому облік реальної температури ФМ у експлуатаційних умовах є обов'язковим. У зв'язку зі складністю теоретичного визначення температури ФМ використовуються емпіричні залежності, що отримані у реальних умовах експлуатації ФЕС [18] і адаптовані до певних кліматичних умов. За результатами цих досліджень, проведених для широт північної півкулі, визначена апроксимуюча залежність перевищення температури поверхні ФМ від величини сонячного випромінювання G та середньої швидкості вітру V , реалізована у MatLab/Simulink (рис. 2.5)

$$\Delta T_{FM} = 0,0283G - 0,0058GV + 0,0005GV^2, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.18)$$

Внаслідок інерції теплових процесів температура ФМ не може змінюватися миттєво, тому до складу моделі включена інерційна ланка, реалізована на базі стандартного блоку передатної функції.

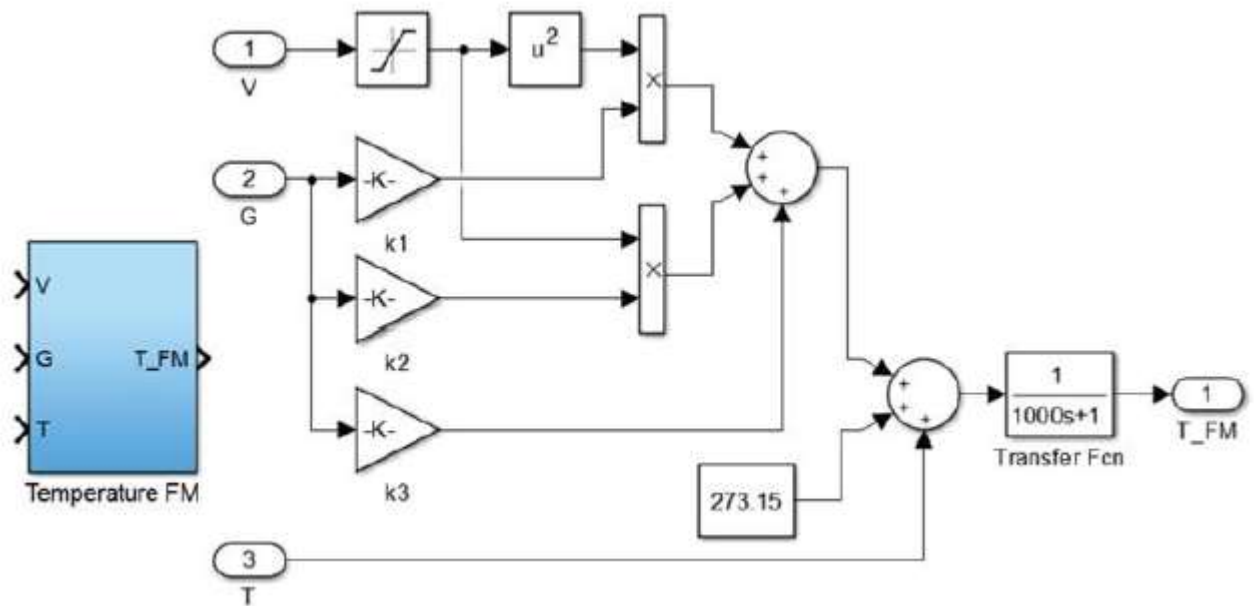


Рис. 2.5. Модуль розрахунку температури фотоелектричних модулів у MatLab/Simulink

2.2.5. Модель акумуляторної батареї

Для моделювання акумуляторної батареї (АБ) використаний метод, запропонований дослідниками Olivier Tremblay та Louis-A. Dessaint [19]. Модель АБ ґрунтується на узагальненому співвідношенні Шеферда і задається рівнянням

$$V_{batt} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{(Q - \int idt)} + A \exp(-B \int idt), \quad (2.19)$$

де $\int idt$ - фактичний рівень заряду АБ, А·год.;

R – внутрішній опір АБ, Ом;

V_{batt} – напруга АБ, В;

i – струм батареї, А;

A, B – коефіцієнти, що характеризують величину падіння напруги під час експоненціальної зони розряду (B) і обернену величину ємності АБ в кінці експоненціальної зони розряду ($A \cdot \text{год.}$)⁻¹;

K – поляризаційний опір (Ом).

Ця модель містить нелінійний член, який характеризує величину напруги (поляризаційна напруга), і який залежить від амплітуди струму і фактичного заряду АБ. В реальній АБ у режимі холостого ходу її напруга зростає практично до ЕРС холостого ходу E_0 , а при появі розрядного струму напруга різко спадає. Наявність нелінійного члену в рівнянні дозволяє знайти реальний струм розряду АБ, однак при чисельному розв'язку це призводить до алгебраїчного циклу і робить модель нестійкою.

У використаній моделі (2.19) величина напруги однозначно визначається значеннями розрядного струму і фактичним рівнем заряду батареї SOC , чим забезпечуються достатньо точні результати моделювання режимів розряду і заряду АБ різних типів, у тому числі таких, що використовуються в енергетичних системах із поновлюваними джерелами енергії: нікель-кадмієвих, свинцево-кислотних та літій-іонних.

На рис. 2.6 прийняті наступні позначення: E_{full} – напруга повністю зарядженої АБ, В; E_{exp} – напруга АБ наприкінці експоненціальної зони розряду, В; E_{nom} – номінальна напруга АБ, В; Q_{exp} – ємність АБ наприкінці експоненціальної зони розряду, А·год.; Q_{end} – залишкова ємність АБ при номінальній напрузі, А·год.



Рис. 2.6. Типова розрядна характеристика АБ

Параметри рівняння 2.19 визначаються за розрядною характеристикою, яку надає виробник, а їх фізичний сенс зображений на рис. 2.6.

У середовищі Simulink АБ моделюється за допомогою керованого джерела напруги, включеного послідовно із постійним опором (рис. 2.7).

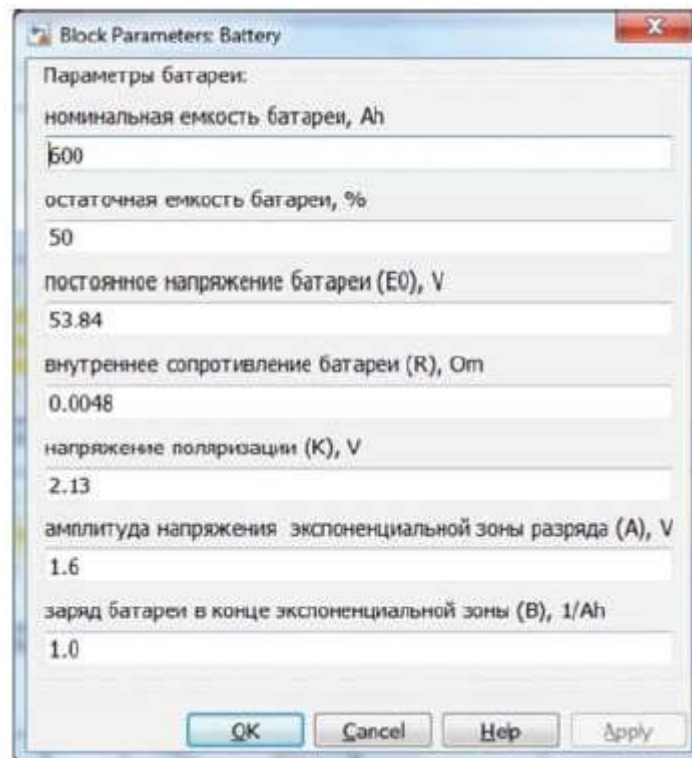
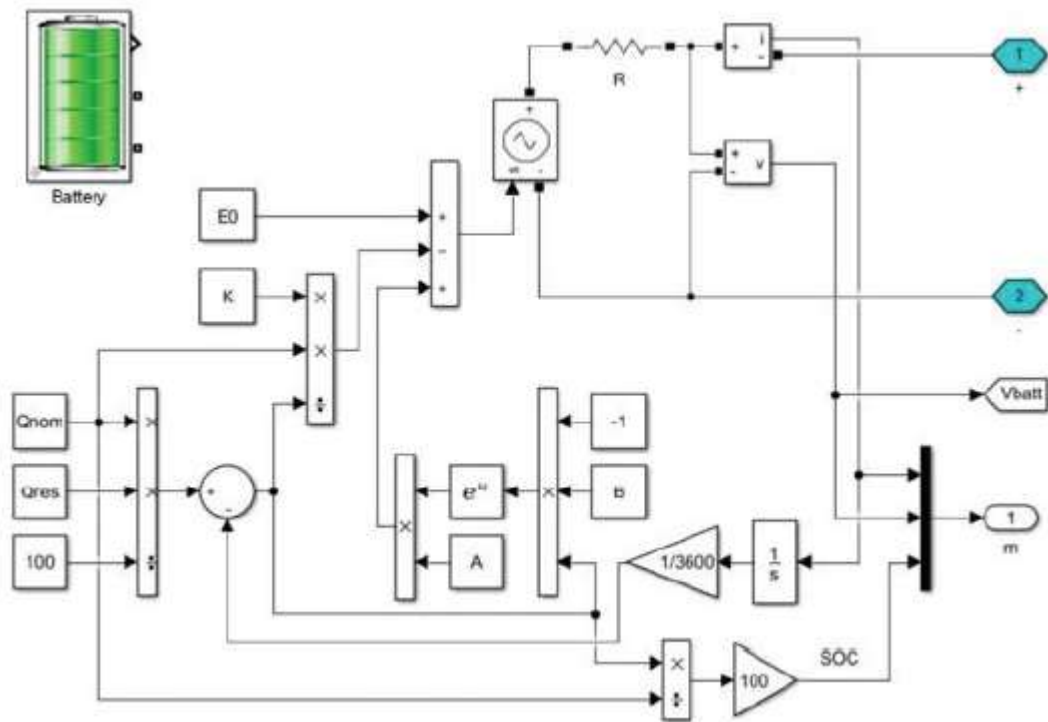


Рис. 2.7. Комп'ютерна реалізація моделі АБ у MatLab/Simulink

Модель виконана у вигляді окремої підсистеми із можливістю вводу основних параметрів через діалогове вікно, що дозволяє легко модифікувати її та використовувати для дослідження характеристик АБ та фотоелектричних систем довільної конфігурації на їх основі.

2.2.6. Моделі перетворювачів

У прийнятій схемі побудови ФЕС (рис. 2.1) використовуються два типи силових напівпровідникових перетворювачів: перетворювач постійної напруги та вихідний інвертор.

Для дослідження енергетичних характеристик ФЕС побудовані "спрощені" енергетичні моделі перетворювачів на базі ідеальних джерел струму і напруги. На рис. 2.8 представлена модель вихідного інвертора.

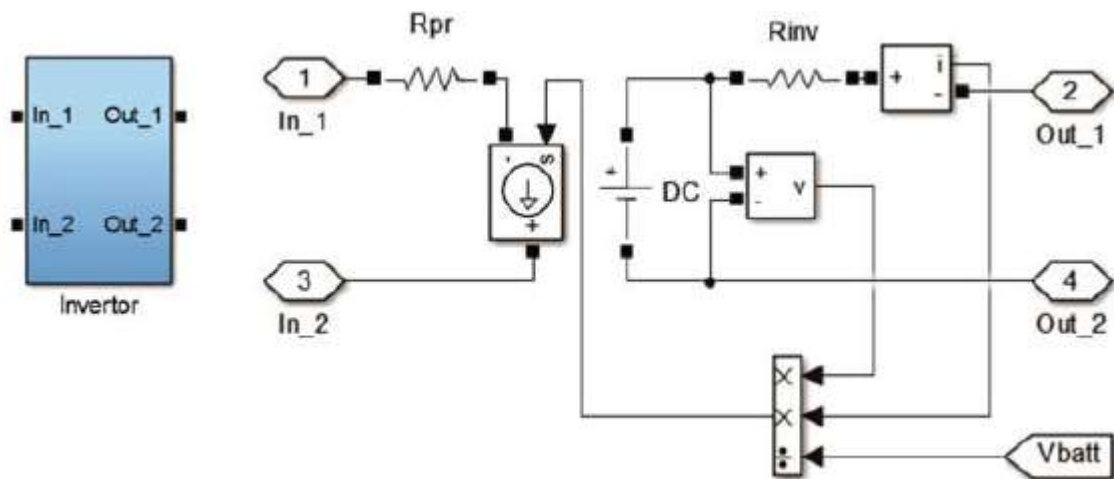


Рис. 2.8. Спрощена модель інвертора у MatLab/Simulink

Ідеальне джерело постійної напруги DC підключене до силових виводів (Out1, Out2) через послідовний активний опір R_{inv} , що забезпечує урахування внутрішніх втрат в інверторі. Вимірювальні трансформатори струму і напруги у вихідному колі інвертора забезпечують розрахунок споживаної навантаженням активної потужності і розрахунок поточних значень струму, що буде зніматися на затискачах АБ. Для обліку втрат у з'єднувальному кабелі від АБ у вхідне коло інвертора включений активний опір R_{pr} .

Аналогічним чином побудована модель перетворювача постійної напруги. Розрахункові тести підтвердили їх працездатність у межах можливого діапазону зміни вхідних і вихідних параметрів.

2.2.7. Модель електричного навантаження

Для моделювання електричного навантаження використовувались ймовірнісно-статистична модель, що задається виразом

$$P_{pi} = \bar{P}_i + \beta\sigma(P_i), \quad (2.20)$$

де P_{pi}, \bar{P}_i - розрахункове активне навантаження і математичне очікування навантаження на i -й годині добового графіку;

β - коефіцієнт надійності розрахунку, що визначає ймовірність, із якою випадкові значення навантаження залишаться менше за прийняте розрахункове значення P_{pi} ;

$\sigma(P_i)$ - середньоквадратичне відхилення для i -го ступеня добового графіку.

У розрахунках прийнятий нормальний закон розподілу навантажень, у відповідності із яким при $\beta = 3$ ймовірність неперевищення розрахункового навантаження складе 99,87%.

Як базову модель електричного навантаження слугував типовий графік активного навантаження сільських житлових будинків, який є типовим для автономних споживачів [20,21].

Комп'ютерна модель навантаження побудована на базі керованого джерела струму (рис. 2.9), вхідним параметром моделі є величина вихідної напруги інвертора, вихідними параметрами є струм і напруга на збірних шинах споживача електроенергії. Добовий графік активної потужності задається за допомогою стандартного блоку бібліотеки Simulink Signal Builder.

Для контролю вихідних електричних параметрів ФЕС у схему моделі включений вимірювальний порт m , який забезпечує вимірювання поточних діючих значень струму, напруги та активної потужності.

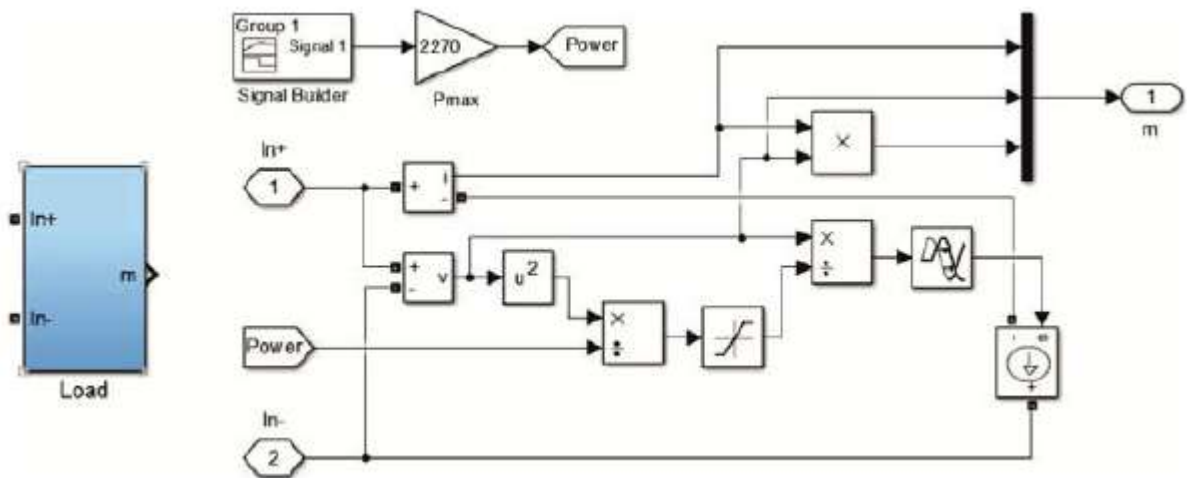


Рис. 2.9. Комп'ютерна модель електричного навантаження

2.2.8. Модель фотоелектричної станції

Розроблена імітаційна модель ФЕС із накопичувачем енергії складається із шести основних компонентів: модель надходження сонячної радіації, СБ, перетворювач постійної напруги (контролер заряду), АБ, інвертор, електричне навантаження. Усі моделі компонентів виконані у вигляді окремих підсистем у програмному середовищі MatLab/Simulink, мають властивість масштабування.

Комп'ютерна реалізація моделі ФЕС із контрольно-вимірювальними приладами представлена на рис. 2.10. Вона була ретельно протестована серією розрахунків, які підтвердили її працездатність і адекватність.

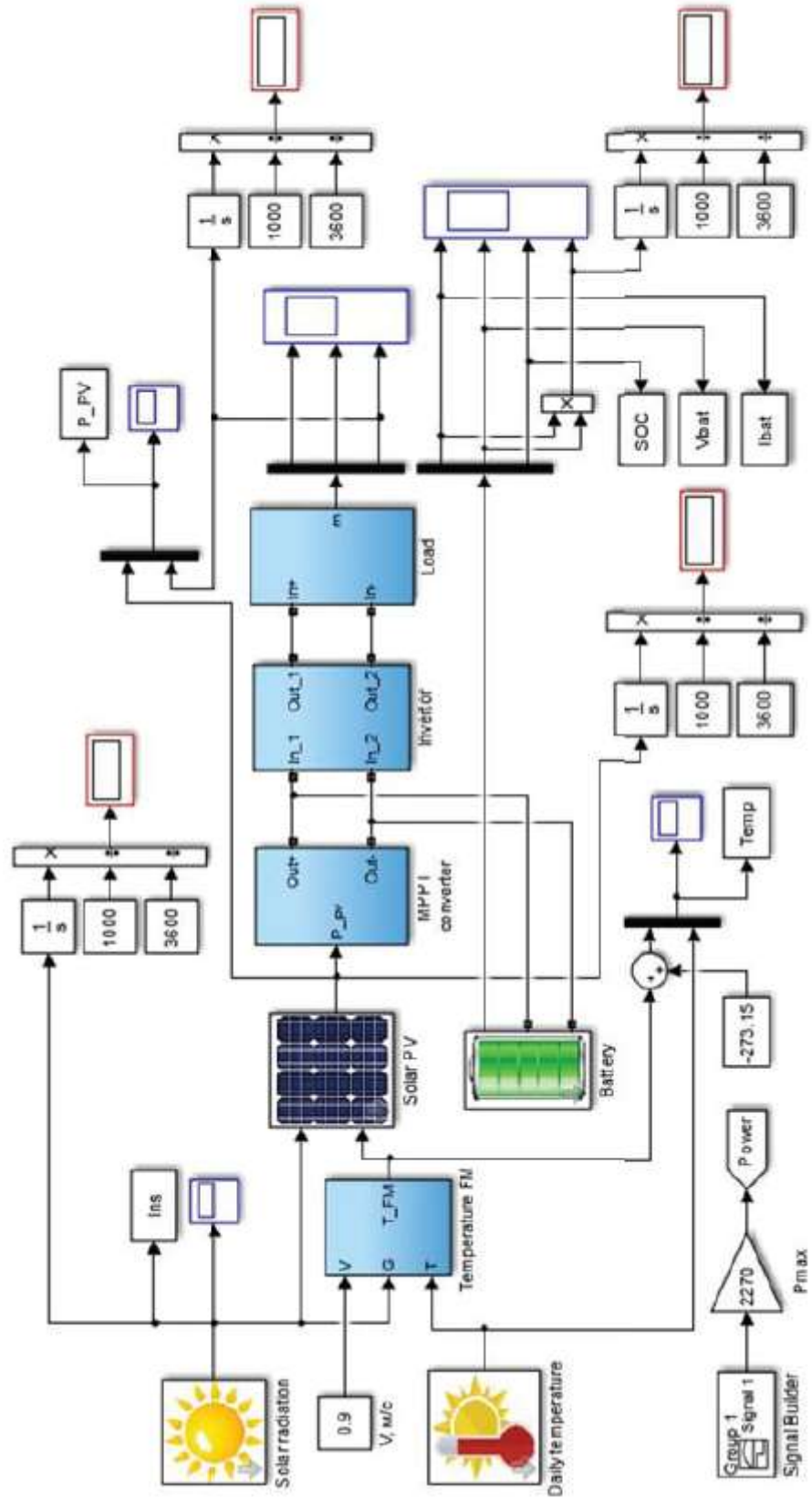


Рис. 2.10. Модель ФЭС у MatLab/Simulink

2.2.9. Результати моделювання

Опишемо результати використання запропонованої імітаційної моделі для аналізу робочих режимів ФЕС за умов Київської області (географічні координати м. Києва $50^{\circ} 27'$ північної широти, $30^{\circ} 31'$ східної довготи) для характерного літнього (21 червня) дня року.

Як об'єкт аналізу прийнята схема ФЕС у мінімальній конфігурації. До її складу входить СБ, що складається з 12 фотоелектричних модулів полікристалічного типу JAP6-60-260 [22] номінальною потужністю 260 Вт, з'єднаних у масив з трьох паралельних ланцюгів по 4 модуля у кожній. АБ побудована на базі 12 гелевих свинцево-кислотних акумуляторів Delta GX 12-200 [23]. Величина номінальної напруги АБ прийнята такою, що дорівнює $U_{\text{ном}} = 48\text{В}$, що визначає вид її електричної схеми: 3 паралельні гілки із 4 послідовно з'єднаними акумуляторами. У розглянутій ФЕС забезпечується автоматична орієнтація СБ на Сонце за азимутом і кутом нахилу.

Вихідними даними моделювання були використані метеорологічні зведення для м. Києва, отримані за результатами багаторічних спостережень. При виконанні розрахунків прийняті середні значення температур навколишнього повітря та швидкості вітру, отримані в результаті обробки статистичних даних за 2015-2020 р.р. за даними [17]. Середні значення альbedo земної поверхні визначені за [24].

Для дня року, що розглядається, середньодобова температура повітря склала $16,9^{\circ}\text{C}$, амплітуда добового ходу температури – $9,1^{\circ}\text{C}$, середня швидкість руху повітря – $0,9$ м/с, місцевий час максимуму температури 16 годин дня, альbedo земної поверхні – $0,22$.

На рис. 2.11 наведені розрахункові часові графіки режимних параметрів ФЕС для досліджуваного дня.

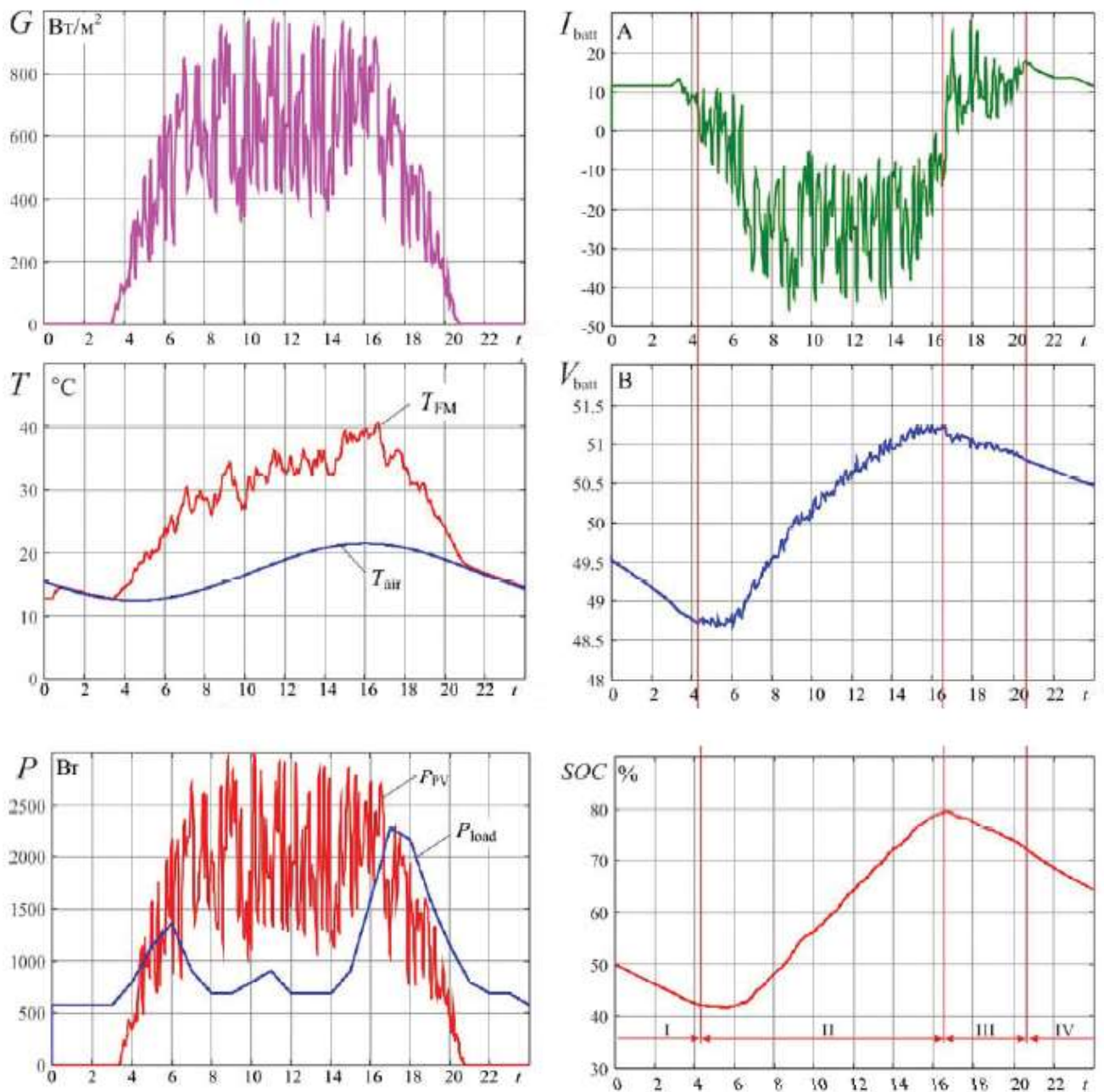


Рис. 2.11. Розрахункові погодинні графіки режимних параметрів ФЕС

у характерний день року:

$G(t)$ – залежність рівня сонячної радіації від часу доби; $T(t)$ – залежність температури навколишнього середовища (T_{AIR}) та поверхні модуля (T_{FM}) від часу доби; $P(t)$ – залежність активної потужності, згенерованої фотоелектричним модулем (P_{FV}) та потужності, що споживається навантаженням (P_{load}) від часу доби; $I_{batt}(t)$ та $V_{batt}(t)$ – залежність струму і напруги АБ від часу доби; $SOC(t)$ – залежність рівня заряду АКБ від часу доби.

Аналіз результатів моделювання дозволив провести детальну оцінку енергетичного балансу ФЕС.

Загальна кількість енергії, що може бути згенерована СБ за добу (без урахування температурного дрейфу вольт-амперних характеристик ФМ), знайдена через розрахункові значення сонячної радіації $G(t)$ та дані технічної специфікації ФМ JAP6-60-260:

$$W_{PV} = \eta_{FM} S_{FM} N_{FM} \int_0^{24} G(t) dt = 31,9 \text{ кВт год.}$$

де $\eta_{FM} = 0,159$ – ККД фотоелектричного модуля;

$S = 1,63 \text{ м}^2$ – площа ФМ;

$N_{FM} = 12$ – кількість ФМ у сонячній батареї.

Для дня року, що розглядається, розрахунковий добовий виробіток електроенергії СБ склала 31,9 кВт·год., що перевищило добовий зимовий виробіток більше, ніж у 4 рази. Максимально можлива кількість енергії, яку може отримати споживач від даної ФЕС за добу у день, що розглядається

$$W_{load} = W_{PV} \eta_1 \eta_2 \eta_3 = 31,9 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 23,2 \text{ кВт год.}$$

У розрахунках прийняті середні значення ККД перетворювальних пристроїв – контролера заряду батареї ($\eta_1 = 0,95$), акумуляторів - ($\eta_2 = 0,85$), інвертора ($\eta_3 = 0,9$).

Середня потужність навантаження об'єкта постачання склала

$$23,2/24 = 0,97 \text{ кВт.}$$

Для типового графіка електричних навантажень децентралізованого споживача максимальне добове навантаження дорівнює

$$P_{MAX} = 2,34 \cdot 0,97 = 2,27 \text{ кВт,}$$

де 2,34 – коефіцієнт максимуму навантаження.

У виконаних розрахунках прийнятий типовий добовий графік навантажень децентралізованих споживачів із максимальним навантаженням $P_{MAX} = 2270 \text{ Вт.}$

Результати моделювання досить добре відображають характер фізичних температурних процесів при експлуатації ФЕС. З рис. 2.11 видно, що в години доби, коли відсутнє потрапляння сонячної радіації на поверхню Землі, ТFM дорівнює температурі навколишнього середовища, при освітленні СБ її температура збільшується, причому тим більше, чим сильніша інтенсивність надходження сонячного випромінювання. Максимальне значення ТFM досягається близько 16 години дня, при цьому перевищення ТFM над температурою навколишнього повітря доходить до 19°C.

З наведених на рис. 2.11 графіків видно, що при прийнятому співвідношенні потужностей забезпечується повне покриття споживаної енергії енергією, що генерується СБ. Однак для безперебійного забезпечення споживача електричною енергією в даних умовах необхідно, щоб зменшення ємності АБ у темну частину доби встигало поповнюватися за час світлового дня, для чого був проведений аналіз енергетичних процесів в АБ. Для зручності аналізу на правих графіках (рис. 2.11) виділені 4 характерні режимні зони роботи ФЕС: зони I та IV відповідають режимам живлення споживача від АБ, в зоні II генерованої потужності достатньо для повного покриття електричного навантаження споживача і заряду АБ, в зоні III навантаження частково покривається за рахунок СБ, і частково за рахунок АБ. Для реалізації такого режиму вихідний інвертор ФЕС повинен вміти "підмішувати" енергію з АБ до енергії, що знімається із затискачів СБ.

Результати моделювання свідчать про те, що для прийнятих умов експлуатації дана конфігурація ФЕС забезпечує безперебійне електропостачання споживача із максимальним розрахунковим навантаженням 2270 Вт, і за умови допустимого 50%-го розряду АБ забезпечується 12-ти годинне резервування споживаної потужності.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

3.1. Розробка алгоритму функціонування системи

Розроблювана система повинна виконувати в першу чергу опитування датчиків освітлення, які встановлені на сонячних панелях, при цьому також розраховуються Зенітний і Азимутальний кути. Ці показання відображаються на LCD дисплей. Далі поточні показання порівнюються з прописаними в пам'яті трекера значеннями і панелі за допомогою серводвигунів розташовуються так, щоб сонячні промені падали під прямим кутом на поверхню. Також додатково реалізована можливість завдання координат системи через інтерфейс USART і повернення трекера у вихідне положення після заходу Сонця.

З урахуванням нашої поставленої задачі складаємо алгоритм роботи системи позиціонування, яка проектується. Робота проекрованої системи починається з ініціалізації. Наступним кроком починається опитування підключених датчиків до трекера, яке працює циклічно. Для отримання інформації з датчиків здійснюється опитування портів вводу-виводу мікроконтролера. Показання записуються в пам'ять системи. Після опитування всіх датчиків та отримання від них інформації, система виконує обробку даних. В результаті цього обчислюються Азимутальний і Зенітний кути. В залежності від поточної дати та часу, система порівнює їх із заданими в пам'яті, і якщо вони відрізняються, мікроконтролер дає команду серводвигунам, які змінюють кути нахилу трекера до поки вони не стануть дорівнювати кутам розташування Сонця.

Алгоритм роботи цієї системи позиціонування сонячних панелей, яка проектується, зображена на рис. 3.1.

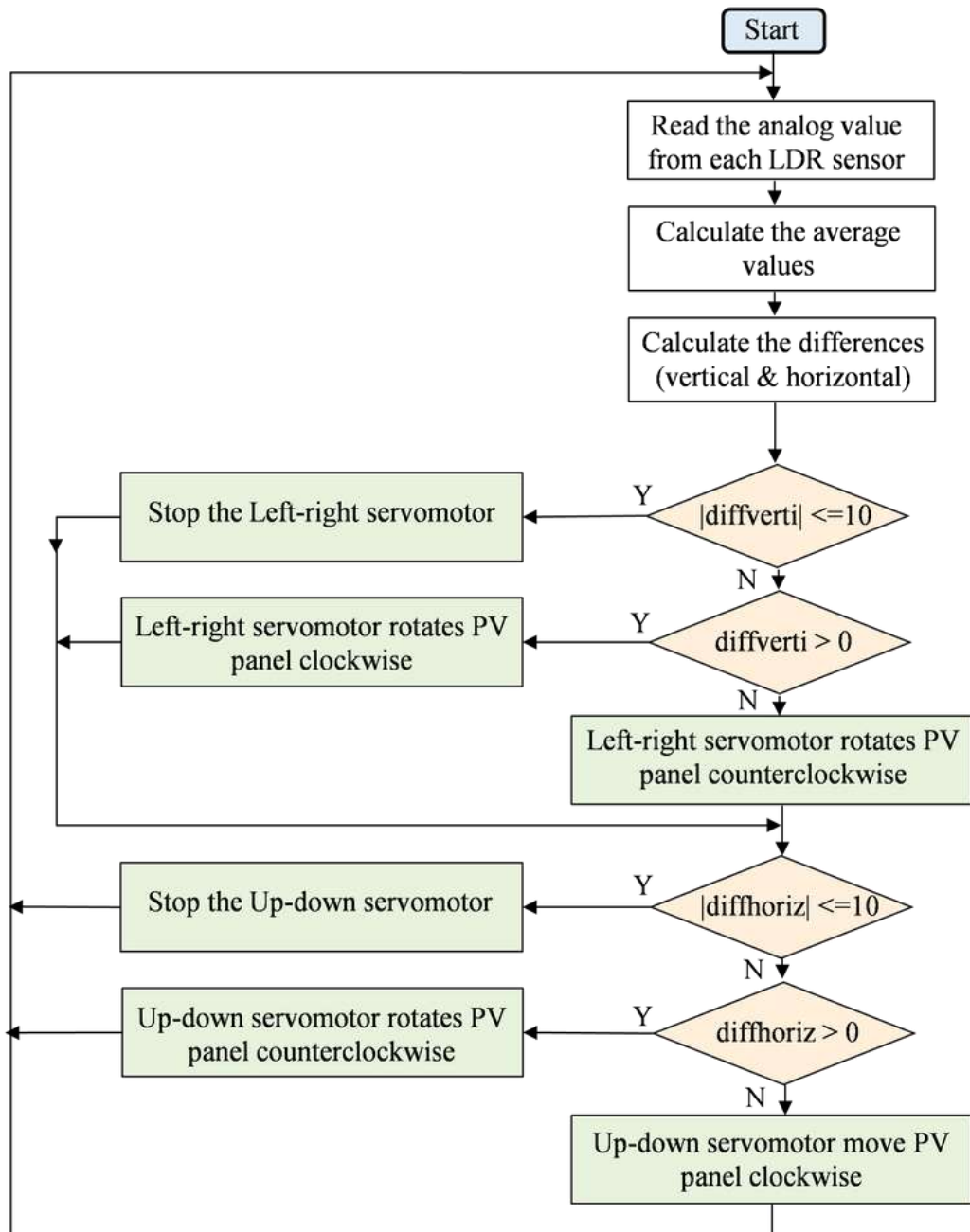


Рис. 3.1. Алгоритм роботи системи позиціонування сонячних панелей

Для завдання поточних кута возвищення та азимуту сонця в залежності від поточного часу використана бібліотека SolarLib [31], започатковану Люком Мілером у 2012 році.

У додатку А наведена програма на C++, яка використовує дані цієї бібліотеки, що зберігаються в базі даних у вигляді Excel файлів (додаток Б, В).

3.2. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування позиціонуванням сонячних панелей

Так як в розробленій системі передбачається циклічне опитування датчиків, розрахунки по формулам, виведення результатів розрахунків на дисплей в реальному часі та керування серводвигунами, можна дійти висновку, що систему логічно проектувати на базі мікроконтролера.

Дану систему умовно краще розділити на декілька блоків, для кращого розуміння:

- 1) блок, який визначає розташування трекера у просторі;
- 2) мікроконтролер, який виконує порівняння показань датчиків з поточними координатами сонця, подає сигнали серводвигунам на виконання переорієнтації трекера і виводить координати на дисплей;
- 3) інтерфейс користувача, в нашому випадку це LCD дисплей.

Система для орієнтації у просторі складатиметься з датчика кута нахилу (акселерометра) та модуля електронного компаса. Цих даних достатньо для досягнення точних даних для переорієнтації трекера.

В проєктованій схемі в якості датчиків будуть використовуватися:

1) магнітометр – вимірювальний прилад, призначений для вимірювання параметрів магнітного поля. Магнітне поле Землі в будь-якій точці характеризується вектором напруженості T , напрям якого можна визначити за трьома складовими по осях X , Y , Z в прямокутній системі координат. Також воно описується горизонтальною складовою напруженості H , тобто за Азимутальним кутом;

2) акселерометр – прилад, призначений для вимірювання різниці істинного прискорення об'єкта та гравітаційного, іншими словами знаходить інерційну масу. Ці дані завдяки розрахункам переведуться в значення Зенітного кута;

3) годинник реального часу, так як Сонце постійно змінює своє положення протягом часу та пори року. В пам'яті мікроконтролера створюється таблиця зі значеннями відповідності кутів положення сонця та показань годинника в даний момент.

В якості інтерфейсу передачі даних між датчиками і мікроконтролером використовується Inter-Integrated Circuit (I²C) – це протокол, який створювався для зв'язку інтегральних мікросхем всередині електронного пристрою. В основі цього протоколу використовується 8-бітна шина, яка виступає мостом для зв'язку між блоками в керуючій електроніці, та системи адресації, завдяки якій відкривається можливість спілкуватися з декількома пристроями по однакових дротах. Просто дані передаються з додаванням до пакетів ідентифікатора потрібного елемента.

Найпростіша схема I²C може містити в собі один ведучий пристрій (зазвичай мікроконтролер) і декілька введених (наприклад, дисплей LCD).

Кожен має адресу в діапазоні від 7 до 127. Двох однакових адрес пристроїв в одній схемі не має бути.

З протоколу I²C можна виділити такі переваги:

- підтримує різні швидкості передачі даних відповідно до версій 100 Кбіт/с, 400 Кбіт/с, 1 Мбіт/с до 3,4 Мбіт/с;
- синхронна комунікація типу SPI;
- використовує лише 2 лінії – SDA (Serial Data) і SCL (Serial Clock);
- у ланцюзі можуть бути використані більше одного пристрою;
- легко виконати діагностику виникнення помилок та їх виправлення;
- для керування декількома пристроями потрібен лише один мікроконтролер;
- пристрої можуть бути вилучені з апаратних засобів, не впливаючи на будь-які інші схеми на шині.
- Проте I²C має і ряд недоліків:

- напівдуплексний режим зв'язку;
- потребує більш складного обладнання;
- швидкість передачі даних менша, ніж у SPI.

Як інтерфейс передачі даних на комп'ютер використовується інтерфейс RS-232. Даний інтерфейс досить просто реалізувати апаратно, він має високу швидкість передачі даних, конкурентноспроможну завадостійкість, підтримується більшістю сучасних мікроконтролерів.

Інтерфейс RS-232-C з'єднує два пристрої. Лінія передачі першого пристрою з'єднується з лінією прийому другого і навпаки (повний дуплекс). Для керування з'єднаними пристроями використовують програмне підтвердження (введення відповідних керуючих символів у потік переданих даних). Також можлива організація апаратного підтвердження шляхом організації додаткових RS-232 ліній для забезпечення функцій визначення статусу і управління [27].

RS-232C – це інтерфейс, з яким комп'ютер використовує для спілкування та обміну даними з вашим модемом та іншими послідовними пристроями. У ПК, як правило, на чіпі універсального асинхронного приймача / передавача (UART) на вашій материнській платі, дані з вашого комп'ютера передаються на внутрішній або зовнішній модем (або інший послідовний пристрій) з інтерфейсу DTE. Оскільки дані у вашому комп'ютері протікають вздовж паралельних контурів, а послідовні пристрої можуть обробляти лише один біт за раз, чіп UART перетворює групи бітів паралельно послідовному потоку бітів.

Дані RS-232C передаються в послідовному коді побайтно. Кожен з байтів отримує стартовий і стоповий біти. Формат даних, що передаються, показано на рис. 3.2.

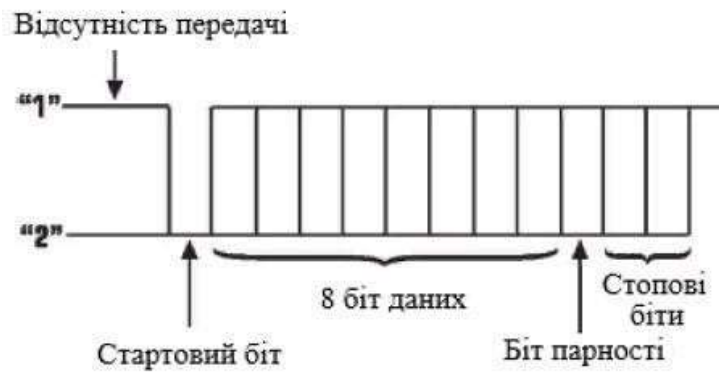


Рис. 3.2. Формат даних RS-232C

Власне дані (5, 6, 7 або 8 біт) супроводжуються стартовим бітом, одним або двома стоповими бітами, бітом парності. Отримавши стартовий біт, приймач вибирає з лінії біти даних через певні інтервали часу. Важливо, щоб тактові частоти передавача і приймача були однаковими (нормальна розбіжність – не більше 10%). Швидкість передачі по RS-232C може вибиратися з ряду: 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 біт/с.

Перевагами цього інтерфейсу вважають: високе розповсюдження, простоту і дешевизну з'єднувального кабелю, доступність програмного забезпечення для роботи з інтерфейсом.

Недоліки RS-232C полягають в тому, що він реалізує зв'язок типу «точка-точка» з низькою, за сучасними технологіями, швидкістю (зазвичай 9600 біт/с), і працює тільки на невеликих відстанях.

Для перетворення послідовних даних в паралельні та навпаки, пристрої, які підключаються до RS-232, потребують модуль універсального асинхронного прийомопередавача UART. Цей модуль працює, як правило, з сигналами TTL-рівнів. Для перетворення цих сигналів в рівні інтерфейсу RS-232 і навпаки використовуються передавачі та приймачі.

Функціональна схема автоматизації системи керування позиціонуванням сонячних панелей зображена на рис. 3.3.

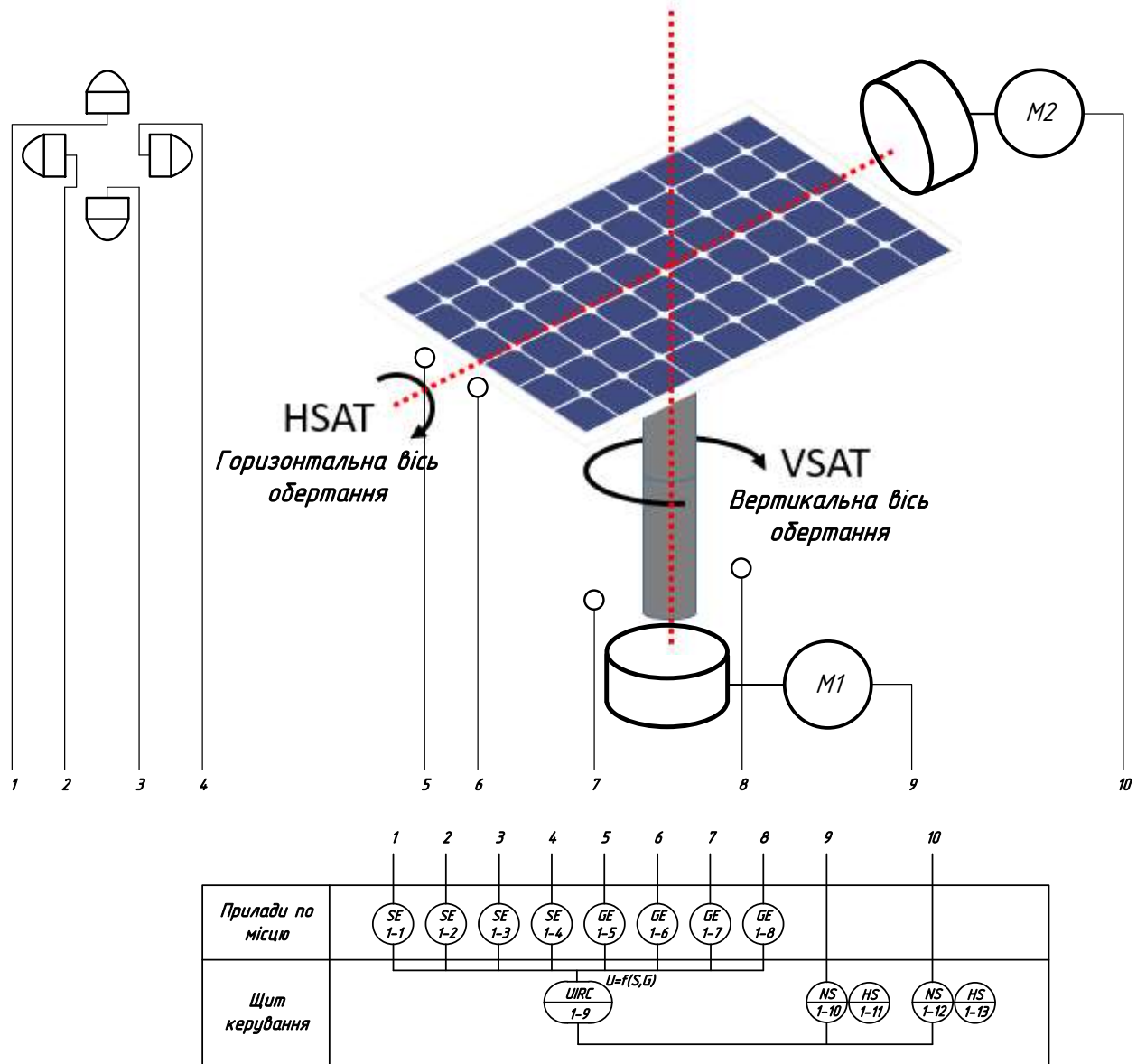


Рис. 3.3. Функціональна схема автоматизації системи керування позиціонуванням сонячних панелей

3.3. Вибір елементної бази

3.3.1. Мікроконтролер

Мікроконтролер Atmega 328 (рис. 3.4) використовується у популярній платформі апаратно-програмних засобів Arduino, зокрема Arduino UNO, яка широко використовується для побудови різноманітних автоматизованих систем і експериментальних досліджень, у тому числі, і в системах сонячної енергетики.



Рис. 3.4. Мікроконтролер Atmega 328

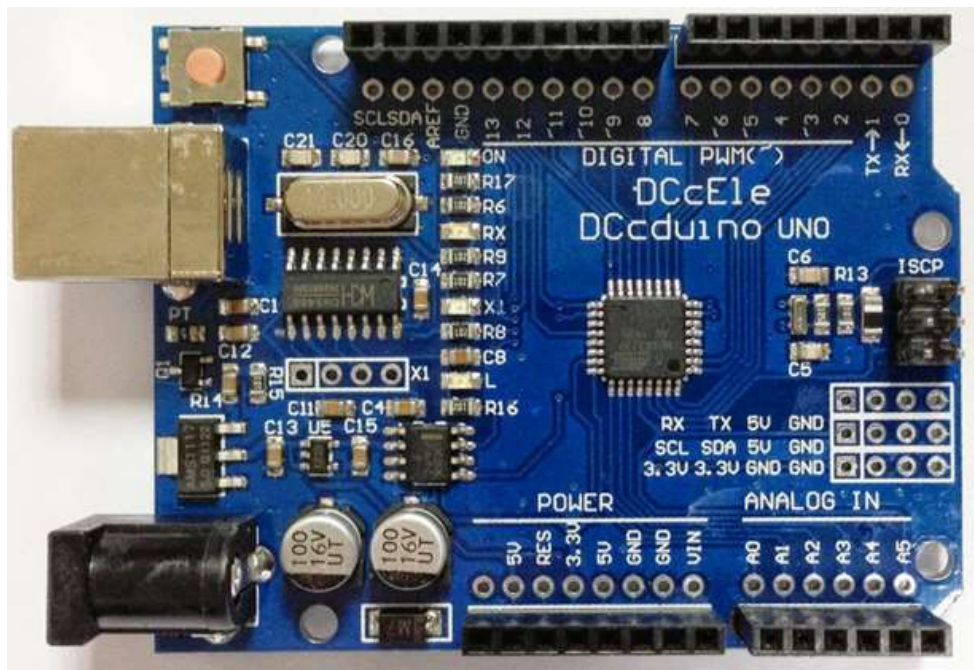


Рис. 3.5. Апаратно-програмний засіб Arduino UNO

Плата STM32VLDISCOVERY підтримує I²C на апаратному рівні. Завдяки цьому протоколу можна використовувати пini PB6 і PB7 для підключення пристроїв.

Особливості плати STM32VLDISCOVERY:

- вбудований ST-Link з перемикачем режиму вибору для використання комплекту як автономного ST-Link (з роз'ємом SWD для програмування та налагодження);
 - вбудовано мікроконтролер STM32F100C4T6B;
 - інтерфейси I²C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART;
 - 8 КБ оперативної пам'яті;
 - 32 – бітне ядро Cortex-M3, робоча частота 24 МГц;
 - кількість входів/виходів 51;
 - периферія DMA, PDR, POR, PVD, PWM, Temp Sensor, WDT;
 - призначена для живлення від USB або зовнішнього джерела живлення 5 В або 3,3 В;
 - робоча температура -40 ... 85 °С;
 - таймер з розширеними функціями;
 - 6 таймерів загального призначення;
 - 16-канальний 12 бітний АЦП; двоканальний 12-розрядний ЦАП
- [28].

3.3.2. Дисплей LCD

Для виведення текстової інформації різного змісту зручно застосовувати символні дисплеї, беручи за увагу їх поширеність і простоту використання. В основі більшості таких дисплеїв лежить контролер HD44780, який дозволяє підключатися до дисплея за допомогою 4 або 8 лінійної шини даних і 3-х ліній управління. Контролер HD44780 приймає команди та виводить відповідні символи на РК дисплеї.

З доступних на ринку LCD дисплеїв, я обрав простий дисплей LCD2004 компанії Winstar, який відображає по 20 ASCII символів в 4 рядки. На рис. 3.6 показано цей дисплей.

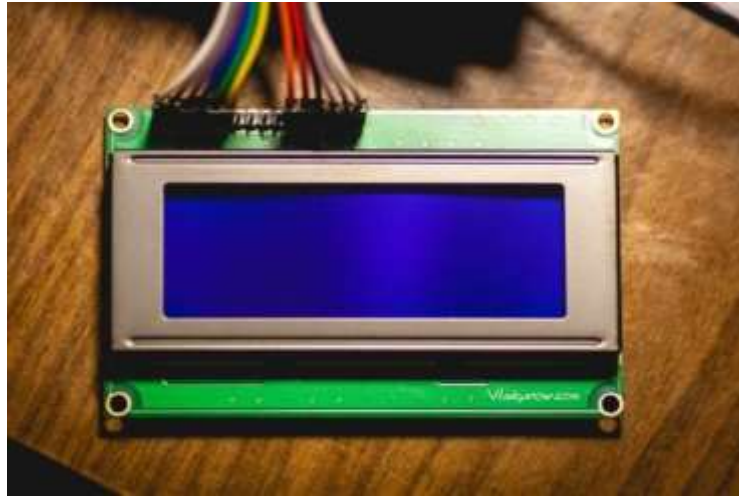


Рис. 3.6. Зовнішній вигляд дисплею LCD2004

Характеристики дисплея LCD2004:

- розміри 98x60x13мм;
- робоча температура -10-50°C;
- зелена під світка та жовтий колір символів;
- розмір точки 0,54x0,54мм;
- формат 20 x 4;
- інтерфейс HD44780;
- видима область 84 x 31мм;
- живлення 5В.

У таблиці 3.1 визначені всі контакти. Якщо взяти дисплей і повернути його до себе, то контакти будуть розташовані зліва направо, відповідно в таблиці йдуть по збільшенню номера. У колонці контакти в дужках вказано позначення в datasheet.

На рисунку 3.7 показано порядок всіх контактів та їх назви.

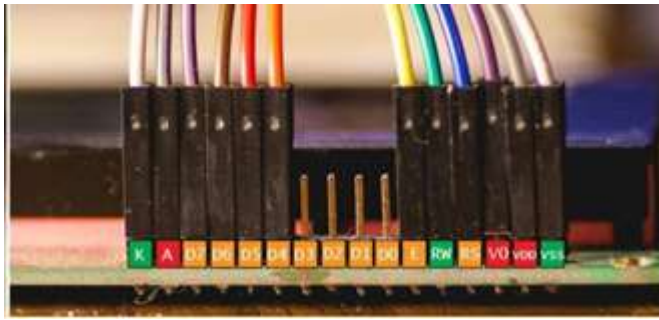


Рис. 3.7. Порядок контактів дисплея

Таблиця 3.1.

Назви контактів дисплею та їх призначення

№	Контакти	Опис використання	Замітки
1	VSS (VSS)	GND. Земля. Живлення мікроконтролером дисплею	0V
2	VDD (VCC)	Напруга живлення для мікроконтролера дисплею	+5V
3	V0 (VEE)	Контраст символів на дисплеї. Підключати краще через потенціометр	від 0v до +5V
4	RS (RS)	Вибір регістру.	
5	RW (R/W)	Перемикання режимів читання/запису	0-читання +5V-запис
6	E	Тактування	
7	D0 (DB0)	Передача даних	Дані
8	D1 (DB1)	Передача даних	Дані
9	D2 (DB2)	Передача даних	Дані
10	D3 (DB3)	Передача даних	Дані
11	D4 (DB4)	Передача даних	Дані
12	D5 (DB5)	Передача даних	Дані
13	D6 (DB6)	Передача даних	Дані
14	D7 (DB7)	Передача даних	Дані
15	A (LED+)	+5V Напруга, підсвітка дисплею, через потенціометр можна регулювати яскравість дисплею	+5V
16	K (LED-)	GND Земля, підсвітка дисплею	0V

3.3.3 Схема перетворювача інтерфейсу

Для керування і внесення початкових параметрів в пам'ять програми мікроконтролера використаємо перетворювач USB to UART на базі Arduino CP2102 (рис. 3.8), який дозволяє підключати різні пристрої та плати до комп'ютера або ноутбука, у яких немає COM порту. Він емулює віртуальний COM порт, який в роботі нічим не відрізняється від реального порту. Особливостями його є низька ціна і широке розповсюдження.



Рис. 3.8. Перетворювач USB to UART на базі CP2102 Arduino

Характеристики перетворювача:

- робоча напруга від 4 В до 5,25 В;
- на базі мікросхеми CP2102;
- підтримка ОС: Windows XP, Vista, Windows 7, Mac OS, Linux;
- швидкість передачі даних: 300 – 1Mbps;
- 3 індикатори стану роботи;
- вихідна напруга живлення 3,3 і 5 В;
- розміри: 20x3x15;
- маса – 2 грами.

3.3.4. Датчик прискорення і нахилу

Для того, щоб орієнтувати сонячний трекер відносно горизонтальної осі потрібно знати кути його нахилу. Для такої задачі підходить датчик акселерометра, який може також визначати положення в просторі.

Акселерометр – це інструмент, задача якого полягає у вимірюванні проекції повного прискорення тіла, для виміру використовуються три чутливі осі: X, Y і Z [29].

При виборі датчика прискорення, положення і нахилу враховувалась необхідна для майбутньої системи смуга пропускання. Звичайно аналогові датчики більш чутливі, але вони використовують зовнішній АЦП з подальшою обробкою даних. Цифрові мають достатню для нашого проекту чутливість, невисоку ціну і дуже прості в підключенні. В якості такого датчика був обраний новий цифровий акселерометр LIS2DW12 (рис. 3.9) компанії STMicroelectronics, який потребує мінімум енергії.

LIS2DW12 – це маленький та малопотужний 3-х осьовий акселерометр з високою роздільною здатністю (14 біт) із діапазоном прискорення до ± 16 g, а діапазон вимірювання вибирається із значень: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g і ± 16 g. Підтримуються інтерфейси SPI або I²C у вигляді 16 біт даних.



Рис. 3.9. Зображення модуля акселерометра LIS2DW12

Акселерометр представляє собою датчик, який вимірює проекції прискорення на три просторові осі. Враховуючи величину прискорення

вільного падіння (g) та дані отриманні по трьох осях, визначається орієнтація акселерометра в просторі.

LIS2DW12 відноситься до класу ємнісних акселераторів та володіє дуже низькою смугою пропускання (0,016...1,6 кГц). Він ідеально підходить для вимірювання низькочастотних вібрацій і кута відхилення.

Особливості модуля LIS2DW12:

- напруга живлення 1,62 ... 3,6 В;
- мінімальний рівень споживання енергії: 0,05 мкА в режимі очікування, 0,38 мкА в режимі зниженого споживання, 120 мкА при максимальному режимі роботи;
- інтерфейси SPI і I²C;
- визначення вільного падіння;
- можливість вибору роздільної здатності в широкому діапазоні;
- діапазон вимірювання, так як і смуга пропускання, вибирається подачею певної команди;
- рекордно низький рівень шуму 90 мкг/Гц;
- мінімальна температурна залежність зміщення 0,2mg/°C;
- робоча температура від -40 °C до +80 °C;
- висока ударостійкість до 10000g.

LIS2DW12 випускається в дуже компактному корпусі LGA-12.

3.3.5. Модуль годинника реального часу

Так як годинник реального часу буде експлуатуватись в різних температурних умовах, в тому числі і досить високих температур, то було обрано Arduino DS3231, за рахунок впровадження в нього термокомпенсуючого кварцового резонатора, який підтримує температурну стабільність частоти.

Arduino DS3231 – це модуль високоточного годинника реального часу (real- time clock, RTC) в який вбудовано I2C інтерфейс і кварцовий

резонатор. Годинник має вхід для підключення резервного автономного джерела живлення, що дозволяє вимірювати температуру і забезпечувати стабільну роботу при відсутності основного джерела живлення. Зображення даного модуля представлено на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Модуль годинника реального часу Arduino DS3231

Пристрій включає в себе акумуляторний вхід і підтримує його точний хронометраж, коли основна потужність пристрою переривається. Інтеграція кристала резонатора підвищує довгострокову точність пристрою та зменшує кількість деталей у виробничій лінії. DS3231 доступний у комерційному та промисловому виробництві.

DS3231 підтримує формат інформації про секунди, хвилини, години, день, дату, місяць і рік. Дата наприкінці місяця автоматично коригується на місяці з меншим, ніж 31 день, включаючи виправлення для високосного року. Адреса і дані передаються послідовно через двонаправлену шину I2C. Точна температура компенсації напруги та компараторний монітор контролює стан VCC для виявлення відмов потужності, щоб забезпечити скидання вихідного сигналу, і автоматично перейти до резервного джерела живлення, коли це необхідно.

Основні можливості DS3231:

- висока точність з термокомпенсацією і корекцією ходу;

- точність ± 2 ppm в діапазоні температур від від -40 °C до $+85$ °C;
- точність ± 3 °C цифрового виходу датчика температури;
- два будильники часу;
- корекція точності ходу;
- режим швидкої роботи інтерфейсу I2C (400 кГц);
- робоча напруга живлення від 2,3 В до 5,5 В;
- діапазон робочих температур: комерційний (від 0 °C до $+70$ °C), промисловий (від -40 °C до $+85$ °C);
- габаритні розміри: 38x22x14 мм;
- вага модуля годинника – 8 г.

3.3.6 Магнітний компас

Для того, щоб визначити положення трекера щодо вертикальної осі потрібно використати модуль трьохосьового магнітометра Arduino GY-271 на мікросхемі HMC5883L. Він досить поширений та володіє достатньою точністю для даного проекту, має інтерфейс підключення I²C. На платі встановлено параметричний стабілізатор на 3,3 В. Зовнішній вигляд даного модуля показано на рис. 3.11.

При повороті трьохосьового магнітометра в магнітному полі Землі показання на його трьох осях змінюються. Використовуючи ці дані можна визначити напрямок по сторонах світу. Знаючи показання з осей X, Y можливо обчислити кут, який і буде кутом відхилення від напрямку на північ. В такому режимі модуль виконує роль компаса.

Для цієї задачі можна було б використати гіроскоп, але у гіроскопа є дрейф і він не може точно показати напрямок по сторонах світу.

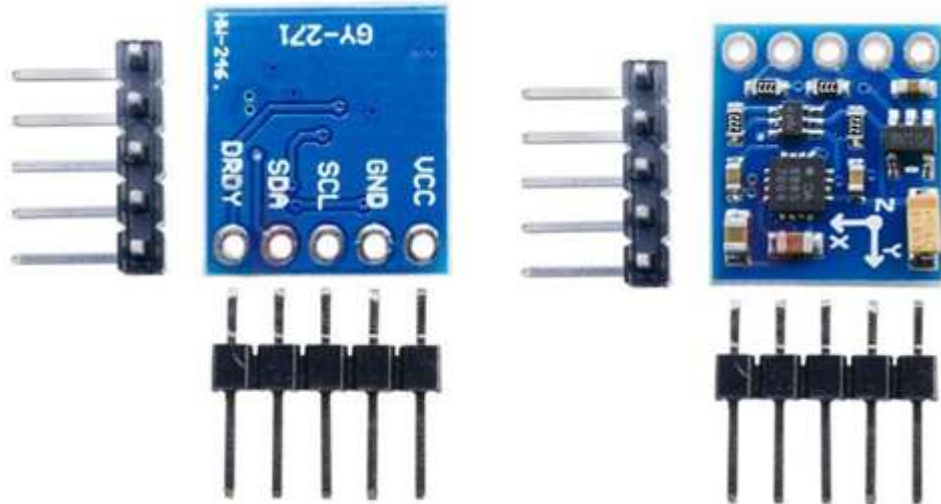


Рис. 3.11. Зовнішній вигляд модуля магнітометра GY-271

Основні характеристики GY-271:

- напруга живлення 3,3 В... 5 В;
- розрядність перетворення: 12 біт;
- автоматичне калібрування;
- підтримка інтерфейсу I2C;
- діапазон вимірювань: ± 8 Гаусс;
- точність вимірювання: ± 2 мГаусс;
- споживання струму: в режимі вимірювання – 2,5 мА,
в режимі сну – 0,1 мА;
- розмір: 14x13 мм.

3.3.7. Виконавчий механізм повороту панелей

Для того, щоб виконувати позиціонування панелей треба вибрати такий пристрій, який би перетворював електричні сигнали на механічний рух. Для цієї задачі чудово підходять актуатори на базі двигунів постійного струму з редукторами. Вони мають достатню потужність для переміщення трека та можливість блокування актуатора при сильному вітрі.

Існують різні види актуаторів, які в свою чергу, мають підвиди. Їх конструкція і принцип дії відрізняються один від одного. В залежності від виду енергії, що використовується для створення пересувного руху, виконавчі механізми діляться на: пневматичні, гідравлічні та електричні [29]. Багато з них мають в комплекті електричний двигун, шестерні і спеціальний вал, через який передається обертальний рух іншим компонентам.

Для даного проєкту підходять електричні актуатори лінійного типу, в яких є властивість блокування передавального валу, що є великою перевагою. Також сучасні моделі мають збільшену кількість зубців на шестернях, що значно збільшує міцність приводу, точність позиціонування панелей та плавність обертання.

В нашому випадку, так як ми будемо рухати сонячні панелі по двох осях, необхідно використати два подібних актуатора. Для даного проєкту підійде модель LAC1500 (рис. 3.12).

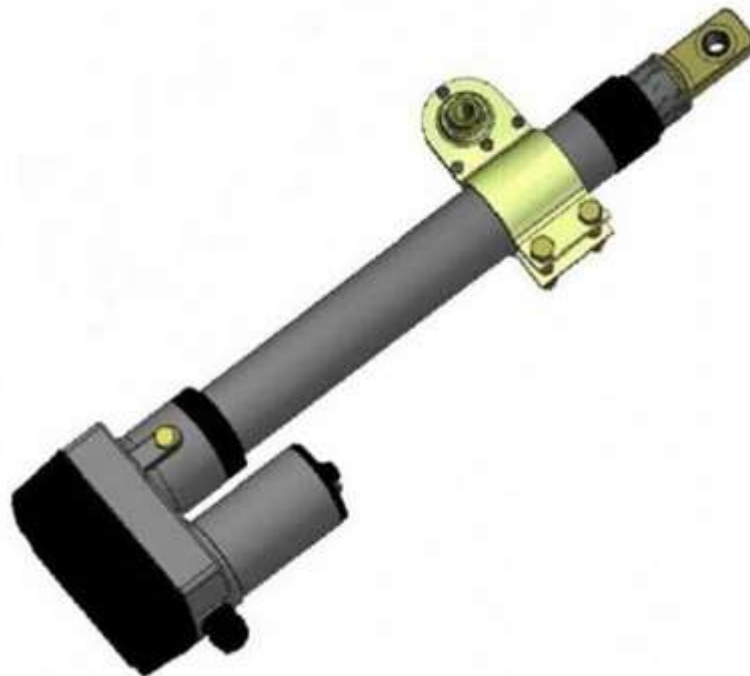


Рис. 3.12. Зображення актуатора LAC1500

Технічні характеристики актуатора LAC1500:

- регульований хід;
- привод Асте (гвинтовий), що самоблокується;
- захист від води і пилу;
- високі точність та антикорозійні якості;
- струм без навантаження $\leq 1\text{A}$;
- струм навантаження $\leq 2\text{A}$;
- статичне навантаження: 5500Н;
- динамічне навантаження: 3500Н;
- вантажопідйомність: 2500Н; швидкість (з навантаженням) 5 мм/с;
- робоча температура від $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Після того, як було вибрано актуатори, потрібно їх підключити до мікроконтролера. Проте напряду на виходи мікроконтролера такі двигуни не підключаються, тому що є обмеження по силі струму на виходах мікроконтролера.

Для вирішення цієї проблеми є декілька способів:

1. Використати силовий транзистор. Але ми зможемо лише керувати швидкістю руху валу, а в нашому випадку потрібно змінювати і напрям.

2. Використати реле, яке буде таким собі перехідним елементом між МК і двигуном. Воно по команді мікроконтролера буде замикати чи розмикати контакти, тобто керувати подачею струму на двигун. Основним недоліком такого способу є те, що ми не зможемо керувати швидкістю та напрямком обертання валу двигуна.

3. Використати плату розширення для МК (Motor Shield), яка забезпечує роботу двигунів постійного струму.

Третій спосіб підходить для нашої мети. На ринку є досить популярний плата керування двигунами Arduino RKP-01A на базі мікросхеми L298N (рис. 3.13).

Дана плата завдяки мікросхемі L298N може керувати відразу двома двигунами постійного струму, що живляться від 5 В до 35 В. Встановлений

на основну мікросхему радіатор охолодження дозволяє витримувати струм навантаження до 2А на канал [30].

Характеристика драйвера двигунів Arduino RKP-01A на мікросхемі L298N:

- можливість живлення зовнішньої логіки (V_{ss}): +5 В - +7 В;
 - вхідна напруга логічної частини (V_d): від 6V до 12V;
 - струм навантаження кожної керованої частини (I_o): 2А;
 - максимальна споживана потужність: 20 Вт;
 - робочий струм зовнішньої логічної частини (I_{ss}): 0 ~ 36mA;
 - піковий струм навантаження кожної керованої частини (I_o): 3А;
- високий рівень вхідного сигналу (High): $2.3V = V_{in} = V_{ss}$;
- низький рівень вхідного сигналу (Low): $-0.3V = V_{in} = 1.5V$;
 - розміри модуля з радіатором L298: 53 x 47 x 27 мм;
 - робоча температура навколишнього середовища: від $-25^{\circ}C$ до $+130^{\circ}C$;
 - вага драйвера моторів RKP-01A: 35 грам.

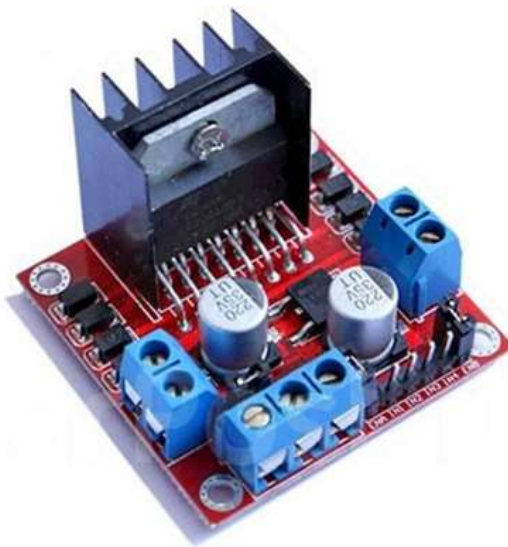


Рис. 3.13. Зображення модуля керування двигунами Arduino RKP-01A

3.4. Розробка схеми електричної принципової

Схема електрична принципова зображена на рис. 3.14. Виходячи з схеми, можна побачити, що до МК підключено дві кнопки. Перша кнопка замикає вхід МК на землю, що призводить до скидання програми. Друга кнопка, що підключена до виводу PA0, при її натисканні виконується замикання на плюс живлення входу МК, тобто на МК подається логічна одиниця.

Вивід МК BOOT0, через резистор R17 і перемикач S1 підключений до землі, тобто стає неможливе завантаження вбудованого завантажувача. Для того, щоб дозволити завантаження, необхідно замкнути вивід BOOT0 на +3,3В.

З схеми видно, що вивід VLA – плюс живлення підсвітки підключається до джерела +5В, VC – мінус живлення підсвітки – на землю. Використовується чотирьох бітний режим передачі даних, виводи дисплея D5, D6, D7, D8, підключаються до виводів PC0, PC1, PC2, PC3 відповідно.

Зі схеми видно, що з порту USB виходять лінії VDD, D-, D+, GND. D- і D+ (лінії передачі даних) надходять на 4 і 5 ноги мікросхеми. Живлення +5В на мікросхему приходить через фільтруючі конденсатори C3 і C4, R8 – перемичка, VDD порту USB підключається до 8 ноги мікросхеми VBUS і Regin, GND – на 3 ногу мікросхеми.

Модуля DS3231 живиться напругою +3,3В, яка фільтрується конденсатором C11. Виводи SCL та SDA підключаються до PB6 і PB7 мікроконтролера. На виводи Vbat та GND підведено резервне джерело енергії.

Магнітометр підключений до входів PB6 і PB7 мікроконтролера через SDA та SCL.

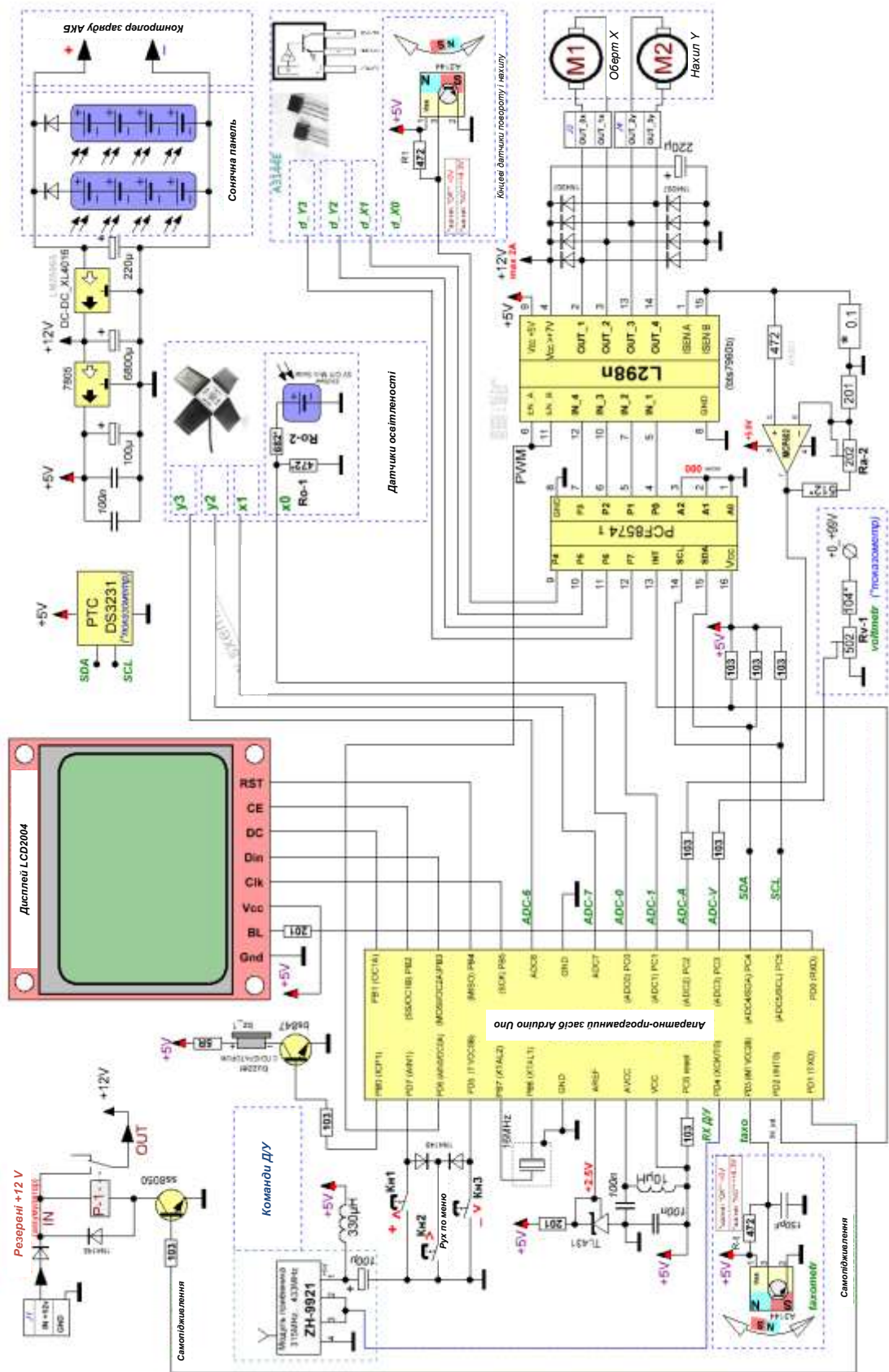


Рис. 3.14. САК позиціонуванням сонячних панелей. Схема електрична принципова

Між землею GND і піном C1 датчика необхідно передбачити конденсатор C2. Причому ці два конденсатори повинні мати високий ESR і знаходитись в керамічному корпусі. Між входами магнітометра SETP і SETC мікросхеми встановлюється конденсатор C1.

На схемі видно, що мікросхема керування двигуном живиться напругою +5В, що подається на входи VSS, EN A, EN B. На виходи IN1, IN2, IN3, IN4 драйвера, що керують напрямком обертання двигунів, надходять управляючі сигнали від пінів PA0, PA1, PA2, PA3 мікроконтролера. Для живлення обох двигунів використовується живляча напруга +12В. Діоди D1-D4, D5-D8 встановлюються для захисту мікросхеми від зворотного струму. Встановлення даних компонентів обов'язкове.

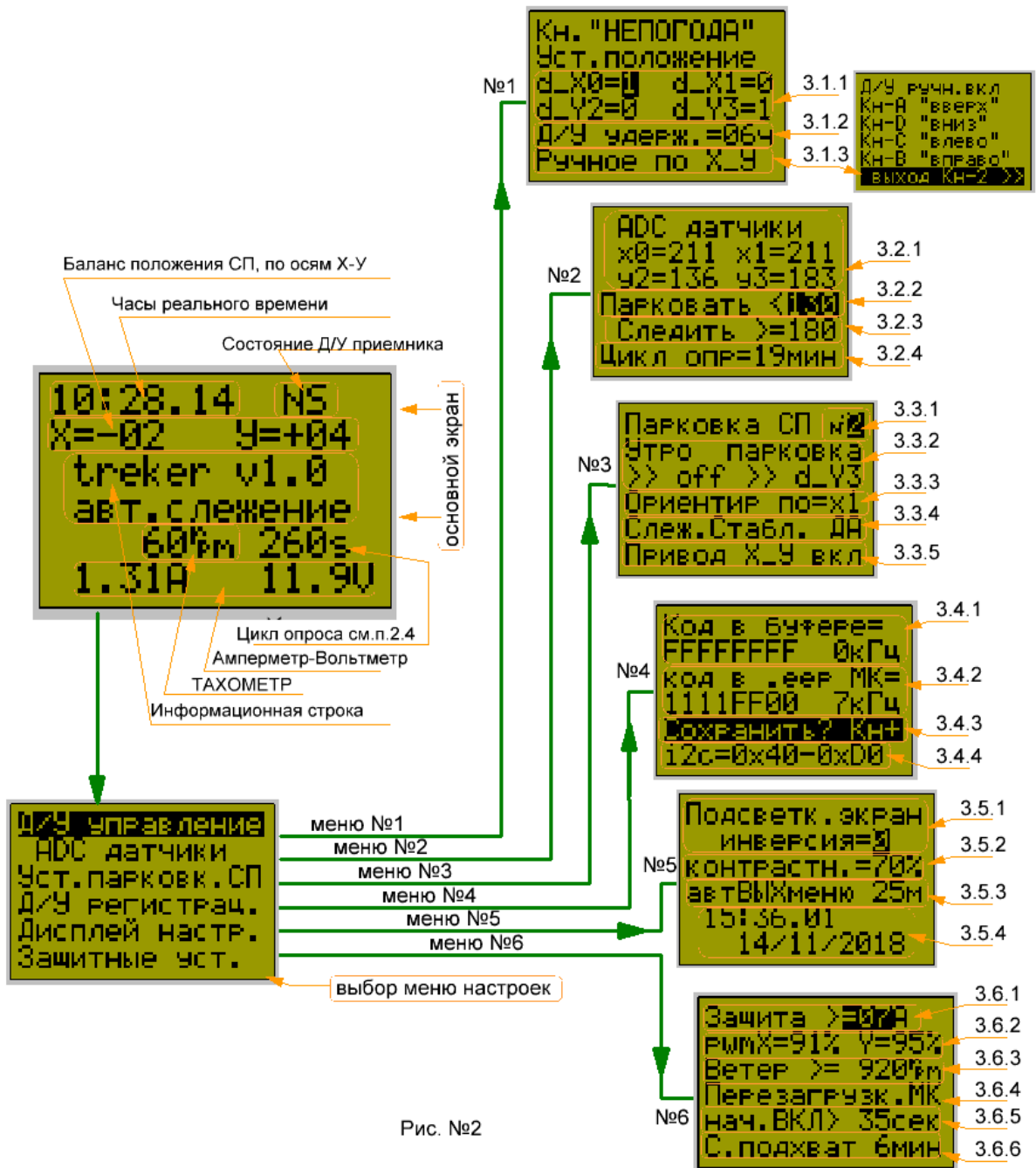


Рис. №2

Рис. 3.15. Налагодження інтерфейсу меню користувача системи керування

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі досліджувалася автоматизована система позиціонування сонячних панелей задля отримання більше сонячної енергії. Було розглянуто різні види сонячних трекерів та графічно показано приріст видобутку енергії при використанні систем, що змінюють кут нахилу сонячних панелей. Найкращі показники отримані при використанні систем, які рухають панелі у двох напрямках, із Сходу на Захід та з Півдня на Північ. Виходячи з цього, було розроблено власну систему позиціонування сонячними панелями у двох напрямках на базі платформи апаратно-програмних засобів Arduino UNO на базі мікроконтролера Atmega 328, наведено алгоритм роботи, структурну, функціональну та електричну принципову схеми.

Дана система має високі експлуатаційні якості та дає приріст у видобутку сонячної енергії на 35% у порівнянні з статичним розташуванням панелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Strategic prospects of the electric power industry / A.A. Makarov, F.V. Veselov, A.S. Makarova // *Thermal Engineering*. – 2017. – V.64. – Iss.11. – P.817-828.
2. Cherepovitsyn A., Tsvetkov P. Overview of the prospects for developing a renewable energy // *Proc. Of 2017 International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2017*. – P. 113–118.
3. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on renewable sources: Prospects for the world and for Russia // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 1 November 2016. – V. 86. – Iss. 6. – P. 433–440.
4. IRENA (2018), Renewable capacity statistics 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. URL: <https://ru.scribd.com/document/382990659/>
5. Ribeiro D.B.S., Demetino G.G., Pepe I.M. Solar Trackers: Worldwide Map of Performances // *22nd International Congress of Mechanical Engineering*. – Ribeirno Preto, Brazil, 2013. – P. 5521–5530.
6. IEC 62817. Photovoltaic systems. Design qualification of solar trackers. ICS 27.160, ISBN 978–28322–1826–6.
7. Энергоэффективность подвижных и неподвижных конструкций солнечных панелей / К.А. Гросс, П.Я. Крауиньш, Д.П. Крауиньш, М.С. Кухта, А.П. Соколов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 113–122.
8. Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes / G. Quesada, L. Guillon, D.R. Rouse et al. // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 103. – P. 147–156.
9. Стадник В.В., Разгоняев Ю.В. Оценка суммарного прихода солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности // *Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. – 2008. – Вып. 557. – С. 67–84.
10. Солнечная энергетика / В.И., Виссарионов Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин / под ред. В.И. Виссарионова. 2-е изд., стер. – М.: ИД МЭИ, 2011. – 276 с.
11. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // *ASHRAE Journal*. – 1961. – V. 3. – P. 53–59.
12. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth edition. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 910 p.
13. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
14. World Radiation Data Centre. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/>

15. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems // Solar Energy. – 2001. – V. 70 (4). – P. 349–359.
16. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 132: Modern Technologies for NonDestructive Testing. – 012017. – 6 p.
17. Росклад погоды. [Электронный ресурс].
Режим доступа: <http://www.rp5.ru/>
18. Meyer E.L., van Dyk E.E. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature // Renewable Energy. – 2000. – V. 21 (1). – P. 37–47.
19. Tremblay O., Dessaint, L._A., Dekkiche, A._I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles / Vehicle Power and Propulsion Conference. VPPC 2007. – P. 284–289.
20. РД 34.20.178. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства / Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. – М.: Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Сельэнергопроект», 1985.
21. Обухов С.Г., Хошнау З.П. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // Электрические станции. – 2012. – № 11. – С. 43–47.
22. JA SOLAR [Электронный ресурс].
Режим доступа: <http://www.jasolar.com/>
23. Delta [Электронный ресурс].
Режим доступа: http://www.delta_batt.com/
24. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 20. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 718 с.
25. Energy Return on Energy Invested (EroEI) for Photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: a comprehensive response / M. Raugei, S. Sgouridis, D. Murphy, V. Fthenakis, R. Frischknecht, Ch. Breyer, U. Bardi, Ch. Barnhart, A. Buckley, M. Carbajales_Dale, D. Csala, M. De Wild_Scholten, G. Heath, A. Jfger_Waldau, Ch. Jones, A. Keller, E. Leccisi, P. Mancarella, N. Pearsall, A. Siegel, W. Sinke, Ph. Stolz // Energy Policy. – 2017. – V. 102. – P. 377–384.
26. Photovoltaic Geographical Information System. Interactive Maps. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
27. Интерфейс RS 232 – стандарт для стыковки оборудования. [Электронный ресурс].
Режим доступа: <http://telesys.by/rs-232/>
28. <https://sxema.com.ua/p621632355-arduino-uno-atmega328.html>

29. Исполнительный механизм. [Электронный ресурс].
Режим доступа до ресурсу:
<http://kipiavp.ru/pribori/ispolnitelnyy-mehanizm.html>
 30. Драйвер моторів двохканальний L298N.
[Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу:
<https://delvik.ru/raznoe/l298n-datasheet-na-russkom-drajver-motorov-dvухkanalnyj-l298n-dual-dc-motor-driver-rkp-mdl298-01a-v2-drajvery-dvigatelej.html>
 31. <https://github.com/millerlp/Solarlib>
-

ДОДАТОК А

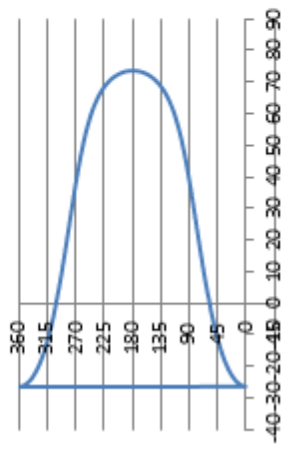
Підпрограма для використання бібліотеки SOLARPOS для визначення кута возвишення та азимуту сонця в залежності від поточного часу

```
#define timeZoneOffset 3      //часовий пояс
#define mylat 50.27          // широта
#define mylon 30.31         //довгота
#include "SolarPos.h"        //моя бібліотека
#include "DS3231M.h"        //бібліотека годин реального часу
DateTime now1;              //поточний час
SolarPos sp1(timeZoneOffset, mylat, mylon); //об'єкт SolarPos
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  now1 = DateTime(2020,3,4,12,47,0);
}
void loop() {
  float angle = sp1.getSEC_Corr( now1.unixtime() );
  float azimuth = sp1.getSAA( now1.unixtime() );
  Serial.print("Time: ");
  printDateTime(now1);
  Serial.print("Elevation: ");
  Serial.print(angle);
  Serial.print("Azimuth: ");
  Serial.print(azimuth);
  Serial.print("Sunrise: ");
  printDateTime(sp1.getSunriseTime(now1.unixtime()));
  Serial.print("Sunset: ");
  printDateTime(sp1.getSunsetTime(now1.unixtime()));
  Serial.print("Day length, minutes: ");
  Serial.println(sp1.getSunDuration(now1.unixtime()));
```

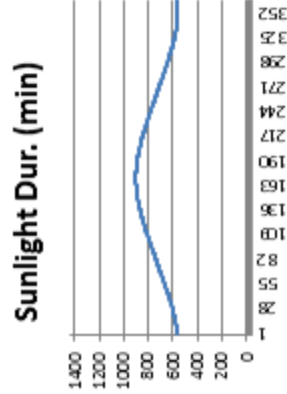
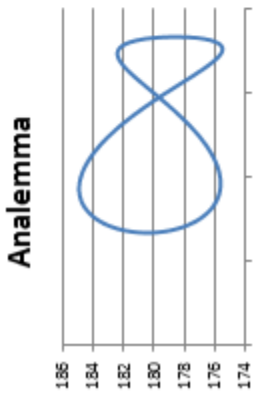
```
Serial.println();
now1 = now1 + TimeSpan(0,1,0,0); //збільшуємо поточний час на годину
delay(1000);
}
void printDateTime(DateTime t){ // Utility function to print time and date
    Serial.print(t.year());
    printDateDigits(t.month());
    printDateDigits(t.day());
    Serial.print(" ");
    Serial.print(t.hour());
    printDigits(t.minute());
    printDigits(t.second());
    Serial.println();
}
void printDateDigits(int digits){ // Utility function to print month/day digits
nicely
    Serial.print("-");
    if(digits < 10) Serial.print("0");
    Serial.print(digits);
}
void printDigits(int digits){ // Utility function for time value printing
    Serial.print(":");
    if(digits < 10)
        Serial.print('0');
    Serial.print(digits);
}
```

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	NOAA Solar Calculations - Change any of the highlighted cells to get solar position data for that location and date.														
2				###	0:06:00	2455368,75	#####		Geom Mean Long Sun (deg)	4126,22	0,0167	0,4468	Sun True Long (deg)	4126,67	Sun Rad Vector (AUs)
3	Latitude (+ to N)	40		###	0:12:00	2455368,76	#####		Geom Mean Anom Sun (deg)	4126,23	0,0167	0,44667	Sun True Long (deg)	4126,67	1,01624
4	Longitude (+ to E)	-105		###	0:18:00	2455368,76	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,23	0,0167	0,44654	Sun True Long (deg)	4126,68	1,01624
5	Time Zone (+ to local)	-6		###	0:24:00	2455368,77	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,23	0,0167	0,44641	Sun True Long (deg)	4126,68	1,01624
6				###	0:30:00	2455368,77	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,24	0,0167	0,44628	Sun True Long (deg)	4126,68	1,01624
7	Date	21.06.2010		###	0:36:00	2455368,78	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,24	0,0167	0,44615	Sun True Long (deg)	4126,69	1,01624
8				###	0:42:00	2455368,78	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,25	0,0167	0,44602	Sun True Long (deg)	4126,69	1,01624
9				###	0:48:00	2455368,78	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,25	0,0167	0,44588	Sun True Long (deg)	4126,7	1,01624
10				###	0:54:00	2455368,79	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,26	0,0167	0,44575	Sun True Long (deg)	4126,7	1,01624
11				###	1:00:00	2455368,79	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,26	0,0167	0,44562	Sun True Long (deg)	4126,71	1,01624
12				###	1:06:00	2455368,80	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,26	0,0167	0,44549	Sun True Long (deg)	4126,71	1,01624
13				###	1:12:00	2455368,80	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,27	0,0167	0,44536	Sun True Long (deg)	4126,71	1,01624
14				###	1:18:00	2455368,80	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,27	0,0167	0,44523	Sun True Long (deg)	4126,72	1,01624
15				###	1:24:00	2455368,81	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,28	0,0167	0,4451	Sun True Long (deg)	4126,72	1,01624
16				###	1:30:00	2455368,81	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,28	0,0167	0,44497	Sun True Long (deg)	4126,72	1,01624
17				###	1:36:00	2455368,82	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,28	0,0167	0,44484	Sun True Long (deg)	4126,73	1,01624
18				###	1:42:00	2455368,82	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,29	0,0167	0,44471	Sun True Long (deg)	4126,73	1,01624
19				###	1:48:00	2455368,83	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,29	0,0167	0,44458	Sun True Long (deg)	4126,74	1,01624
20				###	1:54:00	2455368,83	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,3	0,0167	0,44445	Sun True Long (deg)	4126,74	1,01625
21				###	2:00:00	2455368,83	#####		Geom Mean Sun (deg)	4126,3	0,0167	0,44432	Sun True Long (deg)	4126,74	1,01625

Solar Azimuth vs. Elevation Angle



J	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
NOAA Solar Calculations - Change any of the highlighted cells to get solar position data for that location and time-of-day for a year.				Date	Time (hrs past local midnight)	Julian Day	Julian Century	Geom Mean Long Sun (deg)	Geom Mean Anom Sun (deg)	Earth Orbit Eccent	Sun Eq of Ctr	Sun True Long (deg)	Sun True Anom (deg)	Sun Rad Vector (AUs)	Sun App Long (deg)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Latitude (+ to N)	40			####	12:00:00	2455198,29	0,10002167	281,3238	3958,214	0,016704	-0,06091	281,2628	3958,153	0,983305	281,2616	
Longitude (+ to E)	-105			####	12:00:00	2455199,29	0,10004905	282,3084	3859,2	0,016704	-0,0273	282,2821	3959,173	0,983298	282,2809	
Time Zone (+ to E)	-7			####	12:00:00	2455200,29	0,10007643	283,295	3960,186	0,016704	0,006333	283,3014	3960,192	0,983297	283,3001	
Local Time (hrs)	12:00:00			####	12:00:00	2455201,29	0,10010381	284,2807	3961,171	0,016704	0,039959	284,3207	3961,211	0,9833	284,3194	
Year	2010			####	12:00:00	2455202,29	0,10013119	285,2663	3962,157	0,016704	0,073572	285,3399	3962,23	0,983309	285,3387	
				####	12:00:00	2455203,29	0,10015857	286,252	3963,142	0,016704	0,107163	286,3591	3963,25	0,983323	286,3579	
				####	12:00:00	2455204,29	0,10018595	287,2376	3964,128	0,016704	0,140719	287,3784	3964,269	0,983341	287,3771	
				####	12:00:00	2455205,29	0,10021332	288,2233	3965,114	0,016704	0,174231	288,3975	3965,288	0,983365	288,3963	
				####	12:00:00	2455206,29	0,10024070	289,2089	3966,099	0,016704	0,207689	289,4166	3966,307	0,983394	289,4154	
				####	12:00:00	2455207,29	0,10026808	290,1946	3967,085	0,016704	0,241081	290,4357	3967,326	0,983428	290,4344	
				####	12:00:00	2455208,29	0,10029546	291,1802	3968,07	0,016704	0,274397	291,4546	3968,345	0,983468	291,4534	
				####	12:00:00	2455209,29	0,10032284	292,1659	3969,056	0,016704	0,307626	292,4735	3969,364	0,983512	292,4723	
				####	12:00:00	2455210,29	0,10035022	293,1515	3970,042	0,016704	0,340759	293,4823	3970,382	0,983561	293,4811	
				####	12:00:00	2455211,29	0,10037760	294,1372	3971,027	0,016704	0,373784	294,511	3971,401	0,983615	294,5097	
				####	12:00:00	2455212,29	0,10040497	295,1228	3972,013	0,016704	0,406692	295,5295	3972,42	0,983675	295,5283	
				####	12:00:00	2455213,29	0,10043235	296,1085	3972,998	0,016704	0,439472	296,5479	3973,438	0,983739	296,5467	
				####	12:00:00	2455214,29	0,10045973	297,0941	3973,984	0,016704	0,472113	297,5662	3974,456	0,983808	297,5655	
				####	12:00:00	2455215,29	0,10048711	298,0798	3974,97	0,016704	0,504606	298,5844	3975,474	0,983883	298,5831	
				####	12:00:00	2455216,29	0,10051449	299,0654	3975,955	0,016704	0,536941	299,6023	3976,492	0,983962	299,6011	
				####	12:00:00	2455217,29	0,10054187	300,0511	3976,941	0,016704	0,569107	300,6202	3977,51	0,984046	300,6189	
				####	12:00:00	2455218,29	0,10056924	301,0367	3977,926	0,016704	0,601093	301,6378	3978,528	0,984135	301,6366	
				####	12:00:00	2455219,29	0,10059662	302,0223	3978,912	0,016704	0,632891	302,6552	3979,545	0,984228	302,654	
				####	12:00:00	2455220,29	0,10062400	303,008	3979,898	0,016704	0,664491	303,6725	3980,562	0,984327	303,6713	
				####	12:00:00	2455221,29	0,10065138	303,9936	3980,883	0,016704	0,695881	304,6895	3981,579	0,984443	304,6883	
				####	12:00:00	2455222,29	0,10067876	304,9793	3981,869	0,016704	0,727054	305,7063	3982,596	0,984538	305,7051	
				####	12:00:00	2455223,29	0,10070614	305,9649	3982,854	0,016704	0,757998	306,7229	3983,612	0,984651	306,7217	
				####	12:00:00	2455224,29	0,10073352	306,9506	3983,84	0,016704	0,788705	307,7393	3984,629	0,984769	307,7381	
				####	12:00:00	2455225,29	0,10076089	307,9362	3984,826	0,016704	0,819165	308,7554	3985,645	0,984891	308,7542	



ДОДАТОК В

Фрагмент бази даних SolarLib NOAA Solar Calculations_year.xls