

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему

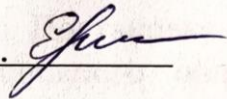
**Розроблення та дослідження геліостанції з регульованим приводом
положення сонячних панелей для приватного будинку**

Виконав: студент 2 курсу, групи 601-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Іванов О. А.



Керівник Єрмілова Н.В.



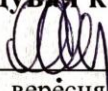
Рецензент Кислиця С.Г.

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри


О.В. Шефер
“ 02 ” вересня 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Іванову Олексію Анатолійовичу

1. Тема проекту (роботи) **«Розроблення та дослідження геліостанції з регульованим приводом положення сонячних панелей для приватного будинку»** керівник проекту (роботи) Єрмілова Наталія Василівна, к.т.н., доцент затверджена наказом вищого навчального закладу від “09” 08 2024 року № 818-ф.а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.12.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Документація на електрообладнання житлового будинку. Документація на побутові прилади, що використовуються в будинку. Номінальна напруга 380/220В. Розробити регульований електропривод положення сонячних панелей. Забезпечити ефективне надійне електропостачання житлового будинку з мінімальними капіталовкладеннями.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Описання типів сонячних панелей, що використовуються для побудови геліостанцій: переваги та недоліки. Зелений тариф в Україні. Постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра. Опис структури та основного обладнання геліостанції. Характеристика об'єкту з точки зору енергоспоживання на зимовий та літній періоди. Розрахунок та вибір обладнання геліостанції. Синтез системи автоматичного керування ЕП сонячної панелі. Математичне моделювання. Дослідження перехідних процесів. Визначення якості та стійкості системи автоматичного керування. Висновки по роботі.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
типи сонячних панелей та їх характеристики; таблиця споживання електроенергії; запропонована структура геліостанції; таблиця обладнання геліостанції. функціональна схема електропривода сонячної панелі; математична модель електропривода сонячної панелі; структурна схема САК електропривода сонячної панелі; графіки визначення стійкості; графіки перехідних процесів; висновки по роботі.
6. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Термін	Категорія	Обсяг	
1	Описання типів сонячних панелей, що використовуються для побудови сонячних електростанцій: переваги та недоліки. Постановка задач на проєктування	07.10.24		15%	Пл. 1
2	Опис структури та основного обладнання геліостанції	16.10.24	I	25%	Пл. 2
3	Характеристика об'єкту з точки зору енергоспоживання на зимовий та літній періоди	05.11.24		40%	Пл. 4
4	Розрахунок та вибір обладнання геліостанції	12.11.24		50 %	Пл. 5
5	Синтез системи автоматичного керування ЕП сонячної панелі.	19.11.24	II	60%	Пл. 6
6	Математичне моделювання. Побудова логарифмічних характеристик	26.11.24		70%	Пл. 7
7	Дослідження перехідних процесів.	04.12.23		80%	Пл. 8
8	Визначення якості та стійкості системи автоматичного керування	11.12.24		90%	Пл. 9
9	Оформлення пояснювальної записки	19.12.24	III	100%	

Магістрант

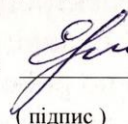


Іванов О. А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



Єрмілова Н.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зміст

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	8
1.1. Енергія Сонця та її характеристики.....	8
1.2. Радіометричні властивості світла.....	10
1.3. Спектри сонячного випромінювання.....	13
1.4. Хвильово-частинковий дуалізм сонячного випромінювання	17
1.5. Опис основних типів сонячних панелей.....	18
1.6 Струм короткого замикання.....	23
Постановка задач.....	25
РОЗДІЛ 2. ОПИС СТРУКТУРИ ТА ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ГЕЛІОСТАНЦІЇ.....	26
2.1. Фотомодулі.....	26
2.2. Система монтажу.....	27
2.3. Інвертор.....	27
2.4. Система зберігання енергії.....	28
2.5. Електричні кабелі та з'єднання.....	28
2.6 Система моніторингу та керування.....	29
2.7 Точка підключення до електромережі.....	29
Висновки до розділу 2.....	30
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	31
3.1. Знаходження споживання будинку у різні періоди року	32
3.2. Визначення необхідної ємності акумулятора	38
3.3. Визначення оптимального положення сонячних батарей.....	41
3.4. Вибір слідкуючого двигуна ЕП для повороту сонячних батарей.....	43
3.5. Розрахунок імпульсного стабілізатора напруги.....	45
3.6. Визначення даних для розрахунку трансформатора.....	47
3.7 Розрахунок втрат у високочастотному трансформаторі та його ККД.....	56
3.8 Розроблення математичної моделі слідкуючого електропривода повороту сонячних батарей.....	58

3.9 Аналіз стійкості САК.....	68
3.10 Підбір основного обладнання і сонячних панелей.....	69
3.11 Розрахунок повної вартості СЕС.....	74
Висновки до розділу 3.....	75
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	78
ДОДАТКИ.....	80

ВСТУП

Підвищення енергоефективності приватних будинків є важливим напрямком розвитку зеленої енергетики. Використання джерел енергії з відновлюваних ресурсів, таких як сонячні панелі, сприяє зниженню залежності від традиційних енергоносіїв та скороченню викидів парникових газів. Ефективність таких систем багато в чому визначається правильним кутом падіння сонячних променів на панелі, який змінюється протягом дня. Застосування геліостанцій із регульованим приводом, які автоматично відстежують положення сонця (технологія трекінгу), дозволяє підвищити продуктивність до 30-40% у порівнянні з фіксованими панелями.

Цей підхід має особливе значення для приватних будинків, оскільки забезпечує раціональне використання площі для розміщення панелей та значно знижує витрати на електроенергію. Крім того, постійний розвиток систем автоматичного управління та сучасних технологій двигунів для геліостанцій робить ці рішення доступними і більш ефективними з технологічної точки зору.

Майбутній розвиток:

Зменшення енергоспоживання: У перспективі передбачається створення привідних систем з вищою енергоефективністю, які потребуватимуть мінімальної кількості енергії для управління орієнтацією панелей.

Інтеграція з розумними системами: Геліостанції можуть бути частиною систем «розумний будинок», де автоматизоване управління режимом роботи базуватиметься на аналізі енергоспоживання, прогнозів погоди та запитів користувачів.

Використання інноваційних матеріалів: Запровадження легких і водночас міцних матеріалів для панелей і механізмів приводу дозволить значно зменшити вагу систем, розширюючи можливості їх встановлення, зокрема на дахах із невисоким навантаженням.

Поліпшення алгоритмів трекінгу: Розробка алгоритмів на основі штучного інтелекту дозволить максимально точно коригувати кут нахилу панелей, враховуючи рівень забруднення, інтенсивність відбитого світла, погодні умови тощо.

Розвиток децентралізованих енергосистем: У подальшому геліостанції зможуть стати частиною локальних енергомереж, де будинки з панелями взаємодіятимуть між собою, обмінюючись або продаючи надлишки енергії сусідам чи на ринок.

Метою роботи є дослідження та розробка регульованого приводу геліостанції для приватного будинку.

Об'єкт дослідження – процес генерації електроенергії за допомогою геліостанції.

Предмет дослідження – геліостанція з регульованим електроприводом.

Задачі дослідження:

Для розробки геліостанції з регульованим приводом положення сонячних панелей для приватного будинку необхідно виконати такі основні задачі:

1. Аналіз існуючих рішень та теоретичне обґрунтування ефективності сонячного трекінгу.
2. Формулювання технічних вимог до конструкції та системи керування.
3. Розробка конструкції геліостанції, включаючи вибір приводу та матеріалів.
4. Моделювання та розрахунки ефективності системи та вибір приводу.
5. Розробка алгоритму управління приводом і сенсорами.
6. Оптимізація та аналіз результатів для підвищення ефективності.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Енергія Сонця та її характеристики

Сонце є головним джерелом енергії та центральним світилом у нашій Сонячній системі. Його основними компонентами є водень і гелій. Цікаво, що маса Сонця становить 99,68% загальної маси всієї системи. Додаткові характеристики наведені в таблиці 1.1, а його будова представлена на рис. 1.1.

Таблиця 1.1 - Теоретичні знання про Сонце	
Середня відстань від Землі:	149 600 000 км (астрономічна одиниця, а.о.)
Діаметр:	1 392 000 км (109 × діаметр Землі)
Об'єм:	1 300 000 × об'єм Землі
Маса:	$1,993 \times 10^{27}$ кг (у 332 000 разів більше маси Землі)
Густина (в центрі):	$>10^5$ кг м ⁻³ (у понад 100 разів більше, ніж у води)
Тиск (у центрі):	понад 1 мільярд атмосфер
Температура (в центрі):	близько 15 000 000 К
Температура (на поверхні):	6 000 К
Енергія випромінювання:	3.8×10^{26} W
Земля отримує:	1.7×10^{18} W

У центрі Сонця завдяки високому тиску та температурі відбувається процес ядерного синтезу. Основна ядерна реакція включає кілька етапів, під час яких чотири протони трансформуються у:

- ядро гелію (два протони і два нейтрони),
- два позитрони (античастинки електронів),
- два нейтрино,
- електромагнітне випромінювання.

Позитрони взаємодіють із електронами, утворюючи процес анігіляції, що супроводжується додатковим випромінюванням. Маса отриманого ядра гелію на 0,635% менша за загальну масу чотирьох протонів. Ця різниця переходить в енергію відповідно до рівняння Ейнштейна.

$$E = mc^2. \quad (1.1)$$

Щосекунди приблизно 4 мільйони тонн сонячної маси перетворюється на енергію. За теоретичними розрахунками, густина енергії в центрі Сонця становить близько 275 Вт/м^3 [1].

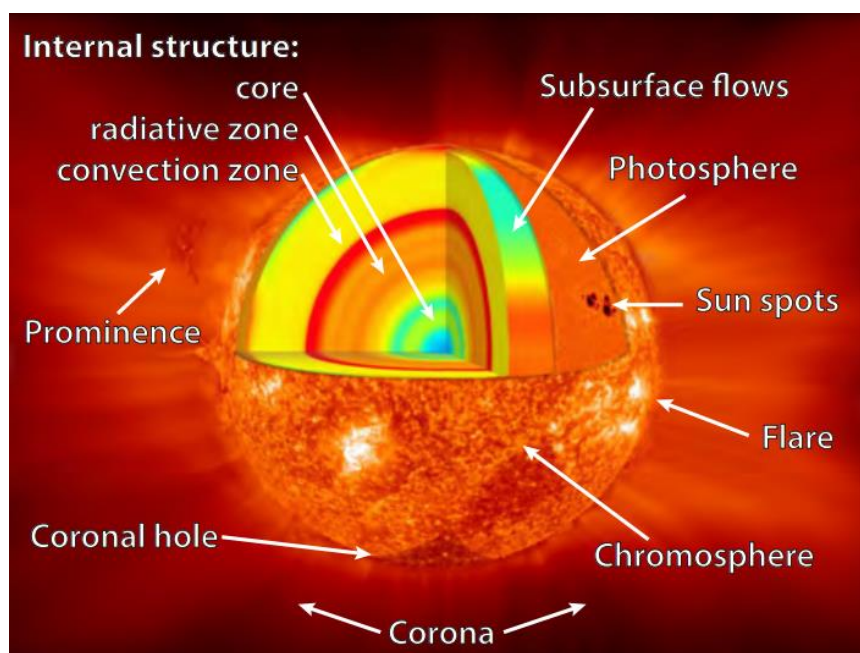


Рисунок 1.1 – Сонце з його шаровою структурою

Нейтрони, які практично не взаємодіють з матерією, залишають сонячне ядро безперешкодно. Кожної секунди крізь Землю, включаючи людські тіла, проходить близько $6,5 \cdot 10^{10}$ нейтронів на см^2 , що становить приблизно 2% від усієї випромінюваної енергії Сонця. Інша частина енергії вивільняється у вигляді електромагнітного випромінювання.

Через високу густину сонячного ядра випромінювання постійно поглинається і перевипромінюється, що подовжує його подорож до поверхні Сонця на 10 000–

170 000 років. Поверхня Сонця, відома як фотосфера, з температурою близько 6000 К, діє як чорне тіло і є джерелом випромінювання, що досягає Землі.

На відстані між Сонцем і Землею середня густина потужності сонячного випромінювання, виміряна перпендикулярно до променів за межами атмосфери, визначається як сонячна стала. Її значення складає близько 1361 Вт/м².

1.2 Радіометричні властивості світла

Радіометрія — це галузь оптики, яка вивчає вимірювання світла. У фотовольтаїці, яка займається перетворенням сонячного світла в електроенергію, критично важливо визначити, як фізично й математично можна виразити «кількість енергії» світла. Особлива увага в сонячних дослідженнях приділяється не загальній кількості енергії, а її кількості, яка передається за одиницю часу. Таким чином, у розрахунках використовується потужність, що визначається формулою.

$$P = dE/dt. \quad (1.2)$$

Для нашого аналізу розглянемо поверхню AA, яка піддається дії світла, як зображено на рис. 1.2 (а). Для визначення повної потужності, що падає на цю поверхню, необхідно виконати інтегрування по її всій площині.

Окрім того, потрібно врахувати, що світло може надходити з різних напрямків, які описуються сферичними координатами (θ, φ). Полярний кут θ вимірюється відносно нормалі до елемента поверхні dA , тоді як φ є азимутом, як показано на рис. 1.2 (b). В результаті інтегрування повинно виконуватися по півсфері, що включає всі напрямки, з яких світло може потрапляти на dA .

Таким чином, отримаємо

$$P = \int_A \int_{2\pi} L_e \cos \theta d\Omega dA \quad (1.3)$$

Величина L_e називається випромінюванням і є однією з фундаментальних властивостей випромінювання найфундаментальніших радіаційних властивостей. Його фізична розмірність має вигляд

$$[L_e] = W * m^{-2} * sr^{-1}.$$

Коефіцієнт $\cos \theta$ виражає той факт, що не сам елемент поверхні dA є відповідною властивістю, а проекція dA на нормаль до напрямку (θ, φ) . Це також відомо як закон косинусів Ламберта.

Ми можемо виразити рівняння (1.3) як інтеграли від координат поверхні (ξ, η) та координат напрямку (θ, φ) , що читається як

$$P = \int_A \int_{2\pi} L_e(\xi, \eta, \theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \, d\xi \, d\eta. \quad (1.4)$$

Оскільки сонячне світло складається зі спектру різних частот (або довжин хвиль), корисно використовувати спектральні властивості. Вони визначаються за допомогою

$$P_\nu = \frac{dP}{d\nu}, \quad P_\lambda = \frac{dP}{d\lambda}, \quad (1.5)$$

$$L_{e\nu} = \frac{dL_e}{d\nu}, \quad L_{e\lambda} = \frac{dL_e}{d\lambda} \quad (1.6)$$

тощо. Їхні фізичні виміри так

$$\begin{aligned} [P_\nu] &= W * Hz^{-1} = W * s, & [P_\lambda] &= W * m^{-1}, \\ [L_{e\nu}] &= W * m^{-2} * sr^{-1} * s, & [L_{e\lambda}] &= W * m^{-2} * sr^{-1} * m^{-1} \end{aligned}$$

Оскільки довжина хвилі і частота пов'язані між собою через $\nu\lambda = c$, P_ν і P_λ пов'язані через

$$P_\nu = \frac{dP}{d\nu} = \frac{dP \, d\lambda}{d\nu \, d\nu} = P_\lambda * \left(-\frac{c}{\nu^2}\right) \quad (1.7)$$

і аналогічно для $L_{e\nu}$ і $L_{e\lambda}$. Знак «-» стоїть через зміною напрямку інтегрування при перемиканні між ν і λ і зазвичай опускається.

Спектральну потужність у довжині хвилі, таким чином, можна отримати через

$$P_\lambda = \int_A \int_{2\pi} L_{e\lambda} \cos \theta \, d\Omega \, dA \quad (1.8)$$

і аналогічно для P_ν . Сяйво задається формулою

$$L_e = \frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial^4 P}{\partial A \partial \Omega} \quad (1.9)$$

і аналогічно для $L_{e\nu}$ та $L_{e\lambda}$.

Ще однією суттєвою радіометричною характеристикою є опроміненість I_e , що відображає густину потужності в конкретній точці (ξ, η) поверхні. Цю величину часто називають (спектральною) інтенсивністю світла. Вона визначається як інтеграл від випромінювання за тілесним кутом.

$$I_e = \int_{2\pi} L_e \cos \theta d\Omega = \int_{2\pi} L_e(\xi, \eta, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (1.10)$$

Спектральне випромінювання $L_{e\nu}$ або $L_{e\lambda}$ обчислюється аналогічно.

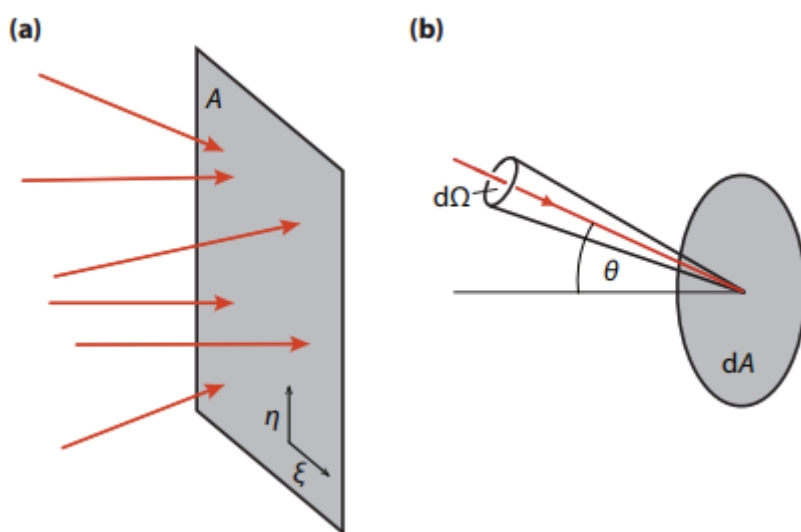


Рисунок 1.2: (а) Ілюстрація поверхні A , опроміненої світлом з різних напрямків, і (б) елемент поверхні dA , який отримує випромінювання від суцільного кутового елемента $d\Omega$ під кутом θ по відношенню до нормалі до поверхні.

Фізичні розміри мають вигляд

$$[I_e] = W * m^{-2}, \quad [I_{e\nu}] = W * m^{-2} * s, \quad [I_{e\lambda}] = W * m^{-2} * m^{-1}$$

Опромінення також задається як

$$I_e = \frac{\partial^2 P}{\partial A} \quad (1.11)$$

і аналогічно для $I_{e\nu}$ та $I_{e\lambda}$. Освітленість визначається як кількість випромінювання, що досягає певної поверхні. Щодо випромінювання, яке випускається цією поверхнею, ми використовуємо терміни променисте

випромінювання, M_e , M_{ev} та $M_{e\lambda}$. Як було зазначено раніше, енергія фотона є пропорційною його частоті, що можна виразити формулою $E_{ph} = h\nu = hc/\lambda$. Отже, спектральна потужність P_λ є пропорційною спектральному потоку фотонів N_ϕ , λ .

$$P_\lambda = N_{ph,\lambda} \frac{hc}{\lambda} \quad (1.12)$$

і аналогічно для P_ν і N_{ph} , ν . Повний потік фотонів N пов'язаний зі спектральним потоком фотонів через

$$N_{ph} = \int_0^\infty N_{ph,\nu} d\nu = \int_0^\infty N_{ph,\lambda} d\lambda \quad (1.13)$$

Фізичні розміри (спектрального) потоку фотонів є

$$[N_{ph}] = s^{-1}, \quad [N_{ph,\nu}] = 1, \quad [N_{ph,\lambda}] = s^{-1} * m^{-1}$$

(Спектральний) потік фотонів Φ_{ph} визначається як потік фотонів на одиницю площі,

$$\Phi_{ph} = \frac{\partial^2 N_{ph}}{\partial A}, \quad (1.14)$$

і аналогічно для $\Phi_{ph,\nu}$ та $\Phi_{ph,\lambda}$. Фізичні розміри мають вигляд

$$[\Phi_{ph}] = s^{-1} * m^{-2}, \quad [\Phi_{ph,\nu}] = m^{-2}, \quad [\Phi_{ph,\lambda}] = s^{-1} * m^{-2} * m^{-1}$$

Порівнюючи рівняння (5.11) і (5.14) та дивлячись на рівняння (5.12), знаходимо

$$I_{e\lambda} = \Phi_{ph,\lambda} \frac{hc}{\lambda} \quad (1.15)$$

і аналогічно для $I_{e\nu}$ та $\Phi_{ph,\nu}$.

1.3 Спектри сонячного випромінювання

Лише фотони з відповідною енергією здатні поглинатися, що, в свою чергу, призводить до генерації електронно-діркових пар у напівпровідникових матеріалах. Тому важливо визначити спектральний розподіл сонячного випромінювання, тобто кількість фотонів певної енергії в залежності від довжини

хвилі λ . Для опису спектру сонячного випромінювання використовують дві основні величини: спектральну освітленість $I_{e\lambda}$ та спектральний потік фотонів $\Phi_{ph}(\lambda)$.

Температура поверхні Сонця приблизно дорівнює 6000 °К. Щоб обчислити спектральне випромінювання чорного тіла з урахуванням розмірів і положення Сонця на Землі, необхідно помножити спектральне випромінювання на тілесний кут Сонця, як його спостерігають з Землі.

$$I_{e\lambda}^{BB}(T; \lambda) = L_{e\lambda}^{BB}(T; \lambda)\Omega_{Sun} \quad (1.16)$$

Ми можемо розрахувати Ω_{Sun} за допомогою

$$\Omega_{Sun} = \pi \left(\frac{R_{Sun}}{AU - R_{Earth}} \right)^2 \quad (1.17)$$

Використовуючи $R_{Sun} = 696\,000$ км, астрономічну одиницю $AU = 149\,600\,000$ км і $R_{Earth} = 6370$ км, знаходимо

$$\Omega_{Sun} \approx 68 \mu sr. \quad (1.18)$$

На рисунку 1.5 зображено спектр чорного тіла. Спектр за межами земної атмосфери має інший вигляд і називається спектром AM0, оскільки не зазнає впливу атмосфери (або «нульової» атмосфери). Цей спектр також наведений на рисунку 1.5, а його освітленість становить $I_e(AM0) = 1361$ Вт * м². При проходженні сонячного випромінювання через атмосферу Землі його інтенсивність знижується. Головним фактором, який визначає зміну сонячної освітленості в ясну погоду, є шлях, який світло долає в атмосфері. Ця відстань найкоротша, коли Сонце знаходиться в зеніті, тобто прямо над спостерігачем. Відношення фактичної довжини цього шляху до мінімальної відстані називається оптичною масою повітря. У положенні зеніту вона дорівнює одиниці, а відповідний спектр називається спектром повітряної маси 1 (AM1).

Якщо Сонце перебуває під кутом θ до zenіту, оптична маса визначається за формулою:

$$AM := \frac{1}{\cos \theta} \quad (1.19)$$

Наприклад, при куті 60° до zenіту (30° над горизонтом) отримуємо спектр AM_2 . Інтенсивність і спектральний розподіл сонячного випромінювання на Землі залежать від географічного розташування та позиції Сонця на небосхилі.

Зниження інтенсивності сонячного випромінювання в атмосфері відбувається через розсіювання та поглинання молекулами повітря, пилом та аерозолями. Найбільший вклад у поглинання роблять водяна пара H_2O , кисень O_2 та вуглекислий газ CO_2 . Це вибіркове поглинання залежить від довжин хвиль і утворює розриви у спектрі сонячного випромінювання, що проілюстровано на рисунку 1.3.

Озон поглинає випромінювання з довжиною хвиль менше 300 нм. Зменшення концентрації озону призводить до підвищення потоку ультрафіолетового випромінювання, що негативно впливає на живі організми. Водночас, молекули CO_2 поглинають випромінювання з довжинами хвиль понад 1 мкм. Зміни концентрації CO_2 впливають на поглинання в інфрачервоному діапазоні, що має важливі наслідки для клімату.

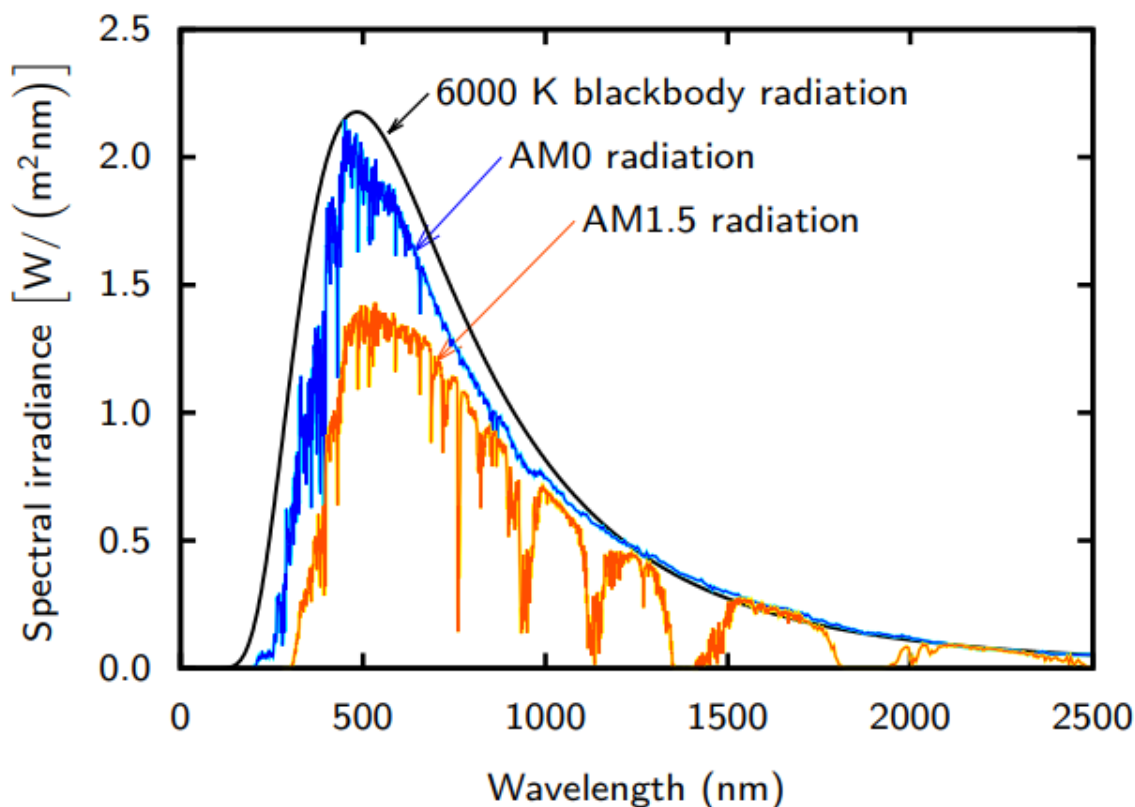


Рисунок 1.3 – Різні сонячні спектри: спектр чорного тіла чорного тіла при 6000 К, позаземний спектр AM0 та спектр AM1.5

Дослідження та продаж різноманітних технологій сонячних елементів є надзвичайно актуальними. Важливо встановити еталонний сонячний спектр, який дозволяє здійснювати порівняння між різними сонячними елементами та фотоелектричними модулями. Промисловим стандартом вважається спектр AM1,5, що відповідає куту $48,2^\circ$. Хоча "реальний" спектр AM1.5 має сумарне випромінювання $827 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, промисловий стандарт визначає $I_e(\text{AM1.5}) = 1000 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, що є близьким до максимального значення, яке можна отримати на поверхні Землі. Таким чином, потужність, яку генерує фотомодуль в цих умовах, вимірюється в одиницях Ватт-пік, W_p . Фактична кількість сонячного випромінювання, що досягає конкретної точки на Землі, є дуже змінною. Окрім регулярних добових і річних коливань, викликаних видимим рухом Сонця, необхідно враховувати нерегулярні зміни, спричинені місцевими атмосферними умовами, такими як наявність хмар. Ці фактори особливо впливають на прямі та

розсіяні компоненти сонячної радіації. Пряма складова сонячної радіації - це та частина світла, яка безпосередньо досягає поверхні, тоді як розсіювання сонячного світла в атмосфері створює дифузну складову.

1.4 Хвильово-частинковий дуалізм сонячного випромінювання

У законі Планка, вперше з'явилася стала h . Її добуток на частоту, $h\nu = hc/\lambda$, має одиницю енергії.

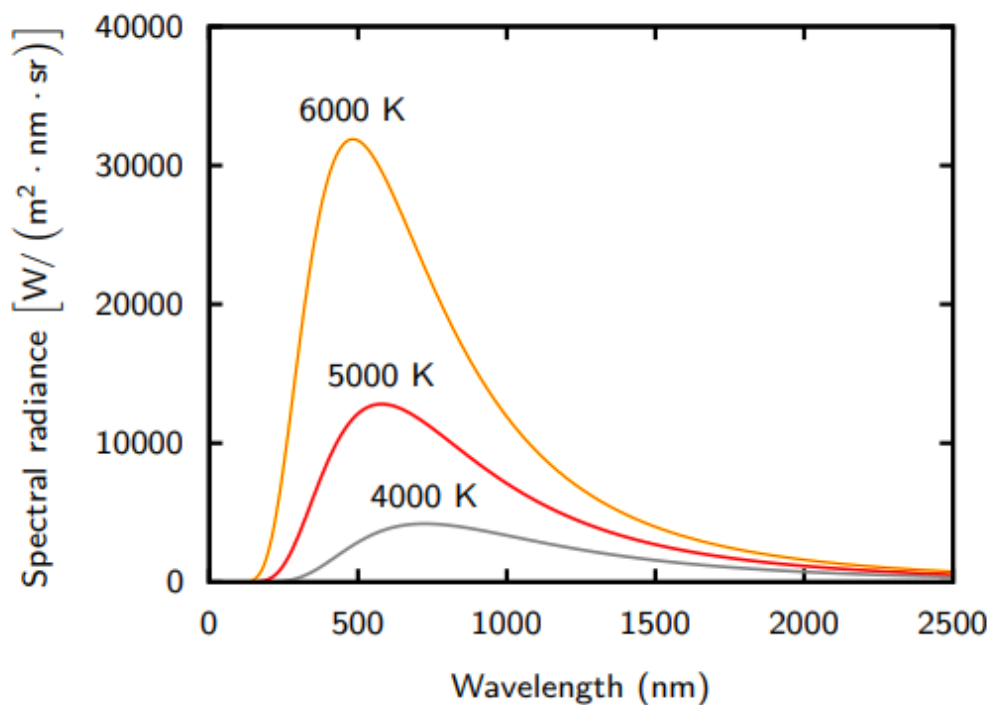


Рисунок 1.4 – Спектр чорного тіла при трьох різних температурах

Сам Планк не бачив наслідків h . Це був Ейнштейн, який зрозумів у 1905 році, що закон Планка насправді треба інтерпретувати так, що світло приходить у вигляді квантів енергії з розміром

$$E_{ph} = h\nu. \quad (1.20)$$

У сучасному світі ці кванти відомі як фотони. З позиції класичної механіки можна стверджувати, що світло демонструє поведінку частинок. Проте, як ми бачили в четвертій главі, світло також має хвильові властивості, що стає очевидним при спостереженні за його поширенням у просторі або при відбитті та заломленні

на плоскій межі розділу фаз. Крім того, було виявлено, що інші частинки, такі як електрони, також проявляють хвилеподібні характеристики. Ця поведінка відома як хвильово-частинковий дуалізм і є надзвичайно цікавою рисою квантової механіки, яка була виявлена та розвинута в першій чверті двадцятого століття. Відбувалися численні дискусії щодо того, як слід інтерпретувати цю дуальність, але це не є темою даної книги. Тому ми просто визнаємо, що в залежності від обставин світло може проявлятися як хвиля або як частинка.

1.5 Опис основних типів сонячних панелей

1.5.1 Монокристалічні сонячні панелі вважаються найефективнішими серед усіх існуючих типів, з коефіцієнтами ефективності, що коливаються від 18 до 23%. Вони виготовляються з єдиного кристала кремнію, що забезпечує високу чистоту матеріалу і сприяє вільному руху електронів, що, в свою чергу, підвищує загальну продуктивність. Ці панелі мають тривалий термін експлуатації, який часто перевищує 25 років. Хоча їх вартість є найвищою, висока ефективність дозволяє зменшити площу, необхідну для встановлення, що робить їх ідеальним вибором для обмежених просторів на дахах житлових і комерційних будівель. Завдяки елегантному зовнішньому вигляду (зазвичай чорного кольору), монокристалічні панелі прекрасно підходять для об'єктів, де важлива естетика. Основним недоліком монокристалічних панелей є їх чутливість до затінення: навіть незначне затінення може суттєво знизити їх ефективність.

1.5.2 Полікристалічні сонячні панелі, на відміну від монокристалічних, виготовляються з кремнієвих блоків, що складаються з численних кристалів. Це спрощує та знижує витрати на виробництво, проте обмежує рух електронів через численні межі кристалів, що призводить до зниження їхньої ефективності (до 15-20%). Полікристалічні панелі мають характерний синюватий відтінок і менш естетичний вигляд у порівнянні з монокристалічними. Вони ідеально підходять для будівель з великою доступною площею, де можна встановити більше панелей для досягнення необхідної потужності. Хоча їхня ефективність нижча, полікристалічні

панелі мають термін служби від 20 до 25 років, що робить їх надійним вибором для тривалого використання, особливо в умовах стабільної температури та без значного затінення.

1.5.3 У разі необхідності використання панелей для великих площ або нерівних поверхонь, відмінним вибором стануть тонкоплівкові сонячні панелі. Цей тип панелей виготовляється шляхом нанесення тонких шарів фоточутливих матеріалів, таких як кадмій-телурид, аморфний кремній або мідно-індій-галій-селенід, на гнучкі основи. Тонкоплівкові панелі мають нижчу ефективність (10-12%) і потребують більшої площі для досягнення необхідної потужності, проте вони демонструють хорошу продуктивність в умовах затінення та високих температур, що робить їх ідеальними для великих сонячних ферм або комерційних будівель. Їх легка вага та гнучкість дозволяють встановлювати їх на фасадах, дахах і навіть на рухомих об'єктах. Термін служби тонкоплівкових панелей становить 10-15 років, що є меншим у порівнянні з кристалічними панелями, але їх вартість та простота у виробництві компенсують цей недолік.

1.5.4 У випадках, коли важливо максимально використовувати відбиття світла, доцільно розглянути біфасціальні сонячні панелі. Ці панелі здатні вловлювати світло з обох сторін, що дозволяє їм генерувати більше енергії завдяки відбитому світлу від поверхні землі або дахів. Завдяки здатності вловлювати додаткове випромінювання, їхня ефективність може перевищувати 25%. Проте біфасціальні панелі вимагають специфічного розташування для забезпечення відбиття світла і є дорожчими в порівнянні з іншими типами, що може збільшити початкові витрати на їх встановлення. Вони ідеально підходять для великих сонячних ферм або комерційних об'єктів з відбивними поверхнями, які можуть додатково підвищити виробництво енергії.

1.5.5 Для об'єктів, які потребують як електричної, так і теплової енергії, доцільно обрати гібридні сонячні панелі (PV+T). Цей тип панелей дозволяє одночасно виробляти електроенергію та тепло, яке можна використовувати для

нагрівання води або опалення. Завдяки тепловій частині вони зменшують перегрів фотоелектричних елементів, що покращує їхню продуктивність у спекотних умовах. Хоча гібридні панелі є дорогими, їхня ефективність може виправдати витрати.

1.5.6 Окремим видом тонкоплівкових панелей є аморфні кремнієві панелі (a-Si), які характеризуються низькою вартістю виробництва та гнучкістю. Їхня ефективність коливається в межах 6-9%, проте вони надзвичайно легкі і можуть бути встановлені на різноманітні поверхні, включаючи нерівні. Аморфні панелі часто використовуються в портативних сонячних зарядних пристроях та на фасадах будівель, де важливіше мати гнучкість і легку вагу, ніж високу ефективність. Термін їх служби становить від 5 до 10 років, а продуктивність швидко знижується з часом, що робить їх менш придатними для довгострокових проєктів, але вони є відмінним вибором для тимчасових або допоміжних систем.

Таким чином, кожен тип сонячних панелей має свої специфічні характеристики, переваги та недоліки. Вибір панелей визначається потребами об'єкта, особливостями розташування, доступною площею та фінансовими можливостями. Монокристалічні панелі є оптимальними для обмежених просторів та високої ефективності, полікристалічні панелі пропонують компроміс між вартістю та продуктивністю, тоді як тонкоплівкові панелі підходять для великих площ з мінімальними обмеженнями щодо ваги та гнучкості. Біфасціальні панелі є найкращими для місць з доступом до відбитого світла, гібридні панелі дозволяють комбінувати електричну та теплову енергію, а аморфні панелі ідеально підходять для застосувань, де важливі легкість і гнучкість.

Враховуючи наведені вище дані, можна створити таблицю для відображення всіх характеристик типів панелей.

Таблиця 1.2 Типи панелей та їх особливості

Тип панелей	Ефективність	Вартість	Термін служби	Переваги	Недоліки	Застосування
Монокристалічні	до 23%	Висока	25+ років	Висока ефективність компактність витончений естетичний вигляд	Дорожчі, складне виробництво	Обмежений простір, приватні будинки, комерційні будівлі
Полікристалічні	до 20%	Нижча за монокристалічні	20-25 років	Доступна ціна, просте виробництво	Нижча ефективність, більша площа потрібна для такої ж потужності	Побутові та комерційні будівлі з більшим доступним простором
Тонкоплівкові	10-12%	Низька	10-15 років	Легкі, гнучкі, добре працюють при зіткненні і високих температурах	Низька ефективність, коротший термін служби	Великі прощаді для сонячних ферм, фасади будівель

Продовження Таблиці 1.2

Тип панелей	Ефективність	Вартість	Термін служби	Переваги	Недоліки	Застосування
Гібридні (PV +T)	Висока: електрична + теплова	Дуже висока	25+ років	Генерація електроенергії та тепла, зниження перегріву, підвищена загальна ефективність	Висока вартість, потребують додаткових систем для зберігання або використання теплової енергії	Житлові та промислові об'єкти з потребою в електричній і тепловій енергії
Аморфні кремнієві (a + Si)	6-9%	Низька	5-10 років	Гнучкі, легкі, дешеві у виробництві	Швидке зниження продуктивності з часом, низька ефективність	Портативні пристрої, фасади будівель, де потрібна гнучкість і легка вага
Біфасціальні	до 25% з обох сторін	Висока	25+ років	Генерація з обох сторін, підвищена продуктивність при відбитті світла від землі	Висока вартість, потребують правильної установки і відбивної поверхні	Великі сонячні ферми, дахи з відбивними покриттями

1.6 Струм короткого замикання

Струм короткого замикання (I_{sc}) — це максимальний струм, який може створити сонячна панель за умови відсутності опору, коли обидва її виходи з'єднані накоротко. Вимірювання I_{sc} є критичним для оцінки продуктивності панелі, а також для гарантування її безпеки й ефективності.

Можна визначити фактори, що впливають на струм короткого замикання

Площа сонячного елемента впливає на кількість поглинутої енергії: чим більша площа, тим більше світла, а отже, й струм буде більшим. Інтенсивність світла також є ключовим фактором, оскільки чим яскравіше світло, тим більше енергії отримує панель. На продуктивність впливає й спектр світла: деякі спектри, такі як видимий і інфрачервоний, також сприяють підвищенню струму. Важливими є певні властивості панелі, зокрема здатність відбивати та поглинати світло, що може оптимізувати використання енергії. Стан поверхні панелі, зокрема чистота від бруду чи пилу, забезпечує максимальне проникнення світла, що також підвищує показник струму.

Контроль показника I_{sc} дозволяє виявити потенційні проблеми у функціонуванні панелі. Це може бути корисним як для оцінки її продуктивності, так і для запобігання можливим небезпечним ситуаціям, пов'язаним з перегрівом або короткими замиканнями. Зокрема, зниження I_{sc} може сигналізувати про забруднення панелі або інші технічні проблеми, а також бути ознакою погіршення її характеристик з часом.

Для точного вимірювання струму короткого замикання потрібен струмовимірювальний прилад, який здатний вимірювати постійний струм, наприклад, мультиметр або струмовимірювальні кліщі. Крім того, важливо, щоб панель перебувала у справному стані, а роз'єми були надійно підключені. Вимірювання проводяться в сонячний день, щоб уникнути тіні, а панель повинна бути чистою, що забезпечить максимальне проникнення світла. Також може знадобитися шматок картону для тестування реакції панелі на зміни освітленості.

Перед вимірюванням треба розташувати панель під прямими сонячними променями. Потім налаштувати мультиметр на відповідний діапазон для вимірювання постійного струму. Коротке замикання створюється шляхом підключення мультиметра до виходів панелі, після чого записується показник струму, який відповідає певному значенню I_{sc} . У разі значних відхилень від нормальних показників панель може потребувати додаткової діагностики або технічного обслуговування.

Для захисту від виникнення струму короткого замикання сонячних панелей треба використовувати різну захисну апаратуру.

- Встановлення автоматичного вимикача або запобіжника

Автоматичний вимикач вибирається відповідно до струму короткого замикання панелі. Він має бути достатньо чутливим, щоб спрацювати при перевищенні цього струму. Наприклад, для панелі зі струмом короткого замикання близько 12 А підійде вимикач на 12–13 А. Вимикач захистить систему, розриваючи електричне коло під час короткого замикання. Запобіжник використовується як альтернатива вимикачу, його вибір здійснюють по номіналу, наближеному до значення I_{sc} .

- Використання діодів захисту від зворотного струму

Байпасні діоди встановлюються у великих системах, або коли є послідовне з'єднання панелей. Вони запобігають протіканню зворотного струму, який може пошкодити панелі. Якщо одна з панелей виходить з ладу або затінюється, байпасні діоди перенаправляють струм в обхід цієї панелі. Блокуючі діоди встановлюються для уникнення потоку зворотного струму вночі або в умовах слабого освітлення. Це запобігає втратам енергії та потенційним пошкодженням.

- Контролери заряду з вбудованим захистом

Якщо панель підключена до акумулятора через контролер заряду, треба обирати модель із вбудованим захистом від короткого замикання та перевантажень. Тоді контролери автоматично розривають ланцюг при виявленні аномалій у струмі, забезпечуючи захист системи.

- Заземлення та моніторинг

Заземлення панелей і всіх металевих елементів конструкції допомагає запобігти накопиченню статичної електрики та забезпечує додатковий захист у випадку короткого замикання. Це важливо для великих установок і систем з високою потужністю. Крім того, необхідно регулярно перевіряти панелі, проводи та з'єднання на предмет пошкоджень, зносу або забруднень.

Комбінація автоматичних вимикачів, діодів і контролерів заряду створює ефективну систему захисту від короткого замикання, підвищуючи надійність сонячної системи і захищаючи панелі від пошкоджень.

Постановка задач

- Виконати детальний розрахунок споживання електроенергії будинку у зимовий та літній періоди, враховуючи специфіку сезонних навантажень.
- Провести аналіз структури споживання з виділенням основних енергоспоживаючих приладів.
- Визначити основні компоненти геліостанції, включаючи тип та потужність сонячних панелей, систему управління орієнтацією, інвертори, акумуляторні батареї.
- Розробити оптимальну структуру системи з урахуванням просторових, естетичних та економічних обмежень.

2. ОПИС СТРУКТУРИ ТА ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ГЕЛІОСТАНЦІЇ

Геліостанція — це комплексна система, яка перетворює сонячне випромінювання на електроенергію, придатну для використання у побутових або промислових цілях. Її структура складається з кількох основних компонентів, що забезпечують ефективність та надійність роботи.

2.1 Фотомодулі

Головним компонентом геліостанції є сонячні фотомодулі, які здійснюють перетворення сонячного випромінювання на електричний струм завдяки фотоелектричному ефекту. Кожен модуль складається з ряду сонячних клітин, виготовлених з напівпровідникових матеріалів, найчастіше з кремнію (як монокристалічного, так і полікристалічного).

Принцип роботи сонячної клітини ґрунтується на взаємодії фотонів сонячного випромінювання з електронами в напівпровідниковому матеріалі. Поглинання фотонів активізує електрони, переводячи їх у стан вільного руху, що, в свою чергу, призводить до генерації електричного струму. Цей процес є основою фотоелектричного ефекту, який забезпечує виробництво електричної енергії.

Сонячні модулі складаються з численних сонячних клітин, які електрично з'єднані в серійні та паралельні ланцюги для досягнення необхідних електричних характеристик. Вони організовані в багатошарову конструкцію, що включає:

- захисний шар із загартованого скла, який забезпечує стійкість до механічних пошкоджень та впливу ультрафіолетового випромінювання;
- інкапсулятор, що є полімерним шаром, який фіксує клітини та захищає їх від вологи і пилу;
- задній захисний шар, зазвичай виготовлений з полімерних матеріалів, що створює додатковий бар'єр від зовнішніх впливів;
- алюмінієву рамку, яка забезпечує жорсткість та зручність монтажу.

Модулі можуть мати різноманітні розміри та форми, такі як квадратні або прямокутні, що дозволяє їх адаптацію до специфічних умов встановлення. Вони встановлюються на спеціально розроблених конструкціях, які можуть бути

розміщені на землі, дахах будівель або інших поверхнях. Електрична енергія, що виробляється сонячними модулями, передається через кабельну систему до інвертора. Інвертор виконує перетворення постійного струму, згенерованого модулями, у змінний струм, який підходить для використання в електромережі або автономних системах енергопостачання.

Отже, конструкція та розташування сонячних модулів є вирішальними чинниками, що впливають на ефективність роботи геліостанції та її здатність задовольняти енергетичні потреби споживачів.

2.2 Система монтажу

Монтажні конструкції підтримують оптимальний нахил фотомодулів для максимального поглинання сонячного випромінювання. Вони можуть бути стаціонарними або рухомими (з трекінговими системами), які регулюють положення панелей, відстежуючи положення сонця протягом дня.

2.3 Інвертор

Сонячний інвертор виконує важливу роль у перетворенні постійного струму (DC), що генерується сонячними панелями, на змінний струм (AC) з напругою 120 В або 240 В. Це перетворення є необхідним, оскільки більшість побутових електроприладів функціонують на змінному струмі, а не на постійному. Таким чином, інвертор адаптує електричну енергію, отриману від сонячних панелей, до вимог домашньої електромережі.

Принцип роботи інвертора базується на наступних аспектах. Сонячні панелі, або фотоелектричні (ФЕ) елементи, виготовляються з напівпровідникових матеріалів, таких як кристалічний кремній або арсенід галію. Ці матеріали складаються з шарів з різними електричними властивостями (позитивний і негативний), які з'єднані р-п переходом. Під впливом сонячного світла напівпровідникові шари поглинають енергію, внаслідок чого електрони у фотоелементах отримують додаткову енергію та починають переміщуватися між шарами, що призводить до утворення постійного електричного струму.

Згенерований постійний струм може зберігатися в акумуляторах для подальшого використання або безпосередньо передаватися до інвертора, в залежності від конструкції системи. Інвертор виконує перетворення постійного струму на змінний, проходячи через трансформатор. У цьому процесі інвертор імітує коливання напруги, властиві змінному струму, завдяки швидкому вмиканню та вимиканню транзисторів. Це дозволяє створити змінну напругу, необхідну для функціонування побутової електромережі.

2.4 Система зберігання енергії

Акумулятор є електрохімічним пристроєм для зберігання енергії. Він зазвичай складається з набору електрохімічних елементів, відомих як гальванічні елементи. Ці елементи містять два електроди, які розділені іонопровідним електролітом, що може бути рідким або твердим. Використовуються різні матеріали, такі як літій, лужний марганець або свинець. В залежності від хімічної системи, акумулятори можуть мати різні рівні напруги та енергетичну щільність. Матеріал електродів визначає номінальну напругу акумулятора. Кількість і природа матеріалів, що використовуються в акумуляторі, впливають на обсяг збереженої енергії. Під час розряду енергія, накопичена в хімічному вигляді, перетворюється на електричну енергію через електрохімічну реакцію, що призводить до виникнення електричного струму.

2.5 Електричні кабелі та з'єднання

Електричні кабелі та з'єднання в сонячних електростанціях виконують ключову функцію в передачі електроенергії від сонячних панелей до інвертора, акумуляторів та загальної енергетичної системи. Вони повинні забезпечувати надійність з'єднань, зменшувати втрати електроенергії та витримувати складні експлуатаційні умови, такі як підвищені температури, вологість, ультрафіолетове випромінювання та механічні навантаження. Основні категорії кабелів і з'єднань включають:

Сонячні кабелі (PV-кабелі) призначені для з'єднання сонячних панелей з іншими елементами системи. Вони характеризуються подвійним ізоляційним

покриттям, що забезпечує захист від ультрафіолетового випромінювання, озону та несприятливих погодних умов. Ці кабелі витримують перепади температур, механічні ушкодження та вологість, відповідаючи таким стандартам, як EN 50618 або TUV. Основними матеріалами для виготовлення є мідь або алюміній, покриті термопластичними матеріалами, такими як XLPE (зшитий поліетилен).

Кабелі постійного струму (DC) з'єднують сонячні панелі між собою та з інвертором, зазвичай виконуючи функцію двополюсних кабелів для передачі негативного та позитивного полюсів. Кабелі змінного струму (AC) передають електричну енергію від інвертора до електромережі або споживчої системи, вимагаючи більшого перерізу через підвищену напругу та струм. Кабелі заземлення забезпечують захист системи від перенапруг і блискавок, зазвичай виготовляються з міді, що має високу провідність і стійкість до корозії.

2.6 Система моніторингу та керування

Для забезпечення ефективної роботи геліостанції використовується моніторингова система, яка збирає дані про продуктивність фотомодулів, стан інверторів і рівень заряду акумуляторів. Вона дозволяє оперативно виявляти несправності та оптимізувати роботу системи.

2.7 Точка підключення до електромережі

Точка підключення виконує важливу роль у інтеграції сонячної електростанції (СЕС) з загальною електромережею, забезпечуючи взаємодію між різними системами. Вона дозволяє ефективно використовувати надлишкову енергію, передаючи її в мережу, а також підтримує стабільність енергопостачання, надаючи доступ до резервних потужностей у випадках недостатнього виробництва електроенергії.

Крім того, точка підключення виконує функцію регулювання потоків енергії, забезпечуючи відповідність параметрів електроенергії вимогам мережі. Важливим аспектом є дотримання національних та міжнародних стандартів, які гарантують безпечну експлуатацію та зменшують ризики негативного впливу на інфраструктуру мережі.

Висновок до розділу 2

Геліостанція — це система, яка перетворює сонячне випромінювання на електроенергію для побутового чи промислового використання. Її ефективність залежить від правильного підбору компонентів і монтажу. У цьому розділі проаналізовано ключові складові геліостанції.

Основним елементом є фотомодулі, що працюють на основі фотоелектричного ефекту. Їхній вибір залежить від вимог до ефективності, економічних можливостей і умов встановлення. Увагу приділено системам монтажу, які оптимізують кут нахилу панелей для поглинання енергії.

Система зберігання енергії та кабельна інфраструктура забезпечують стабільність роботи геліостанції. Акумулятори зберігають надлишкову електроенергію, а монтажні конструкції забезпечують тривалий термін експлуатації. Інвертор перетворює постійний струм на змінний для побутової мережі. Його правильний вибір визначає продуктивність і стабільність роботи системи. Сучасні геліостанції також оснащені системами моніторингу й керування, що оптимізують роботу в реальному часі та дозволяють виявляти несправності на ранніх етапах.

Таким чином, інтеграція фотомодулів, інверторів, акумуляторів, монтажних конструкцій та систем моніторингу забезпечує ефективність і надійність геліостанції. Вона зменшує енергозалежність і негативний вплив на довкілля, роблячи такі системи перспективними для впровадження.

3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Розробка сонячної станції з регульованим приводом має за мету розкрити наступні етапи:

- Розрахунок споживання електроенергії будинку в літній і зимовий періоди.
- Знаходження необхідного інвертора за потужністю (вхідна та вихідна).
- Обчислення ємності АКБ.
- Розрахунок регульованого приводу для оптимального кута повороту панелей до Сонця.
- Пошук потужності та кількості сонячних панелей.

3.1 Знаходження споживання будинку у різні періоди року

Для знаходження навантаження змінного струму а також обчислити обсяг споживаної енергії необхідно виконати послідовно певні дії. Спочатку розраховується сумарна потужність кожного пристрою, наведена в таблиці 3.1, враховуючи його номінальних характеристик, тривалості експлуатації та кількості одиниць. Це забезпечує детальне розуміння потужності всієї системи.

Потім проводиться розрахунок тижневого енергоспоживання шляхом множення номінальної потужності кожного пристрою на час його роботи за тиждень. Зведення отриманих даних дозволяє визначити загальний показник спожитої енергії. Цей результат, позначений як W_t , відображає потреби системи в енергії для її безперебійної роботи протягом зазначеного часу (див. таблицю 3.1).

Таблиця 3.1 – Споживання електроенергії в зимовий період

Назва обладнання	Потужність <i>P_{ср}</i> , Вт	Час роботи, годин за тиждень	Вт * год/ тиждень
Лампа світлодіодна	12	60	720
Холодильник	45	135	6 000
Ноутбук	100	20	2000
Супутникова антена	25	42	1050
Телевізор	65	42	2730
Насос свердловини	750	7	5250
Пральна машина	1950	3.5	6825
Праска	3200	2	6400
Бойлер	2000	20	40000
Фен	2200	1.4	3200
Пилосос	1500	2	3000
Всього:	11847		77 175

Таблиця 3.2 – Споживання електроенергії в літній період

Назва обладнання	Потужність $P_{ср}$, Вт	Час роботи, годин за тиждень	Вт * год/ тиждень
Лампа світлодіодна	12	40	480
Холодильник	45	135	6000
Ноутбук	100	14	1400
Супутникова антена	25	42	1050
Телевізор	65	42	2730
Насос сквердловини	750	7	5250
Пральна машина	1950	3.5	6825
Праска	3200	2	6400
Фен	2000	1	2000
Пилосос	1500	2	3000
Кондиціонер	1000	15	15000
Всього:	10647		50135

З проведених аналізів видно, що найбільше споживання електроенергії спостерігається в зимовий період, тому для подальших розрахунків приймається значення $W_{зм} = 77$ кВт·год/тиждень.

Щоб знайти потужність постійного струму W_H необхідно загальне споживання змінного струму $W_{ЗМ}$ помножити на коефіцієнт $k = 1,2$, що показує втрати інвертора:

$$W_H = W_{ЗМ} \cdot k \quad (3.1)$$

Взявши до уваги опір інвертора, потужність постійного струму знаходимо як:

$$W_H = 77 \cdot 1,2 = 92,4 \text{ кВт}$$

Вхідна напруга інвертора $U_{інв}$ залежить від умов експлуатації та специфікацій вибраного обладнання. Зазвичай вона становить 12 або 24 В, але для потужніших систем може досягати 48 В і більше. Потрібно вибрати інвертор так, щоб його потужність перевищувала потужність змінного струму, помножену на коефіцієнт k .

Для розрахунку необхідної активної потужності інвертора $P_{інв}$ потрібно поділити значення W_H на кількість годин у тижні, що дорівнює 168 годинам (7 днів по 24 години).

$$P_{інв} = \frac{W_H}{168} \quad (3.2)$$

$$P_{інв} = \frac{92,4}{168} = 0,55 \text{ кВт}$$

Під час вибору інвертора для сонячної енергосистеми важливо враховувати кілька основних факторів, які визначають його ефективність, надійність і безпечність. Відповідно до наукових досліджень, найбільшу увагу слід приділити таким аспектам:

- Міцність та довговічність

Інвертор повинен бути виготовлений із високоякісних матеріалів і мати надійну конструкцію, яка забезпечить стабільну роботу протягом тривалого часу.

Використання перевірених компонентів дозволяє зменшити ризик несправностей,

викликаних технічними чи електронними збоями, що підтверджується даними тривалих випробувань.

- Простота використання

Зрозумілий інтерфейс і зручність у налаштуванні є важливими для забезпечення легкого управління пристроєм. Інвертори, оснащені чіткими дисплеями або функціями автоматизації, дозволяють мінімізувати витрати на технічне обслуговування, навіть для користувачів без спеціалізованих знань.

- Захист вхідних і вихідних кіл

Вбудовані захисні механізми, такі як захист від перенапруги, короткого замикання, перегріву або перевантаження, є критично важливими. Це гарантує безпечну роботу інвертора в умовах нестабільного електропостачання та підвищує його експлуатаційну надійність

- Стабільність вихідних параметрів

Інвертор повинен гарантувати стабільну частоту (50/60 Гц) і точну вихідну напругу. Високий рівень стабільності забезпечує сумісність з усіма типами підключених пристроїв, включаючи ті, що чутливі до змін напруги, як зазначено в рекомендаціях IEEE (2021).

- Здатність витримувати перевантаження

Для надійного функціонування під час пікових навантажень, наприклад, при запуску електродвигунів, інвертор має мати достатній запас перевантажувальної здатності. Це є критичним фактором для систем із великою кількістю різномірних споживачів енергії.

- Форма вихідної напруги

Вихідна напруга інвертора повинна мати чисту синусоїдальну форму, щоб забезпечити коректну роботу чутливих електронних пристроїв. Дослідження

показують, що використання інверторів із модифікованою синусоїдою може спричинити підвищений шум і скорочення терміну служби обладнання.

- Потужність інвертора

Потужність інвертора повинна перевищувати номінальну потужність навантаження з урахуванням запасу (зазвичай 1,2–1,5 рази). Наприклад, для системи з навантаженням у 1 кВт варто обирати інвертор потужністю 1,2–1,5 кВт.

Якщо активна потужність інвертора складає лише 0,55 кВт, а система може включати пристрої з високими піковими навантаженнями, наприклад, праску або фен, необхідно врахувати його здатність витримувати такі навантаження. Для цього активна потужність інвертора має бути збільшена в 2–3 рази від номінальної потужності найбільш енергоємного пристрою.

Зважаючи на наведені дані, інвертор із потужністю 0,55 кВт не здатний ефективно працювати за заданих навантажень. Для стабільного функціонування системи та уникнення перевантажень, які можуть спричинити його несправність, рекомендується використовувати інвертор із потужністю не менше 2,5–3 кВт.

Враховуючи ці вимоги, було обрано гібридний інвертор «3000W 24V Tensite» із номінальною потужністю 3 кВт. Його технічні параметри наведено в таблиці 3.3.

Цей пристрій забезпечує максимальну вихідну потужність у 3 кВт і підтримує два режими діапазону вхідної напруги: 170–280V AC (для комп'ютерної техніки) та 90–280V AC (для побутових приладів). На момент розробки системи вартість такого інвертора становила 17 640 грн.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики інвертора

Виробник:	Tensite
Модель:	3000W 24V Tensite
Країна – виробник:	Китай
Тип інвертора:	Гібридний
Кількість фаз:	1
Кількість <i>MPPT</i> :	1
ККД, %:	90-93%
Інтерфейс:	USB/RS232
Вхідні характеристики	
Номінальна потужність, Вт:	3000
Максимальна потужність, Вт:	6000
Діапазон вхідної напруги, В:	30-120 (<i>MPPT</i>)
Номінальна напруга, В:	24 (постійний струм)
Максимальна напруга, В:	145 (постійний струм)
Вхідний струм, А:	20 (максимальний струм заряджання)
Максимальний струм <i>MPPT</i> трекера, А:	60
Вихідні характеристики	
Номінальна потужність, Вт:	3000
Максимальна потужність, Вт:	6000
Вихідний струм, А:	13
Вихідна напруга, В:	220-241 (змінний струм)
Форма синусоїди:	Чиста синусоїдна
Частота, Гц:	50/60 (автоматичне визначення)

3.2 Визначення необхідної ємності акумулятора

Ємність акумулятора для забезпечення навантаження змінного струму протягом тижневого періоду обчислюється за формулою:

$$q_{\text{тиж}}^{\text{зм}} = \frac{W_{\text{н}}}{U_{\text{інв}}} \quad (3.3)$$

$$q_{\text{тиж}}^{\text{зм}} = \frac{92.4}{230} = 0.4 * 10^3 \text{ А * г}$$

Якщо навантаження постійного струму відсутнє ($W_{\text{пост}} = 0$), то загальна необхідна ємність акумуляторної батареї для забезпечення електроенергією протягом тижня ($q_{\text{тиж}}$) розраховується наступним чином:

За умови відсутності навантаження постійного струму), необхідна загальна ємність акумуляторної батареї для забезпечення електроенергією протягом тижня обраховується:

$$q_{\text{тиж}} = q_{\text{тиж}}^{\text{зм}} \quad (3.4)$$

$$q_{\text{тиж}} = 0.4 * 10^3 \text{ А * г}$$

Щоденне споживання ампер – годин можна обчислити, поділивши $q_{\text{тиж}}$ на 7:

$$q_{\text{д}} = \frac{q_{\text{тиж}}}{7} = \frac{400}{7} = 57 \text{ А * г} \quad (3.5)$$

Для встановлення максимальної кількості днів без сонячного світла ($N_{\text{бс}}$) необхідно звернутися до даних, наведених у таблиці А.1 додатку А, яка містить орієнтовні показники для різних режимів експлуатації. Якщо використовується фотоелектрична система (ФЕС) з резервним живленням від міської електромережі, доцільно вибрати мінімальну кількість днів без сонця, що дозволить зменшити витрати. У випадку, коли сонячна енергія недоступна, акумуляторні батареї заряджаються від резервного джерела живлення. Цей показник вказує на те, скільки днів акумулятори можуть підтримувати автономну роботу системи без підзарядки. Встановлюємо $N_{\text{бс}} = 1$.

Тоді якщо врахувати кількість днів, коли сонця немає, загальна ємність АКБ:

$$q_N = q_d * N_{bc} \quad (3.6)$$

$$q_N = 57 * 1 = 57 \text{ А * г}$$

АКБ можуть розрядитись тільки до певної позначки, що становить 70% від їхньої повної ємності. Цей показник позначається коефіцієнтом γ , значення якого дорівнює 0,7. З урахуванням глибини розряду заряд АКБ обчислюється так:

$$q_\gamma = \frac{q_d}{\gamma} = \frac{57}{0.7} = 81.4 \text{ А * г} \quad (3.7)$$

Для визначення температурного впливу на акумуляторні батареї використовується коефіцієнт α , значення якого наведено в таблиці А.2 (додаток А). Він бере до уваги спад ємності акумуляторів при низьких температурах. У розрахунках зазвичай приймається середня температура зимового періоду. При нормальних кімнатних умовах $t \approx 21 \text{ }^\circ\text{C}$, α дорівнює 1,04. Тому, при знаходженні потрібної нам ємності АКБ, потрібно заряд АКБ помножити на цей показник:

$$q_{заг} = q_\gamma * \alpha \quad (3.8)$$

$$q_{заг} = 81.4 * 1.04 = 84.7 \text{ А * г}$$

При номінальній напрузі $U_{ном} = 48 \text{ В}$, і ємності $q_{ном} = 100 \text{ А * год}$, кількість акумуляторних батарей, які потрібно з'єднати паралельно, обчислюється шляхом ділення загальної необхідної ємності батарей $q_{заг}$ на номінальну ємність однієї батареї $q_{ном}$. Результат округлюється до найближчого цілого числа для забезпечення відповідних енергетичних потреб $N_{пар}^{АКБ}$:

$$N_{пар}^{АКБ} = \frac{q_{заг}}{q_{ном АКБ}} \quad (3.9)$$

$$N_{пар}^{АКБ} = \frac{84.7}{100} \approx 0.85 = 1$$

Якщо поділити номінальну напругу постійного струму інвертора $U_{інв}$ на номінальну напругу акумуляторної батареї $U_{ном}^{АКБ}$, ми одержимо потрібну кількість

АКБ. Це значення вказує, скільки батарей необхідно з'єднати послідовно для досягнення потрібної напруги в системі.

Щоб визначити кількість акумуляторних батарей, які потрібно з'єднати послідовно $N_{\text{посл}}^{\text{АКБ}}$, необхідно поділити номінальну напругу постійного струму інвертора $U_{\text{інв}}$ на номінальну напругу акумуляторної батареї $U_{\text{ном}}^{\text{АКБ}}$. Отримане значення вказує на кількість батарей, які потрібно з'єднати послідовно для досягнення необхідної напруги в системі:

$$N_{\text{посл}}^{\text{АКБ}} = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном АКБ}}} \quad (3.10)$$

$$N_{\text{посл}}^{\text{АКБ}} = \frac{230}{48} = 5$$

Наразі виберу кількість АКБ $N^{\text{АКБ}}$, що забезпечить необхідний запас:

$$N^{\text{АКБ}} = N_{\text{пар}}^{\text{АКБ}} * N_{\text{посл}}^{\text{АКБ}} \quad (3.11)$$

$$N^{\text{АКБ}} = 1 * 5 = 5$$

При напрузі 48 В та ємності 100 А·год оптимальним вибором є акумулятор UNOME-LFP48V 4800M. Зважаючи на ринкову вартість одного такого акумулятора, яка становить 56 900 грн, вартість п'яти таких акумуляторів складе 284 500 грн.

Проте, після проведення відповідних розрахунків стало очевидно, що такі значні капітальні витрати є недоцільними в даній ситуації. Тому було ухвалено рішення зменшити кількість АКБ. Замість цього встановити тільки мінімальну кількість для забезпечення автономного живлення у випадку відключення електроенергії з мережі, що може статися внаслідок аварійних ситуацій, зокрема через військовий стан у країні.

3.3 Розрахунок кута нахилу сонячних батарей

Розрахунок пікових сонце-годин базується на середньорічному рівні інсоляції — інтегрального показника сонячного випромінювання, отриманого на певній площині. Використання цього параметра забезпечує оптимізацію роботи фотоелектричної системи. У літній період, коли рівень інсоляції досягає максимуму, енергія, яка не використовується, може передаватися до електромережі. Проте, коли взимку хмари майже весь час переривають доступ до сонця, кількість вироблення енергії значно знижується, використовуючи енергію тільки для власного споживання будинку.

Далі використаємо формулу для знаходження середнього значення сонячної енергії, при куті β (кут падіння сонячної енергії на поверхню):

$$E_n = R * E \quad (3.12)$$

E — усереднене значення кількості сонячної енергії, що потрапляє на поверхню землі під прямим кутом за день.

R — коефіцієнт, який показує відношення середньої денної кількості сонячної радіації на похилу поверхню до кількості, що надходить на горизонтальну.

Додавши суму значень розсіяного, прямого та відбитого випромінювання можна знайти коефіцієнт перерахунку з горизонтальної площини на похилу:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) * R_{\Pi} + \frac{E_p}{E} * \frac{1 + \cos\beta}{2} + p * \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (3.13)$$

Де, E_p – середня кількість розсіяного випромінювання, що надходить на горизонтальну поверхню, кВт · г/м²;

$\frac{E_p}{E}$ – середня – денна частка розсіяного сонячного випромінювання

R_{Π} – середній місячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного

випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню;

β – кут нахилу поверхні СБ до горизонту;

ρ – коефіцієнт відбивання поверхні Землі і навколишніх тіл.

Зимою $\rho = 0,7$; влітку $\rho = 0,2$.

Якщо сонце знаходиться під прямим кутом до землі, тоді середнє значення за місяць цього коефіцієнта дорівнює:

$$R_n = \frac{[\cos(\phi - \beta) * \cos\delta * \sin\omega_{3H} + \frac{\pi}{180} * \omega_{3H} * \sin(\phi - \beta) * \sin\delta]}{\cos\phi * \cos\delta * \sin\omega_3 + \frac{\pi}{180} * \omega_3 * \sin\phi * \sin\delta} \quad (3.14)$$

де, ϕ – широта місцевості;

β – кут нахилу сонячної батареї до горизонту;

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3.15)$$

δ – кут нахилу Сонця

n – порядковий номер дня (від 1 січня).

Значення δ вибирають з таблиці 3.4

Для горизонтальної поверхні кут заходу чи сходу Сонця, який враховує години, визначається таким чином:

$$\omega_3 = \arccos[-tg\phi * tg\delta] \quad (3.16)$$

Часовий кут заходу Сонця на похилій поверхні з південною орієнтацією

$$\omega_{3H} : \omega_{3H} = \arccos[-tg(\phi - \beta) * tg\delta] \quad (3.17)$$

Таблиця 3.4 – Значення кута нахилу сонця

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
$\delta, ^\circ$	-21,3	-13,6	-2,4	9,4	18,8	23,3	21,7	14,4	3,4	-8,5	-18,2	-23,1

Ефективність конверсії сонячної енергії в електричну енергію за допомогою фотоелектричних панелей значною мірою залежить від кута падіння сонячних променів на їх поверхню. Оптимальний кут, при якому досягається максимальне поглинання сонячного випромінювання, становить 90 градусів, тобто коли сонячні промені падають перпендикулярно до поверхні панелі. У цьому випадку найбільша кількість сонячної енергії поглинається панеллю, що забезпечує високий коефіцієнт ефективності.

При відхиленні від цього кута падіння частина сонячних променів відбивається від поверхні панелі замість того, щоб бути поглиненою, що призводить до зниження ефективності процесу перетворення енергії. Кількість відбитих променів зростає в залежності від кута нахилу, що, в свою чергу, знижує кількість енергії, яка може бути використана для генерації електричної енергії. Отже, правильне встановлення панелей, з урахуванням географічної локації та кута нахилу, є критично важливим для забезпечення максимальної ефективності фотоелектричних систем.

3.4 Вибір слідкуючого двигуна ЕП для повороту сонячних батарей.

Для правильного вибору електродвигуна потрібно врахувати деякі характеристики, такі як маса та габарити.

Визначаємо момент інерції панелі СБ:

$$J_n = \frac{ml^2}{12}, \quad (3.18)$$

де m – маса панелі, кг,

l – довжина панелі, м.

Було обрано UNOME-LFP48V 4800M, що має такі масо-габаритні характеристики:

- маса – 45 кг;
- розміри – 442x500x132 мм.

Маємо, що маса панелі:

$$m = N^{CB} m^{CB} \quad (3.19)$$

де m^{CB} – маса однієї сонячної батареї.

Звідси

$$m = 5 \cdot 45 = 225 \text{ кг.}$$

Момент інерції панелі:

$$J_n = \frac{220 \cdot 3,16^2}{12} = 183,07 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (3.20)$$

Припустимо, що механізм повороту спрацьовує 10 разів (кожен раз по 18°), розрахуємо необхідний момент для подолання сил інерції:

$$M_{\text{необ}} = \frac{J_n \omega_{\text{вих}}}{t_n}, \quad (3.21)$$

де $\omega_{\text{вих}}$ – максимальна необхідна швидкість виконавчого валу, рад/с,

t_n – необхідна тривалість “переходу”, с.

Підставивши чисельні значення, отримаємо:

$$M_{\text{необ}} = \frac{183,07 \cdot 0,105}{4} = 4,8 \text{ Нм.}$$

Обираємо 6 двигунів постійного струму типу 4AAM 56 A2, які забезпечують необхідний момент (1 735 грн/ один), з такими параметрами:

- номінальна потужність $P_d = 180 \text{ Вт}$;
- номінальна швидкість обертання $n_d = 1000 \text{ об/хв}$;
- номінальна напруга $U_{\text{я. ном}} = 36 \text{ В}$;
- номінальний струм $I_{\text{я. ном}} = 8 \text{ А}$;
- момент інерції $J_d = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- індуктивність обмотки якоря двигун $L_{\text{я}} = 0,001 \text{ Гн}$;
- номінальний момент двигуна $M_n = 11,9 \text{ Нм}$;

Для подолання моменту інерції сонячної панелі необхідно обрахувати чи достатньо потужний двигун при запуску а також при номінальному режимі роботи:

Передавальне число редуктора дорівнює:

$$K_p = \frac{\omega_d}{\omega_{вих}}. \quad (3.22)$$

Тоді

$$K_p = \frac{10,46}{0,105} \approx 996,8.$$

Редуктор має передавальний момент, який обраховується наступним чином:

$$M_{ном}^{\partial в} = K_p M_n. \quad (3.23)$$

Тоді одержимо

$$M_{ном}^{\partial в} = 1,4 \cdot 11,9 = 16,6 \text{ Нм}$$

Потрібно взяти необхідний запас по моменту, щоб двигун не перегрівався:

$$\frac{M_{ном}^{\partial в}}{M_{необ}} = \frac{16,66}{11,9} = 1,4 \quad (3.24)$$

Цей коефіцієнт повністю задовільняє умови задачі.

3.5. Розрахунок імпульсного стабілізатора напруги

Щоб порахувати потужність необхідного стабілізатора напруги необхідно знати номінал автоматичного вимикача, що становить 25 А. Отже, максимальна потужність становить 5500 ВА (25 А·220В).

Враховуючи все вище зазначене, обираємо однофазний стабілізатор напруги Елекс Герц У 36-1/40 V3.0 – 9 кВА.

Потужність: 9 кВА;

Вхідна напруга: 178 – 264 В;

Вихідна напруга: 220 ± 2.5%;

ККД: 98% при нарузі в мережі 220 В;

Швидкість спрацьовування: 0,2 ... 0,5 с;

Робоча температура: – 5 ... +40°C;

Вихідний сигнал – чиста синусоїда;

Підключення – гвинтові клеми;

Принцип роботи: Стабілізатор працює на основі електромеханічного автотрансформатора, який відповідає за корекцію напруги

Габарити: $550 \times 380 \times 220$ мм;

Вага: 20-25 кг.

Вихідні дані необхідні для розрахунку:

- $P_n = 4500$ Вт – потужність навантаження;
- $U_{вх. ном} = 220$ В – номінальна вхідна напруга;
- $k_{вх. 1} = 0,8$ – коефіцієнт для розрахунку мінімальної вхідної напруги;
- $k_{вх. 2} = 1,2$ – коефіцієнт для розрахунку максимальної вхідної напруги;
- $U_n = 220$ В – вихідна стабілізована постійна напруга блоку;
- $I_n = 40$ А – номінальний струм навантаження;
- $U_n \sim = 1,1$ В – змінна складова вихідної постійної напруга ІСН (пульса – ція), розмах;
- $f = 10$ кГц – частота роботи силових транзисторів ІСН;

- матеріал осердя М6000НМ1 (марка ферита осердя силового трансформатора вибирається з ряду: М2000 НМ1–А(Б); М2000 НМ1-17; М3000 НМ-А; М6000 НМ-

Принципова схема пристрою.

Основними компонентами системи є інверторний тиристорний міст VD7 - VD10, що працює у зв'язці з конденсаторами С1 та С2. Тиристири VD7 і VD8, активуючись по черзі, забезпечують заряджання конденсаторів С1 і С2 в відповідні напівперіоди напруги. Тиристири VD9 і VD10 виконують функцію розряду конденсаторів через навантаження.

Імпульси управління тиристорами генеруються на вторинних обмотках трансформаторів Т2 і Т3 під час активації транзисторних ключів VT1 і VT2. Сигнал управління для транзистора VT1, що відповідає позитивній напівхвилі напруги, формується параметричним стабілізатором VD1, R1 і через гальванічну розв'язку на оптроні ОС1 подається на базу транзистора. Транзистор залишається відкритим протягом усього часу позитивної напівхвилі. У момент його активації перехідний

процес струму в первинній обмотці трансформатора T2 викликає появу імпульсів у вторинних обмотках, які, в свою чергу, відкривають тиристори VD7 і VD10. Тиристори залишаються в активному стані, поки струми через них не зменшаться до нульових значень, що призводить до заряджання конденсатора C1 і розряду C2.

При виникненні негативної напівхвилі напруги транзистор VT1 закривається, тоді як VT2 відкривається завдяки сигналу, що генерується елементами VD2, R5 та ОС2. Функціонування каскаду на транзисторі VT2 під час негативного напівперіоду є аналогічним і призводить до активації VD8, VD9, що, в свою чергу, викликає заряд конденсатора C2 та розряд C1. Блок живлення для транзисторних ключів і формувачів імпульсів реалізовано за найпростішою схемою, що включає трансформатор T1, випрямний міст Br1 та фільтр C3.

3.6 Визначення даних для розрахунку трансформатора

Основною вимогою до використання імпульсного трансформатора є можливість передавати короткочасні імпульси без значних спотворень форми. На це впливають особливості конструкції трансформатора, характеристики осердя а також параметри пристроїв. Зазвичай осердя малопотужних імпульсних трансформаторів виготовляють з феритних метеріалів (якщо вони працюють на великих частотах). Це пов'язане з вихровими струмами, які можуть завдати неповотрим деформаціям, що призведе, до виходу трансформатора зі строю.

Потужність навантаження дорівнює:

$$P_n = U_n I_n, \quad (3.25)$$

де U_n – напруга навантаження,

I_n – струм в навантаженні, А.

Підставивши чисельні дані, одержимо:

$$P_n = 220 \cdot 40 \approx 8800 \text{ Вт.}$$

Для обрахунку мінімального амплітудного значення по напрузі в первинній обмотці трансформатора використовують:

$$U_{1 \min} = U_{\text{вх} \min} - U_{\text{ке,н}} = 231.9 - 0.7 = 231.3 \text{ (В)}, \quad (3.26)$$

$$\text{То } U_{\text{ВХ } min} = K_{\text{ВХ } 1} * U_{\text{ВХ } \text{НОМ}} = 0.8 * 290 \text{ В} = 231.9 \text{ (В)};$$

$$U_{\text{ке,н}} = 0.7 \text{ В} - \text{напряга колектор} - \text{емітер силового транзистору}$$

в режимі насичення.

де $U_{\text{вх. min}}$ – мінімальна вхідна напруга, В, $U_{\text{к. е. н.}}$ – напруга колектор – емітер силового транзистора в режимі насичення, становить 0,7 В.

Мінімальну вхідну напругу розраховуємо за формулою:

$$U_{\text{ВХ } min.} = k_{\text{ВХ } 1} U_{\text{ВХ } \text{НОМ}} \quad (3.27)$$

$$U_{\text{вх. min}} = 0.8 * 220 = 176$$

На первинній обмотці трансформатора мінімальне амплітудне значення:

$$U_{1 \text{ min}} = U_{\text{ВХ } min} - U_{\text{ке,н}} = 176 - 0.7 = 175.3 \text{ (В)},$$

$$\text{Де } U_{\text{ВХ } min} = K_{\text{ВХ } 1} * U_{\text{ВХ } \text{НОМ}} = 0.8 * 290 \text{ В} = 231.9 \text{ (В)};$$

$U_{\text{ке,н}} = 0.7 \text{ В}$ – напруга колектор – емітер силового транзистору в режимі насичення.

Щодо вторинної обмотки, то мінімальне значення напруги трансформатора буде:

$$U_{2 \text{ min}} = \frac{U_{\text{н}} + \Delta U_{\text{др}} + \Delta U_{\text{д}}}{\gamma_{\text{max}}} = \frac{15 + 0.2 + 0.7}{0.38} = 41.3 \text{ (В)}. \quad (3.28)$$

де $U_{\text{вх. ном}} = 290 \text{ В}$ – напруга на вході ВЧ перетворювача;

$\Delta U_{\text{др}}$ – падіння напруги на дроселі $L_{\text{ф}}$ (приймається $\Delta U_{\text{др}} \approx 0,6 \text{ В}$

при $U_{\text{н}} > 5\text{В}$),

$R_{\text{др}}$ – опір обмотки дроселя,

Ом, γ_{max} – граничний коефіцієнт заповнення імпульсів керування,

приймаємо $\gamma_{\text{max}} = 0,38$.

Теоретично граничний коефіцієнт заповнення повинен бути $< 0,5$.

Визначаємо коефіцієнт трансформації:

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_{2m.min}}{U_{1m.min}} \quad (3.29)$$

То

$$K_{mp} = \frac{41.3}{231.3} = 0.178.$$

Щоб знайти максимальне амплітудне значення напруги на вторинній обмотці трансформатора необхідно використати цю формулу:

$$U_{2m \max} = k_{\text{тр}} U_{1m \max} = 0.178 * 347.3 = 62(B), \quad (3.30)$$

$$\text{де } U_{1m \max} = k_{\text{вх.2}} \cdot U_{\text{вх. ном}}$$

$U_{\text{к.е.н.}}$ – максимальна амплітудна напруга на первинній обмотці трансформатора.

$$\text{Тоді } U_{1m \max} = 1.2 * 220 - 0.7 = 263.3 \text{ В.}$$

$$U_{2m \max} = 2.79 * 263.3 = 735.86$$

Для знаходження мінімального коефіцієнта заповнення імпульсів напруги на трансформаторі:

$$\gamma_{\min} = \frac{U_n + \Delta U_{\text{др}} + \Delta U_{\text{д}}}{U_{2m \max}} \quad (3.31)$$

$$\gamma_{\min} = \frac{380 + 0,6 + 0,7}{1270,29}$$

Тепер потрібно знайти ефективність напруги на обох обмотках трансформатора:

$$U_{1.еф} = U_{1m \min} \sqrt{\gamma_{\max}} \quad (3.32)$$

$$U_{2.еф} = U_{2m \min} \sqrt{\gamma_{\max}}$$

Тоді

$$U_{1.еф} = 263.3 \cdot \sqrt{0,38} = 162.309 \text{ В} \quad (3.33)$$

$$U_{2.еф} = 735.86 \cdot \sqrt{0,38} = 453.615 \text{ В}$$

Порахуємо ефективність струмів на обох обмотках трансформатора:

$$I_{1.еф} = I_2 \sqrt{\gamma_{\max}} \quad (3.34)$$

$$I_{2.еф} = I_n \sqrt{\gamma_{\max}}$$

де I_2 – амплітудне значення струму вторинної обмотки трансформатора, А.

$I_2 = 14,34$ А при незначній пульсації струму через дросель фільтра.

$$\begin{aligned} \text{Маємо} \quad I_{1.еф} &= 14,34 \cdot \sqrt{0,38} = 8.84 \text{ А} \\ I_{2.еф} &= 40 \cdot \sqrt{0,38} = 24.658 \text{ А} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Габаритна потужність трансформатора обраховується:

$$P_{габ} = \frac{U_{1.еф}I_{1.еф} + U_{2.еф}I_{2.еф}}{2} + P_{втр} \quad (3.36)$$

де $P_{втр} = P_n \cdot k_u$, Вт,

k_u – коефіцієнт втрат на живлення схеми (УУ) з урахуванням її споживання.

Прийmemo $k_u = 0,02$,

Тоді можна визначити додаткову потужність у трансформаторі:

$$P_{втр} = 5500 \cdot 0.02 = 110 \text{ Вт},$$

$$P_{габ} = \frac{162.309 \cdot 8.84 + 45.3615 \cdot 24.658}{2} + 110 = 6420 \text{ Вт}.$$

Для обрахунку електромагнітної потужності трансформатора ($S_{см} \times S_{в}$ (в см⁴)) необхідно взяти похідну площі «вікна» осердя $S_{в}$ (в см²), що заповнене обмотками трансформатора помноженого на площі активного поперечного перерізу магнітопроводу трансформатора $S_{см}$ (в см²)

$$S_{см} \cdot S_{в} \geq \frac{P_{габ}}{10\Delta B j \eta_{тр} k_c k_M f} \quad (3.37)$$

де ΔB – діапазон зміни магнітної індукції в осерді трансформатора за час робочого імпульсу t_i (Тл).

Прийmemo $\Delta B = 0,4$ Тл згідно таблиці 2.7,

f – частота роботи, кГц,

j – щільність струму в обмотках трансформатора, вибирається в залежності від вихідної потужності (табл. 2.8),

$$\text{приймаємо } j = 4 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2},$$

$\eta_{тр}$ – коефіцієнт корисної дії трансформатора на цьому етапі,

приймаємо $\eta_{тр} = 0,97$ – для $P_n > 50$ Вт,

k_c – коефіцієнт, що враховує ефективне заповнення площі поперечного перерізу осердя магнітопроводу феромагнетиком;

для фериту $k_s = 1$,

k_M – коефіцієнт, що враховує ступінь заповнення “вікна” осердя міддю обмоток, приймаємо $k_M = 0,15$ – при $P_H > 50$ Вт:

Таблиця 3.5 – Діапазон зміни магнітної індукції в осерді трансформатора для двохтактного силового вузла

Марка фериту	Діапазон ΔB , Тл
	$P_H \geq 11$ Вт
M2000HM1-A M2000HM1-B M2000HM1-17	0,2
M300HM1-A	0,28
M6000HM1	0,4

Тоді

$$S_{cm} \cdot S_g \geq \frac{6420}{10 \cdot 0,4 \cdot 4 \cdot 0,97 \cdot 1 \cdot 0,15 \cdot 50} = 50,72 \text{ см}^4$$

Таблиця 3.6 - Щільність струму в обмотках трансформатора

P_H , Вт	< 10	10 ... 20	21 ... 50	51 ... 100	101 ... 200	> 200
J , А/мм ²	10	8 ... 6	6 ... 5	5 ... 4,5	4,5 ... 4	4 ... 3

Відповідно до таблиці - осердя із ряду магнітопроводів [15] – ПЛ 20×40×100:
 $S_{ст} \times S_B = 227,2 \text{ см}^4$ найближче підходить нашій умові.

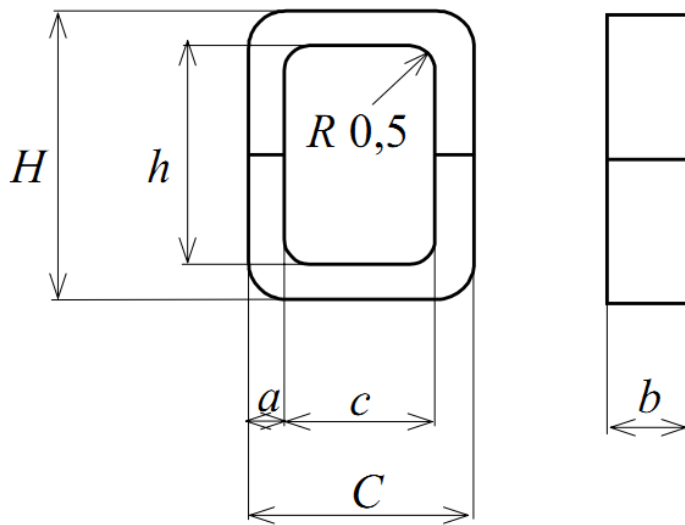


Рисунок 3.2 - Стрічковий магнітопровід: $a = 20$ мм; $h = 40$ мм; $c = 32$ мм; $C = 72$ мм; $H = 140$ мм; $b = 100$ мм; $S_{cm} = 7,1$ см²; $l_{cp} = 32,7$ см; $G_{cm} = 1,77$ кг

Для обрахунку максимальної тривалості імпульсу напруги (в мкс) на обмотках трансформатора необхідно:

$$t_{i.max} = T * \gamma_{max} \quad (3.38)$$

де T – період імпульсів, с.

Тоді
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10 \cdot 10^3} = 0,1 \text{ мс.}$$

Максимальна тривалість імпульсу напруги дорівнює

$$t_{i.max} = 0.1 * 0.45 = 45 * 10^3 \text{ с} = 45 \text{ мкс}$$

Число витків первинної W_1 та вторинної W_2 обмоток силового трансформатора визначється:

$$W_1 = \frac{t_{i.max} * U_{1m.min}}{\Delta B S_{cm}}, \quad (3.39)$$

$$W_2 = K_{mp} W_1.$$

Округливши результат до цілого числа, одержимо:

$$W_1 = \frac{0,45 \cdot 303,3 \cdot 10^{-4}}{0,4 \cdot 7,1 \cdot 10^{-4}} = 48 \text{ витків}, \quad (3.40)$$

$$W_2 = 2,79 \cdot 48 = 134 \text{ витки.}$$

Діаметри міді проводів (в мм) для первинної та вторинної обмоток обчислюємо таким чином:

$$D_{1M} = D_{2M} = 1,13 \sqrt{\frac{I_{1.e\phi}}{jNN_1}}, \quad (3.41)$$

де $I_{1.e\phi}$ – ефективний струм,

A, j – щільність струму в обмотках трансформатора, $j = 4 \left[\frac{A}{\text{мм}^2} \right]$,

NN_1 – число паралельних проводів в первинній та вторинній обмотках трансформатора, для двотактного: $NN_1 = 3$.

Тоді одержимо

$$D_{1M} = D_{2M} = 1,13 \sqrt{\frac{9,62}{4 \cdot 3}} = 1,01 \text{ мм}. \quad (3.42)$$

Взявши інформацію з додаткових даних можна знайти марку і площу поперечного перерізу з урахуванням ізоляції S_{1i3} і S_{2i3} відповідно для первинної та вторинної обмоток. Обираємо провід ПЕВ-2 з

$$D_{1.e\phi} = 1,08 \text{ мм}.$$

Площа проводу з ізоляцією: $S_{1i3} = 1,11 \text{ мм}^2$. Опір постійному струму $\rho_1 = 0,0191 \text{ Ом/м}$.

Сумарна площа поперечного перерізу (в см²), яка займає вікно осердя первинною і вторинною обмотками:

$$S_{\Sigma} = \frac{S_{1\Sigma} + S_{2\Sigma}}{100} \quad (3.43)$$

де

$S_{1\Sigma} = S_{1i3} W_1 NN_1$ – площа поперечного перерізу, що зайнята первинною обмоткою (мм²),

$S_{2\Sigma} = S_{2i3} W_2 NN_2$ – площа поперечного перерізу, що зайнята вторинною обмоткою (мм²)

$$S_{1\Sigma} = 1,11 \cdot 48 \cdot 3 = 159,84 \text{ мм}^2,$$

$$S_{2\Sigma} = 1,11 \cdot 134 \cdot 3 = 442,2 \text{ мм}^2$$

Тоді $S_{\Sigma} = (159,84 + 442,2)/100 = 6,02 \text{ см}^2$.

На основі попередніх даних визначимо коефіцієнт заповнення вікна осердя обмотками:

$$k_g = \frac{S_{\Sigma}}{S_g} \quad (3.44)$$

де S_g – площа перерізу вікна вибраного нами осердя трансформатора.

Тоді

$$k_g = \frac{6,02}{32} = 0,19 \quad (3.45)$$

Визначаємо довжину проводу, необхідного для намотування первинної і вторинної обмоток:

$$\begin{aligned} l_{1н} &= l_{ср.в1} \cdot W_1/100, \\ l_{2н} &= l_{ср.в2} \cdot W_2/100. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Де

$l_{ср. в}$ – середня довжина витка при намотуванні, яка визначається за виразом:

$$l_{ср.в1} = 2(a + b + D_{1.еф}), \quad (3.47)$$

де a, b – розміри магнітопровода, мм,

$D_{1еф}$ – діаметр міді проводів, мм.

Тоді $l_{ср.в1} = 2 \cdot (20 + 40 + 1,08) = 122,16 \text{ мм}$.

$$l_{1н} = \frac{122,16 \cdot 48}{100} = 58,6 \text{ см},$$

$$l_{2н} = \frac{122,16 \cdot 134}{100} = 163,7 \text{ см}.$$

Обчислюємо активний опір постійному струму (Ом) первинної та вторинної обмоток:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\rho_1 l_{1н}}{NN_1}, \\ R_2 &= \frac{\rho_2 l_{2н}}{NN_2} \end{aligned} \quad (3.48)$$

де ρ_1, ρ_2 – опір одного метра намотувального проводу даного перерізу,

$$\rho_1 = \rho_2 = 0,0191 \text{ Ом/м}.$$

Підставивши чисельні дані, одержимо:

$$R_1 = \frac{0,0191 \cdot 0,586}{3} = 0,0037 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \frac{0,0191 \cdot 1,637}{3} = 0,01 \text{ Ом}.$$

Так, як зі збільшенням частоти перетворення збільшується і опір мідного провідника, то потрібно розрахувати повний опір враховучи також і витіснення струму:

$$R_n = k_f \cdot r_o, \quad (3.49)$$

де R_n – повний опір провідника з урахуванням поверхневого ефекту,

Ом, r_o – опір провідника постійного струму,

Ом, k_f – коефіцієнт поправки на вплив високої частоти.

Повний опір на високій частоті обраховується:

$$R_{1n} = k_f R_1,$$

$$R_{2n} = k_f R_2. \quad (3.50)$$

де R_{1n} і R_{2n} – повні опору первинної та вторинної обмоток трансформатора на високій частоті, Ом,

k_f – значення коефіцієнта, взяте з таблиці 2.9,

R_1 і R_2 – опори обмоток постійному струму.

Таблиця 3.7 - Коефіцієнт поправки k_f високої частоти для синусоїдального струму

Частота f , кГц	20	50	75	100	50	200	250	300	400	500
k_f при $DM > 0,8$ мм	1,014	1,065	1,24	1,3	1,41	1,6	1,76	1,9	2,16	2,37

У нашому випадку при діаметрі дроту $1,08 \text{ мм}$ і частоті 20 кГц $k_f = 1,014$.
Знайдені значення опорів обмоток трансформатора будуть використані нижче,
для визначення втрат потужності в трансформаторі.

$$R_{1n} = 1,014 \cdot 0,0037 = 0,00375 \text{ Ом},$$

$$R_{2n} = 1,014 \cdot 0,01 = 0,0101 \text{ Ом}.$$

3.7 Розрахунок втрат у високочастотному трансформаторі та його ККД

Визначаємо втрати потужності (у ватах) в міді первинної і вторинної обмоток трансформатора:

$$\begin{aligned} P_{1M} &= I_{1.эф}^2 R_{1n}, \\ P_{2M} &= I_{2.эф}^2 R_{2n}. \end{aligned} \tag{3.51}$$

Підставивши чисельні дані, одержимо:

$$P_{1M} = 9,62^2 \cdot 0,00375 = 0,347 \text{ Вт},$$

$$P_{2M} = 26,83^2 \cdot 0,0101 = 7,27 \text{ Вт}.$$

Обчислюємо сумарні втрати в міді в обох обмотках трансформатора з урахуванням зміни опору при збільшенні температури за формулою:

$$P_M = (P_{1M} + P_{2M}) \cdot (1 + 0,004 \cdot (T_{\text{дон}} - T_0)), \tag{3.52}$$

де $T_{\text{дон}}$ – максимальна допустима температура матеріалу осердя ($T_{\text{дон}} = 100 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$), $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тоді $P_M = (0,347 + 7,27) \cdot (1 + 0,004 \cdot (100 - 15)) = 10,2 \text{ Вт}.$

Розраховуємо за виразом, приведеним нижче, питомі втрати в магнітопроводі в залежності від частоти і індукції:

$$P_{\text{num}} = P_1 f^\alpha \Delta B^\alpha (1 + kT), \tag{3.53}$$

де P_1 , k – коефіцієнти, значення яких наведені в таблиці 2.10, T – температура осердя трансформатора, на цьому етапі прийємо $T = 100$ °C, із таблиці 2.10. знаходимо $P_1 = 11$ Вт/кг, $\alpha = 1,35$, $\beta = 2,69$, $k = 0,008$ (°C)⁻¹.

Підставивши ці чисельні дані, одержимо наступне значення питомих втрат у магнітопроводі:

$$P_{num} = 11 \cdot 10^{1,35} \cdot 0,4^{2,69} \cdot (1 + 0,008 \cdot 100) = 37,7 \text{ Вт/кг}. \quad (3.54)$$

Знайдемо втрати в осерді трансформатора на його перемагнічування, нехтуючи втратами на вихрові струми:

$$P_{ст} = \frac{P_{num} m_{mp.o}}{1000}, \quad (3.55)$$

де $m_{mp.o}$ – маса осердя трансформатора в грамах.

Таблиця 3.8 – Коефіцієнти для розрахунку питомої потужності

Коефіцієнт	Значення коефіцієнта при частоті, кГц							
	0,4÷100	100÷1000	0,4÷100	100÷1000	0,4÷100	100÷1000	0,4÷100	100÷1000
	Марки феритів							
	M2000HM-1A M2000HM-1Б		M2000HM1-17		M3000HH-A		M6000HM-1	
P_1 Вт/кг	32±7	13±3	63±10	25±4	48±8		11±2	38±0,8
α	1,2	1,4	1,2	1,4	1,2		1,35	1,6
β	2,4		2,85		2,76		2,69	2,6
k (°C)	0,004		0,004		0,008		0,008	

Тоді

$$P_{cm} = \frac{37,7 \cdot 1770}{1000} = 66,73 \text{ Вт.}$$

Тепер можемо визначити сумарні втрати потужності в трансформаторі:

$$P_{\Sigma} = P_M + P_{cm} \quad (3.56)$$

$$P_{\Sigma} = 10,2 + 66,73 = 76,93 \text{ Вт.}$$

Відповідно до знайдених сумарних втрат, ККД трансформатора одержимо з виразу:

$$\eta_{mp} = \frac{U_{2.e\phi} I_{2.e\phi} 100}{U_{2.e\phi} I_{2.e\phi} + P_{\Sigma}}, \quad (3.57)$$

$$\eta_{mp} = \frac{453.615 \cdot 24.658}{453.615 \cdot 24.658 + 76,93} \cdot 100 = 99,3 \text{ \%}.$$

3.8 Розроблення математичної моделі слідкуючого електропривода повороту сонячних батарей

3.8.1 Математична модель привідного двигуна

Впровадження зворотного зв'язку сприяє поліпшенню показників якості перехідних процесів. У зв'язку з цим, ми плануємо інтегрувати зворотний зв'язок за швидкістю, що дозволить підвищити коефіцієнт передачі регулятора швидкості, а також оптимізувати постійні регулятора часу. Це, в свою чергу, може призвести до збільшення жорсткості механічної характеристики привода, зменшення загальної електромеханічної постійної часу системи та компенсації інерційності керованого перетворювача напруги.

Функціональна схема ЕП механізму повороту СБ наведена на рис. 3.3.

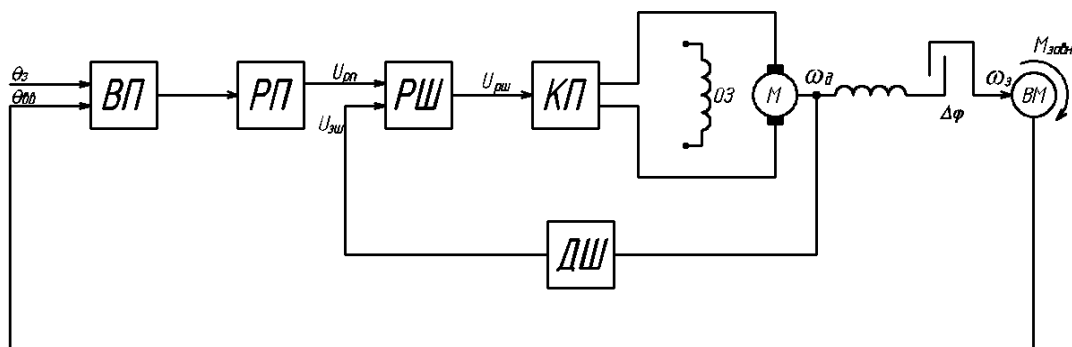


Рисунок 3.3 - Функціональна схема ЕП механізму повороту СБ

У подальшому запис диференціальних рівнянь для двигуна постійного струму з незалежним збудженням здійснюється на основі загальновідомих припущень. Таким чином, був встановлений датчик кута повороту МУ – 615 А з вимірювальним діапазоном кута від -90° до $+90^\circ$. Використаємо малоінерційний і високо чутливий датчик ДВ-160, для вимірювання швидкості та напрямку вітру.

Швидкість обертання вала двигуна постійного струму дорівнює

$$\omega_\partial = \frac{d\phi_\partial}{dt}, \quad (3.58)$$

де ϕ_∂ – кут повороту вала двигуна

Рівняння руху електропривода запишемо як

$$J_\partial \frac{d\omega_\partial}{dt} = M_\partial - M_C, \quad (3.59)$$

де M_∂ – електромагнітний момент двигуна,

M_C – момент навантаження.

Електромагнітний момент двигуна можна визначити із співвідношення:

$$M_\partial = C_M i_1, \quad (3.60)$$

де C_M – коефіцієнт двигуна, i_1 – струм в ланцюзі якоря двигуна.

Рівняння для струму в ланцюзі якоря двигуна запишемо як

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = u - \omega_\partial C_e - r_1 i_1, \quad (3.61)$$

де L_1 – індуктивність обмотки якоря двигуна,

u – напруга живлення двигуна,

r_1 – активний електричний опір обмотки якоря двигуна,

C_e – стала двигуна.

3.8.2 Визначення передавальної функції тиристорного перетворювача

Тиристорний перетворювач використовується для живлення якоря двигуна постійного струму та забезпечує регулювання напруги в межах від 0 до номінальної випрямленої напруги холостого ходу.

Перетворювач складається з керованого випрямляча, системи імпульсно-фазового керування, а також зрівнюючих і згладжуючих реакторів. Він підключається до понижуючого силового трансформатора.

У рамках системи автоматичного керування (САК) цей перетворювач можна трактувати як інерційну ланку першого порядку, де вхідним сигналом є керуюча напруга U_K , а вихідним – електрорушійна сила (ЕРС) перетворювача.

Вибір тиристорного перетворювача здійснюється за такими критеріями:

- Номінальна напруга, струм і потужність перетворювача мають перевищувати відповідні характеристики двигуна;
- Максимальний струм тиристорного перетворювача має бути більшим за максимальний струм двигуна.

З урахуванням цих вимог для нашого двигуна оптимальним варіантом є тиристорний перетворювач серії 12010/130 з такими параметрами:

- номінальний струм якоря – 12 А;
- максимальний струм якоря – 60 А;
- напруга силового живлення – 120 В;
- частота напруги живлення 45 – 65 Гц;
- максимальна напруга якоря – 130 В.

Передавальна функція тиристорного перетворювача має вигляд:

$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП}p + 1}, \quad (3.62)$$

де $K_{ТП}$ – коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача,

$T_{ТП}$ – постійна часу тиристорного перетворювача.

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача визначаємо за формулою:

$$K_{ТП} = \frac{U_{ТП}}{U_K}. \quad (3.63)$$

Приймаємо $U_K = 10$ В. Тоді

$$K_{ТП} = \frac{120}{10} = 12.$$

Стала часу тиристорного перетворювача залежить від наявності індуктивних елементів (реакторів, обмотки трансформатора), а також від індуктивних властивостей силових вентилів. Приймається рівною $T_{ТП} = 0,01$ с.

3.8.3 Визначення передавальної функції редуктора

Розрахуємо електричну постійну двигуна постійного струму розрахуємо за формулою:

$$W_P(p) = \frac{1}{K_P} \quad (3.64)$$

3.8.4 Передавальні функції регуляторів положення і швидкості

Як зазначалося раніше, для покращення якісних характеристик електроприводу повороту сонячних батарей в системі автоматичного керування (САК) пропонується використання двох регуляторів: регулятора положення і регулятора швидкості.

Для регулювання положення застосовують П-регулятор, чия передавальна функція має вигляд:

$$W_{РП}(p) = K_{ПРП}. \quad (3.65)$$

Для регулювання швидкості використовується ІІІ-регулятор, чия передавальна функція являє собою суму ІІ- та І-складової:

$$W_{РШ}(p) = K_{ІІРШ} + \frac{K_{ІРШ}}{p(T_{ІРШ}p+1)}. \quad (3.66)$$

Однак при моделюванні САК необхідно враховувати реальну, а не ідеальну інтегруючу ланку. Ідеальна інтегруюча ланка може спричинити нескінченне накопичення вхідного сигналу, що на практиці є неможливим. Тому передавальна функція ІІІ-регулятора для швидкості має вигляд:

Задача синтезу САК полягає у визначенні коефіцієнтів регуляторів положення $K_{ПРП}$, $K_{ПРШ}$, $K_{ІРШ}$ та інтегруючого коефіцієнта $K_{ІРШ}$. Чим менша стала інтегрування $T_{ІРШ}$, тим ближче реальна інтегруюча ланка до ідеальної.

Далі, складається структурна схема САК :

$$W_{РШ}(p) = K_{ПРШ} + \frac{K_{ІРШ}}{p(T_{ІРШ}p+1)}. \quad (3.66)$$

Тепер, щоб визначити невідомі параметри в структурній схемі, необхідно розрахувати електричну постійну двигуна постійного струму за відповідною формулою.

$$C_e = \frac{U_{я.ном}}{\omega_\delta}. \quad (3.67)$$

Підставивши чисельні дані, одержимо

$$C_e = \frac{36}{104,6} = 0,344 \frac{В \cdot с}{рад}.$$

Механічну постійну двигуна постійного струму розрахуємо за формулою:

$$C_M = \frac{M_H}{I_{я.ном}}. \quad (3.68)$$

Підставивши чисельні дані, одержимо

$$C_M = \frac{11,9}{8} = 1,48 \frac{Н \cdot м}{А}.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю визначаємо за формулою:

$$K_{ЗЗШ} = \frac{U_{я.ном}}{\omega_\delta}. \quad (3.69)$$

Тоді

$$K_{ЗЗШ} = \frac{36}{104,6} = 0,344 \frac{В \cdot с}{рад}.$$

3.8.5 Дослідження динамічного режиму роботи САК

В *Simulink MATLAB*, на основі обрахунків вище, розробив схематичну модель, що зображена на рис. 3.4.

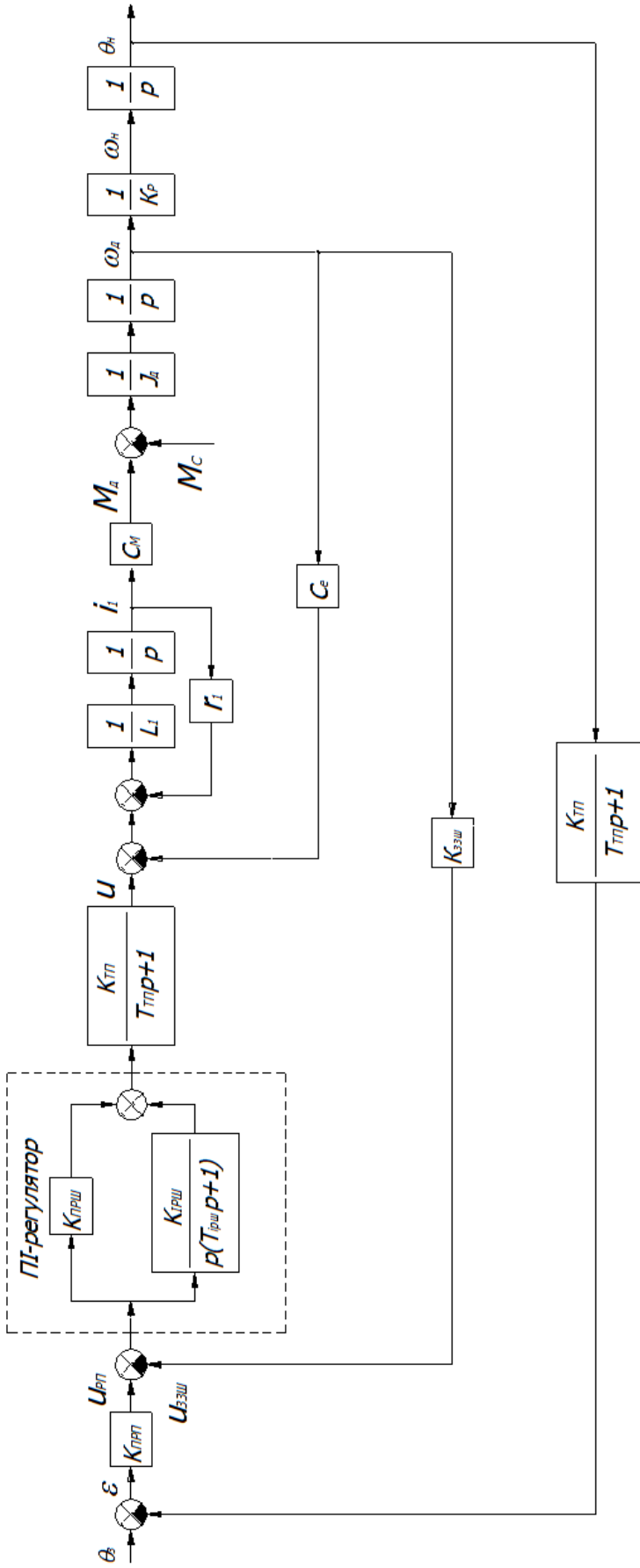


Рисунок 3.4 - Структурна схема САК механізмом повороту геліоустановки

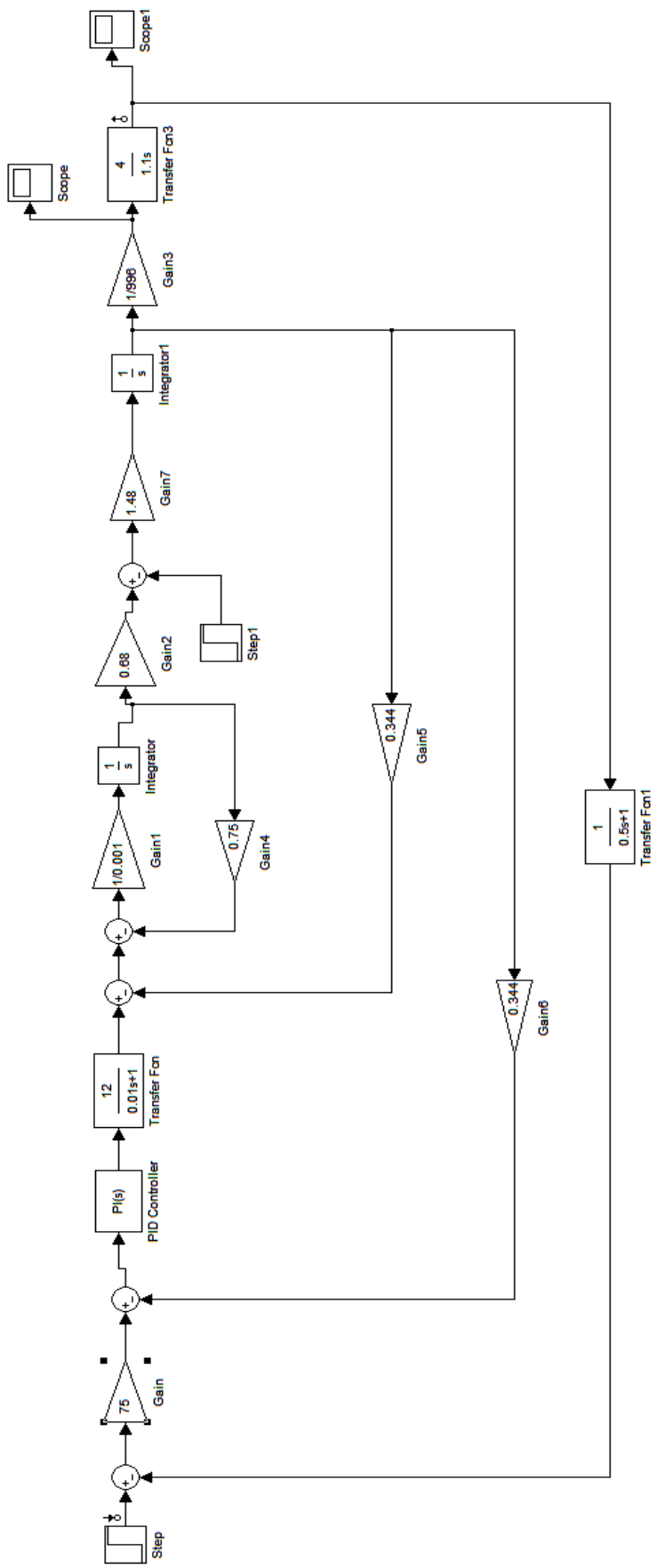


Рисунок 3.5 - Модель САК механізмом повороту геліоустановки в середовищі *Simulink MATLAB*

Моделювання проводилося при подачі на вхід ступінчатого впливу

$\theta_3(t) = 1$. До перехідного процесу САК пред'являлися вимоги по відсутності перерегулювання і статичної помилки та час перехідного процесу не більше 8 с. У результаті при значенні сталої інтегрування $T_{IPШ} = 0,05$ с були одержані наступні оптимальні значення коефіцієнтів регулятора положення і регулятора швидкості: $K_{ПРП} = 75$ $K_{IPШ} = 1,34$ $K_{ПРШ} = 0,71$.

Перехідний процес по положенню САК механізмом повороту геліоустановки наведено на рис. 2.4.

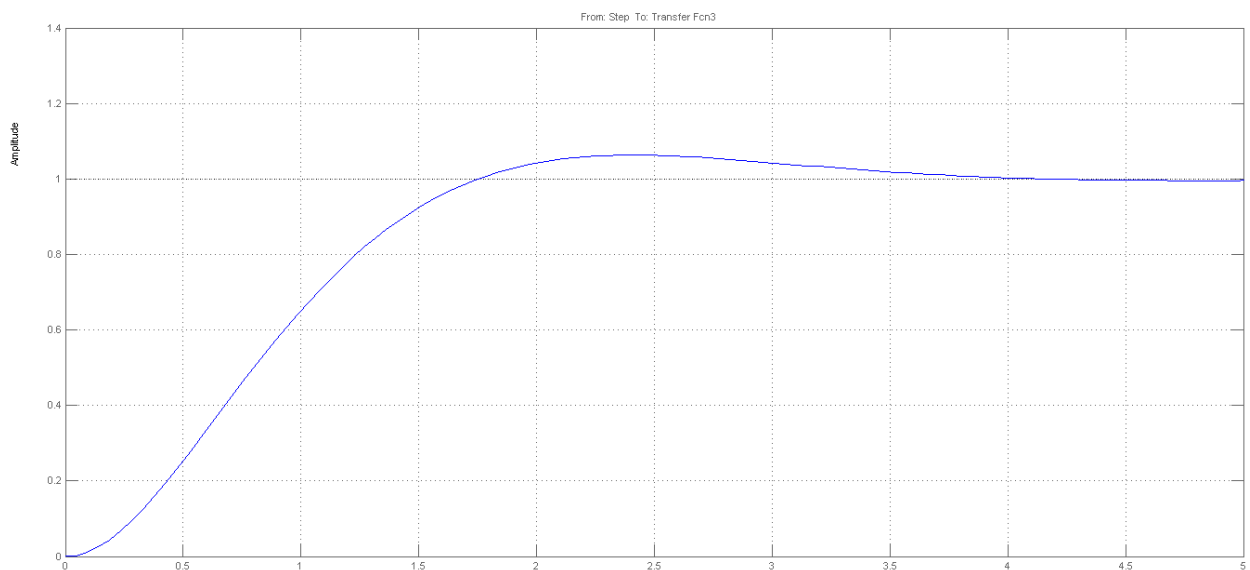


Рисунок 3.6 - Перехідний процес по положенню САК механізмом повороту геліоустановки

Як видно з графіка, а час перехідного процесу складає 5 с, що задовольняє вимогам.

3.8.6 Опис електричної принципової схеми САК

У цій системі реалізовано імпульсне керування в покроковому режимі, яке забезпечує оптимальне орієнтування сонячних батарей залежно від рівня освітленості. Принципова електрична схема системи наведена в графічній частині роботи. Тепер розглянемо механізм її роботи.

Пристрій орієнтації складається з тактового генератора (DD1.1, DD1.2) та основних інтегруючих ланок, представлених на рисунку 2.5. Ці ланки включають фотодіоди

(VD2R4C3, VD3R5C4), формувачі сигналу (DD1.3, DD1.4), цифровий компаратор (DD2), інвертори (DD1.5, DD1.6) і транзисторні комутатори (VT1-VT6), які відповідають за напрямок обертання електропривода, що регулює поворот платформи з сонячними батареями.

Після підключення живлення від сонячної батареї або акумулятора тактовий генератор формує імпульси з частотою 300 Гц. Тактові імпульси генеруються інверторами DD1.3 і DD1.4, а також через інтегруючі ланки VD2R4C3 та VD3R5C4, крутизна яких змінюється в залежності від постійної часу інтегрування. Ця постійна часу залежить від освітленості фотодіодів VD2 і VD3. Струм зарядки конденсаторів C3 і C4 є пропорційним рівню освітленості.

Інтегровані сигнали з виходів ланок передаються на формувачі рівня (DD1.3 і DD1.4), а після цього — до цифрового компаратора (DD2). Співвідношення тривалості імпульсів, що надходять на входи компаратора, визначає на його виходах формування сигналу низького рівня. Якщо освітленість фотодіодів на обох входах компаратора однакова, то на виходах будуть сигнали високого рівня.

Інвертори DD1.5 і DD1.6 виконують функцію управління транзисторами VT1 і VT2. Високий рівень на виході першого інвертора активує транзистор VT1, тоді як сигнал з другого інвертора відкриває транзистор VT2.

Процес роботи базується на порівнянні тривалості імпульсів, що генеруються інверторами DD1.3 і DD1.4, разом з інтегруючими ланками VD2R4C3 і VD3R5C4. Крутизна цих ланок змінюється, залежно від освітленості фотодіодів, і це визначає пропорційний струм зарядки конденсаторів C3 і C4. Сигнали з виходів інтегруючих ланок потім передаються до формувачів рівня DD1.3 і DD1.4, після чого йдуть на цифровий компаратор, де формуються сигнали високого рівня.

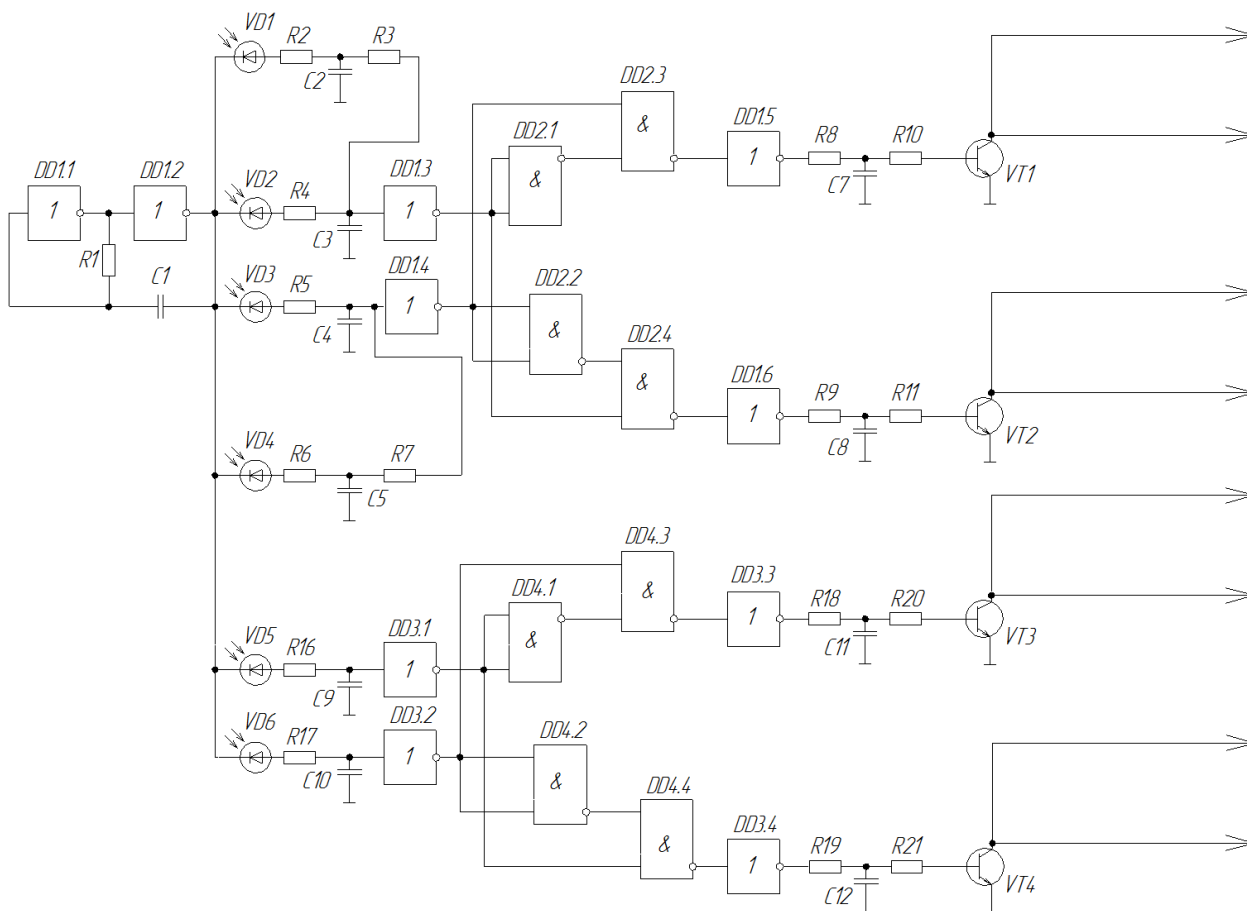


Рисунок 3.7 – Схема електрична принципова системи наведення на Сонце.

Навантаженнями транзисторів VT1 і VT2 є ключі на основі потужних транзисторів VT3, VT6, VT4 та VT5, що керують комутацією напруги живлення електродвигуна. Ланцюги VD8R7C10 і VD9R8C11 виконують функцію згладжування пульсацій на базах керуючих транзисторів VT1 і VT2. Напрямок обертання двигуна змінюється в залежності від полярності підключення до джерела живлення. Цифровий компаратор запобігає одночасному відкриттю всіх силових транзисторів, що підвищує надійність системи.

Коли настає день, різниця в освітленості фотодіодів VD1 і VD4 призводить до того, що електродвигун починає повертати геліоустановку з заходу на схід. Зменшення різниці у тривалості імпульсів, сформованих формувачами, призводить до скорочення тривалості імпульсу, що в свою чергу зменшує швидкість повороту сонячної батареї, гарантуючи її точне позиціонування.

Таким чином, при імпульсному управлінні обертання вала електродвигуна передається через редуктор безпосередньо на платформу з сонячними батареями. Коли Сонце заходить за горизонт, тривалість імпульсів на вході цифрового компаратора стає однаковою, і система переходить в черговий режим, в якому споживаний струм не перевищує 1,2 мА. Оскільки електродвигун активується лише на короткий час для повороту батареї, вимикач живлення не потрібен. Інтегруючі ланцюги VD1R2C2 і VD4R6C5 виконують допоміжну роль, забезпечуючи поворот геліоустановки з заходу на схід під час сходу Сонця.

3.9 Аналіз стійкості САК

Для проведення аналізу стійкості даної системи автоматичного керування необхідно скористатися двома критеріями визначення стійкості:

Критерій Найквіста

Для дослідження САК за критерієм Найквіста по схемі замкненої системи будується спеціальний годограф у програмі *MATLAB*, провіши моделювання, одержено годограф (Рис. 3.8).

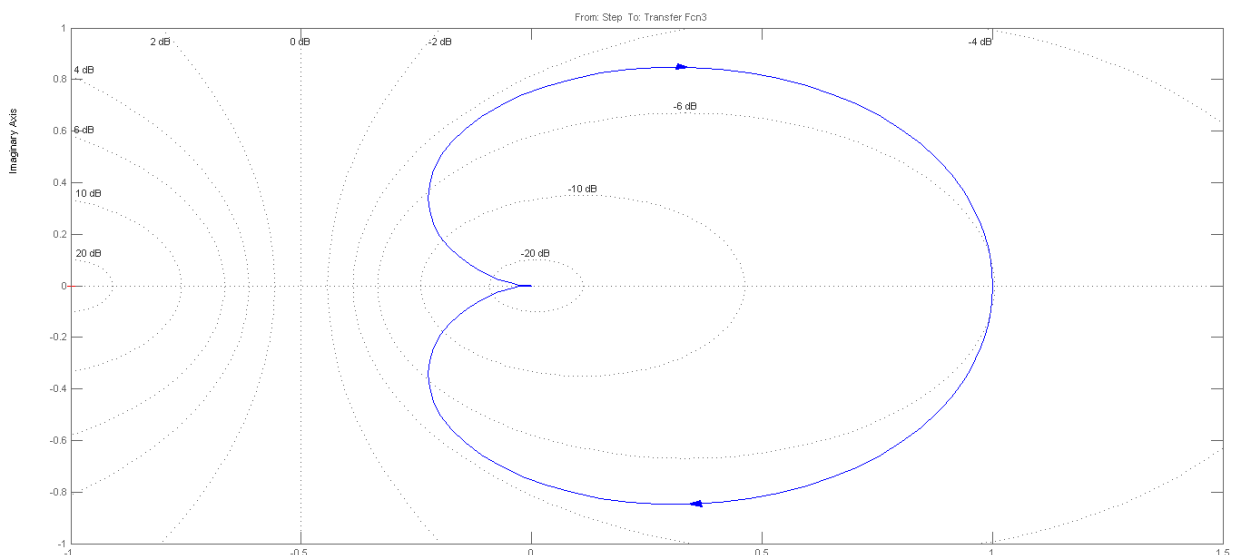


Рисунок 3.8 - Годограф Найквіста

Оскільки побудований годограф не охоплює точку $(-1 ; j0)$, то САК стійка за критерієм Найквіста.

Побудуємо ЛАЧХ та ЛФЧХ і графічно визначимо запас стійкості за фазою $\Delta\varphi$ та по амплітуді ΔL .

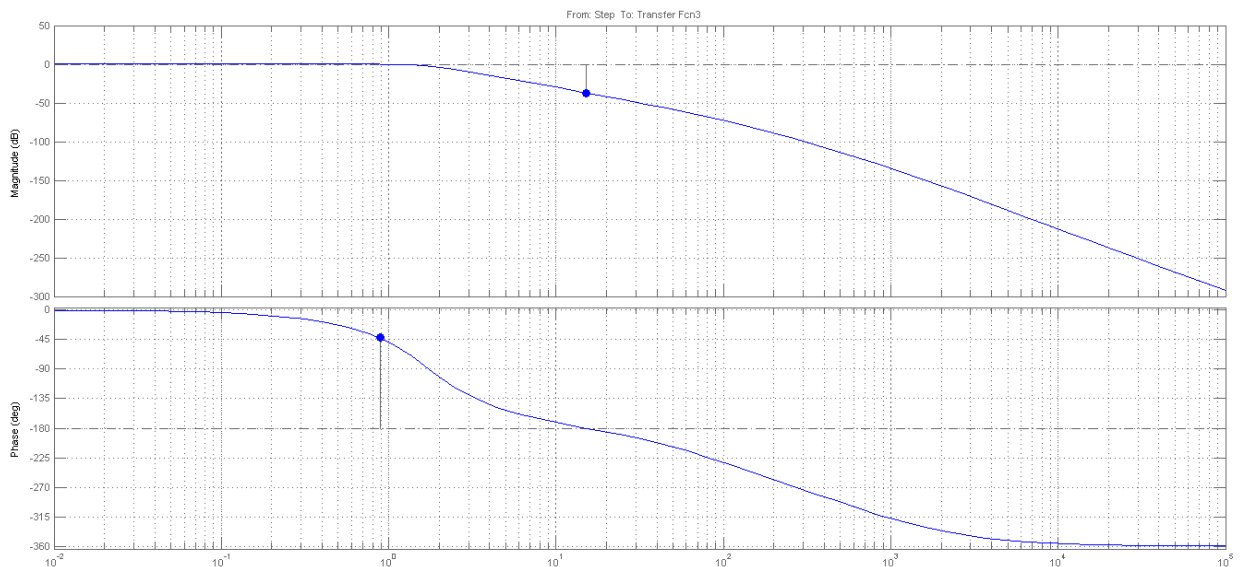


Рисунок 3.9 - Логарифмічна амплітудно-частотна і амплітудо-фазна характеристики САК

Запас по фазі $\Delta\varphi = 137^\circ$ по амплітуді $\Delta L = 36,9$ Дб. Цього досить по умовам задачі.

3.10 Підбір основного обладнання і сонячних батарей

Щоб сонячні панелі покрили свої витрати, реомендується обирати батареї від відомих виробників, з гарантією служби не менше 25 років. Так як репутація відомих брендів говорить про те, що вони є надійними, тому і втрати коштів на заміну панелей будуть незначні. Тому головними аспектами можна вважати якість і тривалість експлуатації.

Я вибрав сонячні полікристалічні панелі Altek ALM-285M-120. Їх ціна на ринку становить 4600 грн. Їх характеристики наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.9 – Основні параметри сонячної панелі

Параметр	Значення
Вага	18.8 кг
Ширина	992 мм
Довжина	1665 мм
Товщина	35 мм
Виробник	Altek
Максимальна робоча температура	85 °С
Гарантійний термін	120 міс
Країна-виробник	Китай
Матеріал рамки	Алюміній
Напруга	24 В
Мінімальна робоча температура	-40 °С
Потужність	455 Вт
Сила струму при максимальній потужності	8.82 А
Тип панелі	Полікристалічна
Кількість елементів	20 шт.
ККД, не менше	17.08 %
Сила струму при короткому замиканні	9.56 А
Температурний коефіцієнт напруги	-0.3 %/°С
Температурний коефіцієнт потужності	-0.38 %/°С
Температурний коефіцієнт струму	0.05 %/°С

Виробіток необхідної сили струму для СЕС обраховується поділом q_d на значення пікових сонце-годин $i_{\text{пiк.годин}}$ місцевості на якій буде монтаж:

$$I^{\text{СБ}} = \frac{q_d}{i_{\text{пiк.годин}}} \quad (3.70)$$

$$I^{\text{СБ}} = \frac{100}{4.37} = 22.88 \text{ А}$$

Де $I^{\text{СБ}}$ – необхідний струм СЕС; i – кількість пікових сонце годин.

Щоб порахувати скільки сонячних батарей потрібно для повного забезпечення, використовується наступна формула:

$$N^{\text{СБ}} = \frac{I^{\text{СБ}} * U_{\text{iнв}}}{P_{\text{ном}}^{\text{СБ}}} \quad (3.71)$$

$$N^{\text{СБ}} = \frac{22,88 * 230}{285} = 20 \text{ шт.}$$

Де $P_{\text{ном}}^{\text{СБ}}$ – номінальна потужність сонячних батарей, Вт.

Частина батарей, що потрібно з'єднати послідовно обраховується поділом напруги постійного струму $U_{\text{iнв}}$ на номінальну напругу сонячної батареї (24В):

$$N_{\text{посл}}^{\text{СБ}} = \frac{U_{\text{iнв}}}{U_{\text{ном}}^{\text{СБ}}} \quad (3.72)$$

$$N_{\text{посл}}^{\text{СБ}} = \frac{230}{24} = 10 \text{ шт.}$$

Тоді як, кількість батарей, що мають бути з'єднані паралельно обраховується:

$$N_{\text{ном}}^{\text{СБ}} = \frac{N^{\text{СБ}}}{N_{\text{посл}}^{\text{СБ}}} \quad (3.73)$$

$$N_{\text{ном}}^{\text{СБ}} = \frac{20}{10} = 2 \text{ шт.}$$

Підсумовуючи обрахунки вище, необхідна кількість панелей для забезпечення роботи системи – 20 шт. Загальна сума на ринку яких коштує 87 тис. гривень на момент кінця 2024 року.

Щоб обрахувати площу, яка необхідна для монтажу СЕС, потрібно площу однієї панелі помножити на її кількість:

$$S_3 = S * N^{CB} = 32 \text{ м}^2 \quad (3.74)$$

Візуально це буде розміщення двох рядів по 10 батарей, що послідовно з'єднані між собою.

Але через різні завади і стрибки напруги ситема потребує додаткового обладнання для регуляції коректної роботи, тому було вирішено встановити контролер Tracer3210A MPPT 30A 12/24В від компанії EPsolar (EPEVER).

Контролери заряду для сонячних батарей виконують важливу роль у захисті акумуляторів від перезарядження, перевантаження чи розряду.

Вони забезпечують ефективне управління процесом заряджання, продовжуючи термін служби системи. Існують два основних типи контролерів: ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) і MPPT (максимальне відстеження точки потужності). Контролери забезпечує високий коефіцієнт корисної дії (ККД) понад 98% та зменшує втрати потужності.

MPPT є основною топологією в економічних схемах перетворення, що реалізується на мікропроцесорі для інтелектуального регулювання робочої точки сонячних панелей, що дозволяє їм досягати максимальної потужності. У разі зміни умов, коли робоча точка сонячних панелей відхиляється від точки максимальної потужності, мікропроцесор автоматично регулюватиме робочу точку батарей, використовуючи алгоритм MPPT, щоб отримати максимально можливу потужність.

Таблиця 3.10 – основні показники контролера

Модель	<i>Tracer3210A</i>
Номанальний струм заряду акумулятора	30А
Номінальний струм навантаження	30А
Системна напруга	12В / 24В автоматичне визначення
Допустимий діапазон напруги акумулятора	8 – 30 В
Максимальна напруга холостого ходу сонячної батареї	100 В за мінімально можливої температури 92 В за температури + 25 градусів
Максимальна вхідна потужність від сонячної батареї	12В — 390 Вт; 24 В – 780 Вт
Напруга підтримувальної зарядки	13,8В
Напруга вимкнення навантаження	11,1В
Напруга відновлення живлення навантаження після вимкнення	12,6 В
Власне споживання	< 20мА (12В); < 16мА (24В)
Температурна компенсація	-5мВ / °С / 2В
Робоча температура	-25 °С ~ + 45 °С
Клас захисту	<i>IP30</i>
Габарити	228 мм * 164мм * 55мм
Вага	1,2кг

Нижче (рис. 3.10) показана вольт-амперна характеристика контролера.

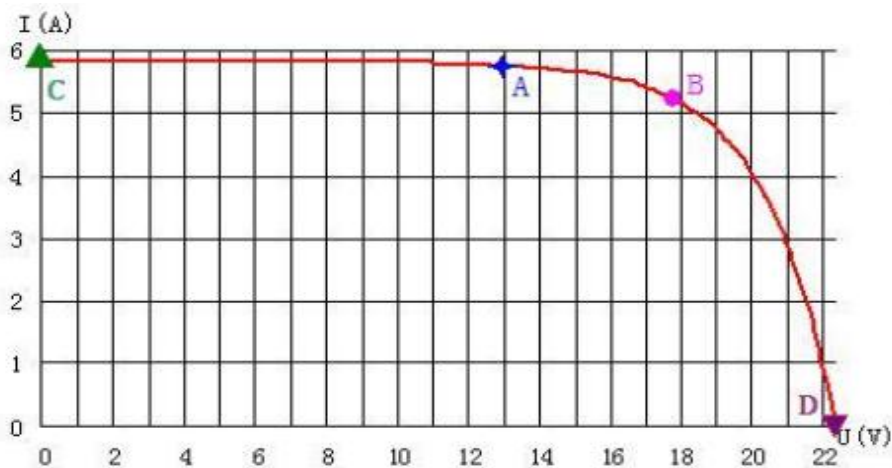


Рис. 3.10 – Вольт – амперна характеристика контролера



Рис. 3.11 – Вимірювання геліосистеми за допомогою спеціального обладнання

Даний контролер підходить для нашої системи через надійність і відносно невелику ціну – 4700 грн.

3.11 Розрахунок повної вартості СЕС

В таблиці 3.11 приведена вартість системи, але без включення кабелів монтажу, що будуть визначені в ході роботи по установці.

Таблиця 3.11 – Загальна вартість СЕС

Найменування елемента	Кількість	Ціна за штуку, грн	Загальна вартість, грн
Гібридний інвертор «3000W 24V Tensite»	1	17640	17640
Акумулятор UHOME-LFP48V 4800M	2	56900	113800
Сонячні панелі MP-MF8612M (HV)-455W	20	4350	87000
Контролер MPPT 30A 12/24В (Tracer3210A)	1	4750	4750
Лічильник NIK 2303 ARK	1	4000	4000

Оскільки точної суми установки даної системи обрахувати доволі складно, через вплив різних факторів, тому будемо орієнтуватись на середній показник 20 тис. гривень.

Тож, загальна вартість СЕС буде становити 247 190 грн.

Висновки до розділу 3

1. Розрахунок енергоспоживання будинку для літнього та зимового періодів. Встановлено, що максимальне споживання припадає на зимовий період і становить 77,175 кВт·год на тиждень. Це значення було використано для подальших розрахунків.
2. Визначення необхідної ємності акумуляторів для забезпечення енергопостачання під час відсутності генерації. Було обрано два акумулятори з ємністю 100 А·год кожен, що забезпечує надійний резерв.
3. Розрахунок оптимальних кутів нахилу панелей залежно від сезонів. Було визначено, що нахил у 68° оптимальний для зимового періоду, а 21° – для літнього.
4. Підбір основного обладнання геліостанції, включаючи монокристалічні панелі MP-MF8612M (HV)-455W, гібридний інвертор Tensite 3000W 24V, акумулятори LogicPower LPM-GL 12V 100Ah, а також інші необхідні компоненти.
5. Визначення загальної вартості СЕС, яка становить 247 190 грн, з урахуванням витрат на обладнання та монтаж.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень, а також забезпечують основу для створення надійної та економічно обґрунтованої системи енергозабезпечення приватного будинку.

ВИСНОВКИ

На основі проведених розрахунків визначено, що середній тижневий обсяг споживаної електроенергії взимку складає 77 кВт·год. Цей показник було використано як основу для розрахунків параметрів та обладнання системи. Було обрано сонячні панелі з оптимальними характеристиками, здатними забезпечити ефективну генерацію енергії в умовах різного освітлення та погодних змін. Додатково виконано математичне моделювання та визначено параметри регульованого приводу, який автоматично налаштовує кути нахилу панелей, що підвищує ефективність системи до 40%.

Реалізація проєкту передбачає початкові капіталовкладення для закупівлі основних компонентів, таких як сонячні панелі, інвертор, акумуляторна система та система керування. За рахунок високої продуктивності та зниження витрат на електроенергію, окупність системи складає 5–7 років. Крім того, економія енергії та можливість продажу надлишків електроенергії за "зеленим тарифом" роблять проєкт фінансово привабливим.

Розроблена геліостанція характеризується технічною реалізованістю, надійністю та адаптованістю до різних умов експлуатації. Вона здатна ефективно знижувати витрати на енергопостачання, водночас генеруючи додатковий дохід. Впровадження подібної системи сприяє зменшенню викидів CO₂, підтримуючи ідеї сталого розвитку.

У підсумку, розробка є технічно, економічно та екологічно обґрунтованою для використання у приватних домогосподарствах, що робить її рентабельною та перспективною.

Список використаних джерел

1. SolarEx. Які типи сонячних панелей існують і який краще вибрати? Огляд різних моделей. URL: <https://solarex.com.ua/news/sonyachni-paneli/yaki-typu-sonyachnykh-paneley-isnuyut-i-yakyy-krashche-vybraty-oglyad-riznykh-modeley> (дата звернення: 24.12.2024).
2. EnergySage. Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels. URL: <https://www.energysage.com/solar/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar/> (дата звернення: 24.12.2024).
3. Solar Energy Basics / Kharkiv Polytechnic Institute. URL: https://web.kpi.kharkov.ua/ief/wp-content/uploads/sites/39/2020/05/solar_energy_1.pdf (дата звернення: 24.12.2024).
4. Положення про організацію освітнього процесу в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Затверджене Вченою радою університету 30.04.2020, протокол №12.
5. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 26 с.
6. Іванов О.А. Розроблення геліостанції для приватного будинку / Кваліфікаційна робота бакалавра. Полтава, НУПП, 2023. – 69 с.
7. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / Укл.: П.Г. Плєшков, Н.Ю. Гарасьова, А.І. Котиш. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 48 с.
8. Галай В.М. Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», галузі знань 14 «Електрична інженерія» / В.М. Галай, Л.І. Леві, С.Г. Кислиця. //

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021.

URL: <https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/main/page/licenzuvannia-ta-akredetacia/nniitm/opp/2021/141-emsap-m.pdf>.

9. ДСТУ ІЕС 61215:2015. Фотоелектричні (сонячні) модулі. Дизайн. Умови роботи та тестування. Київ: УкрНДНЦ, 2015. 60 с.

10. Ахременко І.Г., Кармазін В.А. Системи управління електроприводами. Навчальний посібник. Київ: Видавництво «Освіта», 2019. 192 с.

11. IEEE Std 1547-2018. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. 270 p.

12. Green M.A., Bremner S.P. Energy Conversion Approaches and Materials for High-Efficiency Photovoltaics. Nature Materials, 2017, Vol. 16. pp. 23–34.

13. Solar Energy Development. URL: <https://www.solar-energy.com>.

14. Крамарь В.І., Бахмутова А.Г. Оптимізація енергетичних систем: Підручник. Харків: ХНУ, 2015. 300 с.

15. Власенко В.О. Електричні системи та мережі. Підручник. Київ: Либідь, 2020. 256 с.

16. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / Ed. A. Luque, S. Hegedus. 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2018. – 1184 p.

17. Енергетичний потенціал України та можливості використання відновлюваних джерел енергії. Наукові записки / Відпов. ред. О.Г. Коваленко. – Київ: Наукова думка, 2021. – 120 с.

Додатки

2. DESCRIPTION OF THE STRUCTURE AND MAIN EQUIPMENT OF THE SOLAR POWER PLANT

A solar power plant is a complex system that converts solar radiation into electricity suitable for domestic or industrial use. Its structure consists of several main components that ensure efficient and reliable operation.

2.1 Photovoltaic modules

The main component of a solar power plant is solar PV modules, which convert solar radiation into electric current through the photovoltaic effect. Each module consists of a number of solar cells made of semiconductor materials, most often silicon (both monocrystalline and polycrystalline).

The principle of a solar cell is based on the interaction of solar photons with electrons in a semiconductor material. The absorption of photons activates electrons, putting them in a state of free movement, which in turn leads to the generation of an electric current. This process is the basis of the photovoltaic effect, which ensures the production of electrical energy.

Solar modules consist of numerous solar cells that are electrically connected in series and parallel circuits to achieve the required electrical performance. They are organized into a multilayer structure that includes:

- a protective layer of tempered glass that provides resistance to mechanical damage and UV radiation;
- encapsulant, which is a polymer layer that fixes cells and protects them from moisture and dust;
- a rear protective layer, usually made of polymeric materials, which creates an additional barrier against external influences;
- an aluminum frame that provides rigidity and ease of installation.

The modules can be made in a variety of sizes and shapes, such as square or rectangular, allowing them to be adapted to specific installation conditions. They are mounted on specially designed structures that can be placed on the ground, roofs of buildings, or other surfaces. Electricity generated by solar modules is transmitted through a cable system to an inverter.

The inverter converts the direct current generated by the modules into alternating current, which is suitable for use in the grid or autonomous power supply systems. Thus, the design and location of solar modules are crucial factors that affect the efficiency of a solar power plant and its ability to meet the energy needs of consumers.

2.2 Mounting system

Mounting structures maintain the optimal tilt of the PV modules for maximum solar absorption. They can be stationary or movable (with tracking systems), which adjust the position of the panels by tracking the position of the sun throughout the day.

2.3 Inverter

A solar inverter plays an important role in converting the direct current (DC) generated by solar panels into alternating current (AC) with a voltage of 120 V or 240 V. This conversion is necessary because most household appliances operate on AC power rather than DC power. Thus, the inverter adapts the electrical energy received from the solar panels to the requirements of the home power grid.

The principle of the inverter is based on the following aspects. Solar panels, or photovoltaic (PV) cells, are made of semiconductor materials such as crystalline silicon or gallium arsenide. These materials are composed of layers with different electrical properties (positive and negative), which are connected by a p-n junction. When exposed to sunlight, the semiconductor layers absorb energy, causing the electrons in the photovoltaic cells to receive additional energy and begin to move between the layers, resulting in the formation of a direct electric current.

The generated direct current can be stored in batteries for later use or directly transferred to the inverter, depending on the system design. The inverter converts direct current to alternating current by passing it through a transformer. In this process, the inverter simulates the voltage fluctuations inherent in AC power by rapidly switching transistors on and off. This allows you to create the alternating voltage necessary for the functioning of the household power grid.

2.4 Energy storage system

A battery is an electrochemical device for storing energy. It usually consists of a set of electrochemical cells known as galvanic cells. These cells contain two electrodes that are separated by an ionically conductive electrolyte, which can be liquid or solid. Various materials are used, such as lithium, alkaline manganese, or lead. Depending on the chemical system, batteries can have different voltage levels and energy densities. The material of the electrodes determines the rated voltage of the battery. The amount and nature of the materials used in the battery affect the amount of energy stored. When discharged, the energy stored in chemical form is converted into electrical energy through an electrochemical reaction, resulting in an electric current.

2.5 Electrical cables and connections

Electrical cables and connections in solar power plants perform a key function in the transmission of electricity from the solar panels to the inverter, batteries, and the overall power system. They must ensure reliable connections, reduce power losses, and withstand harsh operating conditions such as elevated temperatures, humidity, UV radiation, and mechanical stress. The main categories of cables and connections include:

Solar cables (PV cables) are designed to connect solar panels to other system elements. They are characterized by a double insulating coating that provides protection against UV radiation, ozone, and adverse weather conditions. These cables can withstand temperature extremes, mechanical damage, and humidity, meeting

standards such as EN 50618 or TUV. The main materials used are copper or aluminum covered with thermoplastic materials such as XLPE (cross-linked polyethylene).

Direct current (DC) cables connect the solar panels to each other and to the inverter, usually acting as bipolar cables to carry the negative and positive poles. Alternating current (AC) cables transmit electrical power from the inverter to the grid or consumer system, requiring a larger cross-section due to the higher voltage and current. Grounding cables protect the system from surges and lightning, usually made of copper, which is highly conductive and corrosion resistant.

2.6 Monitoring and control system

To ensure the efficient operation of the solar power plant, a monitoring system is used that collects data on the performance of PV modules, the state of inverters, and the battery charge level. It allows us to quickly detect malfunctions and optimize the system's performance.

2.7 Point of connection to the power supply

The connection point plays an important role in the integration of a solar power plant (SPP) with the general power grid, providing interaction between different systems. It allows for efficient use of excess energy by transferring it to the grid, and also maintains the stability of energy supply by providing access to backup capacities in cases of insufficient power generation.

In addition, the connection point performs the function of regulating energy flows, ensuring that electricity parameters meet the requirements of the grid. An important aspect is compliance with national and international standards that guarantee safe operation and reduce the risks of negative impact on the grid infrastructure.

Conclusion to Section 2

A solar power plant is a system that converts solar radiation into electricity for domestic or industrial use. Its efficiency depends on the correct selection of

components and installation. This section analyzes the key components of a solar power plant.

The main element is photovoltaic modules that work on the basis of the photovoltaic effect. Their choice depends on efficiency requirements, economic opportunities and installation conditions. Attention is paid to installation systems that optimize the angle of inclination of the panels for energy absorption.

The energy storage system and cable infrastructure ensure the stability of the solar power plant. The batteries store excess electricity, and the mounting structures ensure a long service life. The inverter converts direct current into alternating current for the household grid. Its correct choice determines the performance and stability of the system. Modern solar power plants are also equipped with monitoring and control systems that optimize real-time operation and allow for early detection of faults.

In summary, the integration of PV modules, inverters, batteries, mounting structures, and monitoring systems ensures the efficiency and reliability of a solar power plant. It reduces energy dependence and negative environmental impact, making such systems promising for implementation.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної конференції
«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»

20 грудня 2024 року



Полтава 2024

УДК 004.89 + 681.51

Збірник наукових праць за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 20 грудня, 2024 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Редколегія: О.В. Шефер (головний редактор) та ін. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 124 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних електромеханічних систем та автоматизації, електричних машини і апаратів, моделювання та методів оптимізації, енергозбереження в електромеханічних системах, управління складними технічними системами, проблем аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах, інформаційно-комунікаційних технологіях та засобах управління. Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку IX Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Відповідальний за випуск - д.т.н., професор О.В. Шефер.

Редакційна колегія:

О.В. Шефер – головний редактор, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Н.В. Єрмілова – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

С.Г. Кислиця – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Б.Р. Боряк – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

© Національний університет

«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ЗМІСТ

М.О. Бікчентаєв, Б.Р. Боряк АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНО-КЕРОВАНОВОГО РАДІО.....	8
В.В. Руденко ОГЛЯД СТАНДАРТУ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ LORAWAN	11
К.К. Брижак, А.С. Войтенко, С.В. Польцер, С.Г. Кислиця ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ГЕОТЕРМАЛЬНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ.....	14
А.М. Капітон, О.С. Дзюбан, Р.М. Талибов ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЇ.....	16
О.С. Фомін ШИРОКОСМУГОВИЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТИ.....	18
Д.В. Кислиця, Г.М. Кожушко, С.Г. Кислиця ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКОНФОРТНОЇ БЛИСКОСТІ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ ЗІ СВІТЛОДІОДНИМИ СВІТИЛЬНИКАМИ.....	19
О.С. Фомін ШИРОКОСМУГОВИЙ АДАПТИВНИЙ ДЖАММЕР ДЛЯ КОМЕРЦІЙНИХ ДРОНІВ.....	21
О.А. Іванов, Н.В. Єрмілова КОНТРОЛЬ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СОНЯЧНІЙ ПАНЕЛІ.....	22
О.В. Шефер, О.Г. Дрючко, С.С. Удовик З'ЯСУВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ Й ОБЛАСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ВІДДАЛЕНОГО УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ ОБ'ЄКТАМИ.....	24
Л.І. Леві, Б.В. Качуровський СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО КЕРУВАННЯ СУПУТНЬО-ПЛАСТОВИМИ ВОДАМИ.....	28
В.О. Малород, Р.В. Захарченко, А.І. Криворот, П.Б. Митрофанов СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО НАПРЯМКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АЗОТНОЮ СТАНЦІЄЮ.....	30
В.О. Тітов, Н.В. Єрмілова МОДЕРНІЗАЦІЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПІДСТАНЦІЇ 110/10 кВ З ЖИВЛЯЧОЮ ПОВІТРЯНОЮ ЛІНІЄЮ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	33

УДК 621.311.243

О.А. Іванов, магістрант,

Н.В. Єрмілова, к.т.н., доцент

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

КОНТРОЛЬ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СОНЯЧНІЙ ПАНЕЛІ

Струм короткого замикання (I_{sc}) — це максимальний струм, який може створити сонячна панель за умови відсутності опору, коли обидва її виходи з'єднані накоротко. Вимірювання I_{sc} є критичним для оцінки продуктивності панелі, а також для гарантування її безпеки й ефективності.

Можна визначити фактори, що впливають на струм короткого замикання

Площа сонячного елемента впливає на кількість поглинутої енергії: чим більша площа, тим більше світла, а отже, й струм буде більшим. Інтенсивність світла також є ключовим фактором, оскільки чим яскравіше світло, тим більше енергії отримує панель. На продуктивність впливає й спектр світла: деякі спектри, такі як видимий і інфрачервоний, також сприяють підвищенню струму. Важливими є певні властивості панелі, зокрема здатність відбивати та поглинати світло, що може оптимізувати використання енергії. Стан поверхні панелі, зокрема чистота від бруду чи пилу, забезпечує максимальне проникнення світла, що також підвищує показник струму.

Контроль показника I_{sc} дозволяє виявити потенційні проблеми у функціонуванні панелі. Це може бути корисним як для оцінки її продуктивності, так і для запобігання можливим небезпечним ситуаціям, пов'язаним з перегрівом або короткими замиканнями. Зокрема, зниження I_{sc} може сигналізувати про забруднення панелі або інші технічні проблеми, а також бути ознакою погіршення її характеристик з часом.

Для точного вимірювання струму короткого замикання потрібен струмовимірювальний прилад, який здатний вимірювати постійний струм, наприклад, мультиметр або струмовимірювальні клещі. Крім того, важливо, щоб панель перебувала у справному стані, а роз'єми були надійно підключені. Вимірювання проводяться в сонячний день, щоб уникнути тіні, а панель повинна бути чистою, що забезпечить максимальне проникнення світла. Також може знадобитися шматок картону для тестування реакції панелі на зміни освітленості.

Перед вимірюванням треба розташувати панель під прямими сонячними променями. Потім налаштувати мультиметр на відповідний діапазон для вимірювання постійного струму. Коротке замикання створюється шляхом підключення мультиметра до виходів панелі, після чого записується показник струму, який відповідає певному значенню I_{sc} . У разі значних відхилень від нормальних показників панель може потребувати додаткової діагностики або технічного обслуговування. Наприклад, для обраних в роботі сонячних панелей марки **MP-MF8612M(HV)-455W Mono Perc 9BB HALF-CUT** струм короткого

замикання дорівнює 11,45 А. Цей показник визначений конструкцією та типом панелі і не повинен перевищуватися.

Для захисту від виникнення струму короткого замикання сонячних панелей треба використовувати різну захисну апаратуру.

- Встановлення автоматичного вимикача або запобіжника

Автоматичний вимикач вибирається відповідно до струму короткого замикання панелі. Він має бути достатньо чутливим, щоб спрацювати при перевищенні цього струму. Наприклад, для панелі зі струмом короткого замикання близько 12 А підійде вимикач на 12–13 А. Вимикач захистить систему, розриваючи електричне коло під час короткого замикання. Запобіжник використовується як альтернатива вимикачу, його вибір здійснюють по номіналу, наближеному до значення I_{sc} .

- Використання діодів захисту від зворотного струму

Байпасні діоди встановлюються у великих системах, або коли є послідовне з'єднання панелей. Вони запобігають протіканню зворотного струму, який може пошкодити панелі. Якщо одна з панелей виходить з ладу або затінюється, байпасні діоди перенаправляють струм в обхід цієї панелі. Блокуючі діоди встановлюються для уникнення потоку зворотного струму вночі або в умовах слабого освітлення. Це запобігає втратам енергії та потенційним пошкодженням.

- Контролери заряду з вбудованим захистом

Якщо панель підключена до акумулятора через контролер заряду, треба обирати модель із вбудованим захистом від короткого замикання та перевантажень. Тоді контролери автоматично розривають ланцюг при виявленні аномалій у струмі, забезпечуючи захист системи.

- Заземлення та моніторинг

Заземлення панелей і всіх металевих елементів конструкції допомагає запобігти накопиченню статичної електрики та забезпечує додатковий захист у випадку короткого замикання. Це важливо для великих установок і систем з високою потужністю. Крім того, необхідно регулярно перевіряти панелі, проводи та з'єднання на предмет пошкоджень, зносу або забруднень.

Комбінація автоматичних вимикачів, діодів і контролерів заряду створює ефективну систему захисту від короткого замикання, підвищуючи надійність сонячної системи і захищаючи панелі від пошкоджень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Типи сонячних панелей [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.scribd.com/document/476019352/2nd-half?>
2. Каталог автоматичних вимикачів [Електронний ресурс] – режим доступу: <http://surl.li/edfoti>

CONTROL OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN THE SOLAR PANEL

A. Ivanov, Master's student,

N. Yermilova, Ph.D., Associate professor

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Розроблення та дослідження геліостанції з
регульованим приводом положення сонячних
панелей для приватного будинку**

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:

Студент групи 601МЕ

Іванов О.А.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Єрмілова Н.В.

Полтава 2025

Метою роботи є розробка та дослідження регульованого приводу геліостанції для приватного будинку.

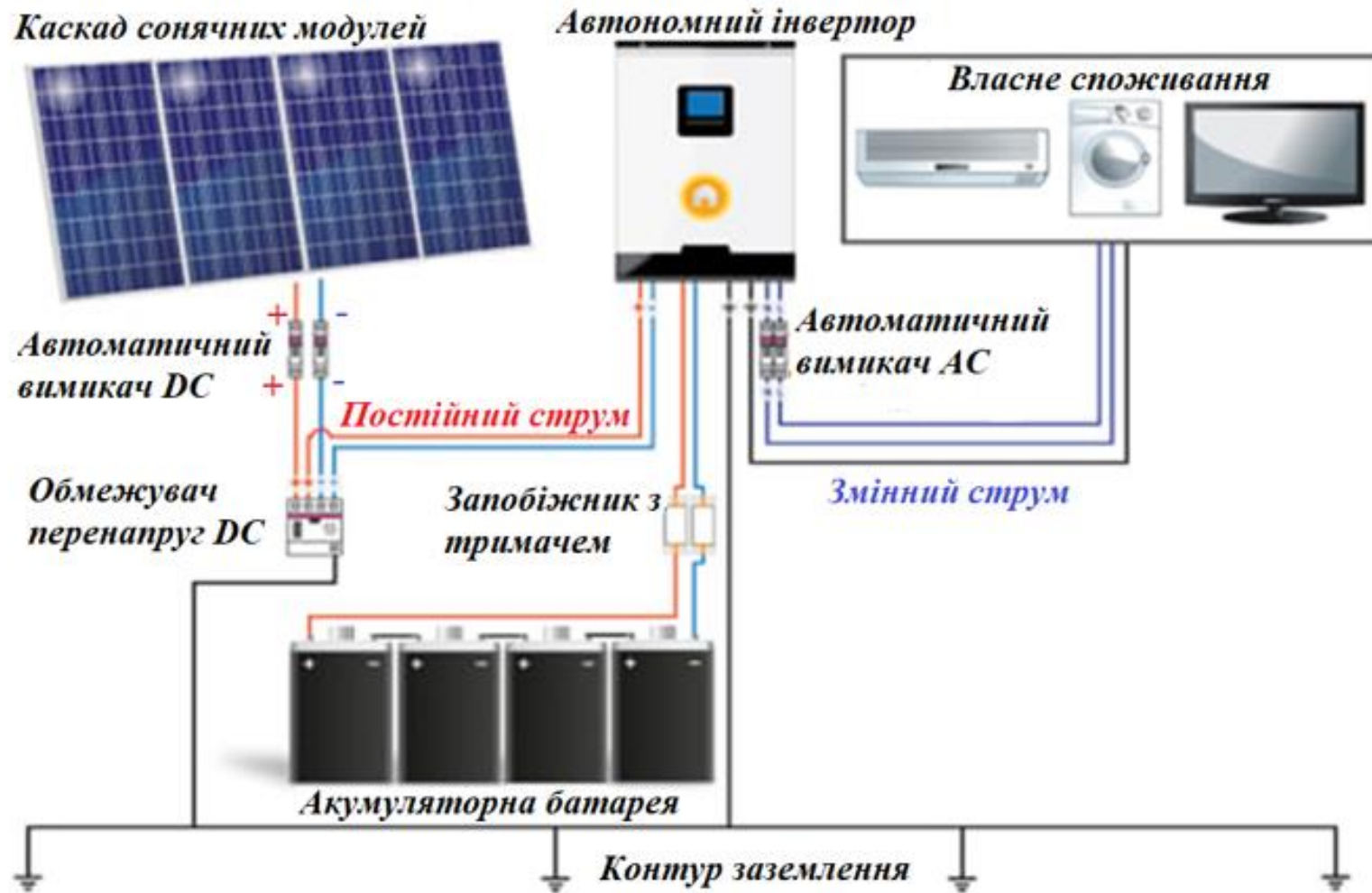
Для виконання поставленої мети в роботі необхідно виконати наступні **завдання**:

- Аналіз існуючих рішень та теоретичне обґрунтування ефективності сонячного трекінгу.
- Розробка конструкції геліостанції, включаючи вибір приводу та матеріалів;
- Моделювання та розрахунки ефективності системи та вибір приводу.
- Розробка алгоритму управління приводом і сенсорами.

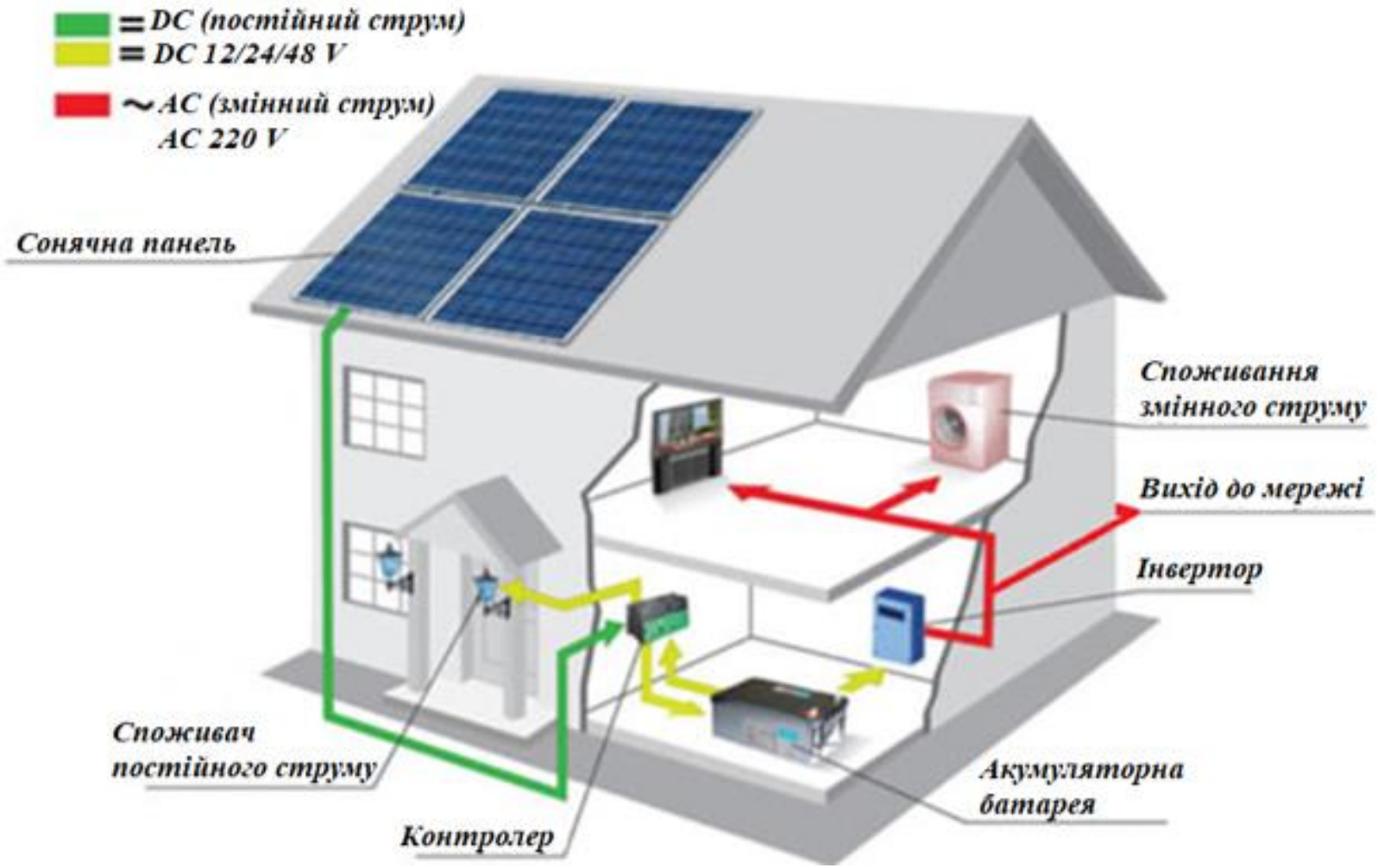
Об'єкт дослідження – процес генерації електроенергії за допомогою геліостанції.

Предмет дослідження – геліостанція з регульованим електроприводом

Структурна схема підключення автономної сонячної станції



Розміщення обладнання в житловому будинку ⁴



Споживання електроенергії в зимовий період

Назва	Потужність Pср, Вт	Час роботи, годин за тиждень	Вт*год/тиждень
<u>Лампа світлодіодна</u>	12	60	720
Холодильник	45	135	6000
Ноутбук	100	20	2000
<u>Спутникова антена</u>	25	42	1050
Телевізор	65	42	2730
Насос сквердловини	750	7	5250
<u>Пральна машина*</u>	1950	3.5	6825
<u>Праска*</u>	3200	2	6400
Бойлер*	2000	20	40000
Фен*	2200	1.4	3200
<u>Всього:</u>	11847		77175

* - виключається можливість одночасного використання цих електроприладів

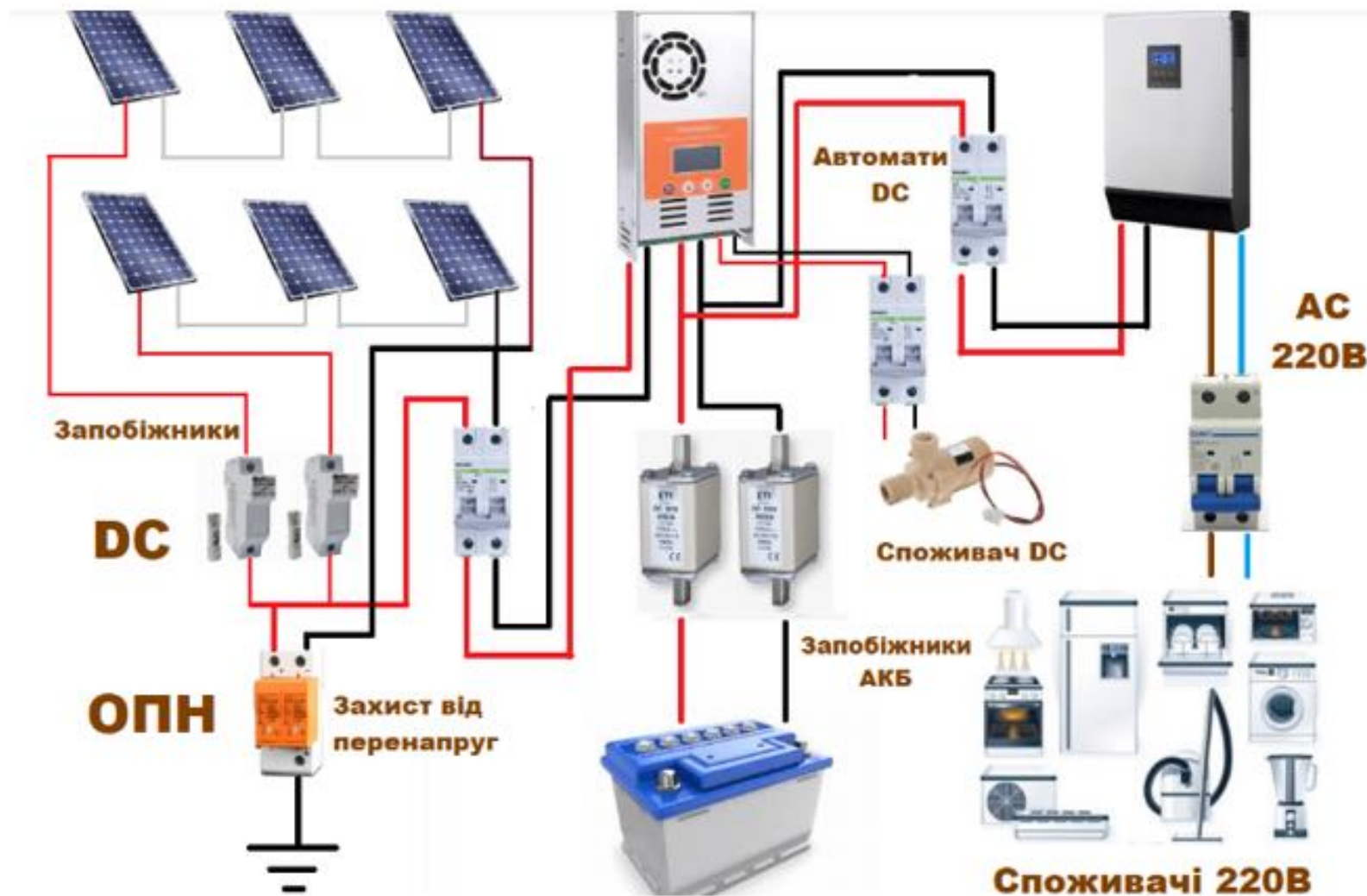
Споживання електроенергії у літній період

<u>Назва</u>	Потужність P _{ср} , Вт	Час роботи, год/тиждень	Вт*год/тиждень
<u>Лампа світлодіодна</u>	12	40	480
Холодильник	45	135	6000
Ноутбук	100	14	1400
Спутникова антена	25	42	1050
Телевізор	65	42	2730
Насос сквердловини	750	7	5250
<u>Пральна машина*</u>	1950	3.5	6825
<u>Праска*</u>	3200	2	6400
<u>Фен*</u>	2000	1	2000
<u>Пилосос*</u>	1500	2	3000
<u>Кондиціонер*</u>	1000	15	15000
Всього:	10647		50135

* - виключається можливість одночасного використання цих електроприладів

Захист геліостанції

7



Загальна вартість геліостанції

8

Найменування елемента	Кількість	Ціна за штуку, грн	Загальна вартість, грн
Гібридний інвертор «3000W 24V Tenwite»	1 шт.	17 640 грн	17 640 грн
Акумулятор «UHOMЕ- LFP48V 4800M»	2 шт.	56900 грн	113 800 грн
Панелі Altek ALM-285M-120	20 шт.	4350 грн	87 000 грн
Контролер MPPT 30A 12/24В (Tracer3210A)	1 шт.	4750 грн	4 750 грн
Лічильник NIK 2303 ARK	1 шт.	4000 грн	4000 грн
<u>Двигун постійного струму</u> 4AAM 56 A2	6 шт.	1735 грн	10410 грн
Кабель ПВП – 2,5 мм ²	100 м	2380 грн	2380 грн
Кабель ПВП – 1,5 мм ²	200 м	1510 грн	1510 грн
Електроmontажна шафа	1 шт.	4870 грн	4870 грн
Датчик кута повороту	1 шт.	3750 грн	3750 грн
Автоматичні вимикачі	3 шт.	720 грн	2160 грн
Запобіжники	4 шт.	485 грн	1940 грн
Реле перенапруги	1 шт.	2300 грн	2300 грн
Вартість встановлення			20 000 грн
		Всього:	276 510 грн

9

Розрахунок оптимального кута нахилу сонячних панелей

$$\beta := \text{Maximize}(R, \beta) = 12.543$$

$$\beta = 1.032$$

$$E_p E := 0.62 \quad w3h := 69$$

$$\varphi := 51 \quad \delta := -21.3$$

$$w3 := 65 \quad \beta := 0$$

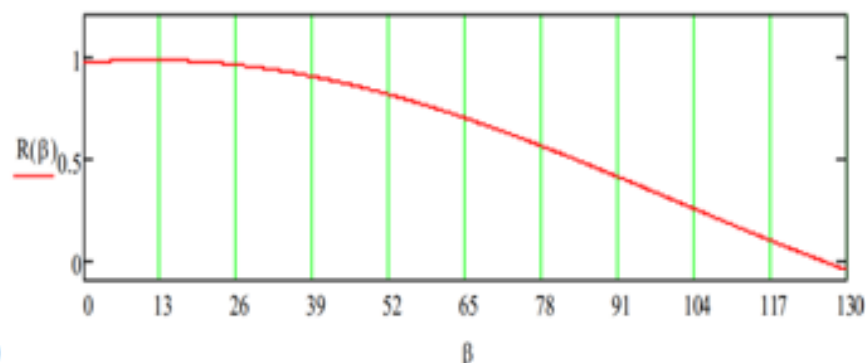
$$p := 0.7$$

$$C := \frac{\cos[(\varphi - \beta) \text{deg}] \cdot \cos(\varphi \text{ deg}) \cdot \sin(w3h \text{ deg}) + \frac{\pi}{180} \cdot w3h \cdot \sin[(\varphi - \beta) \text{ deg}] \cdot \sin(\delta \text{ deg})}{\cos(\varphi \text{ deg}) \cdot \cos(\delta \text{ deg}) \cdot \sin(w3 \text{ deg}) + \frac{\pi}{180} \cdot w3 \cdot \sin(\varphi \text{ deg}) \cdot \sin(\delta \text{ deg})}$$

$$D := E_p E \cdot \frac{1 + \cos(\beta \text{ deg})}{2} + p \cdot \frac{1 - \cos(\beta \text{ deg})}{2}$$

$$R(\beta) := (1 - E_p E) \cdot C + D$$

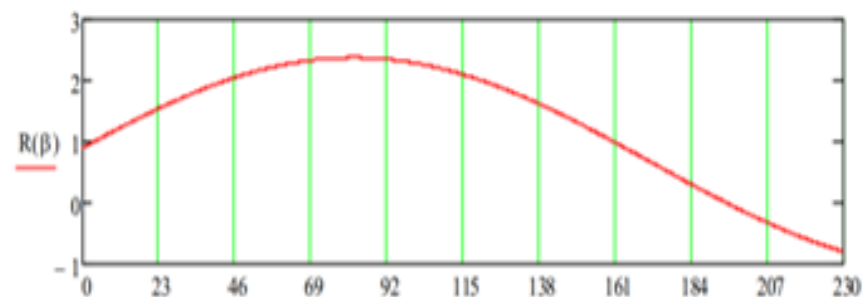
$$\text{Given} \quad -10^{10} < \beta < 10^{10}$$



Розрахунок кута у літній період

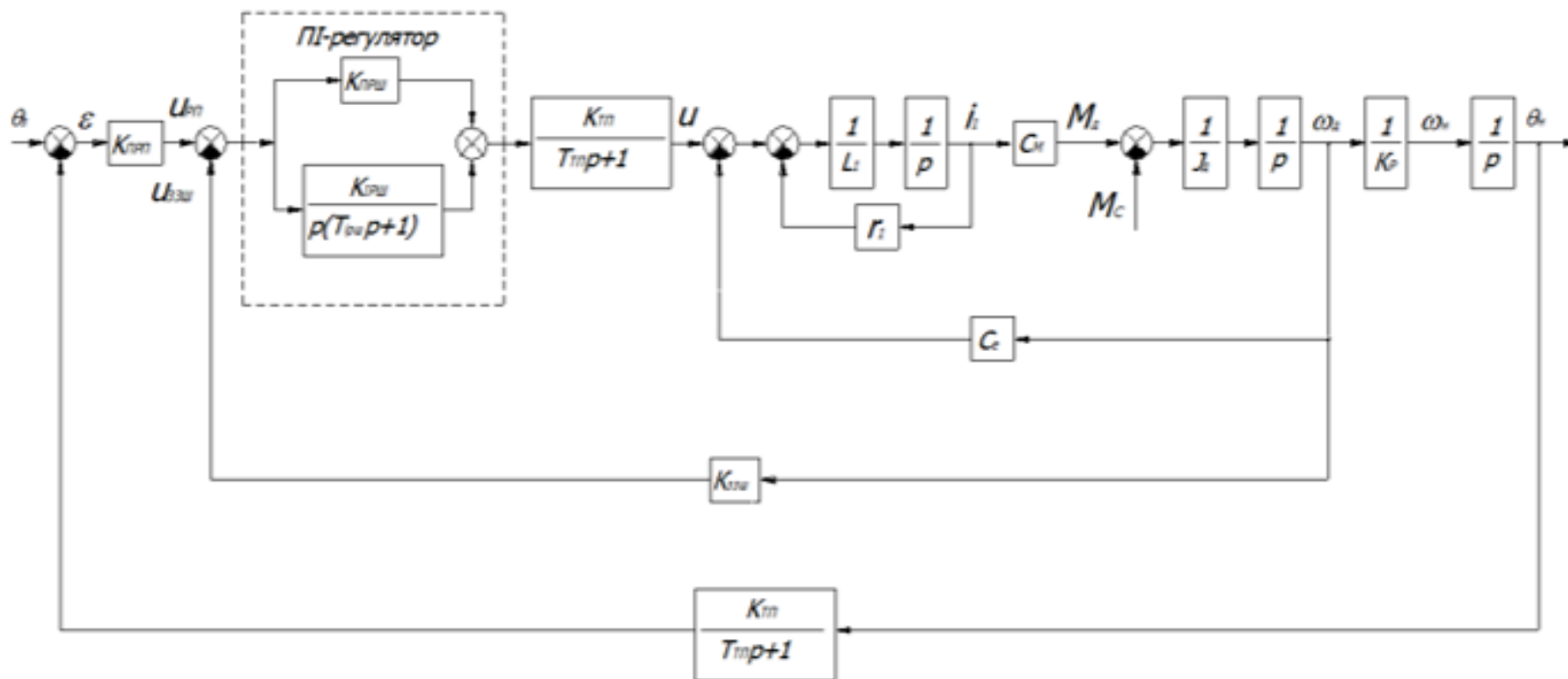
$$\beta := \text{Maximize}(R, \beta) = 72.537$$

$$\beta = 2.547$$

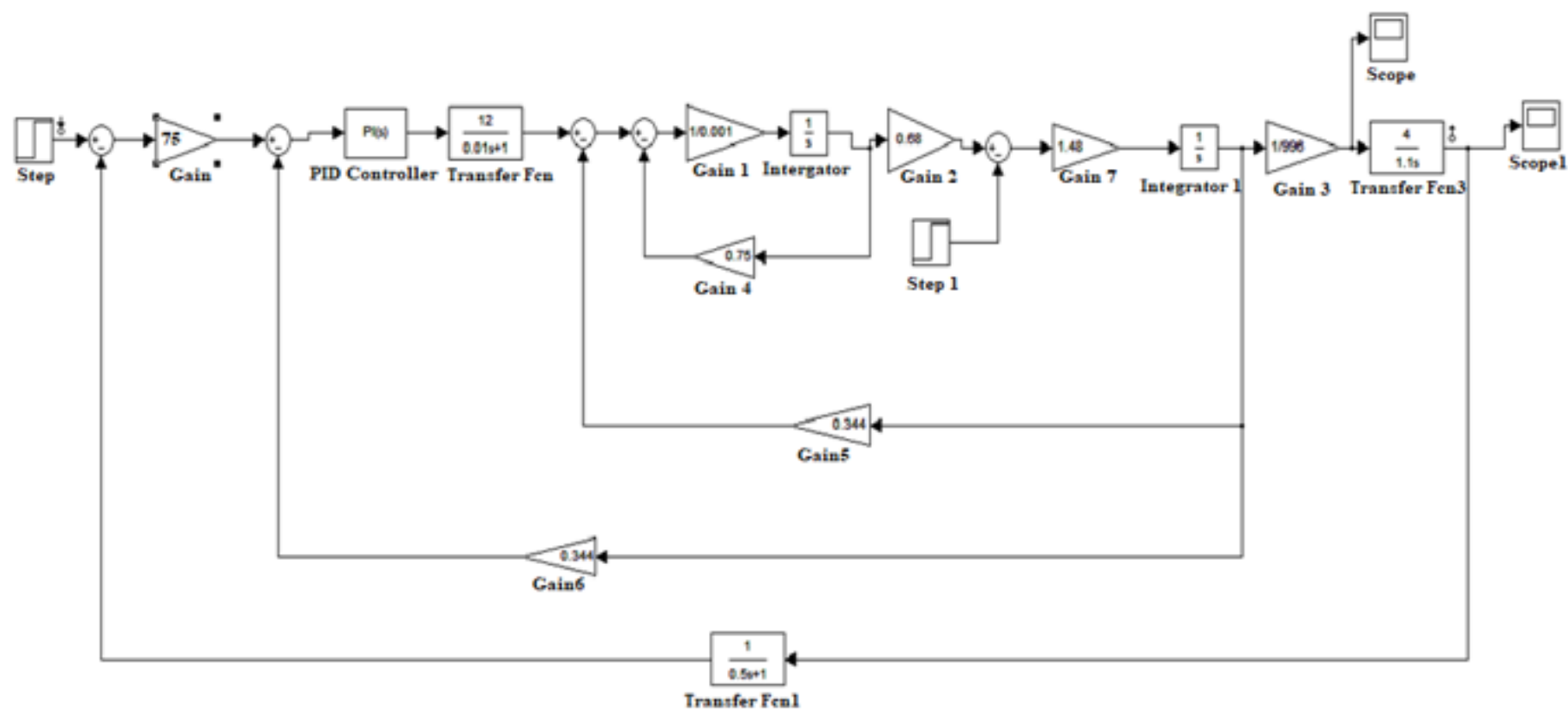


Розрахунок кута у зимовий період

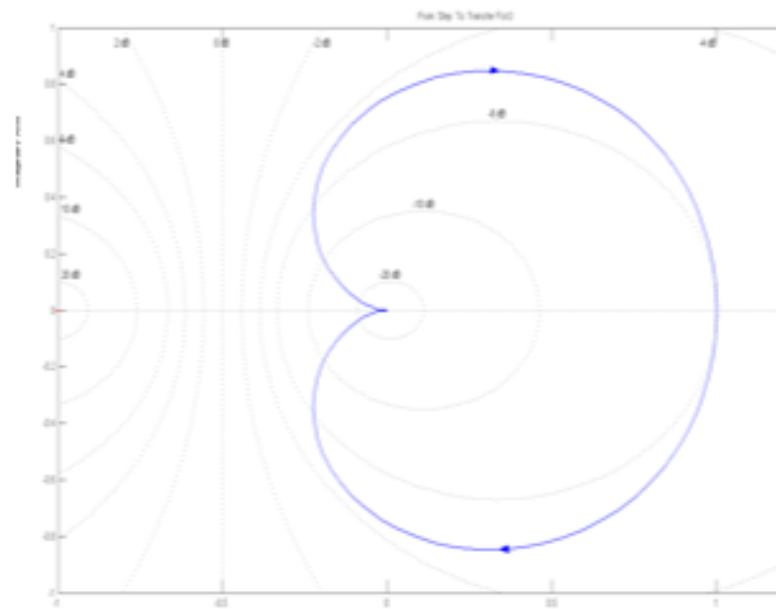
Структурна схема САК механізмом повороту геліоустановки



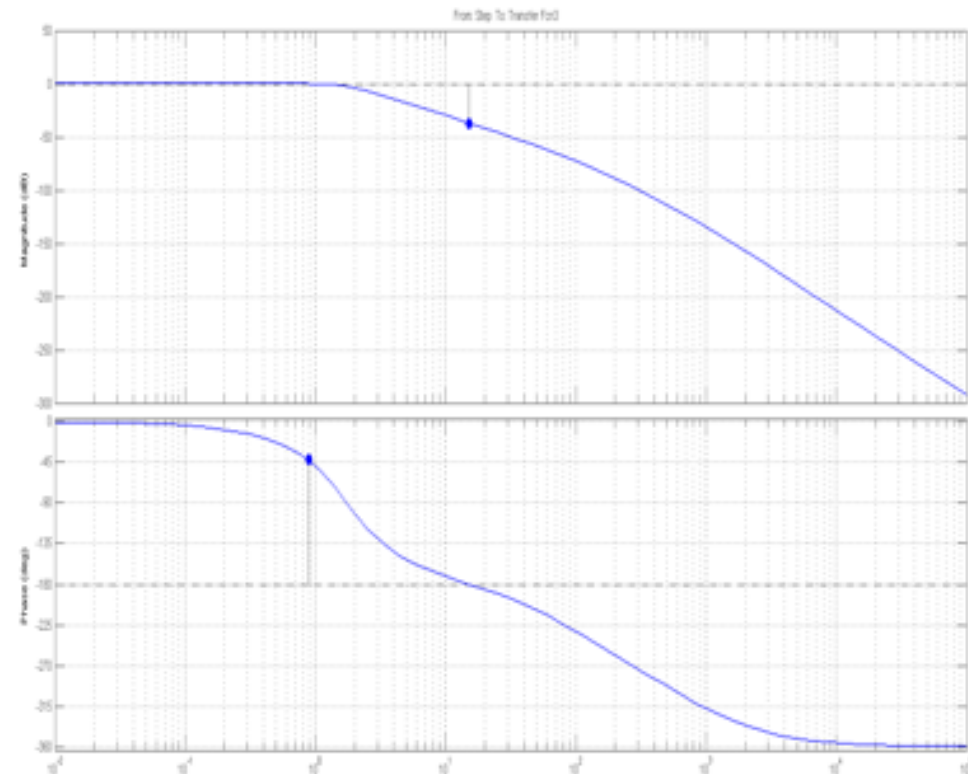
Модель САК механізмом повороту геліоустановки
в середовищі *Simulink MATLAB*



Дослідження стійкості системи



Годограф Найквіста



Логарифмічна амплітудно-
частотна і фазо-частотна
характеристики САК

Приклад слідкуючої станції повороту панелей



Контроль струмів короткого замикання

