

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації

Кафедра Комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Комплексна тема: Домашня сонячна електростанція.

Підтема 1. Оптимізація орієнтації панелі.

Виконав:
студент 2 курсу, групи ІРТМ-22-1
Верягін Владислав Вікторович

Спеціальність 172 «Телекомунікації
та радіотехніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інформаційні радіотехнології»

Керівник проф. Антіпов І. Є.

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

проф. Антіпов І. Є.

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма Інформаційні радіотехнології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

" 20 " 10 _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Верягіну Владиславу Вікторовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Комплексна тема: Домашня сонячна електростанція. Підтема 1. Оптимізація орієнтації панелі.

затверджена наказом університету від "20" _____ 10 _____ 2023 р. № 1220 Ст

2 Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії "10" _____ 01 _____ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Для сонячної панелі з максимальною потужністю 25 Вт, яка встановлена в умовах міської квартири, що обмежує можливість її повороту, і контролера сонячної панелі АСМ 20D:

4. Перелік питань, які потрібно опрацювати в роботі:

- проаналізувати роботу сонячної панелі в таких умовах розташування, коли є часткове закриття горизонту.

- розробити модель, що дає змогу визначати середньодобовий виробіток сонячної панелі залежно від її орієнтації в просторі.

- у моделі врахувати широту і довготу місцевості, кути закриття, добовий і річний рух сонця по небосхилу.

- використовуючи розроблену модель визначити оптимальний з точки зору середньорічного вироблення азимут і кут місця сонячної панелі.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

- 1 Інформація про автора та керівника (титольний слайд);
- 2-3. Обґрунтування актуальності роботи для умов розміщення сонячної панелі з частковим закриттям горизонту;
4. Завдання
5. Загальна структура моделі;
6. Астрономічна частина моделі;
7. Врахування кутів закриття та орієнтації сонячної панелі;
8. Енергетична частина моделі;
- 9-13. Результати моделювання;
14. Висновки по роботі.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка структури моделі	20.10.23 - 31.10.23	
2	Розробка астрономічної частини моделі	1.11.23 - 15.11.23	
3	Розробка енергетичної частини моделі	16.11.23 - 20.11.23	
4	Моделювання, аналіз результатів	21.11.23 - 30.11.23	
5	Складання пояснювальної записки	1.12.23 - 15.12.23	
6	Підготовка графічного матеріалу	16.12.23 - 30.12.23	
7	Підготовка до захисту	2.01.24 - 16.01.24	
8	Захист	18.01.24	

Дата видачі завдання ___20___ ___10___ 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Антіпов І.Є.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи 65 стор, 18 рис., 8 табл. 1 додаток, 17 джерел.

СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ НЕВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ, КОНТРОЛЕР,
ЕКОНОМІЧНІСТЬ, ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ НА КОЛІ УПРАВЛІННЯ.

Розглянуто особливості роботи сонячної панелі, коли вона встановлена в оптимальних умовах: частина горизонту закрита, а оптимальний кут нахилу і поворот реалізувати неможливо. Виконано моделювання кута нахилу і кута повороту для отримання максимальної виробки. Отримані результати, що дозволяють збільшити вироблення сонячної панелі. Модель застосовна для будь-яких умов.

ABSTRACT

Explanatory note of the master's qualification work 49 pages, 18 figures, 8 tables, 17 references. Graphic part 14 slides

SMALL POWER SOLAR PANEL, CONTROLLER, ECONOMY, ENERGY LOSS ON THE CONTROL CIRCUIT.

The peculiarities of the operation of the solar panel when it is installed in non-optimal conditions are considered: part of the horizon is closed, and it is impossible to realize the optimal angle of inclination and rotation. Modeling of the angle of inclination and rotation was carried out in order to obtain the maximum output. The results obtained allow to increase the output of the solar panel. The model is applicable for any conditions.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Сонячна енергетика: принципи роботи, переваги та недоліки	9
1.1 Фізичні принципи роботи сонячних електростанцій	9
1.2 Переваги та прогрес сонячної енергетики	14
1.3 Недоліки та небезпеки сонячної енергетики	15
2 Використання сонячних панелей у домашніх умовах	21
2.1 Оцінка виробітку на основі on-line калькуляторів	21
2.2 Особливості роботи сонячних панелей у домашніх умовах	23
2.3 Шляхи вирішення задачі (формулювання завдання роботи)	26
3 Розроблення моделі	27
3.1 Структура та склад моделі	28
3.2 Астрономічні параметри моделі	29
3.3 Моделювання освітленості	32
3.4 Облік кутів закриття	34
3.5 Облік хмарності та затінення	35
3.6 Облік ослаблення в атмосфері	35
3.7 Розрахунок виробітку	36
3.8 Програмна реалізація моделі	37
4 Результати моделювання	39
4.1 Перевірка моделі	39
4.2 Вибір оптимальних напрямків	42
Висновки	46
Перелік джерел посилань	48
Додаток А. Графічний матеріал	50

ВСТУП

Роботу присвячено питанню оптимізації використання малопотужних сонячних панелей, що встановлюються на балконі в міській квартирі або в інших подібних умовах, коли є перебої в електропостачанні.

У роботі розглянуто, на яких фізичних принципах працюють сонячні електростанції, їхні переваги та недоліки. Зазначається, що останніми роками, під впливом ідеології так званого "зеленого порядку денного", не лише засоби масової інформації, а й навіть науковці та фахівці цілеспрямовано "заплющують очі" на недоліки сонячної енергетики та проблеми, які вона створює для енергосистем і довкілля. Завдяки їм, у суспільстві склалася думка, що сонячна енергетика має тільки "плюси".

Основну увагу під час роботи приділено малопотужним сонячним панелям, які не претендують на те, щоб стати альтернативою традиційним джерелам отримання енергії на постійній основі. Але вони можуть стати додатковим або резервним джерелом живлення в ситуаціях, коли мають місце перебої з енергопостачанням.

Таке використання сонячних панелей стало особливо актуальним в останній рік, коли ситуація з енергопостачанням у країні різко погіршилася, стали виникати тривалі й часом безсистемні відключення електромережі.

Основну увагу в роботі приділено особливостям експлуатації сонячних панелей невеликої потужності в умовах, коли не забезпечується їхнє освітлення Сонцем протягом усього світлового дня. Така ситуація може виникати, якщо панелі встановлено на подвір'ї приватного будинку, на балконі або за вікном міської квартири і частина небосхилу виявляється закритою сусідніми будинками, деревами та іншими перешкодами. Вкладати кошти в те, щоб знайти відповідний майданчик і встановити сонячні панелі капітально теж видається нерациональним, оскільки є надія, що ситуація з нестабільним енергопостачанням не буде постійною.

Але й рекомендація про те, що панель має бути орієнтована суворо на південь, у цьому разі не діє. Оптимальна з погляду максимуму виробітку орієнтація панелей стає неочевидною, її необхідно якимось чином розрахувати. Моделюванню і розрахункам приділено велику увагу в цій роботі.

1 СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА: ПРИНЦИПИ РОБОТИ, ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

Щодня з року в рік Землю висвітлює Сонце, що перебуває від неї на відстані 150 млн. км. Потужність, що утворюється під час термоядерної реакції на Сонці, величезна - вона становить $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт. Її мала частина (приблизно $180 \cdot 10^{15}$ Вт) досягає Землі, створюючи умови для життя на нашій планеті. Енергія, яку планета отримує завдяки сонячному випромінюванню, приблизно у 20 тис. разів перевищує всю сумарну поживану енергію у світі. У середньому на один квадратний метр земної поверхні за межами атмосфери припадає 1350 Вт сонячної потужності.

Один тільки погляд на ці цифри змусить задуматися про те, як використовувати хоча б малу частину цієї енергії для виробництва електрики.

1.1 Фізичні принципи роботи сонячних електростанцій

Сонячна енергетика - це одна з тих сфер, де благі наміри людства майже завжди випереджають технічні можливості та економічні реалії. Творець першої сонячної панелі, американський винахідник Чарльз Фріттс, ще 1881 року передбачав, що вже зовсім скоро звичайні електростанції будуть замінені на сонячні. І це незважаючи на те, що створена ним установка мала ККД лише 1%, тобто саме стільки сонячного світла перетворювалося на електрику. Через 140 років мрія Чарльза Фріттса так і не здійснилася: геліоенергетика досі бореться за місце під сонцем з вітряками, вітряками-генераторами, геотермальними джерелами і корисними копалинами. Що гальмує сонячну революцію і якими методами намагаються поліпшити сонячні батареї?

Здавалося б, придумавши сонячну енергетику, ми протягнули невидимий дріт до найпотужнішого реактора в нашій планетній системі, який не згасне як мінімум ще п'ять мільярдів років (а там подумаємо). Але людству знадобилося

ще майже століття, щоб збільшити ефективність сонячної панелі всього на п'ять відсоткових пунктів - це сталося, коли вчені з Bell Labs створили потужнішу батарею в 1954 році.

Проте прогрес у геліоенергетиці останніми роками був значним. У неї інвестують більше, ніж у будь-яке інше поновлюване джерело енергії (ВДЕ). При цьому середня вартість "сонячної електрики" з 2010 року знизилася з \$0,371 до \$0,085 за кВт-год.

Біля поверхні Землі можна прийняти середню величину інтенсивності сонячного випромінювання 635 Вт/м^2 . У дуже ясний сонячний день ця величина коливається від 950 Вт/м^2 до 1220 Вт/м^2 . Середнє значення - приблизно 1000 Вт/м^2 [1].

Нині існує три різні фізичні принципи, що дають змогу перетворити сонячну енергію на електричну:

- перетворення в теплову енергію через проміжний теплоносій, а потім в електричну;
- перетворення сонячного світла як електромагнітної хвилі в електричні коливання високої частоти з подальшим випрямленням за допомогою ректенн ("енергетичних антен");
- безпосереднє перетворення сонячного світла на постійний електричний струм за рахунок фотоефекту, що виникає в низці напівпровідникових матеріалів.

Коротко розглянемо всі вищеназвані способи.

1.1.1 Перетворення через тепло

Для реалізації цього способу перетворення будуються сонячні електростанції (СЕС) концентраторного типу (англ. Concentrated Solar Power, CSP), або сонячно-теплові електростанції. Вони являють собою систему дзеркал, які спрямовують (концентрують) сонячне світло на теплоприймач, або поверхню, що нагрівається, яка охолоджується за допомогою проміжного теплоносія (як правило, звичайної води). В іншому принцип роботи такої споруди мало чим

відрізняються від звичайної теплової електростанції. Тиск закипаючої рідини обертає турбіни, які виробляють електрику. Зовнішній вигляд такої СЕС показано на рис. 1.2. Переваги такого типу СЕС:

- висока ефективність (ККД до 30-40%);
- здатність акумулювати тепло, що дає змогу працювати станції майже цілодобово.

Недоліки:

- вища собівартість;
- складні процеси експлуатації, які знижують надійність обладнання.

Більш докладно цей тип СЕС описано в [2, 3, 4].

1.1.2 Перетворення за допомогою ректенн

У пристроях, представлених у [5, 6], вуглецеві нанотрубки працюють як антени, що "захоплюють" випромінювання Сонця або інших джерел. Коли світлова хвиля потрапляє на антени з нанотрубок, вони створюють коливальний заряд, який рухається через мініатюрні випрямлячі, вбудовані в стінки трубок, що вмикаються та вимикаються на петагерцовій частоті або 10^{15} Гц. Результатом стає невеликий постійний струм, створений безпосередньо, а не за допомогою ступеневого процесу, подібного до того, як працюють більшість сонячних панелей.

Представники наукової групи розташували на кремнієвій підкладці мільярди вертикальних вуглецевих нанотрубок, ізольованих одна від одної тонким шаром оксиду алюмінію. Конструкцію завершили прозорі пластини з алюмінію і кальцію, що схематично показано на мал. 1.1. При потраплянні світла нанотрубки починають коливатися. Генерується заряд, який потім проходить через випрямлячі. Вони перетворюють змінний струм на постійний завдяки своїй здатності вмикатися і вимикатися з величезною частотою - до квадрильйона разів на секунду.

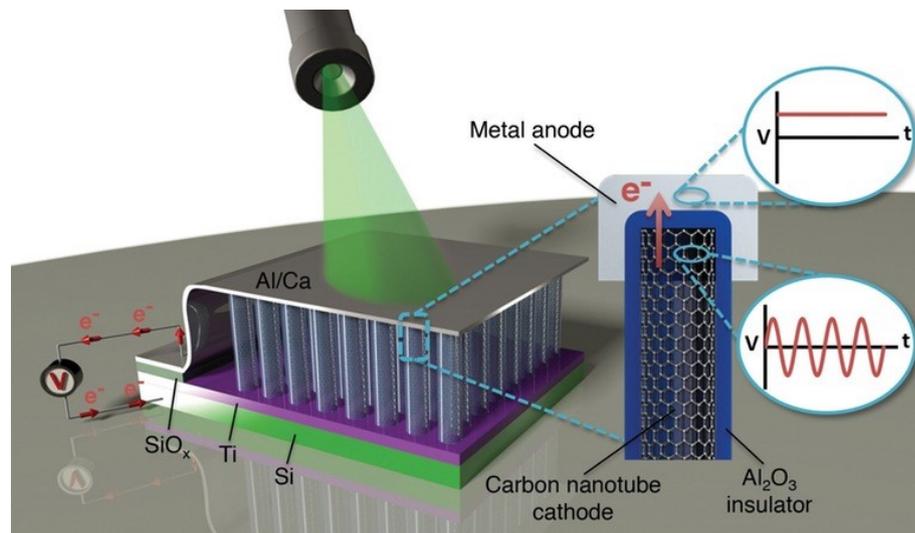


Рисунок 1.1 - Сонячна ректенна

Мільярди ректенн, об'єднані в масив, зможуть давати струм значної величини, хоча ефективність продемонстрованих пристроїв поки що залишається нижче 1%. Дослідники сподіваються різко підвищити параметри своєї розробки за допомогою оптимізації, і впевнені, що ректенна, яка має комерційний потенціал, може з'явитися протягом року.

1.1.3 Безпосереднє перетворення за рахунок фотогальванічного ефекту

Найбільшого поширення набули перетворювачі на фотоелектричних елементах.

Фотоелектричний елемент або фотоелектричний модуль здійснює перетворення сонячної світлової енергії в електричну за рахунок хімічної реакції в кремнійорганічній структурі фотоелемента, де під дією сонячного світла генерується електрика. Такий принцип отримання електроенергії і реалізується в сучасних кремнійорганічних фотоелементах, які для отримання більшої потужності електричних батарей, конструктивно з'єднуються в спеціальні панелі, іменовані сонячними панелями (СП) або модулями. Типовий вигляд СЕС на СП показано на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 - Сонячна електростанція на фотоелектричних панелях

Коефіцієнт корисної дії сонячних панелей сьогодні перебуває в межах 15-30%, а в найсучасніших моделях може бути і більшим.

Залежно від структури сполук кремнію у фотомодулях, усі модулі поділять на:

- сонячні монокристалічні модулі;
- полікристалічні модулі;
- сонячні модулі аморфні.

Кремнійорганічні сонячні панелі - є головними складовими будь-якої електростанції, заснованої на використанні сонячної енергії. Кремній фотомодулів сонячних батарей, у сукупності з різними добавками - утворює так званий "р-п" перехід у фотоелементі, за допомогою якого сонячна енергія перетворюється на електричну.

Підрозділ складено на основі огляду [7, 8, 9].

1.2 Переваги та прогрес сонячної енергетики

До переваг СЕС на сонячних батареях можна віднести:

- великий термін служби СП, який досягає 25 років;
- порівняно невелике необхідне обслуговування СП під час експлуатації.

Воно полягає тільки в профілактичному чищенні поверхні фотоелементів від пилу, снігу та інших забруднень;

- відсутність шуму, шкідливих викидів та інших шкідливих впливів на навколишнє середовище в місці вироблення електроенергії;

- СП можна застосовувати у важкодоступних місцях, куди важко прокласти ЛЕП;

Видима екологічна чистота сонячної енергетики стала ключовою у справі її розвитку і просування в останні роки. Зміна клімату, що відбувається (або передбачувана), яка може бути обумовлена, зокрема, викидом надмірної кількості парникових газів, стимулювала стрімке зростання встановленої потужності СЕС до 7% і, відповідно, зростання вироблення. З 2000 до 2021 року частка СЕС у загальносвітовому виробітку зростає з частки відсотка до 4% [14].

Удосконалення технологій виробництва СП дало змогу істотно знизити їхню вартість.

Перспективи сонячної енергетики видаються найбільш райдужними. Дійсно, якщо вдасться перетворювати в електрику хоча б 1/20 000 частину енергії Сонця, яка абсолютно безкоштовно падає на Землю, то можна буде відмовитися від теплових електростанцій, які спалюють вугілля і забруднюють атмосферу; від атомних електростанцій, робота яких пов'язана з небезпекою ядерного зараження; від гідроелектростанцій, для роботи яких потрібно затоплювати великі території.

Але, як показала практика, робота СЕС пов'язана з низкою особливостей, про які наступний підрозділ.

1.3 Недоліки сонячної енергетики

Сонячна енергетика - це одна з тих сфер, де благі наміри людства майже завжди випереджають технічні можливості та економічні реалії. Творець першої сонячної панелі, американський винахідник Чарльз Фріттс, ще 1881 року передбачав, що вже зовсім скоро звичайні електростанції будуть замінені на сонячні. І це незважаючи на те, що створена ним установка мала ККД лише 1%, тобто саме стільки сонячного світла перетворювалося на електрику. Через 140 років мрія Чарльза Фріттса так і не збулася. У чому причина?

Сонячна енергія залишається не найефективнішою. Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП), тобто відношення фактично виробленої енергії до проектною, встановленою виробником для сонячних панелей, становить 13-18% взимку та 30-35% влітку, що є найнижчим значенням серед інших ВДЕ, а також газу та вугілля.

Як наслідок - вища вартість сонячної енергії - у середньому по світу вона становить \$0,085 за кВт-год, тоді як у біоенергетиці - \$0,062, у геотермальних джерел - \$0,072, гідроелектростанцій - \$0,047; дорожчим є тільки найближчий конкурент - вітряні установки далеко від моря з показником \$0,127, хоча морські прибережні дають енергію по \$0,056 за кВт-год.

Усвідомлення цього факту призводить до поступового зниження інвестицій у сонячну генерацію, що показано на рис. 1.3.

Крім того, для сонячної енергосистеми потрібно багато місця, чи то величезна станція в полі (а земля поблизу міст дорога), чи то домашня електроустановка, до якої треба не тільки під'єднати інвертор і акумулятор, а й забезпечити доступ для техобслуговування.

Але основний недолік сонячної енергетики - переривчастість вироблення. Електроенергія виробляється не тоді, коли вона потрібна споживачам, а коли світить сонце. У результаті енергетичні компанії, які займаються збутом, згодні платити за "переривчасту" електроенергію все менше і менше.

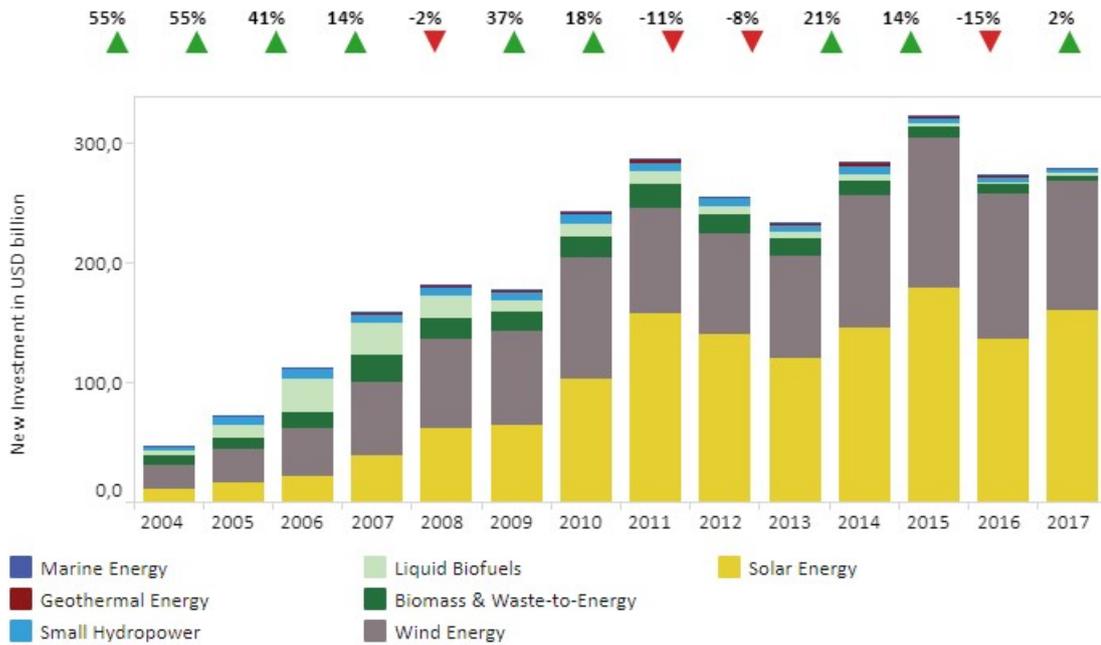


Рисунок 1.3 - Інвестиції в різні види генерації [17].

Загалом додавання "переривчастої" генерації дозволяє скоротити закупівлі вуглеводнів. Іноді, це дає змогу скоротити інвестиції в нову генерацію (оскільки пік сонячної генерації часто припадає на пік споживання кондиціонерів). Водночас додавання "переривчастої" генерації тягне і додаткові витрати:

- набагато більше підключень до генерувальних пристроїв і витрат на обслуговування;
- може виявитися неправильною суміш активної та реактивної енергії, джерела генерації можуть спричинити відхилення від частоти вище, ніж дозволяє регулятор;
- буде потрібно більше ЛЕП на довгі дистанції (бажано на кілька часових поясів, щоб ширше розподіляти в пікові періоди генерації або падіння попиту);
- як наслідок, великі втрати під час передачі;
- якщо будуть використані сховища для розв'язання проблем вище, то вони спричинять як витрати на самі сховища, так і втрати електроенергії під час перетворення;

- поява переривчастої генерації веде до падіння оптових цін на енергію (як - обговоримо нижче), інші генеруючі компанії вимагатимуть компенсацій, або підуть із ринку;

Підсумовуючи, можна сказати, що "переривчаста" генерація дасть деяку економію на паливі, але водночас створить багато нових джерел витрат. Фактично, зараз навіть не зрозуміло, чи будуть вигоди більшими за витрати.

Згідно з дослідженням EIA's 2015 Wind Technologies Market Report, здебільшого "переривчасту" електроенергію в США продають у збутові компанії за довгостроковими контрактами Power Purchase Agreements (PPAs), типова тривалість яких 20 років. Вони її купують як хеджування від ризику подорожчання газу в майбутньому. Згідно зі звітом, закупівельні ціни на таку енергію становлять \$25-\$28 за мегават-годину, тобто 2.5-2.8 центів за кіловат-годину, що вкрай дешево.

Іноді "переривчаста" електроенергія веде до від'ємних цін на оптовому ринку, а також пом'якшує піки цін при піковому споживанні.

У штатах і країнах, де дозволено конкурентне ціноутворення (на протиположну моделі, коли ціни встановлює збутова компанія), оптові ціни на електроенергію танцюють щохвилини, залежно від попиту і пропозиції. Коли у "переривчастого" вироблення виникає пік, оптові ціни можуть стати від'ємними.

Зрозуміло, що кількість періодів з від'ємними цінами збільшується, у міру того, як підвищується частка "переривчастих" джерел. Аналогічні проблеми виникають і в Техасі, і в Європі.

Сонячна енергія, крім того, скорочує пікові денні ціни. Звичайно, ці хвилинні ціни не доходять до кінцевих споживачів, і не відображають їхній попит. Натомість, вони просто означають скорочення коштів доступних для інших виробників електроенергії, більшість з яких не можуть швидко змінювати обсяги генерації.

Зауважте, що нещодавні оптові ціни на електрику в Європі становлять приблизно 30 євро за мегават-годину, а в США \$36 за мегават-годину. Це вище,

ніж те, що сплачується за угодами PPA у США за "переривчасту" енергію (\$25-28).

Проблема в тому, що \$36 за мегават-годину занадто мало для майже всіх типів генерації. Картинка нижче підготовлена Bloomberg у 2019, тобто не зовсім свіжа, але вона дає розуміння проблеми та її масштабів:

\$36 за мегават-годину набагато нижче самого низу цього графіка. Жодна генерація не буде вигідною за цих цін. Занадто мале повернення на інвестиції. Ми досягли ситуації, коли електрогенеруючі компанії майже всіх типів потребують субсидій. Якщо вони їх не отримують, хтось закрийється, хтось припинить інвестиції, залишаючи ринок із дедалі більшою часткою "переривчастої генерації" і дедалі меншим обсягом резервів.

Аналогічна проблема з падінням оптових цін і необхідністю субсидій помічена і в Каліфорнії, і в Техасі. На початку цього тижня і WSJ написав статтю про це, але без розуміння того, що це проблема, а не бажаний результат.

Проблеми з "переривчастим" виробленням мають місце і в інших країнах.

Німеччина зараз світовий лідер за часткою "зеленої" енергетики. Вона становила 12.2% у 2022 (це той рівень, коли проблеми почалися в Гаваях і Каліфорнії) і досягла 19.5% у 2015.

Немає потреби пояснювати, що це веде до частих піків. Німеччина вирішує це питання, скидаючи надлишок генерації в енергосистему ЄС. Польща, Чехія і Голландія вже подали скаргу в ЄС з цього приводу. ЄС вирішив, що з 2017 року країнам ЄС (не лише Німеччині) буде заборонено використовувати feed-in тарифи (це пільгові тарифи, спеціально для "зелених", форма дотацій), які створюють занадто багато переваг для переривчастої генерації. Німеччина пішла навіть далі мінімальних вимог ЄС, у відповідь на що, Федерація зеленої енергетики заявила, що Німеччина "знищить індустрію".

В Австралії одна з недавніх новин звучала так "Австралія розглядає заборону вітряків і сонячних панелей через блекаути". Річ у тім, що в Південній Австралії закривають останні вугільні електростанції, оскільки субсидії на вітряки і СП обвалили ціни на оптовому ринку електроенергії. В Австралії поки частка

"переривчастої" енергії невисока (6.6% у 2018), але через обмеження на енергомережі конкретно Південна Австралія отримала набагато вагомішу частку.

Китай зупинив розгляд нових заявок на вітряки в Північному Китаї, оскільки енергосистема не має потужностей для транспортування "переривчастої" енергії в інші райони. Крім того, більша частина вироблення в Китаї забезпечується вугіллям, і його важко балансувати з вітряками/панелями, оскільки вугільну генерацію важко змінювати швидко і динамічно. Частка вітряків і панелей у Китаї невисока (3.9% у 2018), але проблеми з енергосистемою вже виникли.

Але обсяг субсидій на "переривчасту" генерацію, як і раніше, дуже високий. Програма відновлюваної енергетики в США складається з пересічних програм рівня країни, штатів і місцевих програм. Там і пільгові тарифи, і вимоги, і звільнення від податків, і пільгові кредити. Комбінація складна і оцінити її, склавши окремі шматочки, неможливо.

Є офіційна оцінка ЕІА деяких типів субсидій (тільки федеральних) для 2019 року, вона становить \$11,3 мільярда на вітряки та панелі разом. У 2019 було продано 183.3 тераватат сонячної та вітряної генерації по 2.8 цента за кіловат-годину. Це означає, що повний обсяг продажів склав \$5.1 мільярд. Якщо додати до цього федеральні субсидії, вийде \$16.4 мільярдів, а субсидії склали 69% цієї суми. До цього потрібно додати ще субсидії від штатів.

Paul-Frederik Vach зробив калькуляцію субсидій для вітряків у Данії. Його висновки були такі - зростає і сума субсидій, і частка субсидій у повній ціні. У 2020 ця частка сягнула 66%:

Крім того, обсяги субсидій згодом зростатимуть, оскільки енергосистеми виходитимуть за межі операційних резервів, що потребуватиме нових потужностей для покриття, а також довгих ліній електропередачі для розподілу на більш далекі відстані.

Початок цього процесу ми вже бачимо в Європі. Уся виручка "переривчастої" генерації в Європі становила 13,1 мільярдів євро за 2015 рік на оптовому ринку. А для подальшого розвитку потрібна модернізація енергосистеми ЄС за-

гальною вартістю від 100 до 400 мільярдів євро. Іншими словами, витрати на модернізацію перевершають річну виручку від генерації від 7.6 до 30.5 разів! Більша частина цього піде, найімовірніше, у формі нових субсидій, оскільки термін окупності нормальних інвестицій занадто великий.

Схоже, ми вже досягаємо межі "переривчастої" генерації. Аналогічних висновків доходять і експерти EIA. Steve Kean був обраний основним доповідачем на річній конференції в липні 2016 року, де він заявив щодо відновлюваної енергетики наступне: "Внесок відновлюваної енергетики переоцінений. Переривчаста генерація не рівноцінна нормальній. Без кардинальних проривів у трансформаційних технологіях, 100% відновлювана енергетика неможлива".

На жаль, переривчаста генерація не дуже цінна. Вона може мати навіть негативну цінність, якщо порахувати всі складові для її використання.

Можна сказати, що вся електроенергія має різну якість, але переривчаста ЕЕ якості виключно низької. Ті витрати, що вона створює для енергосистеми, мають покриватися кимось іншим. І це величезна проблема, особливо коли її рівень проникнення в енергосистеми перевищує 10...15% (тобто рівень операційних резервів), вартість подальшого впровадження різко зростає.

Навіть якщо самі вітряки і сонячні панелі будуть абсолютно безкоштовними, цілком імовірно, що вартість розв'язання проблем, які спричиняються переривчастою генерацією, буде більшою, ніж одержувані вигоди [17].

* * *

Усе перераховане не означає, що сонячна енергетика не має майбутнього і подальші роботи в цій галузі недоцільні. Але поки що, мабуть, бажання суспільства знизити вплив на навколишнє середовище, не знижуючи при цьому свій рівень споживання, не підкріплені відповідними технологіями. Коли буде знайдено ефективні способи перетворення, зберігання і передавання ЕЕ на дуже великій відстані, а також буде ще істотніше знижено ціну СП, то це відкриє нові перспективи у сонячній енергетики.

2 ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ У ДОМАШНІХ УМОВАХ

2.1 Оцінка виробітку на основі on-line калькуляторів

Розглянуті в першому розділі особливості та проблеми, які створюють СЕС, стосуються, безумовно, електростанцій великої потужності. У нашій роботі мова піде про значно менші потужності, які можуть бути отримані від СП, встановлених в умовах приватного будинку або міської квартири.

Застосування СП у домашніх умовах може бути виправданим при нестабільному енергопостачанні, при регулярних і тривалих відключеннях електромережі. Звісно, мова піде не про повну заміну електромережі, а всього лише про потужності в кілька десятків ват, яких має бути достатньо для заряду мобільних телефонів та інших гаджетів, а також для роботи малопотужної побутової техніки. Приклад такої СП наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - Сонячна панель з максимальною потужністю 20 Вт

Як базову модель розглянемо СП китайського виробництва. Згідно з описом, вона має розміри 20 x 30 см, а її потужність становить 12 Вт. Одна така панель здатна забезпечувати струм до 1 А при напрузі 12,6 В. Батарея з двох панелей у літній сонячний день здатна виробити до 100 Вт·год.

Тут слід звернути увагу на психологічний аспект сприйняття наведених цифр. Недосвідчений користувач, побачивши в описі, що "*потужність сонячної панелі становить 50 Вт*", починає думати, що з такою СП він зможе весь день працювати на ноутбучі, який, скажімо, споживає 40 Вт, ще й на мобільний телефон енергії вистачить.

Реальність виявляється значно гіршою. В описі, як у рекламі, вказана максимальна потужність, яку може видати СП у ясний сонячний день, коли Сонце в zenіті, а панель перпендикулярна до його променів. У такому режимі панель може працювати 2-3 години на добу, причому не в кожен добу.

Облік кількості похмурих і сонячних днів робить картину ще менш оптимістичною. Так, за даними багаторічних спостережень [17], у Харкові ясними є лише 111 (30%) днів на рік, ще 93 (25%) спостерігається мінлива хмарність, решта 161 (44%) похмурі. Повна інформація представлена в табл. 2.1 (у колонці "Перерахунок у сонячні дні", дні з мінливою хмарністю враховані як $\frac{1}{2}$). Вироблення в похмурий день становить усього 5...10% від виробітку в сонячний.

У мережі Інтернет можна зустріти так звані "Сонячні он-лайн калькулятори", які дають змогу приблизно оцінити вироблення СЕС різної потужності залежно від місця встановлення. Дані для Харкова, отримані за допомогою такого калькулятора, наведено в табл. 2.1. Посилання на он-лайн калькулятор розміщено на ресурсі [12].

Розрахунок виконано за фіксованого кута нахилу панелі, оптимального для даної місцевості (тобто без використання поворотного механізму). Поворотний механізм дає змогу збільшувати вироблення приблизно на 20%.

Відповідно до табл. 2.1, середньодобовий виробіток складе 87 Вт·год. Цього може бути достатньо для підтримання в працездатному стані двох

смартфонів (близько 20 Вт·год на добу кожен), двох мобільних телефонів (до 5 Вт·год на добу кожен), ліхтарика, світильника (18 Вт·год на добу) і радіоприймача (6 Вт·год на добу).

Таблиця 2.1 - Дані для оцінки виробітку СП у Харкові

Місяць	Ясні дні	Дні з мінливою хмарністю	Похмурі дні	Перерахунок у сонячні дні		Очікуване вироблення, Вт·год для СП 20 Вт	
				Дні	%	За місяць	За день
I	3	4	24	5	16	980	32
II	1	3	24	2.5	9	1560	55
III	4	8	19	8	26	1900	61
IV	8	10	12	13	43	2500	83
V	10	9	12	14.5	47	3050	98
VI	13	6	11	16	53	3000	100
VII	14	12	5	20	65	3200	103
VIII	20	8	3	24	77	3000	97
IX	15	9	6	19.5	65	2500	83
X	12	9	10	16.5	53	2230	57
XI	8	10	12	13	43	1800	34
XII	3	5	23	5.5	18	820	26
Рік	111	93	161	157.5	43	25400	87

2.2 Особливості роботи сонячних панелей у домашніх умовах

Робота "домашніх сонячних електростанцій" має низку особливостей, які зазвичай не враховують під час проектування повноцінних СЕС.

Перша особливість - витрати на пристрої управління. Тут, звісно, йдеться не про грошові витрати, а саме про витрату енергії, тому що в умовах, коли електроенергії немає в мережі, питання її ціни сприймається зовсім не так, як коли вона є. Необхідно враховувати, що за малої потужності СП, витрати енергії на роботу поворотних механізмів, контролерів і навіть індикаторних і вимірювальних приладів можуть бути порівнянними з виробленням. Природно, що для зберігання енергії, що виробляється такою "домашньою міні-електростанцією", потрібен акумулятор, а для управління його зарядом спеціа-

лізований контролер [16]. (Це завдання розглядається в другій частині комплексної роботи).

Інша особливість - наявність можливих "кутів закриття". Відомо, що під час проєктування потужних СЕС спочатку обирають відповідний майданчик, який був би не затінений сторонніми перешкодами, і де можна реалізувати поворот панелей на потрібний кут для стеження за Сонцем. Але під час встановлення СП у дворі або на даху приватного будинку реалізувати таке можливо далеко не завжди. Тим паче це складно зробити у квартирі багатоповерхового будинку, де СП може бути розміщено на балконі або просто за вікном (рис. 2.2).

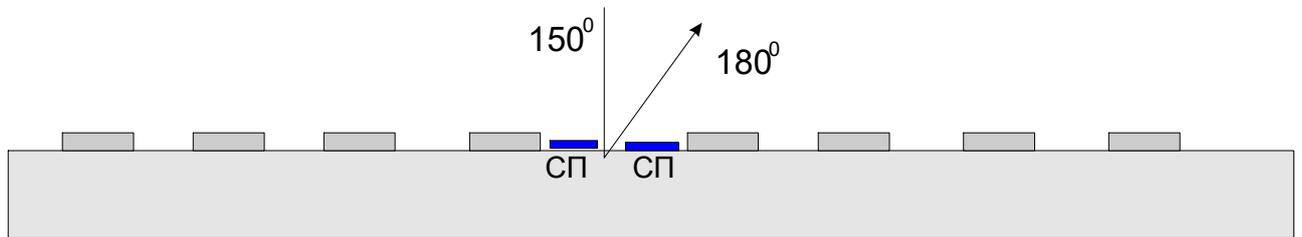


Рисунок 2.2 – Розміщення СП за вікном у багатоквартирному будинку

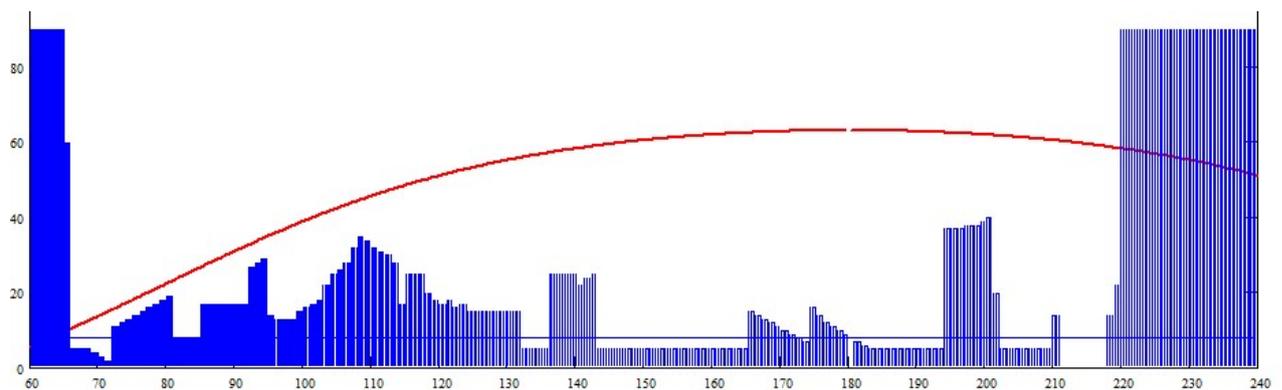
У цьому разі частина небосхилу може бути закрита сусідніми будинками, деревами тощо. Функцію повороту в таких умовах теж можна реалізувати далеко не завжди. Але це не найголовніше. В умовах, коли за деяких азимутів СП опиняються в тіні, рекомендація орієнтувати їх строго на південь може не діяти. Вибір напрямку (орієнтації) СП у таких випадках не очевидний.

На рис. 2.3 показано реальну ситуацію, коли СП без функції повороту розміщено на стіні будинку, перпендикуляр до якої орієнтовано за азимутом 150° .

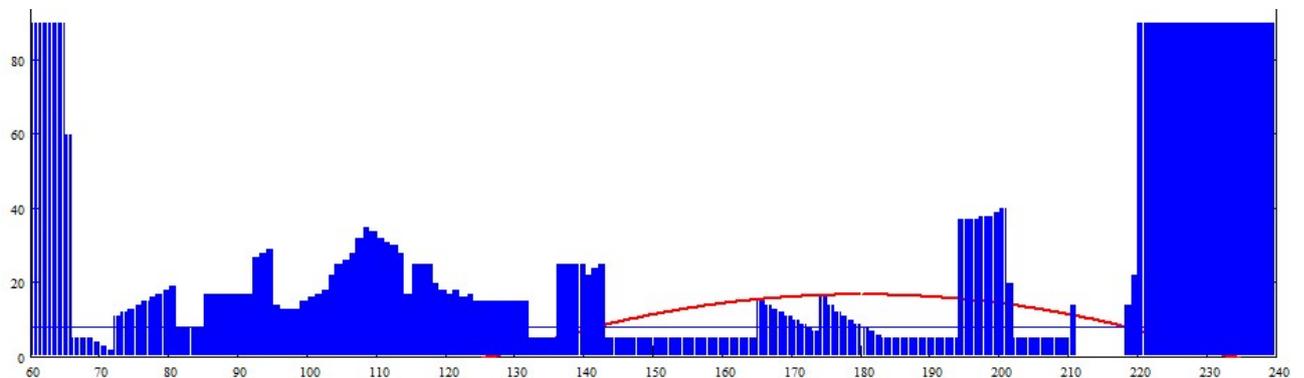
Отже, промені Сонця могли б освітлювати панель, коли Сонце перебуває на азимутах $150^{\circ} \pm 90^{\circ}$, тобто від 60° до 240° .



а)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Схема розміщення СП на стіні будинку (а) і видима лінія руху Сонця 22 червня (б) і 22 грудня (в)

Але, як видно з малюнка, кути 60° ... 65° і 220° ... 240° градусів закриті балконами сусідніх квартир, що виступають, а в інтервалі кутів 65° ... 220° градусів є сусідні будинки та інші перешкоди, які можуть частково закрити Сонце. На рис. 2.3 б) і в) показано рух Сонця в червні та в грудні, відповідно. Як бачимо, у зимовий час Сонце буде дійсно закрито.

На практиці можуть траплятися ще складніші ситуації, коли, наприклад, вікна будинку виходять на захід або на схід і умови для розміщення СП ще менш сприятливі.

Куди в цьому випадку направляти СП? Це і буде основним завданням цієї кваліфікаційної роботи.

2.3 Шляхи вирішення завдання (формулювання завдання роботи)

На жаль, наявні сонячні on-line калькулятори не здатні розрахувати виробіток за неоптимальної орієнтації СП і, тим більше, за наявності "кутів закриття". Також неможливо з їхньою допомогою знайти найкращий варіант повороту панелей. Отримати вихідний код такого калькулятора і внести в нього необхідні доповнення видається завданням досить складним. Тому в роботі необхідно розробити свою власну математичну модель, що дає змогу розраховувати вироблення СП у зазначених умовах.

У розроблюваній моделі необхідно врахувати:

- широту і довготу місцевості;
- річний рух Сонця;
- добовий рух Сонця;
- ослаблення сонячного випромінювання в атмосфері залежно від кута місця Сонця;
- кут падіння сонячних променів на СП;
- кути закриття;
- ймовірність похмурих і сонячних днів.

Для роботи моделі необхідно мати:

- параметри СП (зокрема, значення максимальної потужності за нормального падіння сонячних променів);
- схему "кутів закриття".

Стимулом до виконання цієї роботи послужили тривалі періоди відсутності ЕЕ в мережі, коли СП була єдиним її джерелом.

3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ

3.1 Структура та склад моделі

Розглянемо структуру і склад моделі в загальному вигляді (рис. 3.1). До її складу мають увійти астрономічна частина (1), метеорологічна (3), геометрична (2), розрахунок освітленості (4) та енергетичний розрахунок (5).

В астрономічній частині моделі за широтою і довготою місцевості (7) для кожного дня року і поточного часу (8) розраховуються азимут і кут місця Сонця.

До геометричної частини моделі, яка враховує розміщення та орієнтацію панелі, мають входити її орієнтація в просторі. Вона задається користувачем. Вихідним параметром має бути кут між нормою до панелі (6) та напрямком на Сонце (8). Для обліку кутів закриття мають бути попередньо складені їхні схеми або таблиці. Виходом має бути відповідь: падає тінь на СП у цей момент часу, чи ні.

Для врахування середньостатистичної погоди в метеорологічній частині моделі мають бути дані про кількість ясних і похмурих днів у кожному місяці (9), (10). Результатом моделювання для подальших розрахунків буде ясний або похмурий день, або день зі змінною хмарністю.

Розрахунок освітленості СП виконують на основі даних про орієнтацію СП, напрямком на Сонце і наявність або відсутність затінення.

У частині енергетичного розрахунку проводиться оцінка вироблення на підставі даних про рівень і тривалість освітленості панелі та її параметри (11). Графічно вищеописана структура показана на рис. 3.1.

Ці розрахунки мають повторюватися для всього року (або його частини, що цікавить) для всього світлого часу доби для різних варіантів орієнтації панелей, що показано у вигляді алгоритму на рис. 3.2.

У наступних підрозділах розглянемо частини моделі детальніше.

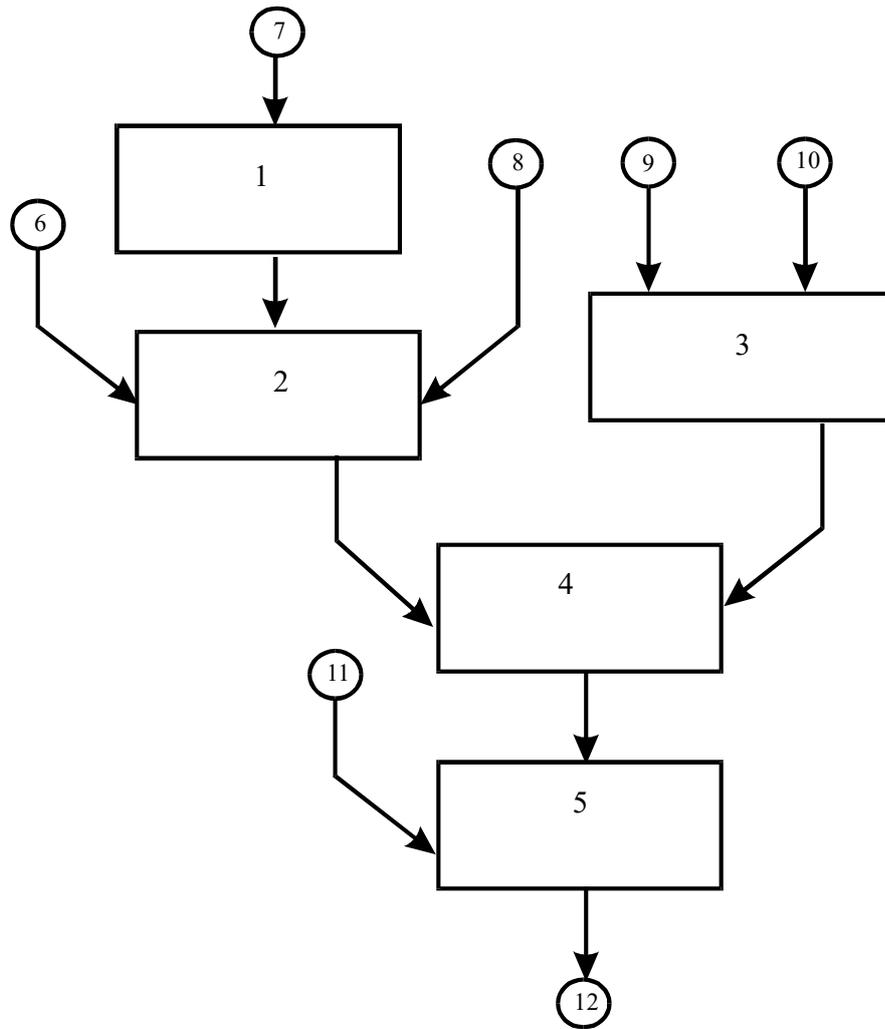
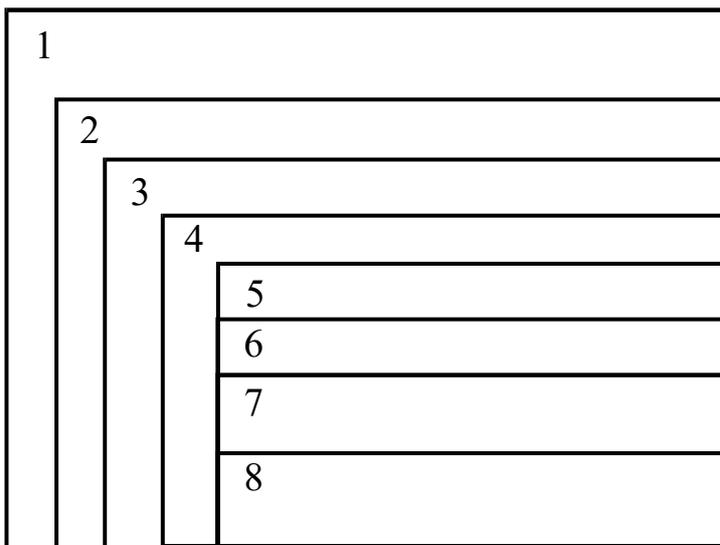


Рисунок 3.1 - Структура моделі



- 1) Для широкої та довготи установки СП, параметрів СП та кутів затінювання
- 2) Для заданої орієнтації сонячної панелі
- 3) Для всього року чи його частини
- 4) Для кожної доби
- 5) Розрахунок кута між СП та Сонцем
- 6) Моделювання погоди
- 7) Розрахунок умов затінення та освітленості
- 8) Розрахунок виробітку (похвилинно)

Рисунок 3.2 - Алгоритм моделювання

3.2 Астрономічні параметри моделі

Як відомо, Земля обертається навколо Сонця з періодом обертання один рік, що становить 365,24 доби. Через нахил земної осі до площини орбіти на кут $23,25^{\circ}$ (мал. 3.3) має місце зміна тривалості дня й ночі та траєкторії руху Сонця по небосхилу (мал. 3.4).

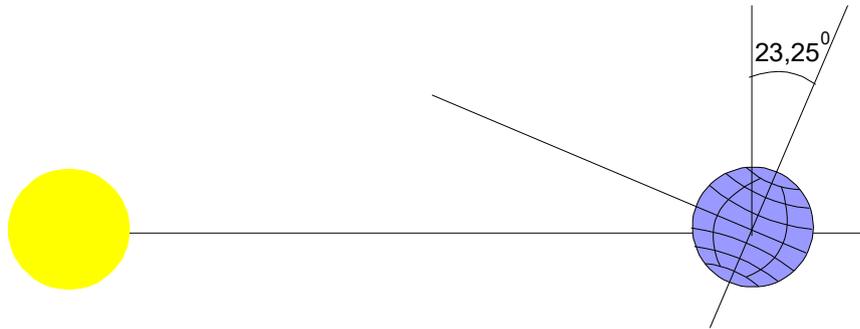


Рисунок 3.3 - Нахил земної осі до орбіти

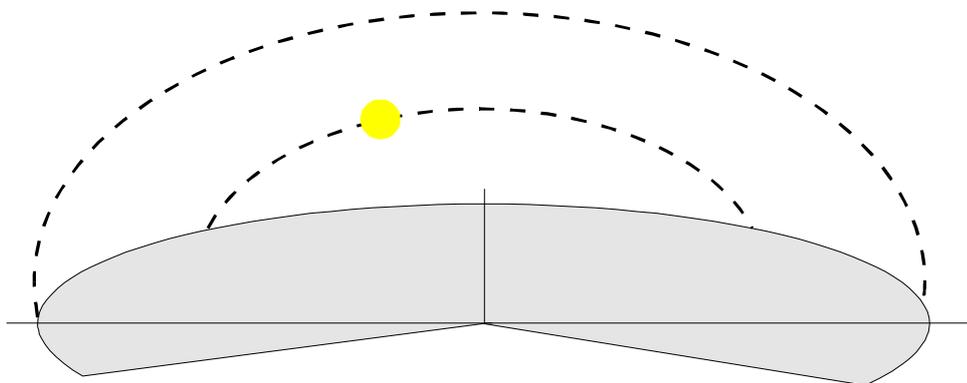


Рисунок 3.4 - Траєкторія руху Сонця по небосхилу

В астрономії існує кілька систем координат: із прив'язкою до центру Сонця (геліоцентрична), із прив'язкою до центру Землі без урахування її обертання (геоцентрична) і з прив'язкою до точки місцевості, де перебуває спостерігач.

У геліоцентричних координатах рух Землі описується формулами

$$i = 0 + 0",468t, \quad (3.1)$$

$$L = 100^{\circ},00532 + 359^{\circ},9937t; \quad (3.2)$$

Однією з координат є схилення β . Схилення небесного об'єкта перебуває в діапазоні від -90° до $+90^\circ$ і дорівнює куту між площиною екватора та напрямком на об'єкт, причому для об'єктів у північній півкулі ця величина є додатною, а в південній - від'ємною.

Іншою координатою позначається або годинниковий кут Ah , або пряме сходження α .

Годинниковий кут дорівнює довжині дуги екватора від небесного меридіана до кола відмінювання світила і відраховується в напрямку обертання небесної сфери.

Пряме сходження дорівнює довжині дуги екватора від точки весняного рівнодення до кола відмінювання світила і відраховується проти напрямку обертання небесної сфери.

Як правило, ці величини вимірюються в годинах і лежать у діапазоні від 0h до 24h. Відповідно, у градусній мірі це від 0° до 360° .

Для розрахунку цих величин (у градусах) існують формули:

$$Ah = 360 \frac{h - 12}{24}; \quad (3.5)$$

$$\alpha = 360 \frac{d}{365.24}; \quad (3.6)$$

$$\beta = 23.26 \sin\left(\frac{2\pi d}{365.24}\right). \quad (3.7)$$

Для перерахунку екваторіальних координат у звичні нам горизонтальні координати (кут місця й азимут) існують формули:

$$H_s = 57.3 \arcsin(\sin \beta \sin \phi + \cos \beta \cos \phi \cos Ah) \quad (3.8)$$

$$Az = 57.3 \arccos\left(\frac{\sin \beta - \sin \phi \sin H_s}{\cos \phi \cos H_s}\right), \quad (3.9)$$

причому, якщо $\sin(Ah) > 0$, то $Az = 360 - Az$.

Завдяки рефракції видиме значення кута місця Сонця дещо більше, ніж насправді. Це тим помітніше, чим ближче Сонце до горизонту. Завдяки цьому явищу світла частина доби в середньому за рік довша, ніж темна, а рівність дня і ночі має місце не точно в день осіннього/весняного рівнодення, а дещо пізніше/раніше. За нормальної рефракції видиме піднесення Сонця визначається за формулою Беннета:

$$HS' = HS + \frac{0.0167}{\operatorname{tg}\left(HS + \frac{7.31}{HS + 4.4}\right)}. \quad (3.10)$$

3.3 Моделювання освітленості

Спрямуємо осі умовної системи координат, прив'язаної до точки розміщення СП, так: вісь x на північ, вісь y на схід, вісь z у зеніт, як показано на рис.

3.6.

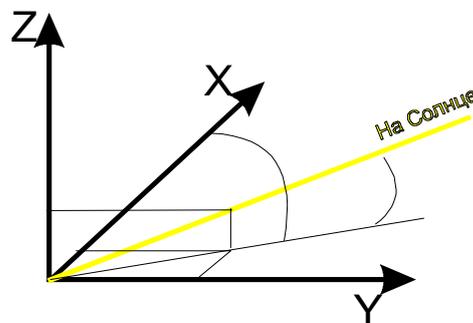


Рисунок 3.6 - Умовна система координат

Тоді напрямок на Сонце в напрямних косинусах матиме вигляд:

$$m_s = \cos Az \cos Ha; \quad (3.11)$$

$$n_s = \sin Az \cos Ha; \quad (3.12)$$

$$p_s = \sin Ha . \quad (3.13)$$

Аналогічним чином вводяться напрямні косинуси для нормалі до сонячної панелі:

$$m_p = \cos Azp \cos Nap ; \quad (3.14)$$

$$n_p = \sin Azp \cos Nap ; \quad (3.15)$$

$$p_p = \sin Nap . \quad (3.16)$$

Тоді кут між напрямком на Сонце і нормою до панелі становитиме:

$$\theta = \arccos \frac{|m_s m_p + n_s n_p + p_s p_p|}{\sqrt{m_s^2 + n_s^2 + p_s^2} + \sqrt{m_p^2 + n_p^2 + p_p^2}} . \quad (3.17)$$

Саме цей кут і дає змогу врахувати ефективність використання сонячного світла з інтенсивністю S_0 як

$$S = S_0 \cos \theta . \quad (3.18)$$

3.4 Облік кутів закриття

Для обліку кутів закриття необхідно скласти таблицю, де кожному азимуту від 0 до 359 градусів буде поставлено у відповідність кут місця, простір до якого закрито. Такі дані можуть бути отримані шляхом вимірювань із точки розміщення СП за допомогою бусолі або теодоліта. Якщо таких інструментів немає, то можна піти двома шляхами:

- наближено оцінити висоти за допомогою компаса і транспортира, виготовивши імпровізований секстант (інструкцію можна знайти в Інтернеті);
- скориставшись google-картою, знайти відстані до найближчих будинків та інших перешкод, а потім, знаючи їхню висоту і висоту розміщення СП (поверх), оцінить видимі кути закриття.

Як приклад у табл. 3.1 подано кути закриття, за якими створено рис. 2.3, б.

Таблиця 3.1 - Кути закриття для різних азимутів (приклад)

000 90	036 90	072 11	108 5	144 5	180 9	216 10	252 90	288 90	324 90
001 90	037 90	073 11	109 5	145 5	181 8	217 10	253 90	289 90	325 90
002 90	038 90	074 17	110 5	146 5	182 7	218 10	254 90	290 90	326 90
003 90	039 90	075 15	111 5	147 5	183 6	219 10	255 90	291 90	327 90
004 90	040 90	076 15	112 5	148 5	184 5	220 10	256 90	292 90	328 90
005 90	041 90	077 10	113 10	149 5	185 5	221 90	257 90	293 90	329 90
006 90	042 90	078 10	114 10	150 5	186 5	222 90	258 90	294 90	330 90
007 90	043 90	079 10	115 10	151 5	187 5	223 90	259 90	295 90	331 90
008 90	044 90	080 8	116 5	152 5	188 5	224 90	260 90	296 90	332 90
009 90	045 90	081 8	117 5	153 5	189 5	225 90	261 90	297 90	333 90
010 90	046 90	082 8	118 5	154 5	190 5	226 90	262 90	298 90	334 90
011 90	047 90	083 8	119 5	155 5	191 5	227 90	263 90	299 90	335 90
012 90	048 90	084 8	120 5	156 5	192 5	228 90	264 90	300 90	336 90
013 90	049 90	085 8	121 5	157 5	193 5	229 90	265 90	301 90	337 90
014 90	050 90	086 7	122 5	158 5	194 5	230 90	266 90	302 90	338 90
015 90	051 90	087 7	123 5	159 5	195 37	231 90	267 90	303 90	339 90
016 90	052 90	088 7	124 5	160 5	196 37	232 90	268 90	304 90	340 90
017 90	053 90	089 7	125 5	161 5	197 37	233 90	269 90	305 90	341 90
018 90	054 90	090 7	126 5	162 5	198 38	234 90	270 90	306 90	342 90
019 90	055 90	091 7	127 5	163 5	199 38	235 90	271 90	307 90	343 90
020 90	056 90	092 7	128 15	164 5	200 39	236 90	272 90	308 90	344 90
021 90	057 90	093 7	129 15	165 5	201 40	237 90	273 90	309 90	345 90
022 90	058 90	094 14	130 15	166 15	202 20	238 90	274 90	310 90	346 90
023 90	059 90	095 14	131 15	167 14	203 5	239 90	275 90	311 90	347 90
024 90	060 90	096 14	132 15	168 13	204 5	240 90	276 90	312 90	348 90
025 90	061 90	097 13	133 5	169 12	205 5	241 90	277 90	313 90	349 90
026 90	062 90	098 13	134 5	170 11	206 5	242 90	278 90	314 90	350 90
027 90	063 90	099 13	135 5	171 10	207 5	243 90	279 90	315 90	351 90
028 90	064 90	100 10	136 5	172 9	208 5	244 90	280 90	316 90	352 90
029 90	065 90	101 10	137 5	173 8	209 5	245 90	281 90	317 90	353 90
030 90	066 60	102 10	138 5	174 7	210 5	246 90	282 90	318 90	354 90
031 90	067 15	103 10	139 5	175 16	211 10	247 90	283 90	319 90	355 90
032 90	068 15	104 10	140 5	176 14	212 10	248 90	284 90	320 90	356 90
033 90	069 15	105 5	141 5	177 12	213 10	249 90	285 90	321 90	357 90
034 90	070 16	106 5	142 5	178 11	214 10	250 90	286 90	322 90	358 90
035 90	071 16	107 5	143 5	179 10	215 10	251 90	287 90	323 90	359 90

Далі кути закриття беруть участь у розрахунку затінення. Розглянемо їх спільно з погодою (хмарністю).

3.5 Облік хмарності та затінення

Для реалізації функції вибору ясного дня, похмурого дня або дня зі змінною хмарністю в моделі необхідно передбачити генератор випадкових чисел із

рівномірним законом розподілу. Він формує випадкове число в діапазоні від 1 до кількості днів у місяці.

Наприклад, якщо в Харкові у травні місяці (згідно з табл. 2.1) 9 ясних днів, 11 днів зі змінною хмарністю і 11 похмурих днів, то програма моделі формує випадкове число в діапазоні від 0...31.

Якщо отримане випадкове значення виявляється в інтервалі 0...9, то моделюють ясний день, якщо в діапазоні 9...20, то моделюють день зі змінною хмарністю, якщо понад 20, то похмурий день.

Природно, що якщо СП опиняється в тіні, то її потужність знижується. Причому, виявляється, що чималу роль відіграє вид тіні - "сильна" або "слабка".

Сильна тінь з явними контурами (листя, що впало на панель, сніг, близько розташована перешкода) викликає зниження напруги на панелі, що призводить до зниження потужності до 10% від максимуму.

Слабка ж тінь - наприклад, відкинута перешкодою, що знаходиться на віддалі, знижує силу струму приблизно так само, як за похмурої погоди, тобто до 20...30% від максимуму.

Систематизуємо ці дані у вигляді таблиці

Таблиця 3.2 - Послаблення освітленості панелі у % від максимальної залежно від хмарності та затінення (η)

Умова	Тінь		
	Ні	Слабка	Сильна
Яскраве Сонце, промені перпендикулярні СП	100	30	10
Змінна хмарність	60	20	10
Похмура погода	20	6	1

3.6 Облік ослаблення в атмосфері

Відомо, що ослаблення сонячних променів в атмосфері відбувається завдяки двом процесам: поглинанню і розсіюванню. Поглинена сонячна радіація переходить в інші види енергії, в основному в теплову, тобто витрачається на нагрівання

повітря. Ослаблення тим більше, чим більшу товщу атмосфери проходять сонячні промені (рис. 3.7).

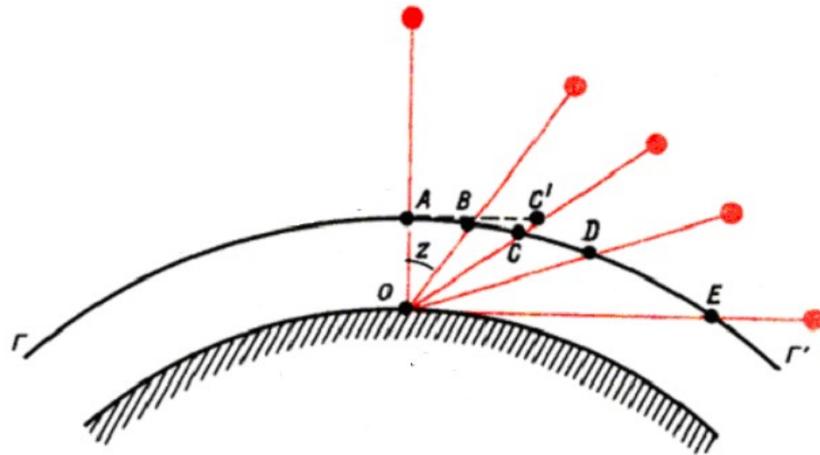


Рисунок 3.7 - До оцінки ослаблення сонячного світла атмосферою

Ослаблення характеризується експоненціальною залежністю виду

$$S = S_0 P^m, \quad (3.19)$$

де S_0 - вихідне сонячне випромінювання, P - коефіцієнт прозорості атмосфери, який зазвичай у середніх широтах становить 0,8; m - відносна оптична товщина атмосфери, що є відношенням товщини атмосфери для шуканих випадків (точки **B ... E** на рис.3.7.) до випадку вертикального падіння променів (Сонце в зеніті, точка **A** на рис. 3.7.).

Обчислюється m як:

$$m = \frac{1}{\cos z}, \quad (3.20)$$

де z - зенітний кут Сонця, який визначається як $z = 90 - H_s$.

3.7 Розрахунок виробітку

У підсумковій частині моделі проводиться розрахунок виробітку. Інтервал дискретизації в роботі прийнято таким, що дорівнює 1 хвилині (тобто, вважається, що за одну хвилину умови освітленості, кути, хмарність тощо не зміняться). Отже, і виробіток протягом $t = 1$ хвилини залишається постійним. Розрахунок виконується за формулою:

$$E = P_0 t S \mu \cos \theta, \quad (3.21)$$

де P_0 - встановлена потужність СП.

Для кожної наступної хвилини проводиться новий розрахунок.

Потім результати складаються за потрібний період: годину, світловий день, місяць, рік.

Слід звернути увагу, що в представлений моделі не враховуються:

- зміна потужності панелей зі зміною їхньої температури;
- зменшення потужності в міру "старіння" панелей.

3.8 Програмна реалізація моделі

Модель було реалізовано в середовищі MathCad. Її було обрано через простоту реалізації більшості описаних вище функцій і можливості оперативно перевірити будь-яку з них на адекватність шляхом побудови потрібного графіка.

Вихідними даними для роботи програми є:

- широта і довгота місцевості;
- день (або діапазон дат) для яких потрібно виконати розрахунок.

Дані про СП, які необхідно ввести:

- паспортна потужність панелі;
- азимут і кут місця нормалі до панелі.

Дані про кути закриття мають бути оформлені у вигляді текстового файлу, аналогічного тому, що показаний у табл. 3.1.

Час розрахунку для однієї фіксованої орієнтації СП для одного місяця становить близько 1 секунди, для всього року близько 10 секунд. Повний цикл розрахунків для всіх представлених у роботі результатів (з урахуванням часу для збереження проміжних даних) склав приблизно 2,5 години.

Вихідними даними є чисельне значення вироблення ЕЕ за вказаний період.

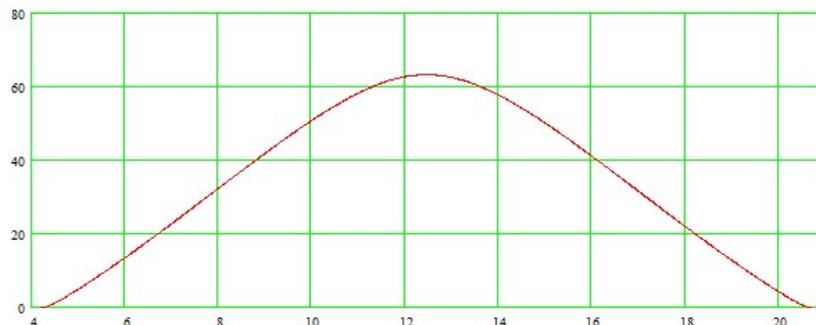
Таким чином, нами розроблено модель, здатну виконувати розрахунок вироблення "домашньої" сонячної електростанції з урахуванням кутів закриття і неоптимальної орієнтації СП,

4 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

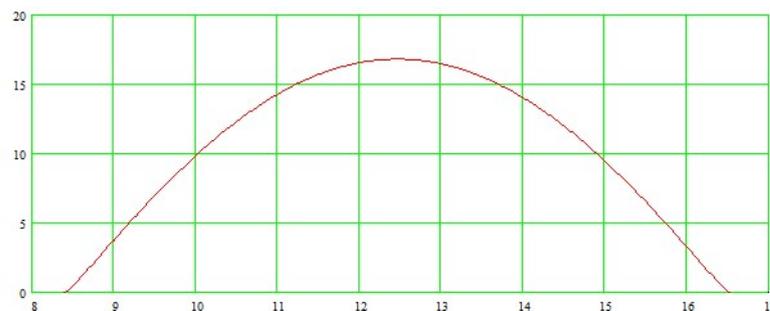
4.1 Перевірка моделі

Для того щоб переконатися, що модель складено правильно, було виконано розрахунки, результати яких можуть бути легко перевірені. Зокрема, було розраховано азимут і кут місця Сонця протягом світлового дня.

На рис. 4.1 показано графік залежності висоти Сонця над горизонтом від часу доби для Харкова в дні літнього та зимового сонцестояння.



а)



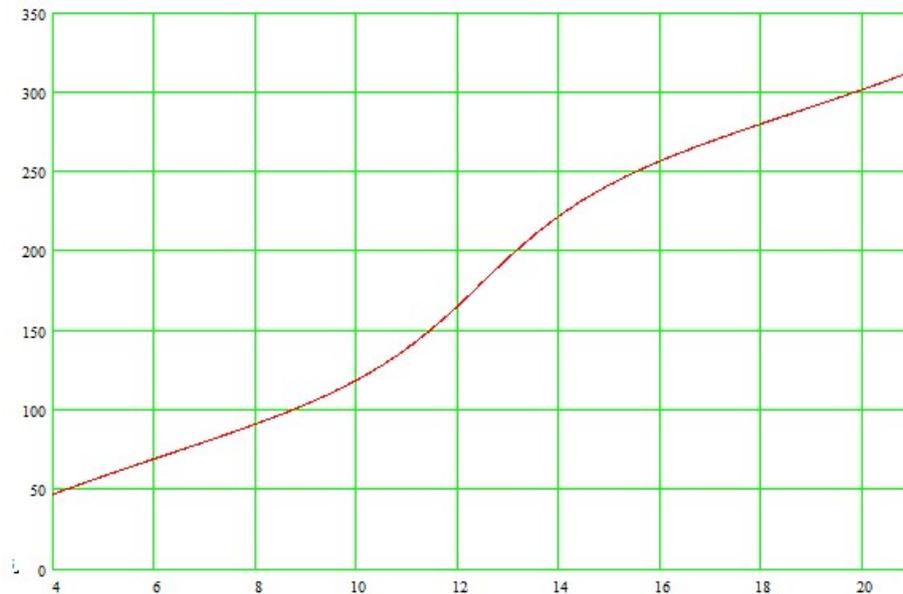
б)

Рисунок 4.1 – Висота Сонця над горизонтом 22 червня (а) і 22 грудня (б)

Як видно з графіка, максимальна висота досягається о ~12.30, що відповідає довготі Харкова, а висота становить 63° влітку і 17° взимку, що відповідає широті Харкова. Час сходу і заходу Сонця, що визначаються за

графіком, також відповідають даним про схід і захід для Харкова в зазначені дні.

На рис. 4.2 подано графіки залежності азимута і для дня зимового та літнього сонцестояння.



а)



б)

Рисунок 4.2 - Азимут Сонця 22 червня (а) і 22 грудня (б)

Як видно з графіка, Сонце перебуває точно на півдні (180°) рівно опівдні за місцевим сонячним часом, що відповідає приблизно 12.30 за київським.

Також було виконано розрахунок, який показує рух Сонця на тлі перешкод, що показано на рис. 4.3

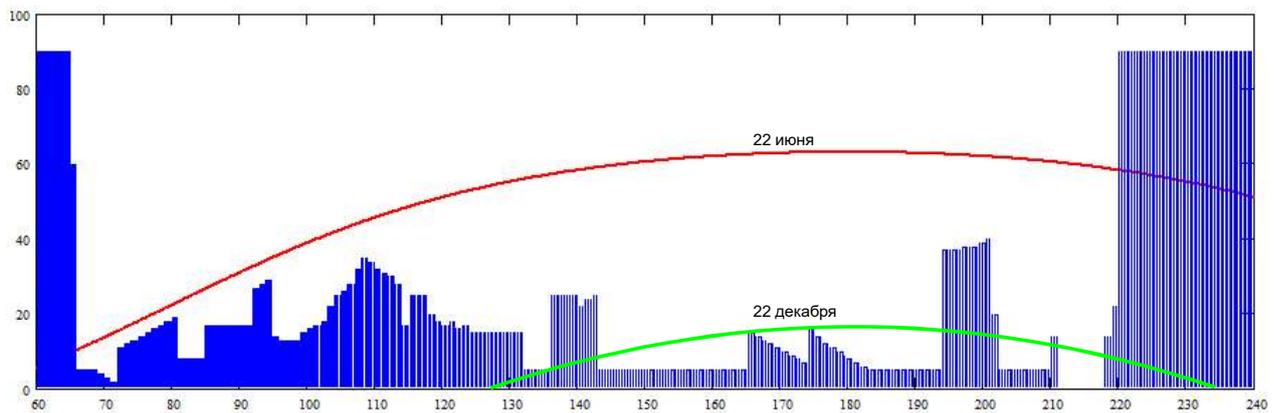


Рисунок 4.3 - Траєкторія Сонця на тлі видимих перешкод

Як видно з рисунка, влітку Сонце перебуває вище перешкод практично весь світловий день, а взимку значну частину світлового дня приховано за сусідніми будинками, що спостерігається практично.

Графік ослаблення сонячного світла за рахунок зміни товщини атмосфери (вираз 3.19) показано на рис 4.4.

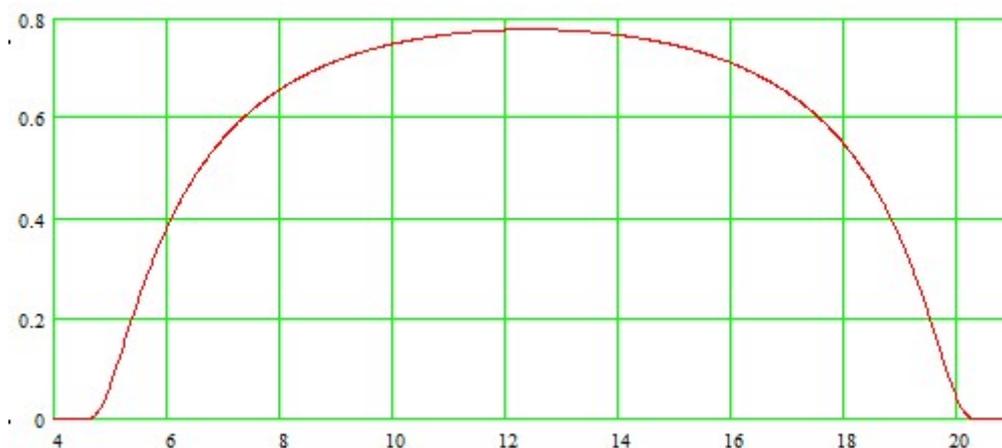


Рисунок 4.4 - Ослаблення сонячного світла протягом світлового (22 червня)

Як видно з рисунка, близько полудня спостерігається максимум сонячного випромінювання, але не одиниця. (Одиниця була б, якби Сонце перебувало в зеніті, а на широті Харкова таке не спостерігається).

Усі вищенаведені модельні графіки відповідають реально спостережуваним процесам і явищам, тому модель можна вважати адекватною.

4.2 Вибір оптимальних напрямків

Спочатку було проведено пошук оптимальних кутів для всього року. Для цього було виконано розрахунки виробітку за (3.21) для цілого року за різних фіксованих варіантів встановлення СП. Розрахунки виконувалися з дискретністю в 5^0 за азимутом і за кутом місця. Результати моделювання наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 Залежність річного виробітку (Вт·год) від кута встановлення СП

Кут місця	Азимут							
	145	150	155	160	165	170	175	180
30	23150	23600	23480	23500	23430	23270	23020	22690
35	23600	23830	23940	23960	23900	23750	23510	23190
40	23910	24110	24220	24250	24190	24050	23820	23520
45	24020	24220	24330	24350	24300	24170	23960	23680
50	23960	24150	24250	24280	24230	24110	23900	23660
55	23730	23890	23990	24020	23980	23870	23700	23460
60	23320	23470	23550	23580	23540	23450	23300	23090
65	22740	22870	22940	22960	22940	22860	22730	22550
70	21990	22090	22160	22180	22160	22090	21990	21850

Кольором у таблиці виділено оптимальний з погляду максимуму виробітку кут місця й азимут. Як видно з таблиці, максимум виробітку в 24.35 кВт·год досягається при азимуті 160^0 і куті місця 45^0 . Слід зазначити, що сонячний on-line калькулятор (табл. 2.1) дає результат 25 кВт·год річного вироблення, що ще раз підтверджує адекватність моделі.

Під час візуального аналізу і порівняння результату з графіком (рис. 4.3) виникло припущення, що можна домогтися ще більшого виробітку, якщо повертати панель хоча б раз на місяць. Для перевірки цього припущення було виконано розрахунок для кожного місяця року.

Результати моделювання для трьох місяців (червень, грудень і вересень) наведено в таблицях 4.2, 4.3 і 4.4, відповідно. Результати для інших місяців також було отримано і далі враховано, але для скорочення обсягу в записку не включено.

Таблиця 4.2 Залежність виробітку за червень (Вт·год) від кута встановлення СП

Кут місяця	Азимут									
	110	115	120	125	130	140	150	160	170	180
35	2884	2899	2904	2899	2885	2827	2733	2609	2474	2338
40	2973	2988	2994	2991	2978	2926	2840	2726	2598	2467
45	3042	3057	3063	3061	3050	3004	2927	2823	2704	2508
50	3091	3105	3112	3111	3101	3061	2993	2899	2790	2675
55	3119	3132	3139	3138	3131	3097	3037	2955	2857	2752
60	3126	3138	3144*	3144	3139	3110	3059	2989	2904	2810
65	3112	3123	3128	3129	3125	3102	3060	3001	2929	2848
70	3077	3086	3091	3092	3089	3071	3038	2992	2933	2867

*) Максимум при 59^0 і 122^0 становить 3146 Вт·год.

Таблиця 4.3 Залежність виробітку за вересень (Вт·год) від кута встановлення СП

Кут місяця	Азимут							
	130	140	150	160	165	170	175	180
30	2028	2162	2259	2317	2330	2333	2325	2305
35	2073	2220	2295	2350	2363	2366	2358	2340
40	2104	2225	2303	2366	2378	2381*	2374	2357
45	2119	2332	2314	2364	2375	2378	2371	2356
50	2118	2222	2298	2344	2354	2357	2351	2337
60	2071	2154	2214	2251	2259	2261	2257	2246
70	1964	2022	2064	2089	1095	2097	2094	2086

* Максимум при 42^0 і 169^0 становить 2382 Вт·год.

Таблиця 4.4 Залежність виробітку за грудень (Вт·год) від кута встановлення СП

Кут місяця	Азимут						
	155	160	165	170	175	180	185
10	1044	1077	1102	1119	1128	1129	1122
15	1051	1083	1108	1124	1133	1134*	1127
20	1049	1080	1104	1121	1129	1130	1123
25	1039	1070	1093	1109	1117	1118	1111
30	1022	1051	1073	1088	1096	1097	1090

* Максимум при 16^0 і 178^0 становить 1135 Вт·год.

Оптимальні кути для кожного місяця (зокрема для тих, які не відображені у вищенаведених таблицях) графічно показано на рис. 4.5.

Як видно з рисунка, оптимальне положення змінюється протягом року. Щоб оцінити, наскільки істотні ці зміни з погляду виробітку, було виконано розрахунок для кожного місяця на оптимальних середньорічних кутах. Результати розрахунку наведено в табл. 4.5.

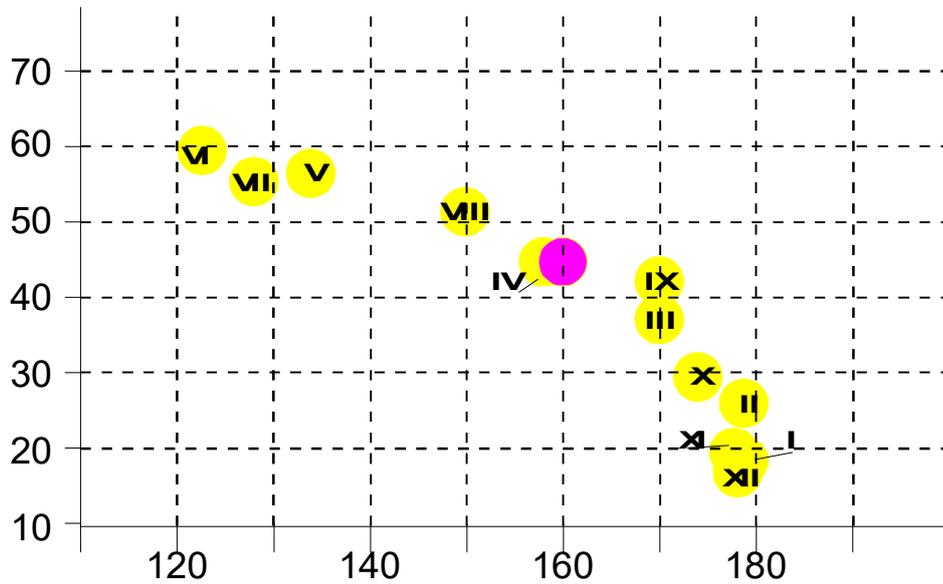


Рисунок 4.5 - Оптимальні кути СП за місяцями

Таблиця 4.5 - Порівняння різних кутів установки СП

Місяць	Оптимальний напрямок		Виробіток за місяць, Вт·год		Втрати по відношенню до оптим. кутів, %
	Азимут	Кут місяця	Оптим. кути	Середні кути	
I	178	18	1296	1101	15
II	178	26	1632	1485	9
III	170	37	2123	2059	3
IV	157	45	2495	2470	1
V	134	57	2839	2810	5
VI	122	59	3044	2739	10
VII	127	57	3003	2732	9
VIII	149	52	2653	2600	2
IX	170	40	2304	2293	0,5
X	175	29	1802	1694	6
XI	177	20	1362	1185	13
XII	178	16	1135	919	19
Усього			25688 (рік)	24350 (рік)	6
Ср. рік	160	45			

Як видно з таблиці, різниця виявляється досить суттєвою. У середньому за рік щомісячний поворот СП дає "надбавку" у виробленні 6%. В окремі місяці (червень, листопад, грудень січень) вигаш становить понад 10%.

Таким чином, з використанням розробленої моделі отримано дані кутів установки СП, що забезпечують максимум виробітку як у середньому за рік, так і за окремими місяцями.

Навіть якщо реалізувати автоматичний поворот СП для "стеження" за Сонцем неможливо, її щомісячний поворот дасть змогу отримати збільшення виробітку в середньому на 6%, а в зимові місяці до 19%.

У роботі розрахунки виконано лише для одного варіанта розміщення СП на балконі в багатоквартирному будинку. Але закладені в модель можливості дадуть змогу за потреби виконати такий розрахунок для будь-якого місця встановлення СП, необхідно лише змінити файл кутів закриття і кути орієнтації панелей.

ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі магістра розглянуто наявну ситуацію і перспективи сонячної енергетики, її переваги та недоліки. Серед недоліків особливо виділено переривчастість вироблення, яка не дає змоги нарощувати частку СЕС у будь-якій енергосистемі вище 10...15% від сумарної встановленої потужності. При її перевищенні енергосистема втрачає стійкість, оскільки зникає можливість маневрувати потужністю для компенсації переривчастості.

Основну увагу в роботі приділено особливостям "домашньої" сонячної електростанції, робота якої не загрожує стійкості енергосистеми. Її завдання забезпечити ЕЕ квартиру або приватне домоволодіння в умовах, коли при тривалих відключеннях електромережі. Особливістю експлуатації такої СЕС є те, що місце її розміщення може бути не цілком придатним з погляду освітлення Сонцем - воно може освітлюватися Сонцем не весь світловий день. Також можуть мати місце часткові затінення, а поміняти місце встановлення немає можливості, оскільки воно обмежене невеликим двором, стіною, балконом тощо. Тому постає питання про оптимальний кут напрямку такої СП.

Для відповіді на це питання в роботі було вирішено такі завдання:

1. Розроблено модель роботи СП, що містить астрономічну, геометричну та енергетичну частини;
2. Запропоновано метод обліку закритих кутів (азимутів);
3. Модель реалізовано у вигляді програми в середовищі MathCad.
4. Зроблені перевірки показали відповідність результатів моделювання теорії та практики.

Далі з використанням розробленої моделі для конкретних умов розміщення СП малої потужності:

5. Знайдено оптимальні кути орієнтації СП для кожного місяця і в середньому для всього року. Вони відрізняються від рекомендацій, що не враховують кутів закриття.

6. Отримано чисельні значення виробітку.
7. Показано, що для збільшення середньорічного виробітку слід хоча б раз на місяць повертати СП на оптимальний для поточного місяця напрямок.
8. Розроблена модель може бути використана для розрахунку оптимальних кутів за будь-яких умов розміщення СП за будь-якої їхньої потужності.

* * *

За темою роботи є наукова публікація [16].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Оцінка енергії сонячного випромінювання <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/techirrad.htm> (дата звернення: 15.12.2023).
2. Найбільша теплова сонячна електростанція США стала жертвою сучасних технологій <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/4580-krupnejshaya-teplovaya-solnechnaya-elektrostantsiya-ssha-stala-zhertvoj-sovremennykh-tekhnologij.html> (дата звернення: 15.12.2023).
- 3 Теплові сонячні електростанції баштового типу, системи концентрації сонячної енергії <https://electricalschool.info/energy/2432-solnechnye-elektrostantsii-bashennogo-tipa.html> (дата звернення: 15.12.2023).
4. Сонячні теплові електростанції <https://solarsoul.net/solnechnye-teplovye-elektrostantsii> (дата звернення: 15.12.2023).
5. Світло навчилися перетворювати на електрику напряму за допомогою ректенни <https://nplus1.ru/news/2015/09/29/rectenna> (дата звернення: 15.12.2023).
6. Ректенна - альтернатива сонячним панелям [Електронний ресурс] <https://altenergiya.ru/sun/rektenna-alternativa-solnechnym-panelyam.html> (дата звернення: 15.12.2023).
7. Фотомодулі - основа альтернативного енергозабезпечення з використанням енергії сонця <https://electricalschool.info/energy/1042-fotomoduli-osnova-alternativnogo.html> (дата звернення: 15.12.2023).
8. Ефективність сонячних фотоелементів і модулів <https://electricalschool.info/energy/2055-effektivnost-solnechnyh-fotoelementov-i-moduley.html> (дата звернення: 15.12.2023).
9. Використання сонячної енергії, сонячна енергетика - історія розвитку, плюси та мінуси <https://electricalschool.info/energy/2305-solnechnaya-energetika-istoriya-plyusy-i-minusy.html> (дата звернення: 15.12.2023).
- 10 Іспанський сонцеелектричний феномен - <https://aftershock.news/?q=node/880311&full>] (дата звернення: 15.12.2023).

11. Ціни на електроенергію на біржі Амстердама напередодні падали до від'ємних значень <https://www.interfax.ru/business/896916> (дата звернення: 15.12.2023).

12. Реальная производительность солнечных электростанций <https://termoteh.in.ua/article/realnaya-proizvoditelnost-ses> (дата звернення: 25.12.2023).

13. Виробництво сонячної батареї: технологія та обладнання <https://yandex.com/turbo/fb.ru/s/article/258728/proizvodstvo-solnechnoy-batarei-tehnologiya-i-oborudovanie> (дата звернення: 15.12.2023).

14. Global Electricity Review 2022 [<https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>] (дата звернення: 15.12.2023).

15. Інтелектуальний контролер сонячного зарядного пристрою ACM 20D. Посібник користувача. https://solar-tech.com.ua/image/data/Instructions/charge-controllers/ACM_20USB.pdf (дата звернення: 15.12.2023)

16. Верягін В.В. Оптимізація роботи малопотужних сонячних панелей в умовах нестабільного електропостачання Оптимізація роботи малопотужних сонячних панелей в умовах нестабільного електропостачання // Матеріали 27-го міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті". С. 44 - 45.

17. Intermittent Renewables Can't Favorably Transform Grid Electricity [Електронний ресурс] <https://ourfiniteworld.com/2016/08/31/intermittent-renewables-cant-favorably-transform-grid-electricity/> (дата звернення: 06.01.2024)