

С. В. Губін, С. В. Сінченко

# **ПРОЕКТУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК**

2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

С. В. Губін, С. В. Сінченко

## **ПРОЕКТУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК**

Навчальний посібник до курсового та дипломного проектування

Харків «ХАІ» 2019

УДК 621.311.243.01(075.8)  
Г93

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Л. І. Книш,  
канд. техн. наук, доц. О. М. Лістратенко

**Губін, С. В.**

Г93        Проектування сонячних енергоустановок [Електронний ресурс] :  
навч. посіб. до курс. та дипл. проектування / С. В. Губін, С. В. Сінченко. –  
Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т»,  
2019. – 64 с.

Наведено метод проектування сонячної енергетичної установки на прикладі дачного будинку й спеціальні відомості про сонячне енергонадходження та його використання при визначенні параметрів енергоустановок. Охарактеризовано головні конструктивні елементи й типові конструкції сонячних енергоустановок та формування структури за критерієм мінімального терміну окупності.

Розглянуто виконання типових проектів та конструкцій сонячних енергоустановок з визначенням міцності конструкції та надійності її структури за умов типових механічних навантажень.

Для студентів, які навчаються за освітньою програмою «Нетрадиційні й відновлювальні джерела енергії», «Енергетичний менеджмент», а також спеціалізуються з дисциплін, що належать до області відновлюваної й малої енергетики.

Іл. 35 . Табл. 15. Бібліогр.: 14 назв

**УДК 621.311.243.01(075.8)**

© Губін С. В., Сінченко С. В., 2019  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2019

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	4
ВСТУП.....	5
1. ПРОЕКТНІ РОЗРАХУНКИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ	7
1.1 Визначення та аналіз параметрів енергоустановки .....	7
1.2 Визначення вартості базових елементів енергоустановки .....	19
1.3 Формування структурної схеми БФ .....	20
1.4 Вибір акумулятора та контролера .....	22
1.5 Підбір фотоелементів і проектування модуля сонячної батареї ....	22
2 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ .....	27
2.1 Визначення вартості компонентів енергетичної установки.....	27
2.2 Аналіз терміну окупності енергетичної установки .....	29
2.3 Витрати на ЗВЗ та заробітну плату .....	33
2.4 Амортизаційні витрати .....	37
3 КОНСТРУКЦІЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ .....	41
3.1 Характеристика базових елементів.....	41
3.2 Компонування фотоелектричної установки .....	43
3.3 Розрахунок на міцність під дією навантаження .....	56
ВИСНОВКИ .....	61
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	62

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

**АС** – перемінна напруга;

**DC** – постійна напруга;

**MS Excel** – розрахункове програмне середовище;

**AM** – атмосферна маса;

**АЕС** – атомна електростанція;

**БФ** – батарея фотоелектрична;

**БЛУ** – блок логіки управління;

**ВДЕ** – відновлювані джерела електроенергії;

**ДБН** – державні будівельні норми;

**ДЗП** – додаткова заробітна плата;

**ДЛ** – двонаправлений лічильник;

**ЗВЗ** – запасні вироби та запчастини;

**КВМ** – коефіцієнт використання матеріалу;

**ККД** – коефіцієнт корисної дії;

**MPPT** – пристрій для слідування за точкою максимальної потужності;

**МС4** – герметичний роз'єм для сонячної батареї;

**ПВП** – противовідбивне покриття;

**ПДВ** – податок на додану вартість;

**РПГ** – регулятор потужності генератора;

**РЩ** – розподільний щит;

**СБ** – сонячна батарея;

**СЕП** – система електропостачання;

**СЕУ** – сонячна енергоустановка;

**ФЕП** – фотоелектричний перетворювач.

## ВСТУП

Природні ресурси є вичерпними й з кожним роком людство стоїть на порозі енергетичної кризи. Саме тому напрям дослідження альтернативної енергетики є актуальним у наш час. Сьогодні людство вже не уявляє свого життя без тих технічних досягнень, якими володіє. Однак мало хто задумується, що всі винаходи стали можливими завдяки освоєнню нових джерел енергії, нових методів для видобутку первинних енергоносіїв, а також освоєння нових місць з видобутку корисних копалин.

Варто враховувати, що видобуток енергії у ще більшій кількості не може не впливати на екологічний стан планети. Викиди з теплових електростанцій складаються в основному з вуглекислого газу, який спричиняє парниковий ефект та глобальне потепління у всьому світі. Інші викиди містять оксиди сірки, азоту, які, об'єднуючись в атмосфері з водою, випадають у вигляді кислотних дощів. Високий рівень кислотності ґрунту призводить до зниження її плодovitості, а також висушування лісів, зменшення рибних запасів.

Застосування атомних електростанцій не вирішує проблеми екологічної чистоти. При роботі АЕС в атмосферу у всьому світі викидається до 26 т радіоактивних відходів у день. Крім того, експлуатація атомних станцій пов'язана з певною небезпекою, оскільки аварія на АЕС може спричинити велику екологічну катастрофу [1]. Насамперед, це викликає побоювання і те, що запаси енергетичних ресурсів, головними з яких залишаються нафта, вугілля і газ, далеко не безмежні. Ці ресурси є відновлюваними.

Кожного року на модернізацію обладнання, що може у подальшому давати змогу видобувати енергію з нетрадиційних джерел, виділяють більше 1 млрд грн. Інвестори з інших країн беруть у цьому участь, бо південний регіон України є особливо сприятливим для встановлення

фотоелектричних енергоустановок й подальшого продажу електроенергії за «зеленим тарифом». Ці тарифи прийняті на законодавчому рівні й діють з 2009 по 2030 рік з подальшим продовженням строку [2].

Сонячна енергія – одна з найперспективніших світових альтернативних видів енергії. Світова сонячна енергетика розвивається двома шляхами – фотоелектричних сонячних електростанцій та теплових сонячних електростанцій

На сьогоднішній день перетворення сонячної енергії в доступні види здійснюється двома способами: фотоелектричним (прямим перетворенням світлової енергії в електричну) і фототермічним (перетворенням світлової енергії в теплову).

Фотоелектричні сонячні станції мають безліч переваг. Так, ці станції мають найкращий показник енерговіддачі (відношення кількості енергії, виробленої системою за термін служби, до кількості енергії, витраченої на виробництво матеріалів та обладнання для цієї системи), і в перспективі очікується, що значення цього параметра буде поліпшуватися.

Слід зазначити, що фотовольтаїка дозволяє не тільки отримувати відновлювану енергію, але й витратити мінімальну кількість невідновлюваних матеріалів ( до них належать практично всі матеріали, крім, наприклад, деревини), більш того, запаси основного матеріалу – кремнію (скла, сонячних елементів) – досить великі.

Фотоелектричне перетворення має значні потенційні переваги:

- не має рухомих частин, що істотно спрощує і знижує вартість обслуговування, термін служби, ймовірно, буде досягати 100 років (проблема – не в самих перетворювачах, а в матеріалах);

- ефективно використовує як пряме, так і розсіяне (дифузне) сонячне випромінювання;

- не потребує високої кваліфікації обслуговуючого персоналу;

- придатне для створення установок практично будь-якої потужності.

# 1. ПРОЕКТНІ РОЗРАХУНКИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Для того, щоб розробити конструкцію фотоелектричної установки, необхідно визначити кількість споживаної електроенергії. Розглянемо споживання на прикладі дачного будинку. Для засвоєння закономірностей розрахунку сонячних енергетичних установок без застосування поширених «сонячних калькуляторів» скористуємося аналітичним методом. Визначення параметрів енергетичної установки проведемо розрахунком інсоляції, а саме щільності сонячного випромінювання й необхідної площі фотоактивної поверхні за необхідної потужності самої установки. Етап проектування є базовим для формування вимог та розроблення конструкції, що задовольняє потребі користувача й має нетривалі терміни окупності.

## 1.1 Визначення та аналіз параметрів енергоустановки

Узятий за приклад дачний будинок має побутову техніку різної потужності та призначення. Всі значення кількості споживання електроенергії занесемо в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані щодо споживання електроенергії у будинку

Пристрій	Кількість електроенергії, Вт/год	Години					
		0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Водонагрівач	850		+	+	+	+	+
Електропіч	1300		+	+		+	
Холодильник	150	+	+	+	+	+	+
Телевізор	120					+	+
Комп'ютер	100					+	+
Пральна машина	600					+	
Інші	500		+			+	
Загальна потужність, кВт/год	-	0,15	2,8	2,3	1	3,62	1,22

На першому етапі проектування сонячної фотоелектричної енергоустановки необхідно визначити потужність, що має бути генерована сонячною батареєю. Для вирішення цього завдання необхідно побудувати графік споживання електроенергії за добу за таблицею 1.1 (рисунок 1.1).

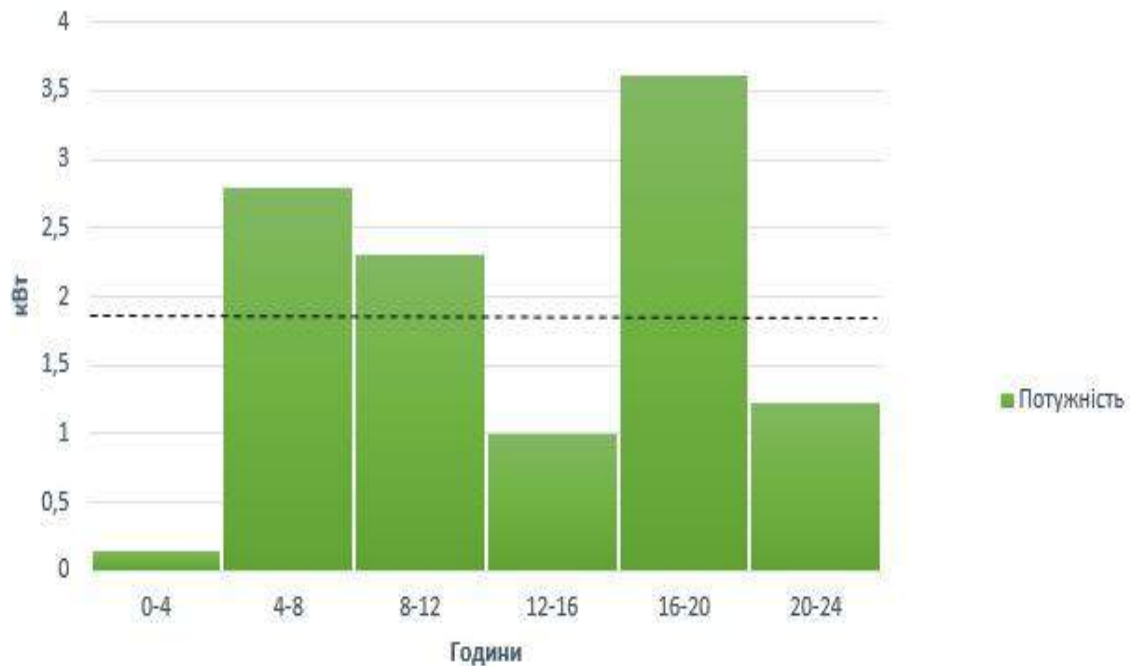


Рисунок 1.1 – Графік споживання енергії дачного будинку

З рисунка 1.1 та таблиці 1.1 бачимо, що розрахована потреба середньодобової потужності становить 1,84 кВт. Визначимо потужність сонячної батареї, необхідну будинку для покриття всіх енергетичних потреб щомісячно, протягом середнього дня місяця (15 число). Виконаємо розрахунок:

$$P_{\text{СП}} = \sum (P_i \cdot \tau_i) = 44360 \text{ Вт} \cdot \text{год}, \quad (1.1)$$

де  $P_{\text{СП}}$  – сумарна споживана енергія, Вт·год;

$P_i$  – потужність  $i$ -ї години, Вт·год;

$\tau_i$  – середній світловий час середнього дня кожного місяця;

$$P_H = \frac{P_{\text{СП}}}{\tau_i}, \quad (1.2)$$

де  $P_H$  – щомісячно споживана енергія, Вт·год;

Для зручності обчислень значення потужності, що потрібна протягом середнього дня, за сезонами були розраховані за допомогою програмного середовища Microsoft Excel, зафіксовані в електронних таблицях та наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Середня кількість споживаної енергії  $P_{\text{СП}}$  від СЕУ за сезон у дачному будинку

Пора року	Зима	Весна	Літо	Осінь
$P_{\text{СП}}$ , Вт	5522	3832	2778	3594

Розподіл потужності сонячної батареї залежно від сезону показано на рисунку 1.2.

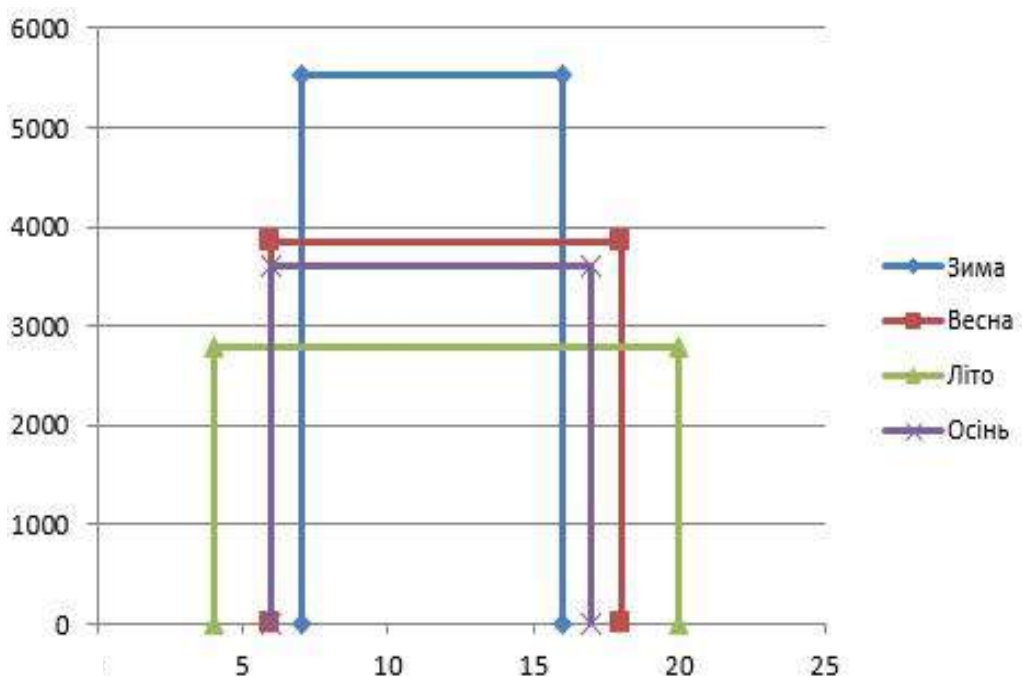


Рисунок 1.2 – Розподіл потужності залежно від сезону

## **Розрахунок інсоляції**

Методику розрахунку було розглянуто згідно з рекомендаціями, вказаними у роботі [3]. Розрахунок наземної сонячної фотоелектричної енергоустановки містить визначення проникнення сонячної радіації на поверхню фотоелектричного перетворювача. Для розрахунку необхідно знати закономірності руху Сонця по небосхилу. Це пояснюється тим, що проникнення сонячної радіації значною мірою залежить від багатьох чинників, і, в першу чергу, від геометричного розташування приймального майданчика щодо Сонця, а також від положення Сонця на небесній півсфері.

### **Закономірності руху Сонця по небосхилу**

Для розрахунку кількості сонячної енергії, що надходить на приймальну поверхню, необхідно знати кути падіння сонячних променів на горизонтальну і похилу поверхні в певній місцевості.

Положення точки А на земній поверхні щодо сонячних променів у певний момент часу визначається трьома основними кутами – широтою місця розташування точки  $\varphi$ , годинним кутом  $\omega$  і схиленням Сонця  $\delta$ . Загальний вигляд зображено на рисунку 1.3.

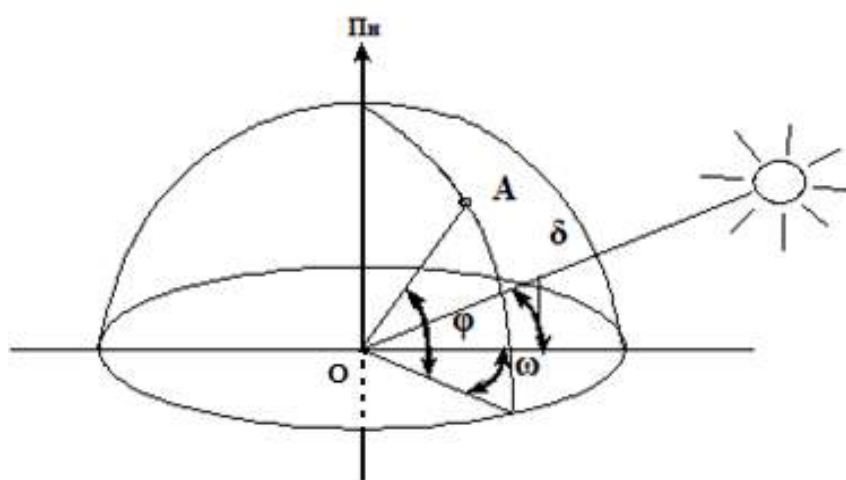


Рисунок 1.3 – Кути, що визначають положення точки А на поверхні Землі

**Широта  $\varphi$**  – це кут між лінією, що з'єднує точку А з центром Землі О, і її проекцією на площину екватора. **Часовий кут  $\omega$**  – це кут між проекцією лінії ОА і проекцією лінії, що з'єднує центри Землі і Сонця. У сонячний полудень годинний кут дорівнює нулю ( $\omega = 0$ ), а одній годині відповідає  $15^\circ$ . У дополудневий час кут  $\omega$  – від'ємний, у післяполудневий – додатний.

**Схилення Сонця  $\delta$**  – це кут між лінією, що з'єднує центри Землі і Сонця, і її проекцією на площину екватора ( $\pm 23^\circ 27'$ ).

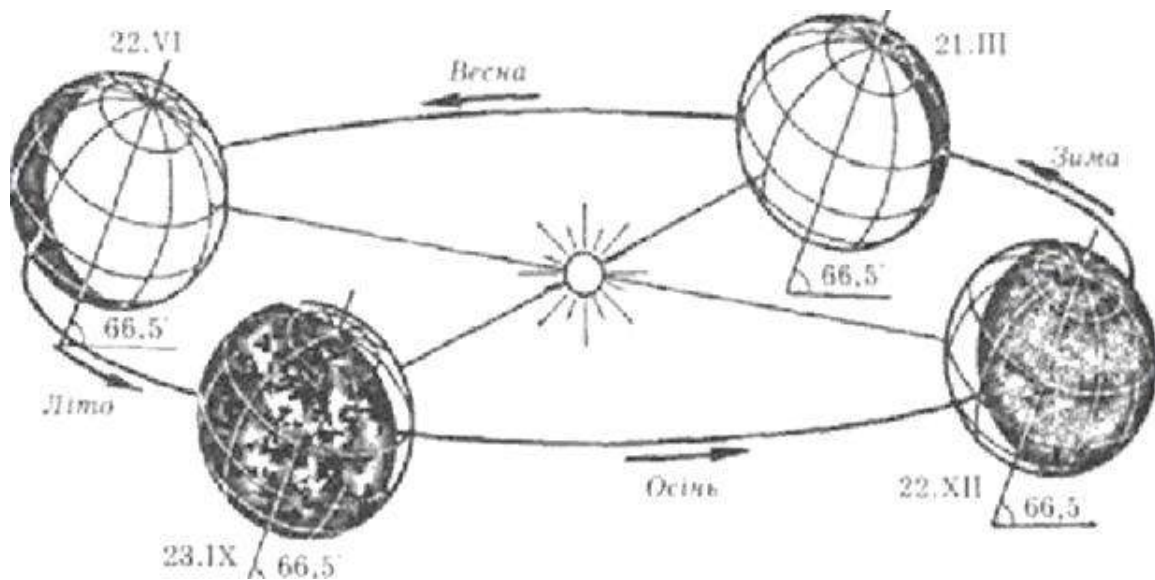


Рисунок 1.4 – Схема освітленості Землі сонячним випромінюванням в різні пори року

Схилення Сонця знаходиться за формулою

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left( 360^\circ \cdot \frac{284+n_i}{365} \right), \quad (1.3)$$

де  $360^\circ$  – значення повного обороту Землі навколо Сонця за рік;

284 – кількість діб від 21 березня (день весіннього рівнодення) до 31 грудня;

$n_i$  – порядковий номер дня року.

**Зенітний кут  $Z$**  – це кут між сонячним промінням і нормаллю до горизонтальної площини в точці  $A$ . **Кут висоти Сонця  $\alpha$**  – це кут у вертикальній площині між сонячним промінням і його проекцією на горизонтальну площину. Сума  $\alpha + Z = 90^\circ$ . **Азимут Сонця  $\alpha_{\pi}$**  – це кут в горизонтальній площині між проекцією сонячного проміння на горизонт і напрямком на південь.

Зв'язок між додатковими і основними кутами встановлюють такими співвідношеннями щодо горизонтальної поверхні [3]:

зенітний кут

$$\cos Z = \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta ;$$

кут висоти Сонця

$$\alpha = \pi/2 - Z.$$

Виразимо із співвідношення

$$\sin \alpha = \cos Z$$

азимут Сонця

$$\sin \alpha_{\pi} = \sec \alpha \cdot \cos \delta - \sin \omega.$$

Для північної півкулі широта  $\varphi$  береться зі знаком "+", для південної – зі знаком "-", схилення  $\delta$  має знак "+" тільки для літа і знак "-" в інші пори року.

Кут  $\omega$  змінюється в діапазоні від  $0^\circ$  в сонячний полудень до  $180^\circ$  опівночі і має знак "+" при  $\omega < 90^\circ$ , а при  $\omega > 90^\circ$  – знак "-".

Кут падіння сонячних променів на довільно орієнтовану поверхню, що має азимут  $\alpha_{\pi}$  і кут нахилу до горизонту  $\beta$ , визначають за формулою

$$\cos i = \sin \beta [\cos \delta (\sin \varphi \cdot \cos \alpha_{\pi} \cdot \cos \omega + \sin \alpha_{\pi} \cdot \sin \omega) - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha_{\pi}] + \cos \beta \cdot [\cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \beta]. \quad (1.4)$$

Кут падіння променів на горизонтальну поверхню ( $\beta = 0^\circ$ )

$$\cos i = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \sin \delta \cdot \sin \varphi. \quad (1.5)$$

Кут падіння променів на горизонтальну поверхню ( $\beta = 90^\circ$ )

$$\cos i = \cos \delta (\sin \varphi \cdot \cos \alpha_{\pi} \cdot \cos \omega + \sin \alpha_{\pi} \cdot \sin \omega) - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha_{\pi}.$$

Азимут вертикальної поверхні  $a_{\Pi}$  в такому випадку, якщо вона орієнтована на південь, дорівнює  $0^{\circ}$ , на захід –  $90^{\circ}$ , на схід –  $-90^{\circ}$ , на північ –  $-180^{\circ}$ . Тому для похилої поверхні з південною орієнтацією ( $a_{\Pi} = 0$ ) маємо

$$\cos i = \sin(\varphi - \beta) \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cdot \cos \varphi . \quad (1.6)$$

### **Розрахунок інсоляції, що надходить на поверхню фотоелектричної батареї**

Батарею фотоелектричну зазвичай встановлюють з оптимальним кутом нахилу до горизонту для прийому найбільшої кількості сонячної енергії.

Середньомісячне денне значення щільності сонячного випромінювання, що припадає на похилу поверхню БФ, визначається  $R$ -методом за формулою

$$E_{\Pi} = R \cdot E, \quad (1.7)$$

де  $E$  – середньомісячна денна сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню,  $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \cdot \text{день}}$ ;

$R$  – відношення середньомісячної денної щільності сонячного випромінювання, що надходить на похилу і горизонтальну поверхні;

$$E = E_{\Pi} E_p, \quad (1.8)$$

де  $E_{\Pi}$  – середньомісячна частка прямого сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню;

$E_p$  – середньомісячна денна частка розсіяного сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню.

Коефіцієнт перерахунку кількості сонячної енергії з горизонтальної поверхні на похилу поверхню БФ, наведеної в таблиці 1.1, з південною орієнтацією дорівнює сумі трьох складових, відповідних прямому, розсіяному і відбитому сонячному випромінюванню [5]:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) R_{\pi} + \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1.9)$$

де  $\frac{E_p}{E}$  – середньомісячна денна частка розсіяного сонячного випромінювання;

$R_{\pi}$  – середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальної на похилу поверхню, град;

$\beta$  – кут нахилу поверхні БФ до горизонту, град;

$\rho$  – коефіцієнт відображення (альbedo) поверхні Землі і навколишніх тіл.

Середньомісячний коефіцієнт  $R_{\pi}$  перерахунку прямого сонячного випромінювання на похилу поверхню приймача з південною орієнтацією визначають виразом [5]

$$R_{\pi} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_3 + \frac{\pi}{180} \cdot \omega'_3 \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_3 + \frac{\pi}{180} \cdot \omega'_3 \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi}, \quad (1.10)$$

де  $\varphi$  – широта місцевості, град;

$\beta$  – кут нахилу панелі до горизонту, град;

$\delta$  – добове схилення Сонця;

$\omega'_3$  – часовий кут заходу Сонця щодо похилої поверхні.

Часовий кут заходу Сонця щодо горизонтальної поверхні [4]

$$\omega_3 = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta). \quad (1.11)$$

Як годинний кут заходу Сонця  $\omega'_3$  щодо похилої поверхні з південною орієнтацією беруть меншу з двох величин:  $\omega_3$  або  $\omega_{3H}$ , розраховану за формулою [3]:

$$\omega_{3H} = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \cdot \operatorname{tg} \delta]. \quad (1.12)$$

Тривалість дня  $\tau_{\text{дн}}$  знаходимо за формулою

$$\tau_{\text{дн}} = 2 \cdot \frac{\omega_3}{15} \quad (1.13)$$

Для зручності значення  $E_n$  і  $E_p$  використовуємо з роботи [4] і записуємо в таблицю 1.3 (для широти  $\varphi = 49^\circ$ ).

Таблиця 1.3 – Середньомісячне значення щільності прямого ( $E_n$ ) і розсіяного ( $E_p$ ) сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню

Щільність випромі- нювання, кВт·год/м <sup>2</sup> /день	Місяць											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$E_n$	1,17	2,02	3,08	4,03	5,41	5,58	5,57	4,84	3,48	2,1	1,19	0,87
$E_p$	0,71	1,08	1,61	2,12	2,49	2,69	2,57	2,22	1,69	1,1	0,72	0,56

Значення кута  $\beta$  установлення модулів БФ, оптимальних за максимумом енергонадходження, є різними для кожного місяця. Оскільки фотоелектрична установка є фіксованою, то кут нахилу БФ можна вибрати таким, що дорівнює широті її місця розташування для підвищення інсоляції взимку, або визначити як 0,707 широти для максимуму цілорічної інсоляції.

За допомогою електронних таблиць MS Excel та наведених формул (1.4) – (1.10) розраховують інсоляцію в середній день місяця. Результати використовують згідно з даними на 15 число кожного місяця і зводять у таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Значення, одержані за формулами (1.5) – (1.10) (для широти  $\varphi = 49^\circ$ )

Параметр	Місяць											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$n$	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
$\delta^\circ$	-21,27	-13,29	-2,82	9,41	18,79	23,31	21,52	13,78	2,22	-9,60	-19,15	-23,34
$\varphi^\circ$	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
$\beta^\circ$	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
$\omega_3^\circ$	63,40	74,23	86,75	101	113,04	119,72	116,97	106,39	92,55	78,78	66,46	60,25
$\omega_{3H}^\circ$	84,28	86,53	89,28	92,43	95,00	96,33	95,79	93,60	90,57	87,52	84,90	83,66
$\tau$	8	10	12	13	15	16	16	14	12	10	9	8
$R_n$	2,90	2,14	1,58	1,20	1,00	0,91	0,95	1,10	1,40	1,91	2,65	3,21
$R$	1,76	1,54	1,25	1,06	0,97	0,93	0,95	1,03	1,18	1,40	1,62	1,79
$E_o, \text{кВт год/м}^2$	3,85	4,29	5,27	5,19	5,28	4,98	4,11	2,95	1,92	1,56	3,85	4,29
$E_n, \text{кВт год/м}^2$	0,333	0,318	0,350	0,325	0,338	0,351	0,333	0,281	0,217	0,194	0,333	0,318

Гістограму зміни щільності сонячного випромінювання на похилу поверхню залежно від пори року (приклад для широти  $\varphi = 49^\circ$ ) показано на рисунку 1.5.

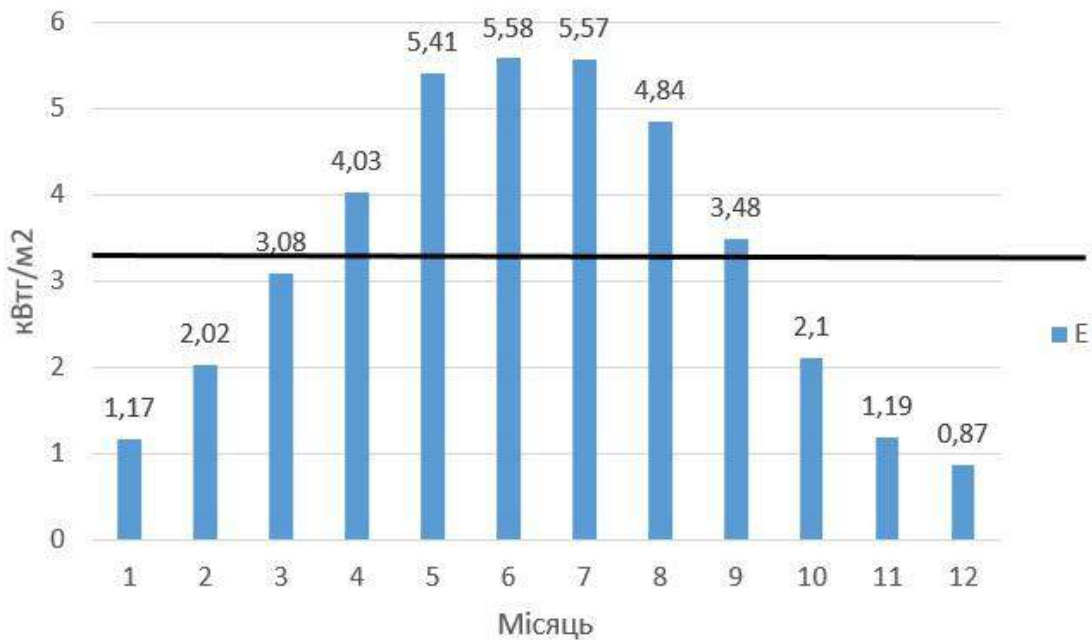


Рисунок 1.5 – Проникнення сонячної радіації на похилу поверхню

Висновок. У середньому за рік на одиничну площадку проникає  $3,28 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$  сонячної радіації за світловий день.

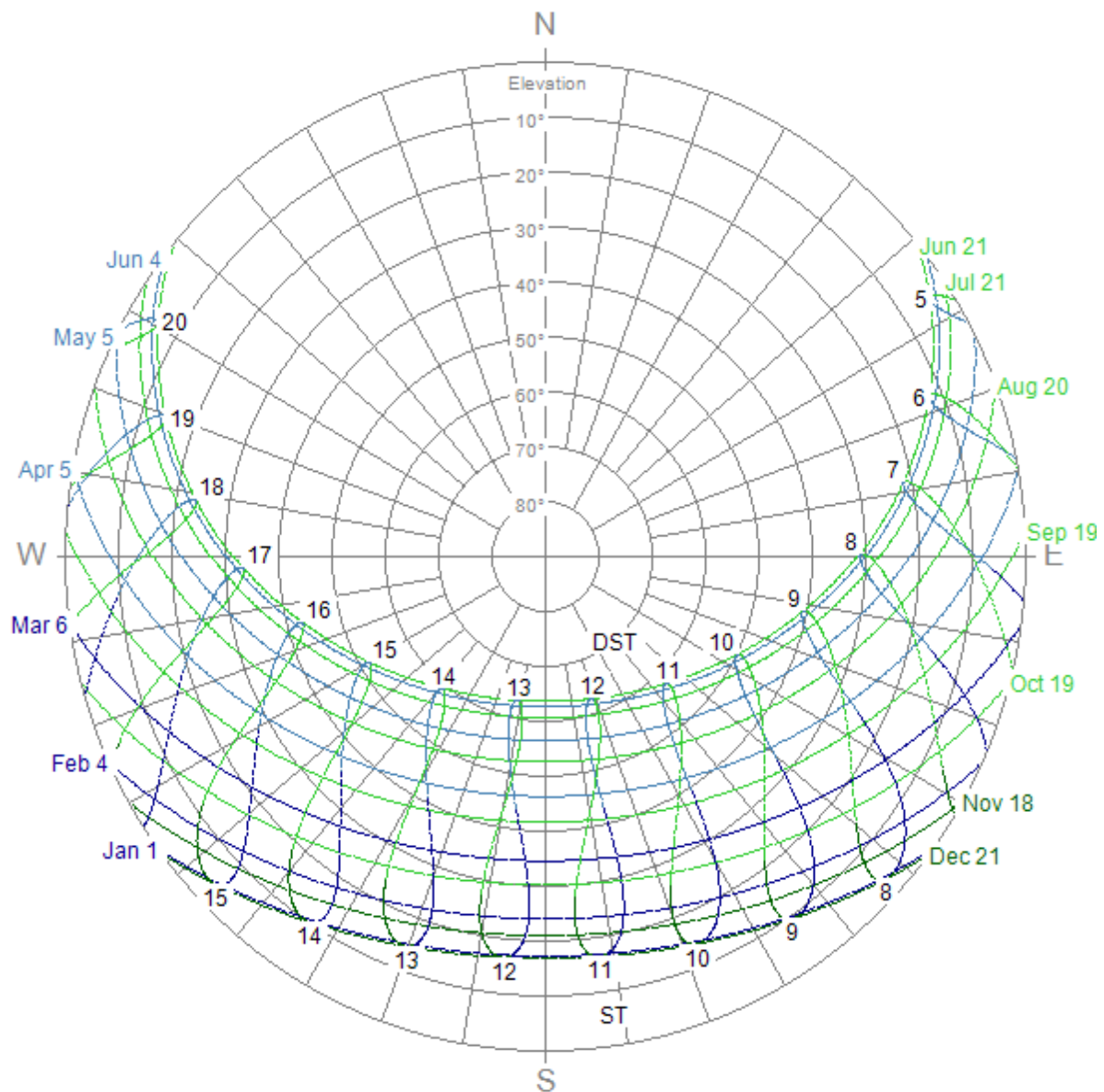
Середньомісячне годинне значення сонячного випромінювання визначаємо за формулою

$$E_{ci} = \frac{E_n}{\tau_i} \quad (1.14)$$

Для правильності розрахунків можна скористатися перевіркою положення сонця в певній місцевості протягом всього року. Одним з можливих варіантів є SolarBeam, додаток, який містить базу даних про міста і інформацію про положення сонця в кожному з них.

Наприклад, SolarBeam для попереднього розрахунку діаграми руху сонця у Харкові показано на рисунку 1.6.

# Solar diagram



Kharkiv (Ukr)  
 coordinates: 49° 58' 48" N 36° 13' 12" E  
 timezone: UTC+2 ST, UTC+3 DST

date: 21.06.2014  
 time: 12:33:00 DST



solar elevation: 63.45°

solar azimuth: 178.01°

03:40  
dawn

04:25  
sunrise

12:36  
solar noon

20:47  
sunset

21:32  
dusk

Рисунок 1.6 – Діаграма руху сонця в SolarBeam

## 1.2 Визначення вартості базових елементів енергоустановки

Для подальшого з'ясування параметрів енергоустановки необхідно визначити площу фотоактивної поверхні,  $m^2$ :

$$S_{\Pi} = \frac{P_{\text{сп}}}{\eta \cdot E_{\text{н}} \cdot 1000}, \quad (1.19)$$

де  $P_{\text{сп}}$  – необхідна потужність споживаної енергії, кВт;

$\eta$  – ККД СБ,  $\eta=0,16$ ;

1000 – це приведення необхідної потужності до нормативного значення, Вт;

$E_{\text{н}}$  – середньомісячне нормоване значення енергії,  $\text{Вт}/m^2$ , спрямованої на похилу поверхню 15 числа першого сезону кожної пори року, згідно з таблицею 1.4.

Значення потрібної площі фотоелектричної батареї для кожного місяця наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Площа БФ залежно від пори року

Пора року	Зима	Весна	Літо	Осінь
$S_{\text{н}}, m^2$	178	72	54	68

У нашому випадку відношення потрібних площ до пори року становить:  $178/54=3,3$ . При цьому різниця потужностей батареї фотоелектричної для забезпечення енергією цих площ взимку і влітку є досить значною. Таким чином, вибір необхідної площі доцільно здійснювати на основі техніко-економічного аналізу за необхідним критерієм. Це може бути найбільший виробіток енергії, найбільший дохід від продажу енергії, найменший термін окупності тощо. Визначимо найбільш оптимальний з точки зору окупності варіант схеми сонячної енергетичної установки (СЕУ), що найчастіше відповідає вимогам

споживача енергії. Попередню вартість установки розрахуємо за питомими показниками вартості комплектації.

Визначимо вартість БФ, враховуючи зимовий період:

$$C_{БФ} = N_{БФ} C_{пит. БФ}, \quad (1.20)$$

де  $C_{БФ} = 5522$  ум. од.;

$C_{пит. БФ} = 1$  ум. од./Вт – питома вартість БФ на час розрахунку;

$N_{БФ}$  – потрібна потужність БФ для задоволення енергоспоживання, Вт

Час сходу і заходу сонця наведено на рисунку 1.6. Визначимо ємність акумулятора для зимового сезону

$$Q = \frac{W_{сп}}{U} = \frac{5522}{24} = 230,1 \text{ А}\cdot\text{год}, \quad (1.21)$$

де  $U = 24 \text{ В}$  – напруга акумулятора;

$W_{сп}$  – енергія, що споживається від акумуляторної батареї, Вт·год.

### 1.3 Формування структурної схеми БФ

Структурну схему енергоустановки можна побудувати як типову за елементами, що зображено на рисунку 1.7.

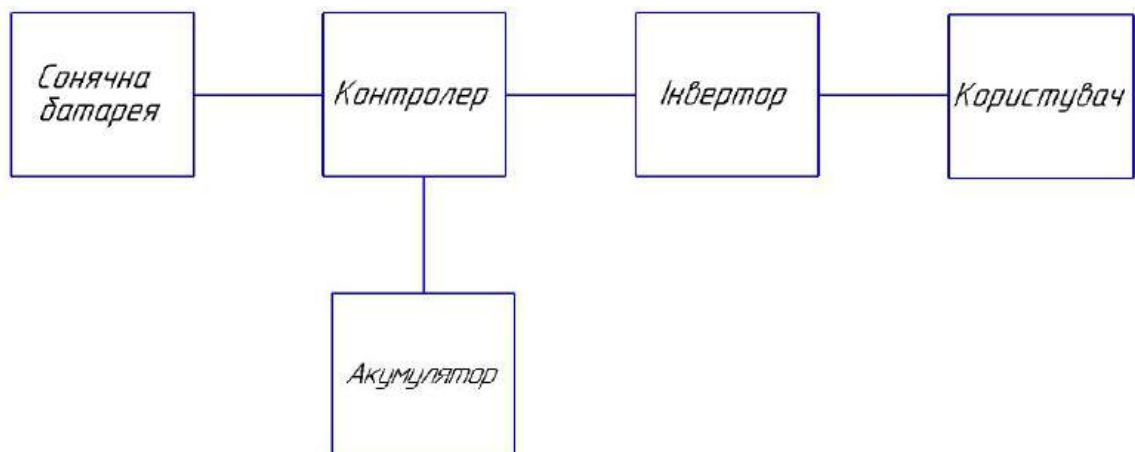


Рисунок 1.7 – Структурна схема БФ

Загалом функціональна схема підключення матиме вигляд, зображений на рисунку 1.8.

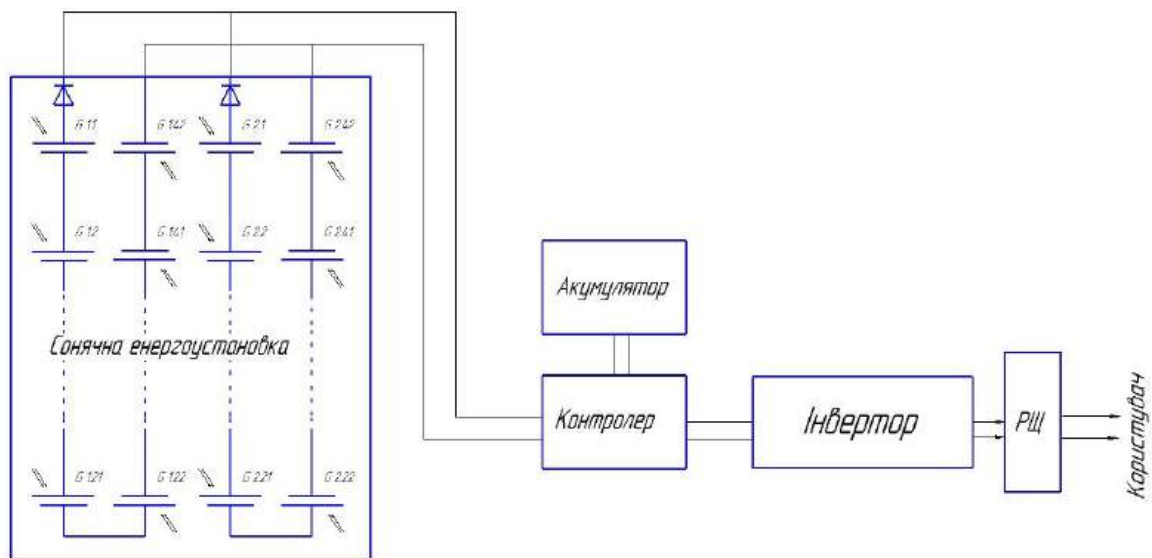


Рисунок 1.8 – Функціональна схема підключення

Система автономного електропостачання будинку на базі фотоелектричної сонячної батареї складається з таких компонентів:

- сонячної батареї необхідної потужності;
- контролера заряду акумуляторної батареї, який запобігає згубним для батареї глибокому розряду і перезаряду;
- батареї акумуляторів (АБ);
- інвертора, що перетворює постійний струм в змінний;
- розподільного щита для прийому та розподілу електричної напруги.

Для забезпечення надійного електропостачання за умови часткового використання споживаної енергії від сонця необхідно мати резервне джерело електроживлення, яким може бути невеликий (2...6 кВт) бензо- або дизель-електрогенератор. Введення такого резервного джерела електроенергії різко скорочує вартість сонячної батареї. У цьому випадку у систему також вводиться зарядний пристрій для швидкого заряджання (протягом декількох годин) АБ, наприклад, від рідкопаливного

електрогенератора (РПЕГ). Є можливим застосування блока безперебійного живлення, в якому вбудована заряджена АБ.

#### **1.4 Вибір акумулятора та контролера**

Згідно з результатами розрахунку (1.21) можна визначити, що для роботи потрібен акумулятор ємністю не менше 230 А·год. Для цього вибрано акумуляторну батарею Delta DTM 12250 [5] напругою 24 В та ємністю 250 А·год. Витрати на її придбання та експлуатацію будуть у подальшому враховані у розрахунках окупності.

Контролер сонячної батареї дозволяє використовувати безкоштовне живлення електроприладів навіть у домашніх умовах. Даний компонент регулює роботу акумулятора, дозволяючи оптимально витратити заряд. Було вибрано контролер Victron BlueSolar MPPT 150/70. Його технічні характеристики [6]:

- технологія заряду АКБ: MPPT;
- номінальна напруга: 12...48 В;
- максимальна сила струму: 70 А;
- робоча температура: від -40 до +60° С;
- габарити: 350x160x135 мм;
- вага: 4,2 кг.

#### **1.5 Підбір фотоелементів і проектування модуля сонячної батареї**

Отримані характеристики потужності, струму та напруги є головними при виборі фотоелементів. Їх параметри залежать від кількості елементів на сонячній панелі. У сучасних стандартних виробках використовуються 6-дюймові (156x156 мм) так звані «квазі-квадратні» сонячні елементи з

монокристалічного кремнію або квадратні з полікристалічного як найбільш потужні.

На практиці часто використовують пластини ФЕП розміром 125×125; 102,5×102,5; 86×86 тощо або похідні з наведених.

Потужність панелі залежить від її розміру. Найбільш популярними є панелі з паспортною потужністю 100...250 Вт. Це 36 послідовно з'єднаних монокристалічних або полікристалічних елементів в одному корпусі (приведено до стандарту 12 В) або 72, або 60 (на 24 В).

Найбільш ефективною є полікристалічна технологія. На її основі працюють близько 80 % всіх сонячних електростанцій в світі. Тому для подальшого розрахунку було використано фотоелементи від виробника CSG PVtech (Китай) [7] розміром 156x156 мм, в яких застосовано чотири струмопровідні шини для послідовного з'єднання стрингу (таблиця 1.6).

Таблиця 1.6 – Характеристика фотоелемента CSG PVtech

Розмір, мм	Форма	$U_{xx}$ , В	$I_{кз}$ , А	$U_p$ , В	$I_p$ , А
156×156	Квазі-квадрат	0,642	8,9	0,53	8,17

У таблиці 1.6 прийнято такі позначення:

$U_{xx}$  – напруга холостого ходу;

$I_{кз}$  – струм короткого замикання;

$U_p$  – напруга в робочій точці;

$I_p$  – струм в робочій точці.

Знаючи параметри фотоперетворювача, визначаємо потужність фотоелемента в робочій точці

$$N_{\text{ФЕП}} = U_p \cdot I_p; \quad (1.21)$$

$$N_{\text{ФЕП}} = U_p \cdot I_p = 0,53 \cdot 8,17 = 4,33 \text{ Вт.}$$

Площу використовуємо з характеристики ФЕП:

$$S_{\text{ФЕП}} = 0,024336 \text{ м}^2.$$

Далі визначаємо кількість фотоперетворювачів, необхідних для забезпечення потрібною потужністю приватного будинку:

$$N = \frac{S_{\text{СБ}}}{S_{\text{ФЕП}}}; \quad (1.22)$$
$$N = \frac{72}{0,024336} = 2958 \text{ шт.}$$

Враховуючи, що обрано модуль, в якому 36 фотоелементів, кількість модулів знаходимо за таким співвідношенням:

$$m = \frac{S_{\text{СБ}}}{36 \cdot 0,024336} = \frac{72}{0,876} = 82,2. \quad (1.23)$$

Приймаємо  $m = 84$  шт., модулі розміщуємо за схемою  $42 \times 2$ , тоді потужність БФ і відповідно СЕУ визначаємо за формулою

$$N_{\text{БФ}} = N \cdot N_{\text{ФЕП}} = 2958 \cdot 4,33 = 12,8 \text{ кВт.} \quad (1.24)$$

Напругу на одному модулі можна розраховувати за формулою

$$U_{\text{М}} = U_{\text{р}} \cdot n = 0,53 \cdot 36 = 19,08 \text{ В,} \quad (1.25)$$

де 36 – кількість фотоелементів, з'єднаних за послідовною схемою в модуль.

Напругу на виході фотоелектричної установки визначаємо з урахуванням, що модуль має напругу 12 В:

$$U_{\text{БФ}} = U_{\text{М}} \cdot m_{\text{посл}} = 12 \cdot 42 = 504 \text{ В.} \quad (1.26)$$

Максимальний струм на виході фотоелектричної установки розраховуємо за формулою

$$I_{\text{БФ}} = I_{\text{М}} \cdot m_{\text{пар}} = 8,17 \cdot 2 = 16,34 \text{ А.} \quad (1.27)$$

Використовуючи додаток MS Excel та модель ФЕП, що наведена в роботі [4], побудуємо вольт-амперну і вольт-ватну характеристики ФЕП. Результати зображено на рисунках 1.9 та 1.10.

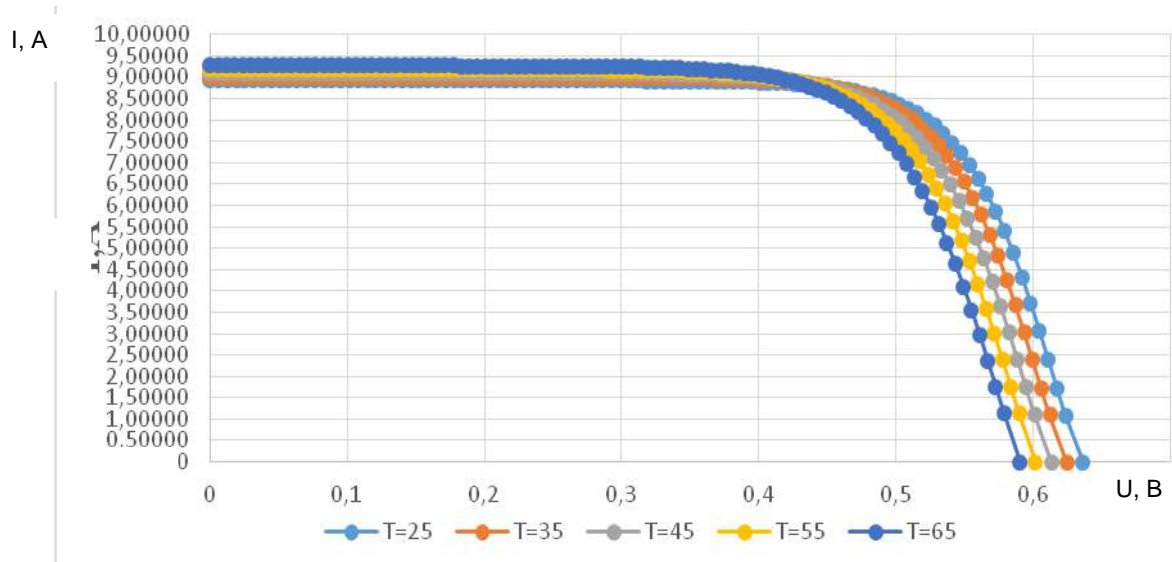


Рисунок 1.9 – Вольт-амперна характеристика ФЕП при  $E=1000 \text{ Вт/м}^2$  і різних температурах

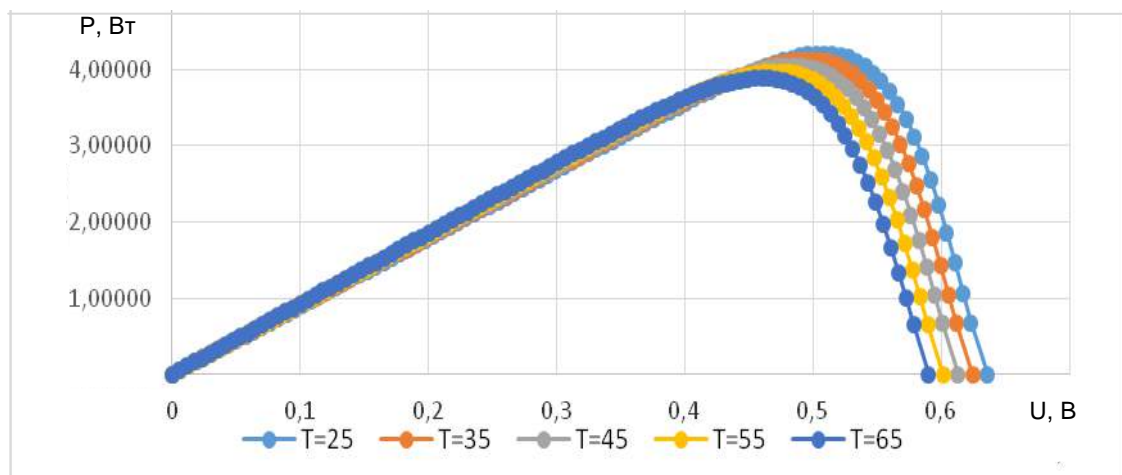


Рисунок 1.10 – Вольт-ватна характеристика ФЕП при  $E=1000 \text{ Вт/м}^2$  і різних температурах

Вольт-амперні і вольт-ватні характеристики ФЕП були розраховані в додатку MS Excel. Результати зображено на рисунках 1.11 та 1.12.

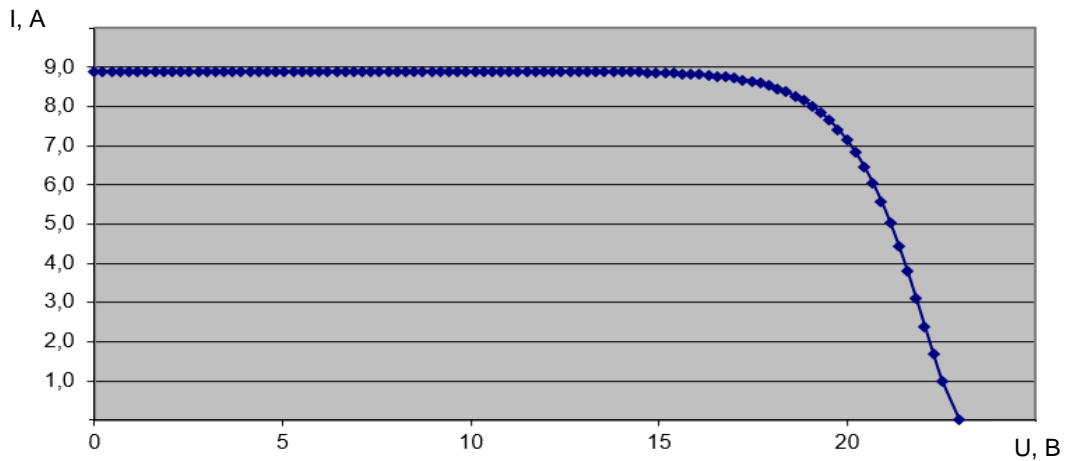


Рисунок 1.11 – Вольт-амперна характеристика модуля

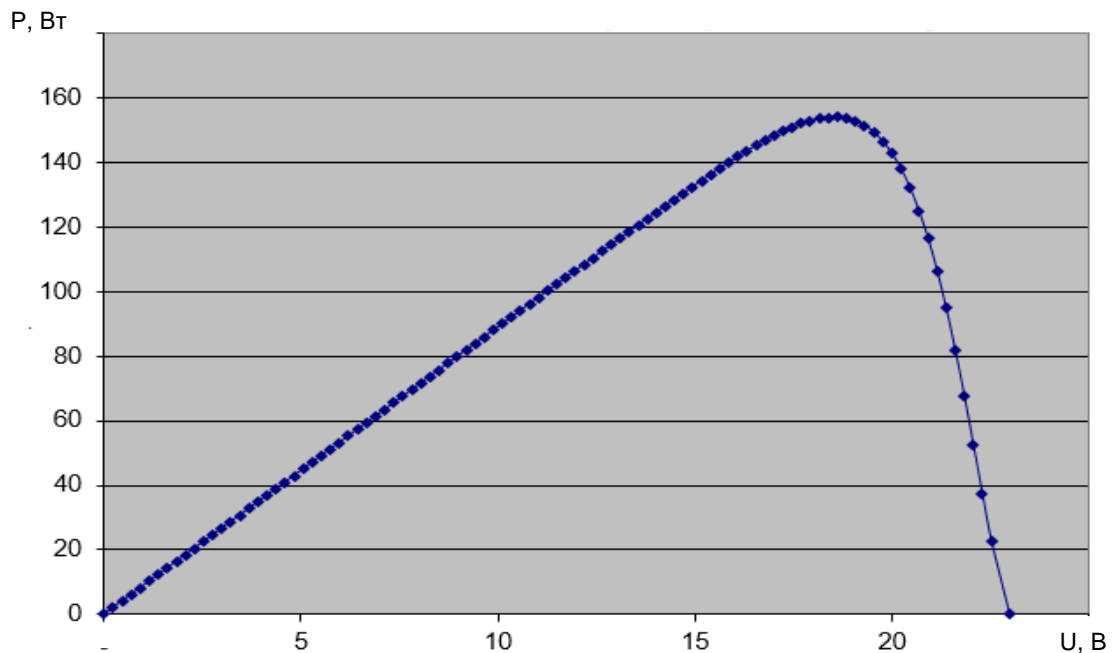


Рисунок 1.12 – Вольт-ватна характеристика модуля

**Висновки.** За результатами розрахунків були вибрані фотоелементи та визначена кількість модулів сонячної енергоустановки. На основі даних вольт-амперної та вольт-ватної характеристик модуля було визначено, що вони задовольняють умовам завдання.

## 2 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ

Для визначення оптимальної структури СЕУ скористуємось визначенням окупності з урахуванням витрат на монтажні роботи автономної фотоелектричної енергоустановки для дачного будинку. Проведемо аналіз енергоустановок різної потужності відповідно до кожної пори року та в результаті виберемо найбільш оптимальну складову матеріалів, що входять у комплектацію та приладдя для технічного обслуговування за мінімальним терміном окупності.

### 2.1 Визначення вартості компонентів енергетичної установки

Для подальшого розрахунку вартості СЕУ будуть використані формули (1.19) та (1.20), згідно з якими визначимо площу та вартість батареї фотоелектричної для задоволення енергопотреб посезонно (літом, восени, весною, взимку) з відповідним задоволенням потреб сонячною енергією і відповідною заміною додатковим генератором (ДГ) або мережею. Вартість інших елементів СЕУ визначають за їх питомою вартістю, що наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Питома вартість елементів СЕУ

БФ	Батарея хімічна (БХ)	Електро-ніка	Конструкція	Орієнтація	Допоміжна силова установка	Паливо	Витрати палива	Тех-обслуговування	Тариф енергії
$C_{\text{пит БФ}}$ , \$/Вт	$C_{\text{пит БХ}}$ , \$/А·год	$C_{\text{пит Ел}}$ , \$/Вт	$C_{\text{пит К}}$ , %/вузлів	$C_{\text{пит ор}}$ , \$/Вт	$C_{\text{пит ДСУ}}$ , \$/Вт	$C_{\text{пит П}}$ , \$/літр	$Q_{\text{вит}}$ , л·кВт·ч	$C_{\text{пит ТО}}$ , %/год	$C_{\text{ел}}$ , \$/кВт·год
1	1	0.25	15	0.5	0.2	0.9	0.2	2	0.2

Визначимо вартість акумулятора:

$$C_{\text{БХ}} = C_{\text{пит БХ}} \cdot Q, \quad (2.1)$$

де  $C_{\text{пит БХ}}$  – питома вартість хімічної батареї, ум.од. /А·год, зведена до 12 В;

$Q$  – ємність АКБ;

$$C_{БХ} = 230,1 \text{ ум. од.}$$

Розрахуємо вартість вузлів (апаратури регулювання і контролю):

$$C_{ел} = P_{сер.доб} \cdot C_{пит ел}; \quad (2.2)$$

$$C_{ел} = 1860 \times 0,25 = 465 \text{ ум. од.}$$

Визначимо вартість додаткового генератора:

$$C_{ДГ} = C_{пит ДГ} N_{ДГ}; \quad (2.3)$$

$$C_{ДГ} = 0,9 \times 2746 = 2471 \text{ ум. од.}, \quad (2.4)$$

де 
$$N_{ДГ} = \frac{W_{ДГ}}{\tau_{зими}}; \quad N_{ДГ} = 2746 \text{ Вт};$$

$$W_{ДГ} = W_{\Sigma} - W_{БФ}; \quad (2.5)$$

$$W_{ДГ} = 44360 - 22390 = 21970 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$W_{БФ} = N_{літа} \cdot \tau_{зими}; \quad (2.6)$$

$$W_{БФ} = 2778 \times 8,06 = 22390 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Отримані значення було внесено у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Розраховані параметри генератора

Параметр	Значення
$W_{БФ}, \text{ Вт} \cdot \text{год}$	22390
$W_{ДГ}, \text{ Вт} \cdot \text{год}$	21970
$N_{ДГ}, \text{ Вт}$	2746

Вартість конструкції ( $C_k$ ) без додаткового генератора визначимо за формулою

$$C_k = K_k(C_{БФ} + C_{БХ} + C_{ел}), \quad (2.7)$$

де  $K_k = 0,15$ ;

$$C_k = 0,15 \times (5522 + 230,1 + 465) = 931,96 \text{ ум.од.} \quad (2.8)$$

Значення вартості компонентів СЕУ, розрахованих за виразами (2.1) – (2.4), (2.7), (2.8), наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вартість компонентів СЕУ

Компонент	Значення, ум. од.
$C_{БФ}$	5522
$C_{БХ}$	230,1
$C_{ел}$	465
$C_{ор}$	3093
$C_{ДСУ}$	1902
$C_k$	931,96

## 2.2 Аналіз терміну окупності енергетичної установки

Визначимо окупність без додаткового генератора

$$C_{ТФЕУ} = C_{ФЕУ} - \frac{C_{ФЕУ} - K_{пт} C_{ФЕУ}}{\tau_{експ}} \cdot t, \quad (2.9)$$

де  $C_{ФЕУ}$  – початкова вартість фотоенергоустановки;

$\tau_{експ}$  – час експлуатації (за умовою  $\tau_{експ} = 30$ );

$K_{пт} = 0,03$ ;

$t$  – поточний рік.

Визначимо окупність з додатковим генератором

$$C_{ТФЕУ} = C_{ФЕУ} - \frac{C_{ФЕУ} - K_{пт} C_{ФЕУ}}{\tau_{експ}} \cdot t + C_{пал} \cdot t, \quad (2.10)$$

де  $C_{пал}$  – вартість палива;

$$C_{пал} = Q_{рт} C_{пит} \tau_{дг}, \quad (2.11)$$

де  $\tau_{дг}$  – кількість годин у році працює додатковий генератор;

$$C_{пит} = 0,9 \text{ \$/л};$$

$$Q_{рт} = N_{дг} Q_{пит. внутр}, \quad (2.12)$$

де  $Q_{пит. внутр} = 0,2 \text{ л/кВт}\cdot\text{год}$ .

Визначимо вартість енергії:

$$C_{ен} = C_{тар} \cdot t \cdot Q, \quad (2.13)$$

де  $C_{тар}$  – тариф на електроенергію;

$$C_{тар} = 0,1 \text{ \$/кВт}\cdot\text{год}.$$

Розрахунок окупності було проведено з використанням програмного середовища MS Excel. Усі значення розрахунку наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Окупність сонячної електроустановки

Рік	Енергоустановка без орієнтації, \$	Енергоустановка без орієнтації з допоміжною силовою установкою, \$	Проста орієнтація енергоустановки, \$	Енергія, кВт
0	10677,69	9902,11	10354,23	0
1	10357,36	10393,45	10043,61	1752
2	10037,03	10884,78	9732,98	3504
3	9716,70	11376,12	9422,35	5256
4	9396,37	11867,46	9111,73	7008
5	9076,04	12358,79	8801,10	8760
6	8755,71	12850,13	8490,47	10512
7	8435,38	13341,47	8179,85	12264
8	8115,05	13832,80	7869,22	14016
9	7794,72	14324,14	7558,59	15768
10	7474,39	14815,48	7247,96	17520
11	7154,05	15306,81	6937,34	19272
12	6833,72	15798,15	6626,71	21024
13	6513,39	16289,49	6316,08	22776
14	6193,06	16780,82	6005,46	24528
15	5872,73	17272,16	5694,83	26280
16	5552,40	17763,50	5384,20	28032
17	5232,07	18254,83	5073,57	29784
18	4911,74	18746,17	4762,95	31536

Продовження таблиці 2.4

Рік	Енергоустановка без орієнтації, \$	Енергоустановка без орієнтації з допоміжною силовою установкою, \$	Проста орієнтація енергоустановки, \$	Енергія, кВт
19	4591,41	19237,51	4452,32	33288
20	4271,08	19728,84	4141,69	35040
21	3950,75	20220,18	3831,07	36792
22	3630,42	20711,52	3520,44	38544
23	3310,08	21202,85	3209,81	40296
24	2989,75	21694,19	2899,19	42048
25	2669,42	22185,53	2588,56	43800
26	2349,09	22676,86	2277,93	45552
27	2028,76	23168,20	1967,30	47304
28	1708,43	23659,54	1656,68	49056
29	1388,10	24150,87	1346,05	50808
30	1067,77	24642,21	1035,42	52560

За результатами розрахунків було побудовано графік, який відображає, наскільки різноманітні схеми підключення будуть окуповуватися впродовж терміну експлуатації (рисунки 2.1- 2.3).

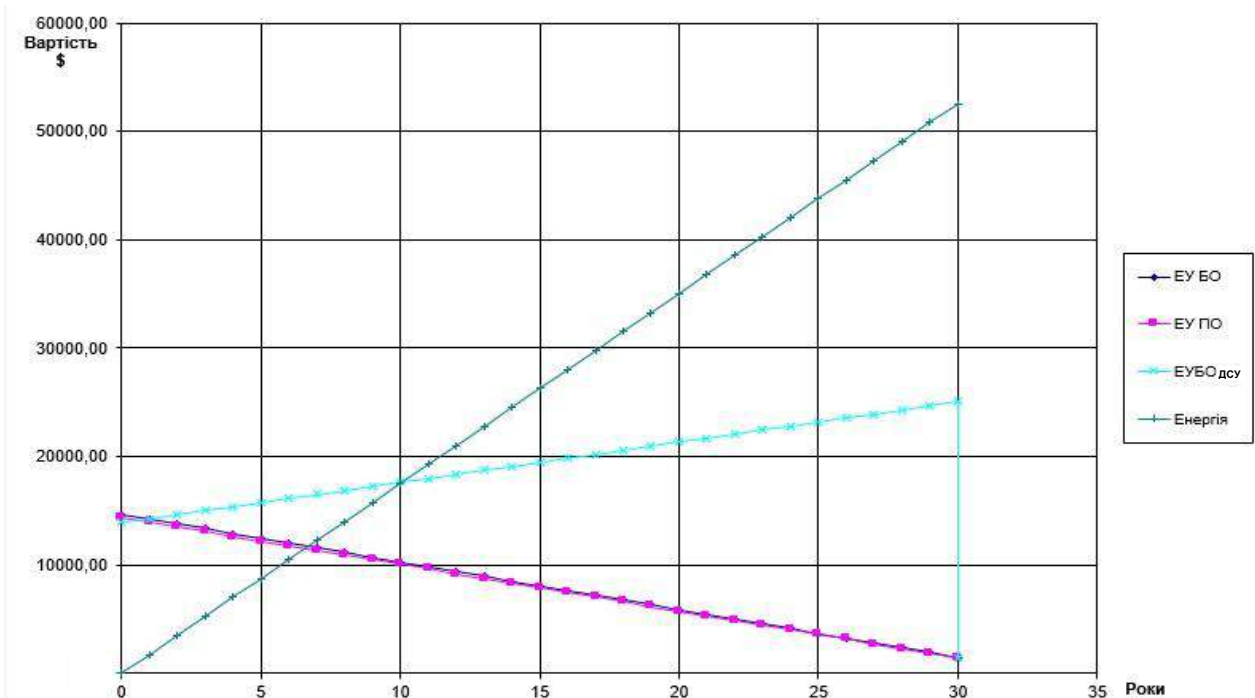


Рисунок 2.1 – Графік окупності для зимового періоду

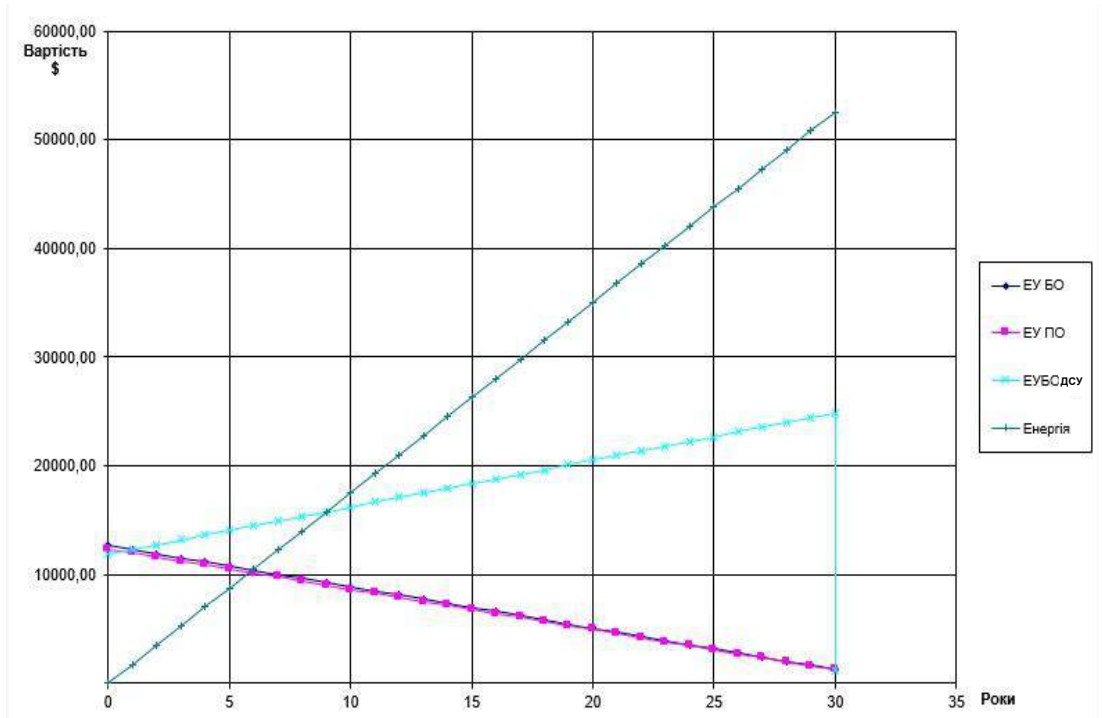


Рисунок 2.2 – Графік окупності для весняного періоду

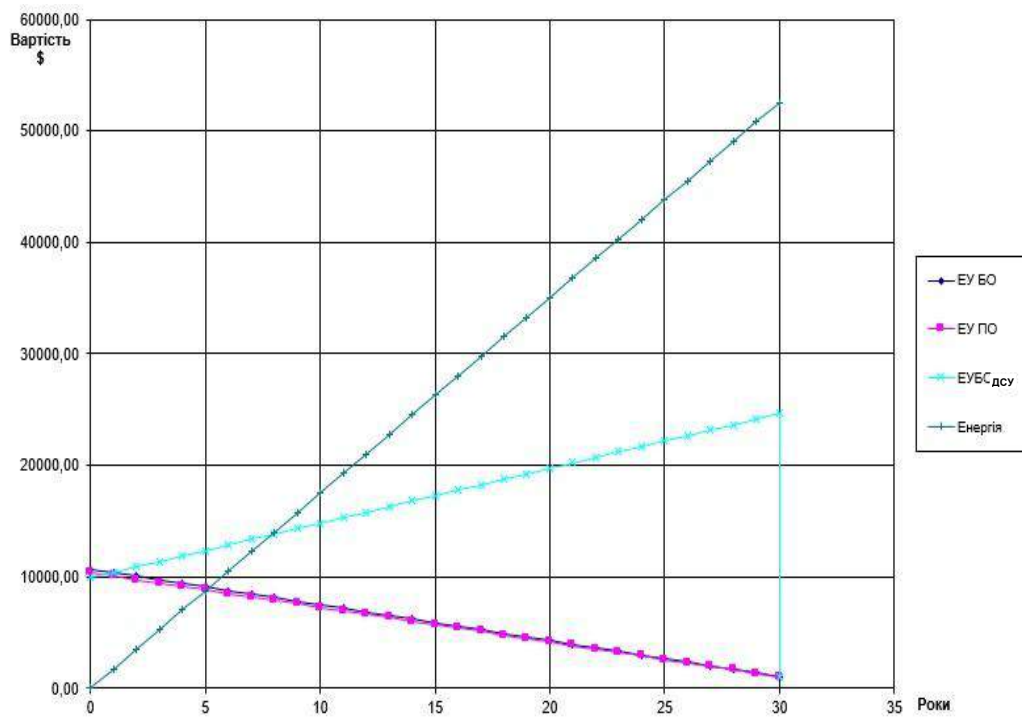


Рисунок 2.3 – Графік окупності для літнього періоду

З графіків бачимо, що системи СЕУ без орієнтації, як і установки з простою орієнтацією, швидко окупаються. Всього за 5–5,5 років можна буде повністю окупити систему. Для такої конструкції у подальшому врахуємо запасні вироби та запчастини, що існують у комплектації підприємства-постачальника.

### 2.3 Витрати на ЗВЗ та заробітну плату

Кошторис витрат на науково-дослідну роботу (НДР) містить витрати, що спрямовані як безпосередньо на виконання НДР, так і на прибуток (накопичення) для розвитку досліджень.

Кошторис витрат на НДР містить таке:

- витрати на оплату праці;
- матеріальні витрати;
- відрахування на соціальні заходи;
- інші витрати.

До витрат на оплату праці належать основна і додаткова заробітні плати персоналу, зайнятому безпосередньо виконанням конкретної теми: науковці, науково-технічні, науково-допоміжні і виробничі робітники.

Тривалість кожного етапу визначається такою формулою:

$$T = \frac{t}{n}, \quad (2.14)$$

де  $T$  – тривалість етапу в робочих днях;

$t$  – трудомісткість етапу, людино-дні;

$n$  – прийнята кількість виконавців, одночасно зайнятих на певному етапі роботи.

Етап проектування потребує присутності спеціалістів різного рівня кваліфікації. Всі операції на етапі підготовки до монтажу та їх кошторис наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Перелік робіт

Етап роботи	Виконавець	Кількість робочих годин	Оплата за годину, грн	Витрати, грн
Розроблення ТЗ	Інженер-проектувальник	20	56,8	1136
Постановка завдання	Інженер-проектувальник	1	56,8	56,8
Збір даних	Інженер-проектувальник	8	56,8	454,4
Оброблення даних	Молодший спеціаліст	8	41,2	329,6
Розроблення конструкторської документації	Інженер-проектувальник	40	52	2080

На підготовку необхідно буде витратити 4056,8 грн [14].

Для монтажних робіт необхідно використати чотири робочих дні по 10 годин, а також дві години на те, щоб розвантажити приладдя й після закінчення процесу зібрати комплектуюче. Така модель розрахунку потребує участі двох виконавців: старшого спеціаліста і молодшого спеціаліста, а також водія.

У комплекті сонячної батареї містяться ЗВЗ, що замовник може використовувати для підтримання високого КПД, щоб кількість електроенергії не зменшувалася з часом.

У складі ЗВЗ під час експлуатації слід ураховувати:

- кабель для сонячної батареї (10 м);
- герметичний роз'єм для сонячної батареї (4 шт.);
- комплект монтажу для чотирьох панелей.

До складу ЗВЗ ТО входять:

- комплект для промивання;
- засоби для очищення.

Будь-які додаткові матеріали під час експлуатації не враховують, тому їх вартість оцінено в 0 грн. Параметри занесено у таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Витрати на ЗВЗ

Тип витрат	Найменування	Кількість	Вартість, грн
ЗВЗ експлуатаційні	Кабель для сонячної батареї	10 м	400
	Герметичний роз'єм для сонячної батареї	4 шт	350
ЗВЗ експлуатаційні	Комплект монтажу для чотирьох панелей	4	5000
ЗВЗ ТО	Комплект для промивання	1	250
	Засоби для очищення	1	100

Загальні витрати на ЗВЗ:

$$\sum \text{ЗВЗ} = \text{ЗВЗ}_{\text{експ}} + \text{ЗВЗ}_{\text{ТО}} ; \quad (2.15)$$

$$\sum \text{ЗВЗ} = 400 + 350 + 5000 + 250 + 100 = 6100 \text{ грн.}$$

Крім цього, під час монтажу слід урахувати витрати на заробітну плату інженерів-монтажників. Це є винагорода за працю залежно від кваліфікації працівників; складності, кількості та якості виконуваної роботи. Враховуючи, що на монтажні роботи 84 модулів СБ необхідно лише 42 години, то заробітна плата стає договірною або завчасно визначеною з представником компанії-виробника. Всі витрати внесено в таблицю 2.7. Таблиця 2.7 – Витрати на заробітну плату при монтажних роботах

Посада	Розряд	Часова ставка, грн	Кількість відпрацьованих годин	Витрати, грн
Старший інженер-монтажник (старший спеціаліст)	5	90	42	3780
Молодший інженер-монтажник	3	68,4	42	2872,8
Молодший інженер-монтажник	3	68,4	42	2872,8

Сума залежить від розряду працівника та складності виконуваних робіт, при цьому один з молодших спеціалістів може бути також водієм.

Загалом необхідно виплатити за роботу:

$$ЗП = ЗП_{осн} + ЗП_{дод}, \quad (2.16)$$

де  $ЗП_{осн}$  – заробітна плата працівників, що займаються монтажем;

$ЗП_{дод}$  – додаткова заробітна плата, що становить 20 % від основної суми;

$$ЗП_{осн} = 3780 + 2872,8 \cdot 2 = 9525,6 \text{ грн};$$

$$ЗП_{дод} = 0,2 \cdot 9525,6 = 1905,12 \text{ грн};$$

тобто

$$ЗП = 9525,6 + 1905,12 = 11413,72 \text{ грн.}$$

При офіційному працевлаштуванні інженерів-монтажників та водія слід також урахувати додаткові витрати (єдиний соціальний внесок), що становлять 22 % від загальної вартості доходу працівників.

Ця сума

$$ЗП_{\text{есв}} = (11413,72 + 4056,8) \cdot 0,22 = 3403,51 \text{ грн.}$$

Варто зазначити, що всі значення були використані з урахуванням чинного курсу валюти, де 1\$ = 26 грн, тобто за ЗВЗ загалом необхідно додатково витратити 673,6\$, що при конвертації у гривні становить 17513,72 грн за умови, що робочий день триває не більше 8 годин.

## 2.4 Амортизаційні витрати

На цьому етапі необхідним є розрахунок амортизації (АМ) самої конструкції та обладнання для сонячної панелі. У подальшому буде використана така методика:

1. З урахуванням первісної вартості обладнання і річної норми амортизації знаходження річної суми амортизаційних відрахувань за певним видом обладнання.

2. Визначення величини амортизаційних відрахувань у розрахунку на одну годину роботи обладнання певного виду.

3. Залежно від часу використання обладнання в процесі виготовлення продукту розрахування розміру амортизаційних відрахувань, пов'язаних з виробництвом одиниці продукції певного виду.

Під час монтажу енергоустановки використовується обладнання, яке з часом має особливість псуватися та потребувати ремонту. До такого обладнання належать електричні пристрої, приладдя для страхування, а також автомобіль, на якому доставляють інженерів та обладнання для монтажу. Для кожного з них застосовують спеціальний коефіцієнт амортизації, а саме:

- для автомобілів: 10 % від вартості бензину, що був затраченим на маршрут;
- енергоприладдя: 5 % від кількості затраченої електроенергії певним пристроєм.

Таким чином, витрати становитимуть не менше ніж сума, вказана у формулі:

$$AM = AM_{авт} + AM_e, \quad (2.17)$$

де  $AM_{авт}$  – амортизаційні витрати на ремонт автомобіля;

$AM_e$  – амортизаційні витрати на ремонт електроприладдя,

$$AM = 50 \text{ грн.}$$

Однак під час монтажу існують витрати на технологічну електроенергію – кількість енергії, яку використовують інженери-монтажники, підключаючись до мережі замовника. Її розраховують за формулою

$$S_e = T_{тар} \cdot T \cdot W, \quad (2.18)$$

де  $T_{тар}$  – тариф на електроенергію (2,01 грн за 1 кВт) [15];

$T$  – кількість годин роботи;

$W$  – споживана потужність.

Приладдя, що використовує електроенергію під час монтажу:

- дріль потужністю 500 Вт;
- шурупокрути потужністю 350 Вт;
- перфоратор – 400 Вт;
- кутова шліфувальна машина – 350 Вт;
- дизель-генератор;
- лампа сіткова – 15 Вт.

Таким чином, кількість технологічної електроенергії

$$S_{ел} = 2,01 \cdot 42 \cdot 4 = 337,68 \text{ грн.}$$

Собівартість – це сума всіх витрат, тобто конструкції, ЗВЗ, монтажних робіт, амортизації і технологічної електроенергії. Загалом вона становитиме близько 300000 грн залежно від курсу долара на момент придбання конструкції та вартості ЗВЗ, а також витрат на заробітну плату. Розраховані значення внесено в таблицю 2.8.

Таким чином, витрати на ЗВЗ та заробітну плату з урахуванням єдиного соціального внеску та витрат на амортизацію приведуть до зміни графіка окупності (рисунок 2.4).

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку

№ п/п	Стаття калькуляції	Витрати, грн
1	Запасні вироби та запчастини	6100
2	Етап проектування	4056,8
3	Основна заробітна плата	9525,6
4	Додаткова заробітна плата	1905,12
5	Єдиний соціальний внесок	3403,51
6	Витрати на технологічну електроенергію	337,68
7	Амортизація	50
8	Собівартість	~ 300000

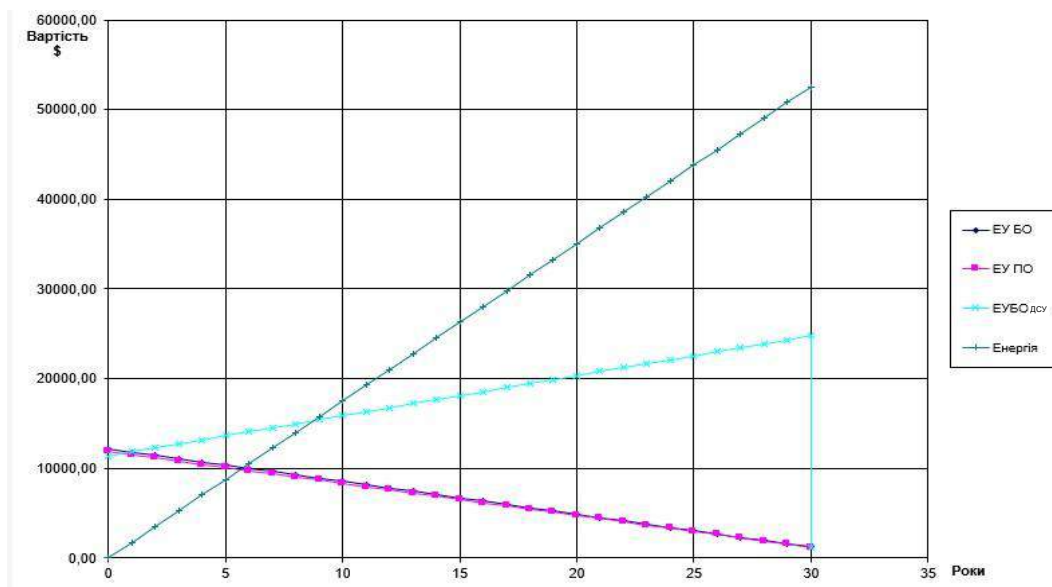


Рисунок 2.4 – Графік окупності з урахуванням додаткових витрат

**Висновки.** Витрати на ЗВЗ та заробітну плату не сильно впливають на окупність установки. Підвищення вартості на 25378,71 грн призвело до

збільшення терміну на 6-8 місяців, а загальна вартість конструкції для весняного періоду, згідно з яким й проводиться розрахунок, становитиме близько 300000 грн залежно від курсу долара на момент розрахунку. Таким чином, конструкція ЕУ без системи орієнтації та з простою орієнтацією є найбільш рентабельною за техніко-економічним аналізом.

## **3 КОНСТРУКЦІЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ**

Розроблення конструкції є важливою складовою у створенні сонячної енергоустановки. Завдяки цьому етапу формується пакет документації. Початковим етапом є розроблення схеми розташування ФЕУ – компонування відповідно до раніше розробленої функціональної схеми – та створення несучої опори, що буде визначати параметри навантаження й надійності. Вдале компонування у подальшому надасть користувачеві можливість окупити витрати у найкоротший термін та досить просто здійснити експлуатаційне очищення конструкції, що забезпечить високий рівень ККД протягом всього терміну використання ФЕУ за призначенням.

### **3.1 Характеристика базових елементів**

Після розрахунку було вибрано фотоелектричний модуль (ФЕМ) Моно BST потужністю 150 Вт. Габарити цієї конструкції становлять 1510 x 680 x 40 мм. Кількість з'єднаних елементів – 36. Конструкцію показано на рисунку 3.1.

Система складається з декількох компонентів – захисної автоматики з постійним струмом, двокерованого лічильника, розподільного щита і мережного інвертора, 42 модулів БФ, з'єднаних послідовно між собою в один ряд і два ряди БФ, з'єднаних паралельно.

Система електропостачання працює таким чином: електрична енергія, генерована фотоелектричною батареєю, передається на інвертор відомою мережею. Інвертор перетворює постійну напругу 374 В у перемінну 220 В. Змінна однофазна напруга передається безпосередньо до споживачів.

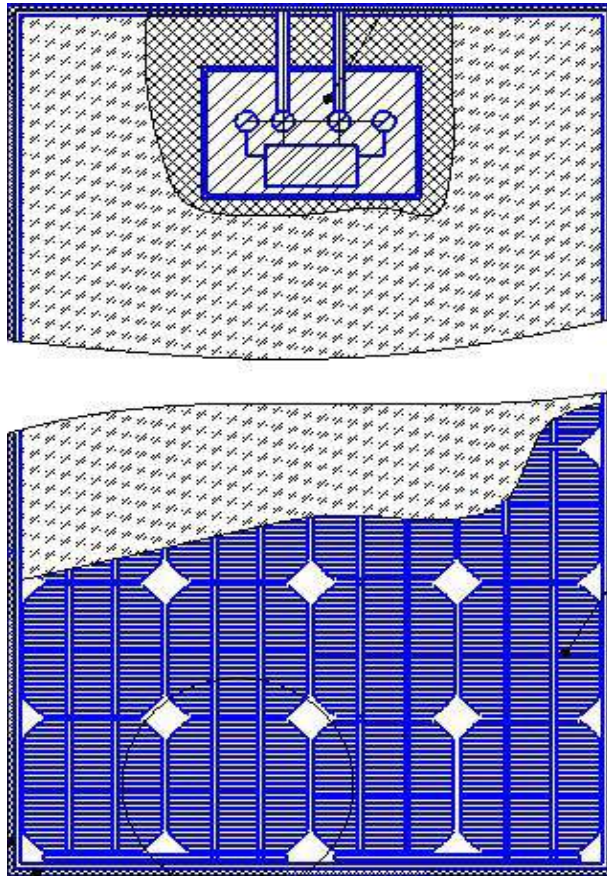


Рисунок 3.1 – Конструкція каркасного модуля

Інвертор, призначений для перетворення постійної напруги в перемінну, має вбудований MPPT – контролер, що слідкує за точкою максимальної потужності, тобто встановлює значення струму і напруги СЕУ так, щоб вихідна потужність була максимальною і дозволяла здійснювати продаж електроенергії за «зеленим тарифом».

БФ послідовно підключається до автоматики захисту з постійною напругою. Далі енергія постійної напруги подається до інвертора, що перетворює напругу постійного струму 374 В в перемінну 220 В, 50 Гц. Від інвертора енергія подається на розподільний щит, який розподіляє енергію між споживачами, а інша гілка йде до двонаправленого лічильника, котрий враховує різницю між відданою та споживаною енергією до і від зовнішньої мережі.

### 3.2 Компонування фотоелектричної установки

За умовами розроблення слід розмістити ФЕУ на даху під кутом до горизонту  $34,6^\circ$  як оптимальний кут, отриманий під час розрахунків. Фотоелектрична установка є фіксованою і кріпиться до рами. Будинок та ФЕУ спрямовані чітко на південь. 84 послідовно та паралельно з'єднаних модулі розташовані за схемою 42 x 2.

Компонування фотоелектричної установки показано на рисунку 3.2.

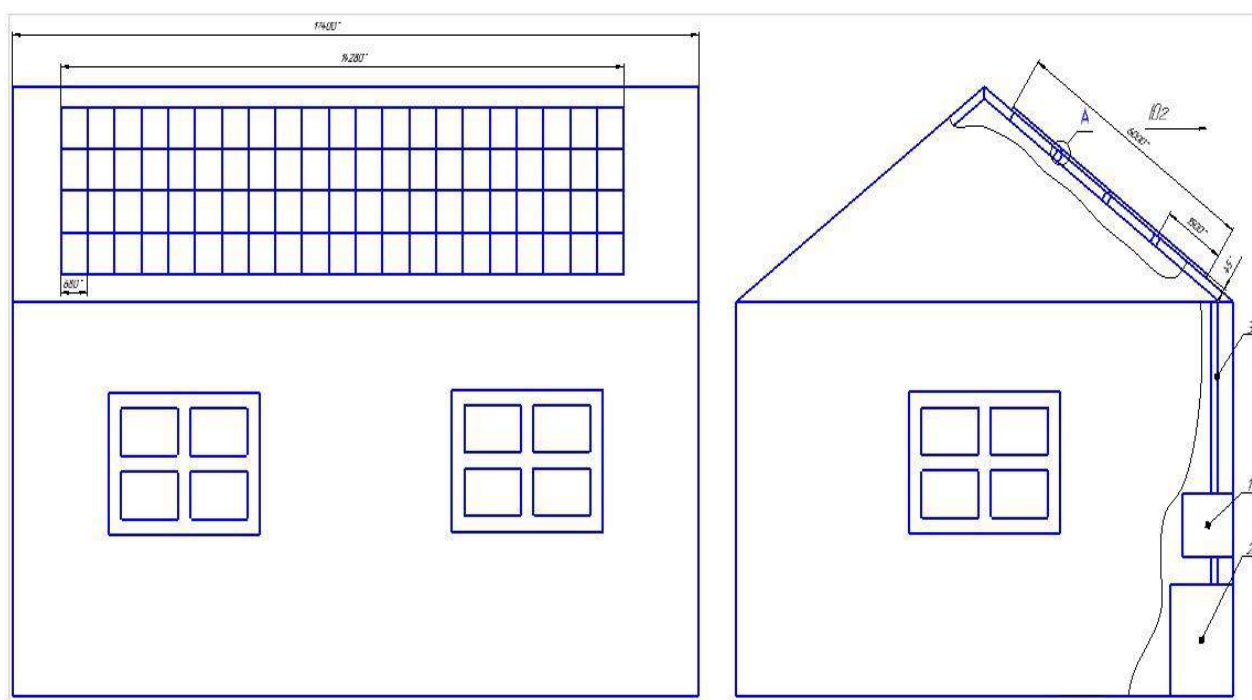


Рисунок 3.2 – Розміщення ФЕУ

На похилих дахах, орієнтованих на південь за азимутом і кутом нахилу, близькому до оптимального, монтаж сонячних батарей виконують на алюмінієвих профілях, закріплених на опорних елементах в / на покрівлі (рисунок 3.3).

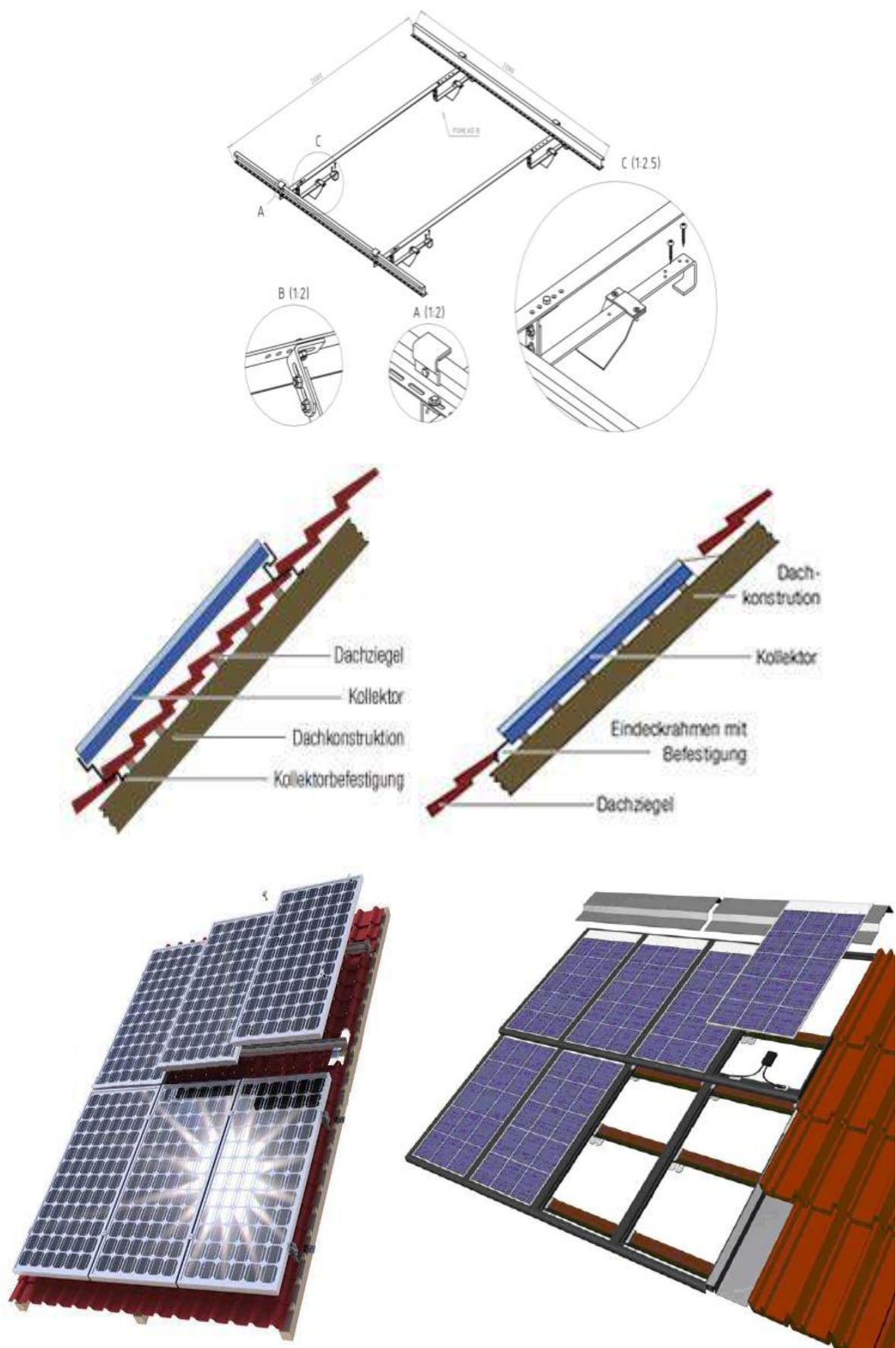


Рисунок 3.3 – Монтаж сонячних панелей на / в похилому даху

Якщо для монтажу фотоелектричних модулів використовують плоский дах, то застосовують конструкції з алюмінієвого профілю з опорними елементами з нержавіючої сталі (рисунок 3.4). На таких конструкціях монтують панелі в один або кілька ярусів, орієнтуючи їх у горизонтальній або вертикальній площині.

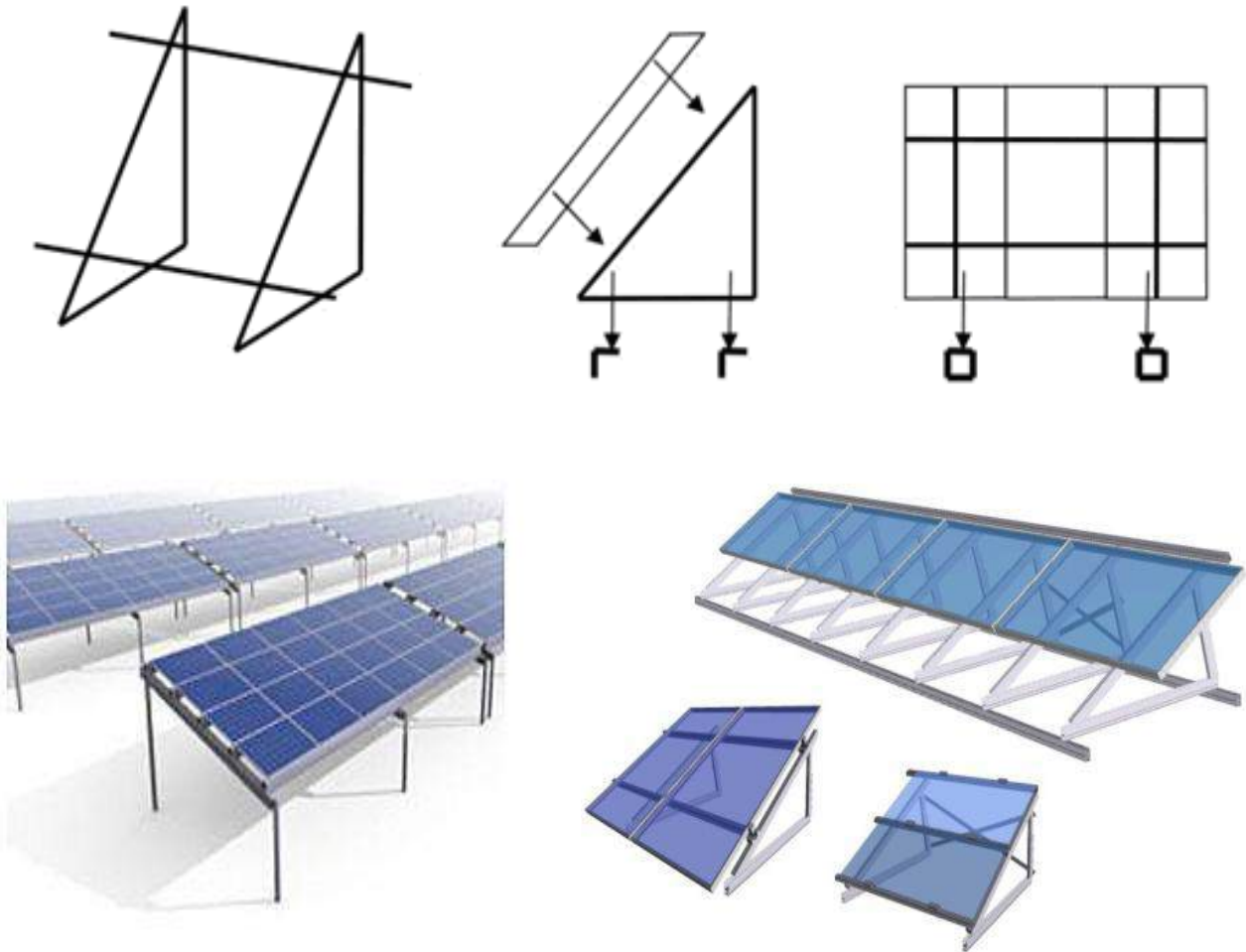


Рисунок 3.4 – Монтаж панелей на плоскому даху

Для наземного монтажу сонячні панелі виготовляють з оцинкованого сталевого або алюмінієвого профілю, зібраного в єдину конструкцію для кріплення одного або групи з декількох модулів у вертикальній або горизонтальній площині. Такі конструкції частіше встановлюють на бетонний фундамент (рисунок 3.5).

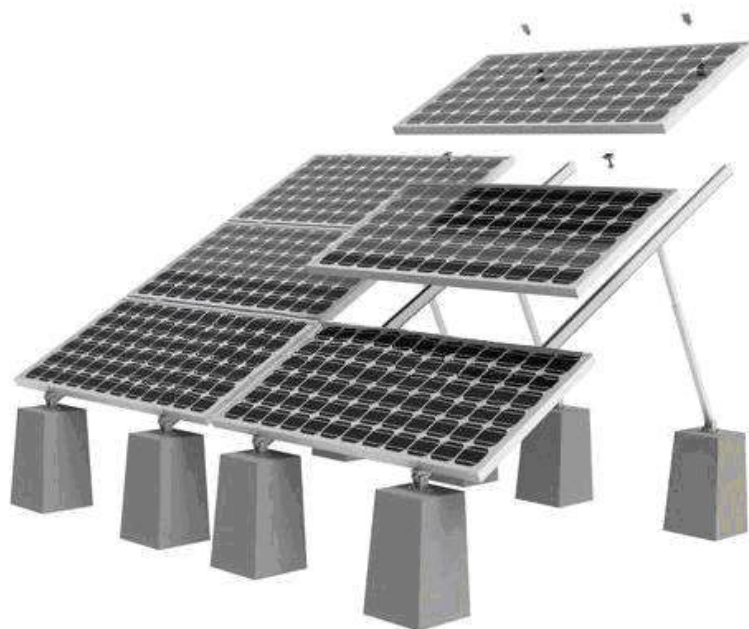
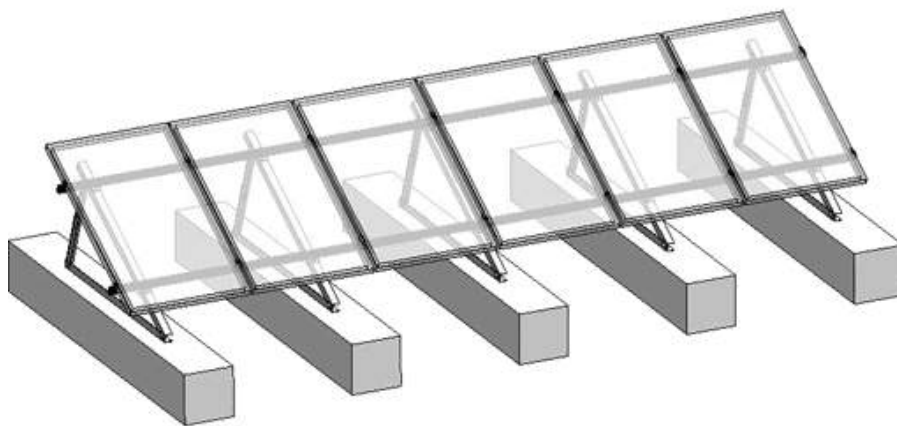
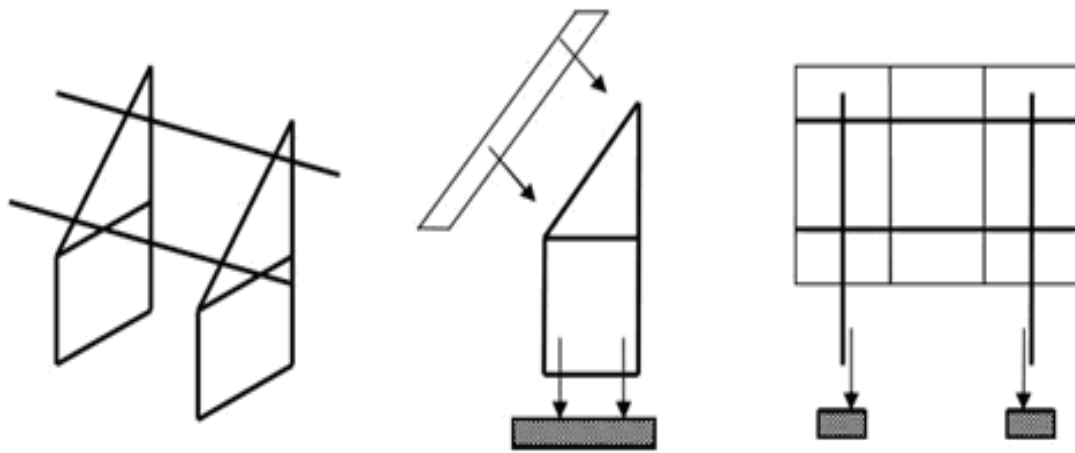


Рисунок 3.5 – Наземний монтаж сонячних панелей

При розташуванні конструкцій сонячних панелей в кілька рядів, крім правильної орієнтації і кута нахилу, дуже важливим є правильно вибрати

відстань між рядами, щоб не відбувалося взаємного затінення поверхні модулів. Для середньої смуги при оптимальному фіксованому куті нахилу найчастіше використовують просту формулу  $d = 3w$ , де  $d$  – відстань між рядами і  $w$  – висота панелі під оптимальним кутом нахилу (рисунок 3.6).

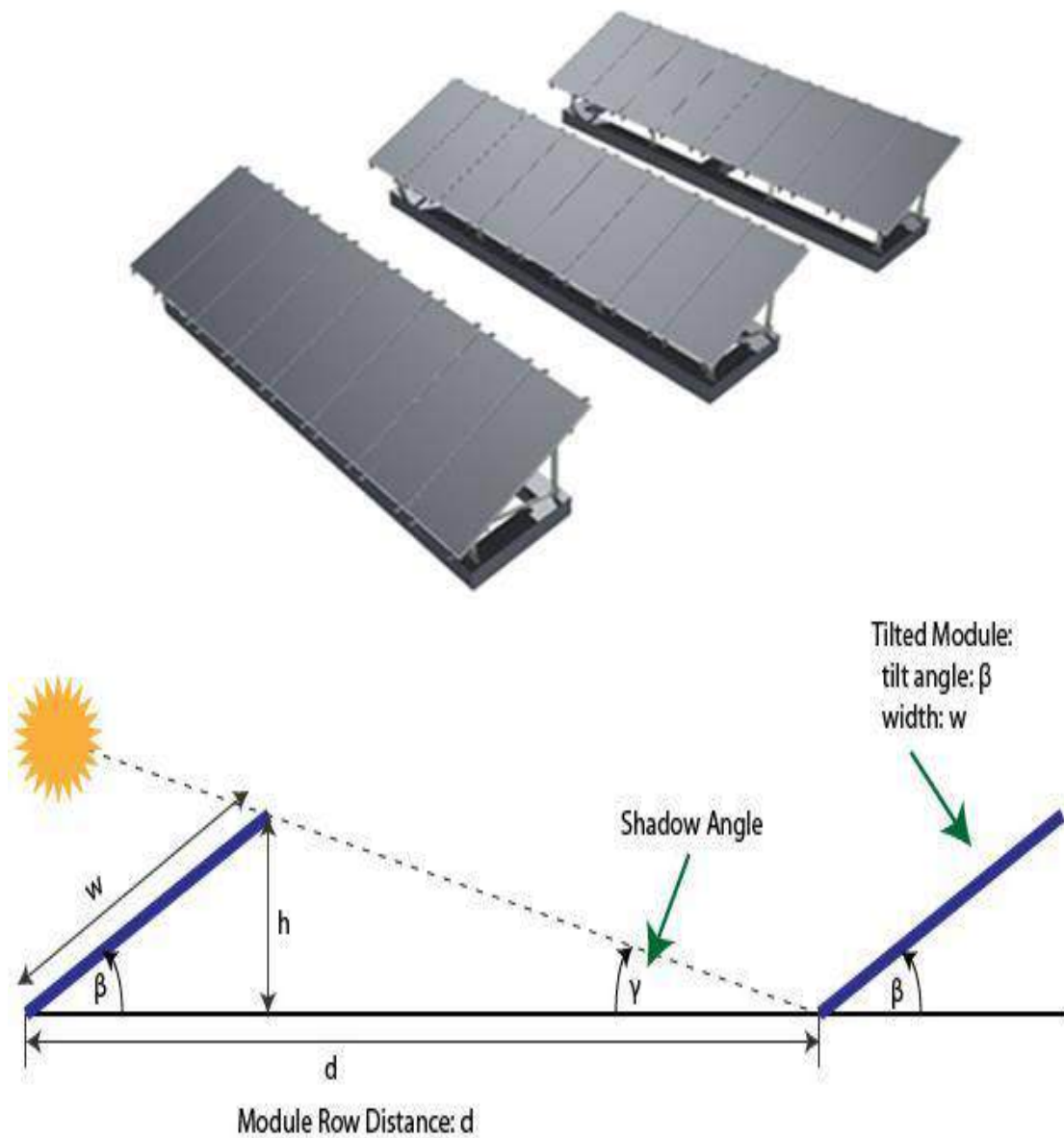


Рисунок 3.6 – Вибір міжрядної відстані

Крім стаціонарних конструкцій для встановлення фотоелектричних модулів на землі можна також застосувати поворотні в одній або двох площинах конструкції для систем спостереження за сонцем – трекерні системи орієнтації. Використання трекерів дозволяє максимально

ефективно розташувати активну поверхню сонячних панелей і значно збільшити продуктивність енергії порівняно з фіксованим розміщенням на нерухомих металоконструкціях – до 30 – 40 % (рисунок 3.7).

Трекери виготовляють із сталевих нержавіючих і алюмінієвих профілів.

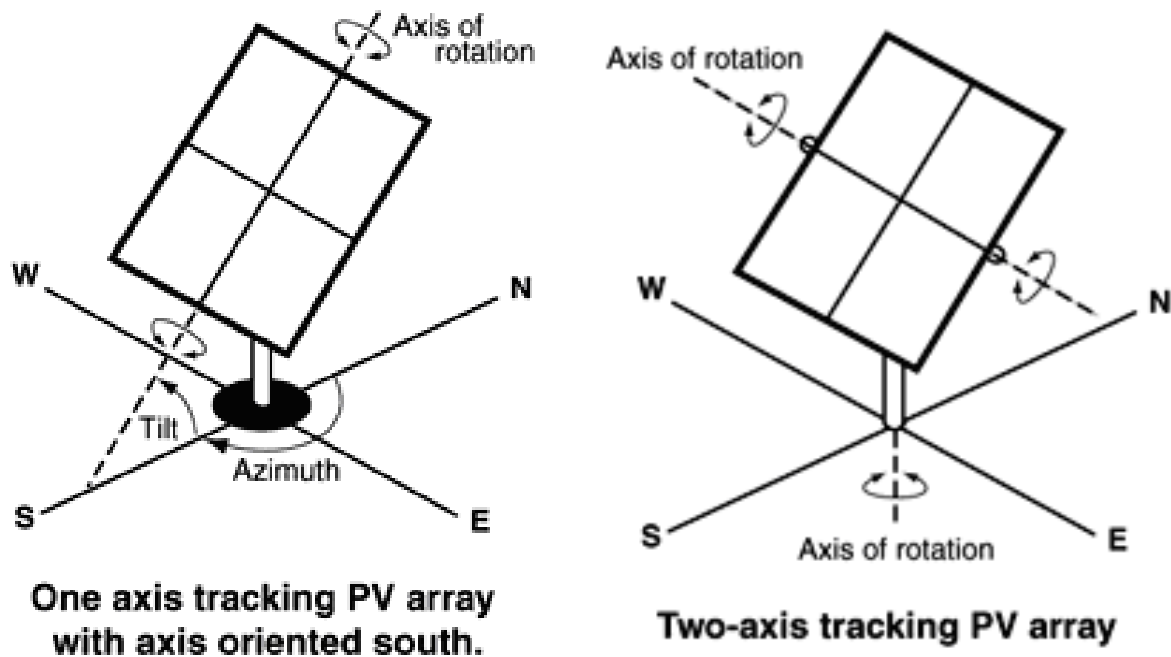


Рисунок 3.7 – Одноосьовий і двовісний трекер

Співвідношення вартості й ефективності трекерів визначає оптимальну потужність розміщених на них фотомодулів, яка може становити від одиниць до десятка кіловат.

Особливістю розроблення наземної конструкції є виготовлення опор, які встановлюються в уже приготовлені бурінням лунки діаметром 200 мм і глибиною 800 мм, які після забиваються на 200 мм і заливаються бетоном марки не нижче М200. За допомогою болтового з'єднання М8х40 кріпляться інші частини конструкції: похила, несуча, супорт і розкіс (рисунки 3.8, 3.9).





Для закріплення сонячних модулів до конструкції використовують торцеві і міжмодульні притиски, виготовлені з алюмінію. Вони кріпляться за допомогою болтів M8×25 мм для торцевих і 45-міліметрових для міжмодульних притисків. Так само застосовують тентову прокладку між алюмінієвими притисками і оцинкованим профілем, щоб уникнути виникнення корозії між металами (рисунок 3.10).

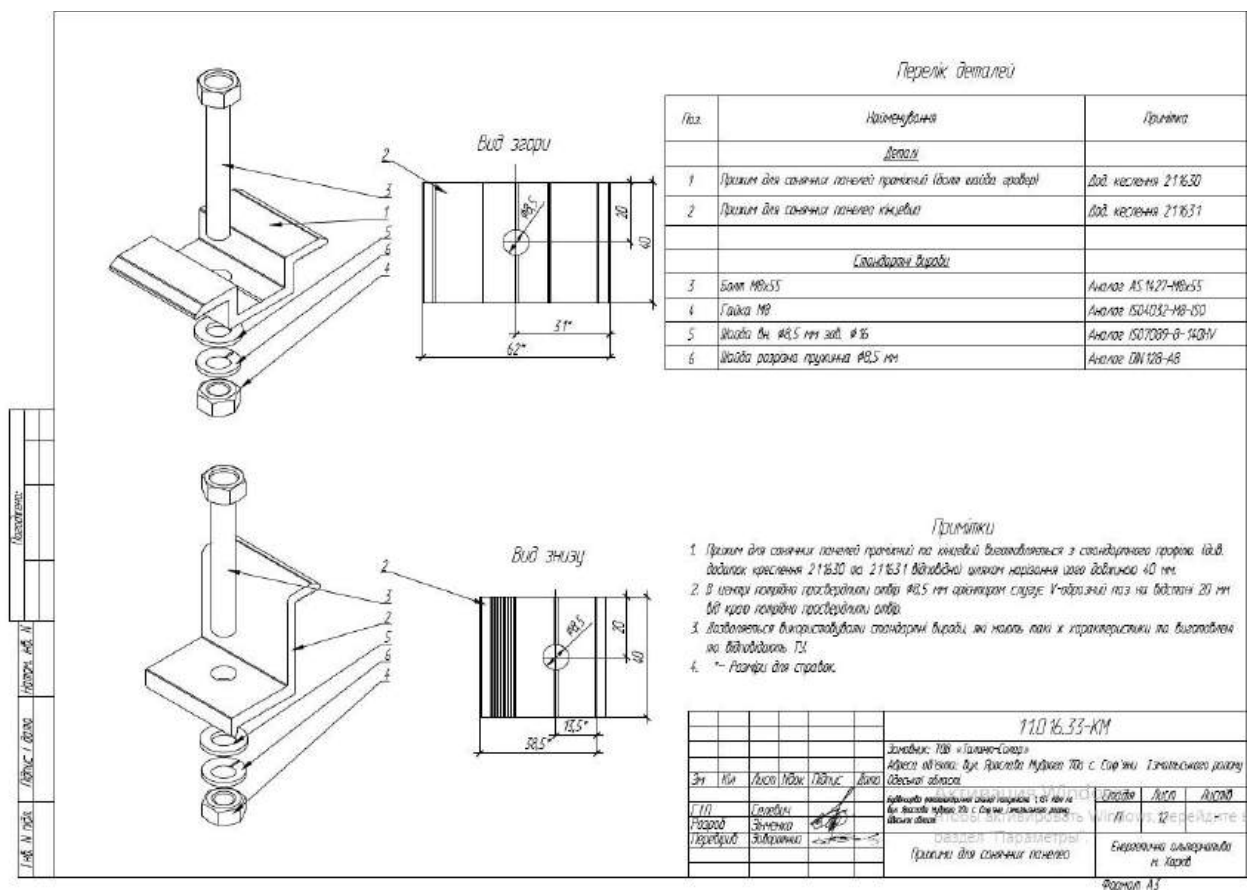


Рисунок 3.10 – Торцевий та міжмодульний притиск

При монтажі сонячних модулів використовують електропровідний кабель із поперечним перерізом 4 – 6 мм<sup>2</sup>. Ним потрібно з'єднати батареї фотоелектричні і підключити до інвертора. У комплектації використовують кабель PV4 перерізом 4 мм<sup>2</sup> і загальною довжиною 600 мм. Цього достатньо, щоб забезпечити передачу струму в необхідній кількості без перебоїв при безпечній щільності струму. Чим менше довжина кабелю, тим менше будуть втрати напруги. Згідно з

характеристиками комплектації втрати складатимуть не більше 2 %, що є допустимою нормою для такої схеми підключення.

Зазвичай кабельну лінію прокладають у С + профілю, де міститься кабель PV 4, максимальна кількість в джгуті – 14 кабелів (рисунок 3.11). Оскільки такий кабель спеціально розроблено для фотоелектричних систем, він має подвійну ізоляцію і є стійким до інфрачервоного випромінювання. Кабель PV також використовують для зовнішнього монтажу і прокладки лінії постійного струму до інвертора.

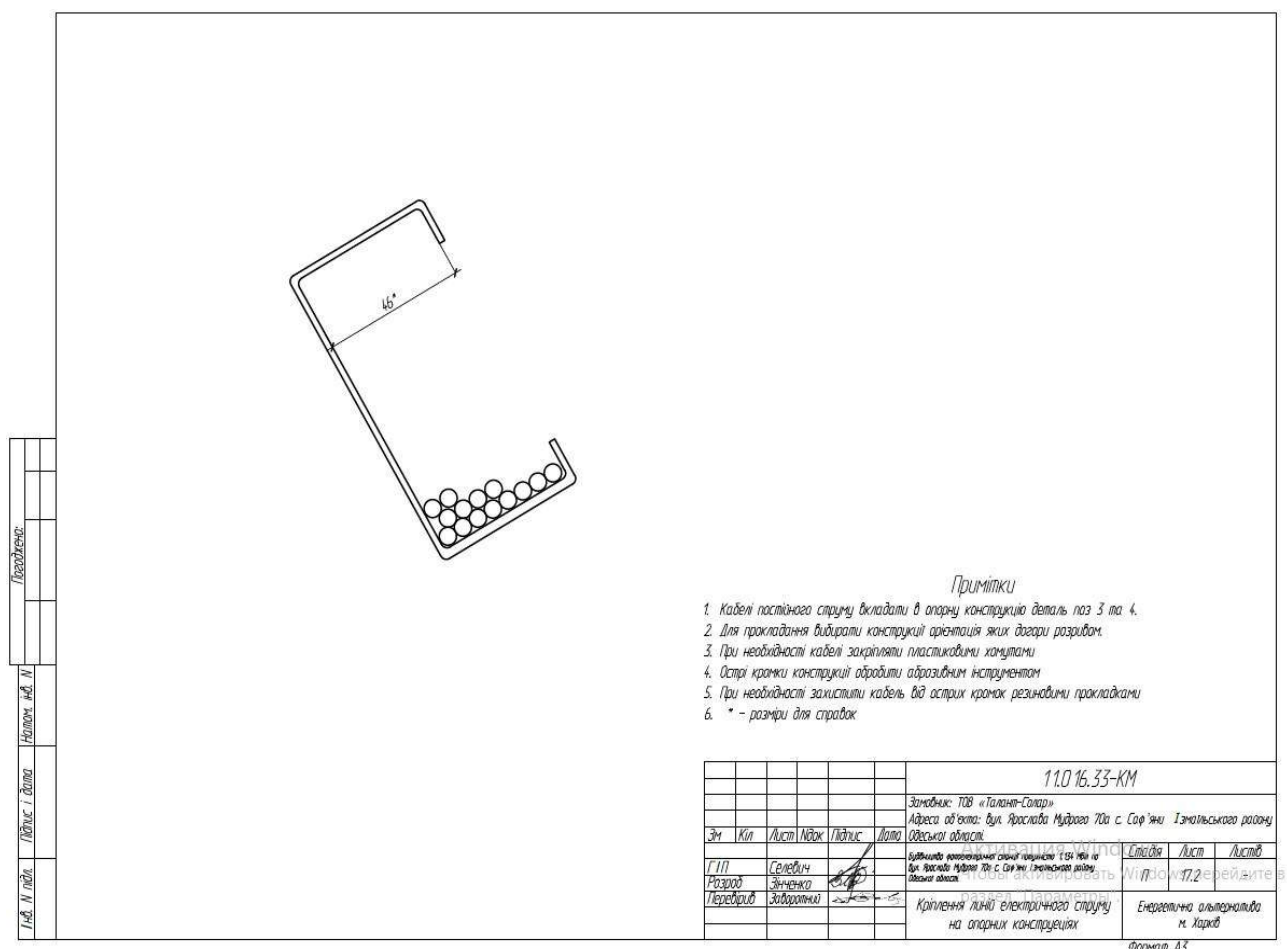


Рисунок 3.11 – Прокладка кабелю в С + профілі

Кабельну лінію змінного струму прокладають від інвертора в металевій трубі діаметром 40 мм. Трубу піднімають до інвертора із землі і кріплять до металевої смуги 40x4 мм зварюванням в зручних для цього

місцях. Смугу приєднують до розкосини зварюванням, після чого зварений шов обробляють для надання йому антикорозійного захисту.

Як герметичні роз'єднувачі для сонячної батареї вибрано MC4 [8]. Система складається зі штекера та гнізда. Вилки й розетки розташовані всередині пластикової оболонки. Упорядкування рядів панелей (стосовно сусідніх панелей та однієї щодо іншої) для більш легкого ручного монтажу відбувається натисканням на роз'єднувач MC4. Щоб відключити їх, потрібні спеціальні інструменти, щоб не був випадково вимкненим кабель. У наш час MC4 і сумісні з ними продукти є універсальними й більш практичними в альтернативній сонячній енергетиці. У комплекті міститься 21 пара MC4, чого достатньо для підключення послідовно 42 модулів. Характеристики герметичного роз'єднувача наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики MC4

№ п/п	Параметр	Значення
1	Максимальний робочий струм, А	30
2	Максимальна робоча напруга, В	1000
3	Довжина, мм	56
4	Діаметр роз'єднувача, мм	17
5	Діаметр контакту, мм	4
6	Максимальний переріз, мм	6 мм <sup>2</sup>
7	Температура експлуатації	від -40°C до +90°C
8	Клас захисту	IP67

Схему підключення MC4 зображено на рисунку 3.12.

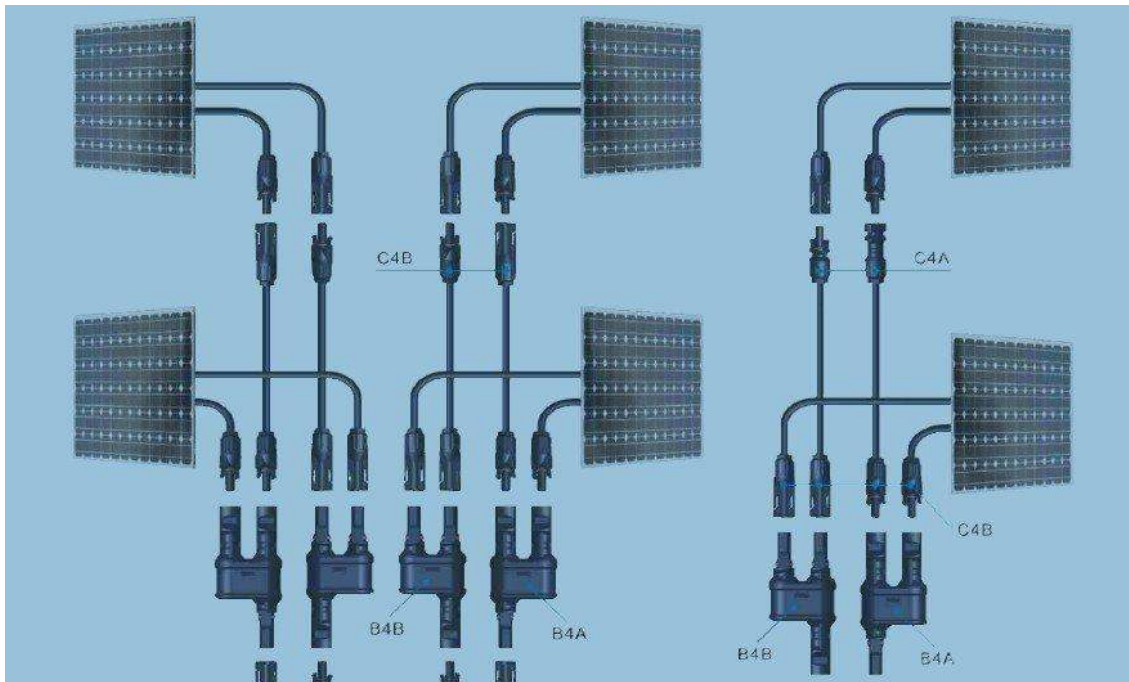


Рисунок 3.12 – Схема підключення MC4 до сонячної батареї

Для складання конструкції знадобляться болти 6-8 мм і ключі залежно від розміру придбаних болтів. Після цього можна приступити до складання металевої рами (каркасу), на якій будуть розміщені сонячні панелі. Її габарити зображено на рисунку 3.13.

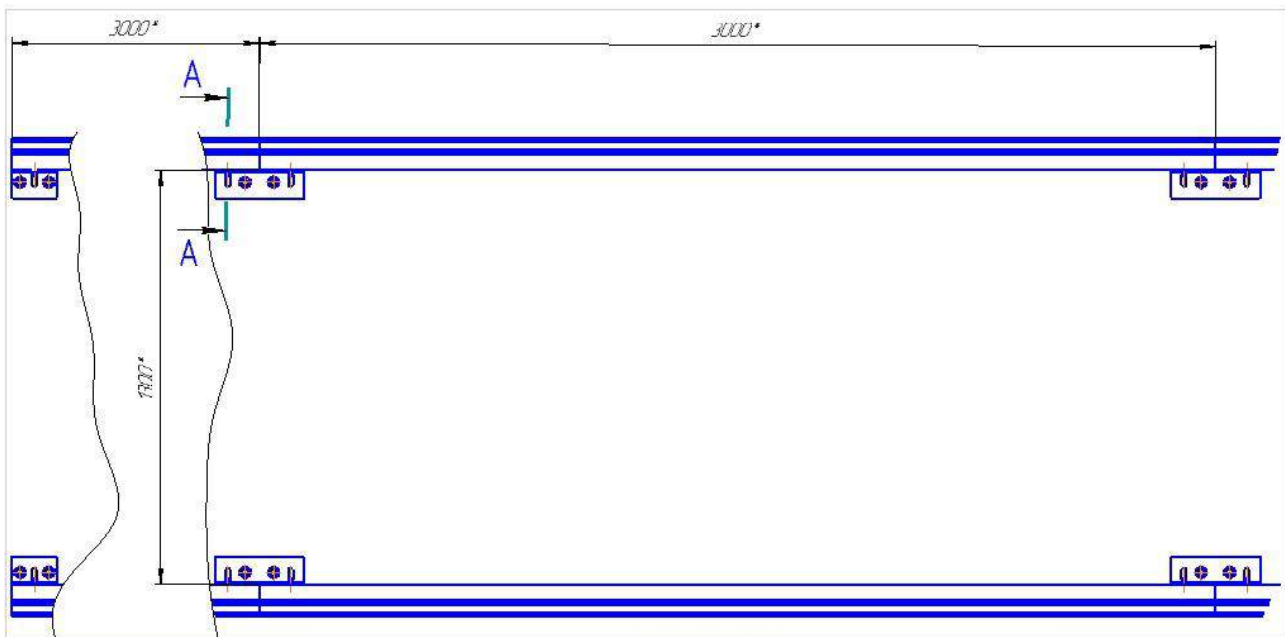


Рисунок 3.13 – Габарити рами

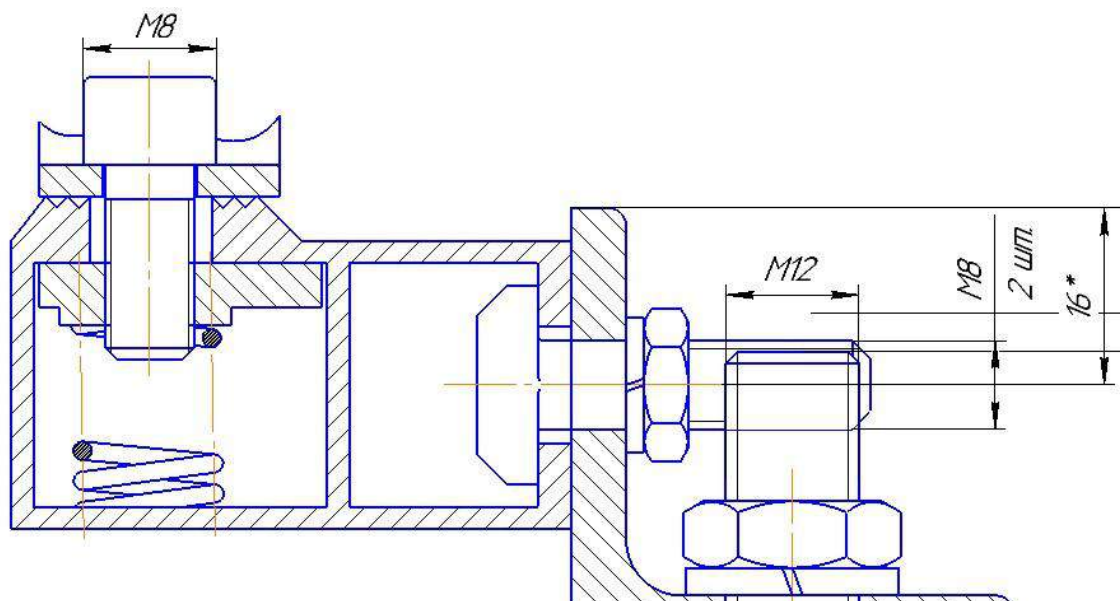


Рисунок 3.14 – Кріпильна частина

Алюмінієву раму було вибрано таким чином, щоб на двох металевих конструкціях можна було розмістити чотири модулі. Довжина однієї рами становить 3 м, а ширина модуля – 0,68 м, тобто при розміщенні чотирьох модулів залишиться зазор, що використовують для контактної проводки між БФ.

За допомогою підготовлених болтів закріплюють сонячні панелі на даху таким чином, щоб вони не зміщувалися навіть при сильних поривах вітру. Встановлюють і фіксують вісім кріпильних кутників вісьмома U-подібними скобами, після чого встановлюють і фіксують 42 профілі до кріпильних та кріпильно-з'єднувальних кутників за допомогою T-подібних болтів M8 у кількості 168 штук. На кінцевому етапі встановлюють 21 модуль у чотири ряди на раму, з'єднуючи їх T-подібними болтами з П-подібними скобами. По краях модулі фіксують Г-подібними скобами. Після виконання перелічених етапів можна переходити до підключення акумуляторів до сонячних панелей, до інверторів і контролерів і до електричної мережі даного будинку. З'єднання чотирьох модулів з кріпленнями з двома рамами було модельовано у програмному середовищі SolidWorks.

Результати зображено на рисунку 3.15.

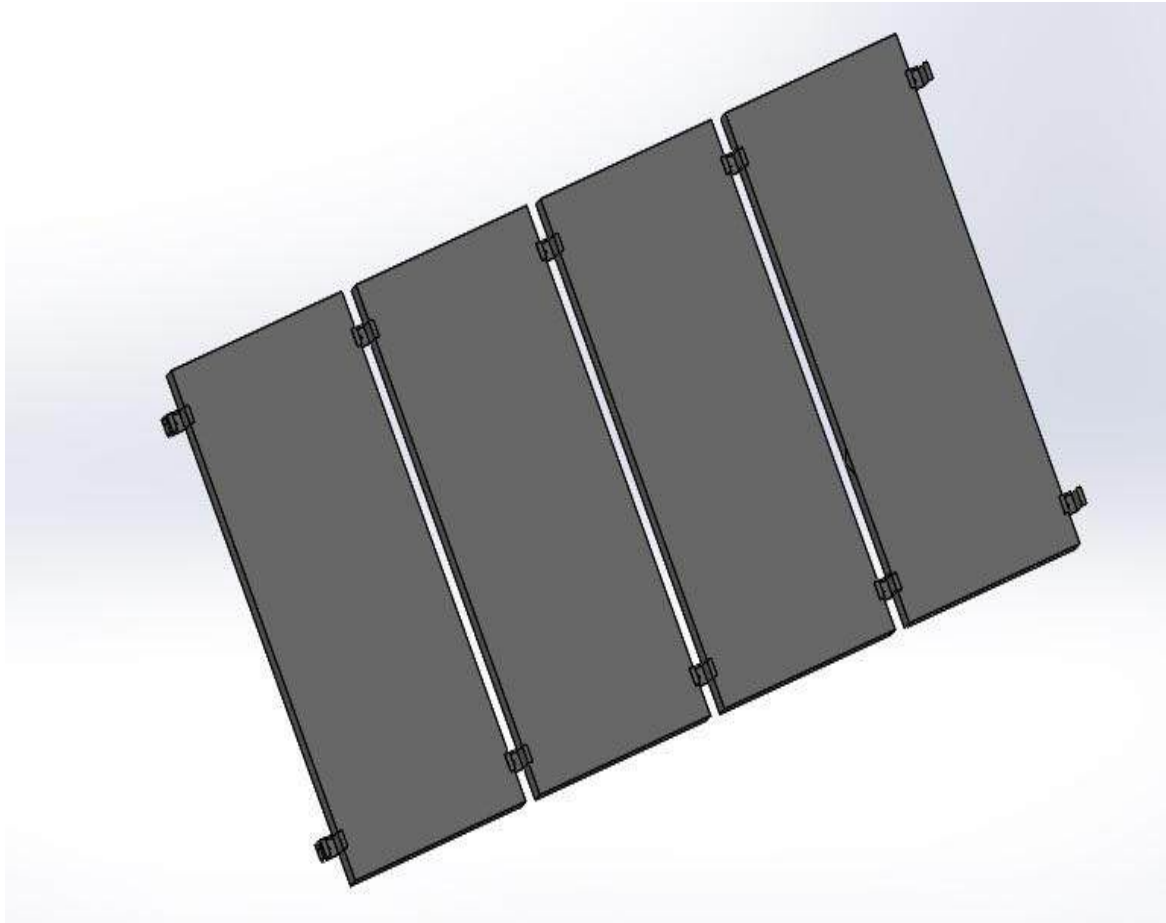


Рисунок 3.15 – Модель кріплення модулів на раму

### 3.3 Розрахунок на міцність під дією навантаження

Снігове навантаження розраховуємо за формулою

$$P_{\text{сн}} = S_0 \cdot \mu \cdot \frac{b}{2} \cdot \gamma_{f1}, \quad (3.1)$$

де  $S_0$  – середнє значення по регіону згідно з ДБН [6];

$\mu$  – коефіцієнт переходу від нормального навантаження на модуль до навантаження на похилу поверхню;

$\gamma_{f1}$  – коефіцієнт, враховуючий запас міцності у певній місцевості згідно з ДБН.

Значення  $\mu$  вибираємо залежно від кута нахилу  $\beta$  на поверхню.

Вітрове навантаження

$$q_{w1} = W_0 \cdot K_{c1} \cdot \frac{b}{2} \cdot \gamma_{f2}, \quad (3.2)$$

де  $W_0$  – нормативне вітрове навантаження згідно з ДБН [6];  
 $K_{c1}$  – коефіцієнт, враховуючий опір вітру на певній висоті;  
 $\gamma_{f2}$  – коефіцієнт міцності при вітровому навантаженні згідно з ДБН;

$$W_0 = \frac{\rho V^2}{2} \cdot A, \quad (3.3)$$

де  $A$  – це площа поверхні, на яку діє навантаження.

На практиці використовують програмне середовище для того, щоб звірити з результатами розрахунків. У подальшому приймаємо, що сніг діє на поверхню рівномірно по всьому модулю. Модулі розташовані під кутом  $34,6^\circ$ , завдяки чому виникає необхідність закріпити їх U-подібними скобами на рамі. Для розрахунку в програмному середовищі SolidWorks було задано характеристики матеріалу для рами та модулів.

Силкові фактори було використано з показників розташування енергоустановки. Всі характеристики вказано в роботі [9], а також у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри снігового та вітрового навантаження на модуль, розташований на даху (висота будівлі 10 метрів)

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
Снігове навантаження $S_o$	450	Н/мм <sup>2</sup>
Вітрове навантаження $W_o$	1370	Н/мм <sup>2</sup>
Товщина стінки ожеледі $b$	21	мм

Густина льоду, що діє на модуль, становить  $917 \text{ кг/м}^3$ . Таким чином, поверхня даху покривається льодом товщиною 21 мм, тобто навантаження становить  $180 \text{ Н/мм}^2$ . Навантаження є рівномірним, без

врахування кутів нахилу модуля (товщина стінки ожеледі зі збільшенням кута нахилу буде більшою, тобто застосовано спрощену схему навантаження). Вітер із силою  $1370 \text{ Н/мм}^2$  діє на модуль під кутом  $34,6^\circ$ , під яким модуль розташовано на криші. Результати навантаження зображено на рисунках 3.16 – 3.19.

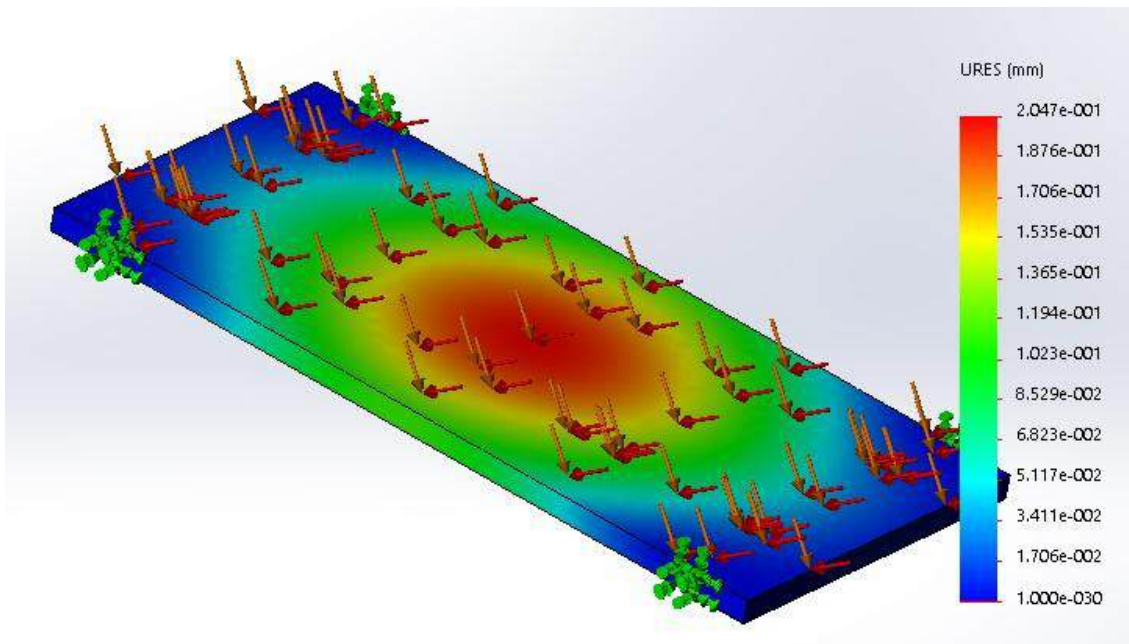


Рисунок 3.16 – Переміщення снігу та ожеледі під дією сил вітру

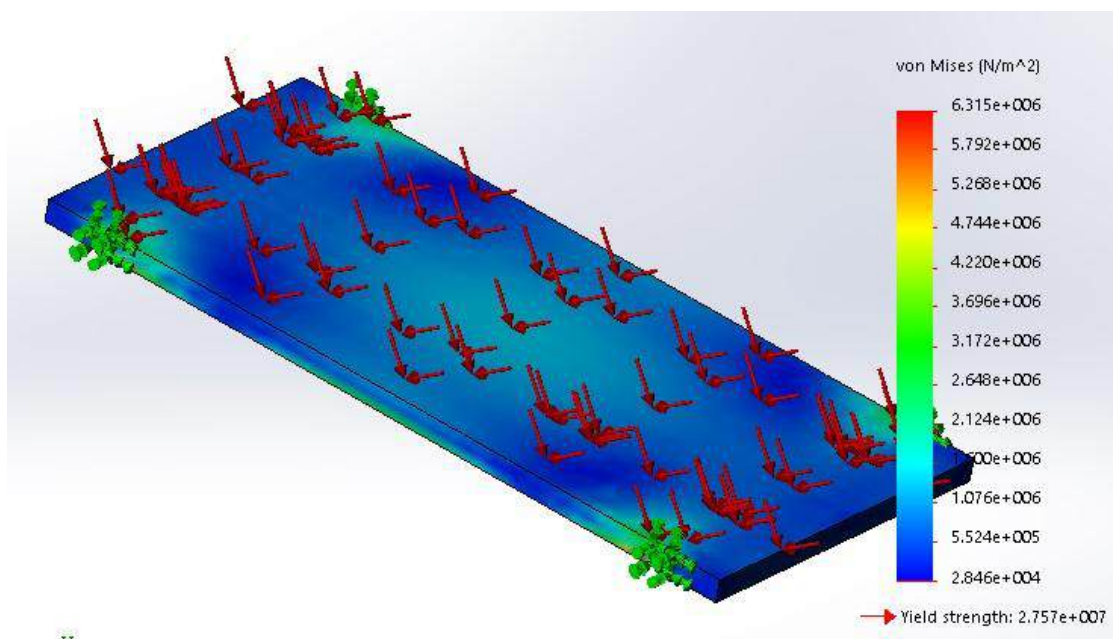


Рисунок 3.17 – Напруження снігу та ожеледі під дією сил вітру

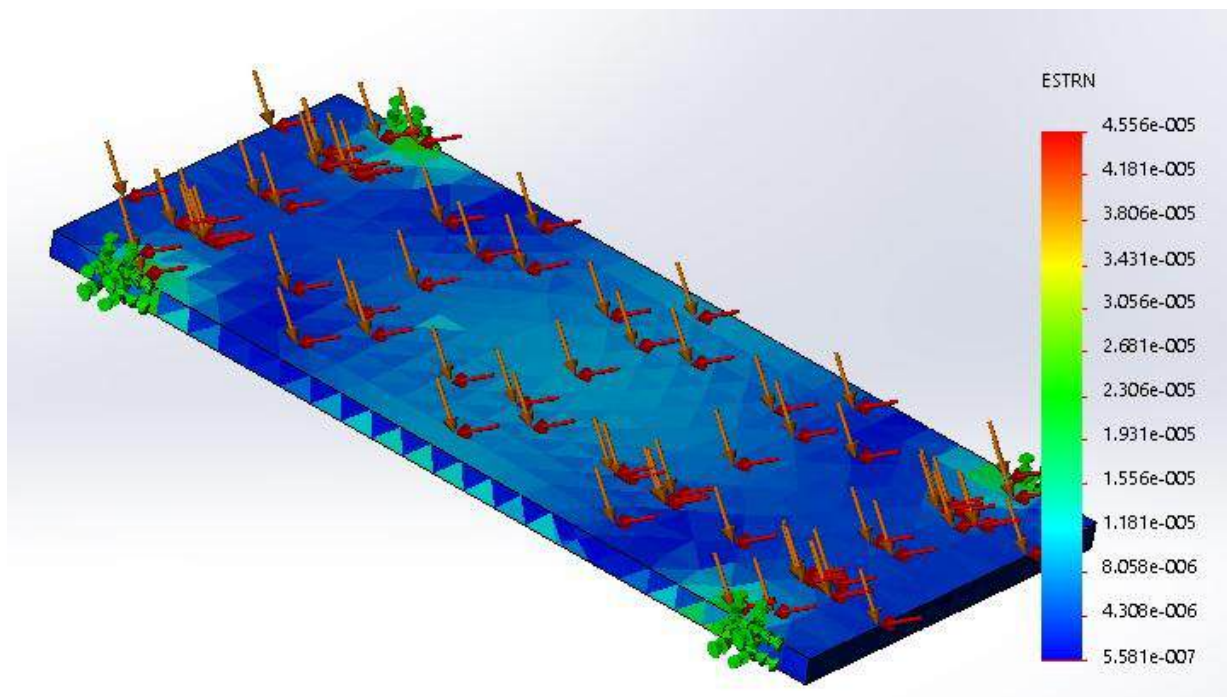


Рисунок 3.18 – Деформація снігу та ожеледі під дією сил вітру

Коефіцієнт запасу міцності становить 4,4, що повністю задовольняє умови експлуатації установки.

### 3.4 Розрахунок структурної надійності сонячної батареї

Модулі підключені за схемою 42x2, де 42 – послідовне, а 2 – паралельне підключення. У зв'язку з цим схему розрахунку структурної надійності модуля фотоелектричної батареї показано на рисунку 3.19.

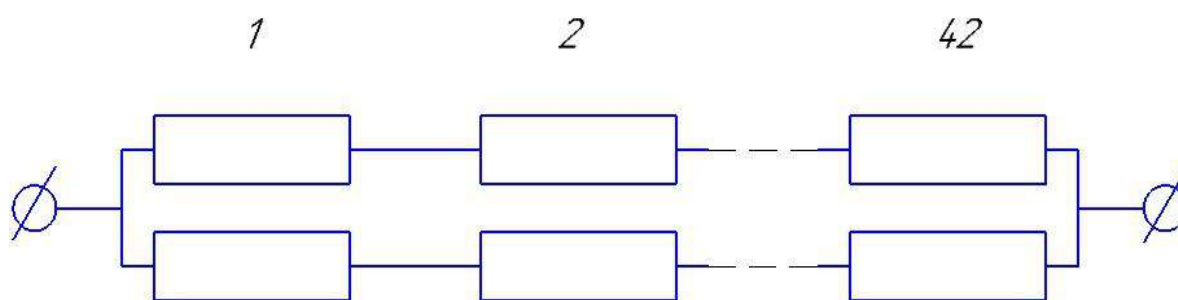


Рисунок 3.19 – Схема розрахунку надійності модуля

Для того, щоб визначити ймовірність відмов, як показник надійності модуля варто знати ймовірність відмов кожного фотоперетворювача.

Це можна розрахувати за довідковими значеннями  $\lambda$ :

$$P_{\text{ФЕП}} = e^{-\lambda\tau}, \quad (3.4)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмови фотоперетворювача (типове  $\lambda=10^{-7}$  1/год);

$\tau$  – час експлуатації СЕУ,  $\tau = 30$  років = 262800 годин;

$$P_{\text{ФЕП}} = e^{-\lambda\tau} = e^{-10^{-7} \cdot 262800} = 0,9741.$$

Визначимо надійність модуля за формулою

$$P_M = [1 - (1 - P_{\text{ФЕП}})^{m_{\text{ел}}}]^{N_{\text{ел}}}, \quad (3.5)$$

де  $m_{\text{ел}}$  – кількість, паралельно з'єднаних елементів у модулі,  $m_{\text{ел}} = 2$ ;

$N_{\text{ел}}$  – кількість послідовно з'єднаних елементів у модулі,  $N_{\text{ел}} = 42$ .

$$P_M = [1 - (1 - P_E)^{m_{\text{ел}}}]^{N_{\text{ел}}} = [1 - (1 - 0,9741)^2]^{42} = 0,9722.$$

**Висновки.** За результатами конструювання створено фотоелектричний модуль, несучу конструкцію (раму) та у програмному забезпеченні SolidWorks змодельовано навантаження під дією сил вітру, снігу та ожеледі. У результаті одержане значення цілком задовольняє вхідним умовам.

## ВИСНОВКИ

У результаті проектування та конструювання автономної сонячної енергетичної установки для дачного будинку, що розташований у північно-східному регіоні України, було отримано такі величини:

- середньодобове споживання ( $P_{\text{сер}}$ ) – 1,84 кВт;
- середньорічне проникнення сонячної радіації ( $E_{\text{сер}}$ ) – 3,28 кВт · год/м<sup>2</sup>;
- кількість модулів – 84 (36 фотоелементів; розмір – 1500x680 мм; схема розміщення – 42x2);
- потужність установки ( $P_{\text{уст}}$ ) – 12,8 кВт;
- окупність – 5,7 років
- собівартість – ~300000 грн ( залежно від курсу \$).

У результаті було модельовано навантаження на конструкцію сонячної установки під дією сил вітру, снігу та ожеледі згідно з кліматичними особливостями міста Рубіжне. Визначено, що максимальне переміщення під навантаженням становитиме 0,247 мм, а напруження досягнутої межі – 6,315 МПа, що є допустимим для спроектованої установки.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
2. Перспективи альтернативної енергетики в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zet.in.ua/news/perspektivi-alternativno%D1%97-energetiki-v-ukra%D1%97ni/>.
3. Безручко, К. В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии: учеб. пособие / К. В. Безручко, С. В. Губин. – Харьков: ХАИ, 2007. – 310 с.
4. NASA Surface meteorology and Solar Energy [Електронний ресурс] // Surface meteorology and Solar Energy. – Режим доступу: [https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=217142&lat=51&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=skip@larc.nasa.gov&p=grid\\_id&p=swv\\_dwn&p=exp\\_df&step=2&lon=36](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=217142&lat=51&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=skip@larc.nasa.gov&p=grid_id&p=swv_dwn&p=exp_df&step=2&lon=36).
5. Аккумулятор герметичный свинцово-кислотный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tinko.ru/catalog/product/237683/>.
6. Контроллер для солнечных панелей Blue Solar MPPT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.solnechnye.ru/controllery-zaryada/Victron-BlueSolar-MPPT-150-70-70A-12-24-48V.htm>.
7. Преимущества солнечных фотоэлектрических модулей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://solarempire.ru/solnechnie-moduli-fsm.html>.
8. MC- 4 - коннекторы для солнечных панелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.alternative-energy.com.ua/vocabulary/mc-4-коннекторы/>.
9. Державні будівельні норми України. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів ДБН В.1.2-14:2018 / Офіційне видання. Київ. Міністерство регіонального розвитку,

- будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018. – 30 с.
10. Лахтин, Ю. М. Основы металловедения / Ю. М. Лахтин. – М.: Науч.-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1957. – 460 с.
  11. Тарифы на электроэнергию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://index.minfin.com.ua/tarif/electric/>.
  12. Стоимость монтажа солнечных батарей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teplo.guru/eko/solnechnye-batarei-dlya-doma.html>.
  13. PVCDROM Christiana Honsberg и Stuart Bowden [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pvcdrom.pveducation.org/RU/>.
  14. Положение Солнца [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ust.su/solar/media/section-inner79/2866/>.

Навчальне видання

**Губін Сергій Вікторович  
Сінченко Світлана Володимирівна**

## **ПРОЕКТУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК**

Редактор В. М. Коваль

Зв. план, 2019

Підписано до видання 25.09.2019

Ум. вид. арк. 3,6. Обл.-вид. арк. 4. Електронний ресурс

---

Видавець і виготовлювач  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)  
Видавничий центр «ХАІ»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК N 391 від 30.03.2001