

Лабораторна робота №2

Тема: Розробка імітаційної моделі діючої сонячної електростанції

Мета: Ознайомлення з принципами роботи сонячної електростанції та методами імітаційного моделювання. Розробка та дослідження імітаційної моделі функціонування сонячної електростанції для оцінки її продуктивності в залежності від різних параметрів, таких як інтенсивність сонячного випромінювання, кут нахилу панелей, температурні умови та інші фактори.

Завдання:

Створення математичного апарату для визначення сумарної сонячної радіації як складової частини моделі сонячної електростанції.

Результатом роботи є визначення сумарної сонячної радіації в кожен момент часу з подальшим використанням програми в моделі прогнозування експлуатаційних характеристик сонячної електростанції.

Теоретичні матеріали

Задачею сонячної електростанції є генерація електричної енергії. Ефективність використання встановленої потужності залежить від потоку сонячної енергії, яка сприймається панеллю електростанції. З метою підвищення надходження сонячної інсоляції приймаючу поверхню намагаються повертати перпендикулярно до Сонця, тобто так, щоб кут між сонцем і панеллю, що приймає, був мінімальним.

На рис. 1 показано характеристики, що задають розташування панелі сонячної електростанції щодо положення Сонця, де β – кут нахилу панелі щодо землі; γ – азимутальний кут установки приймальною панеллю, град.; ϑ_z – зенітний кут, град.; ϑ – кут падіння сонячного випромінювання, град.; 1 і 2 – нормалі до горизонтальної та похилої площин; W, S, E, N – сторони світла, відповідно.

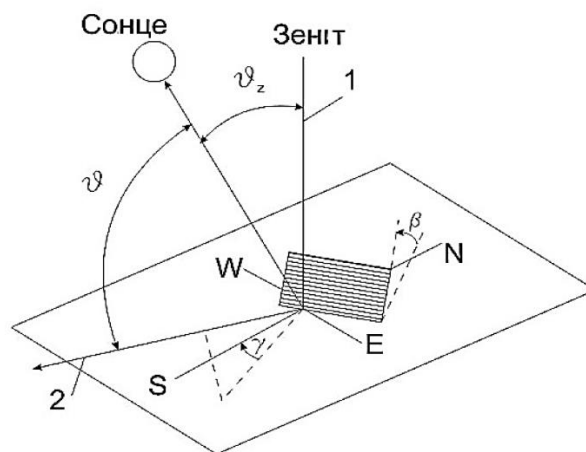


Рис.1. Схема орієнтації поверхні, приймаючої сонячне випромінювання

Сумарна сонячна радіація дорівнює сумі прямої, розсіяної та відбитої інсоляцій:

$$\begin{aligned} I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} &= I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{розс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{відобр}}^{\beta\gamma} = \\ &= I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos\vartheta}{\cos\vartheta_z} + I_{\text{розс}}^{\text{гор}} \frac{1+\cos\beta}{2} + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \frac{1-\cos\beta}{2}, \quad (1) \\ I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} &= I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{розс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{відобр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \cdot \frac{\cos\vartheta}{\cos\vartheta_z} + I_{\text{розс}}^{\text{гор}} \cdot \frac{1+\cos\beta}{2} + \rho \cdot I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \cdot \frac{1-\cos\beta}{2} \end{aligned}$$

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

$I_{\text{пр}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{розс}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$ - значення прямої, розсіяної та сумарної сонячної радіації, що падає на горизонтальну поверхню;

ρ - альbedo до земної поверхні. Альbedo - здатність поверхонь або окремих тіл відбивати сонячну радіацію. Визначається в долях потоку радіації, що поступає на поверхню.

Найбільше альbedo у снігу - 70-90 %, що сильно затримує його танення, особливо в Заполяр'ї. У піску до 35 %, у трав'яного покриття 20-25 %, у лісових крон від 5 до 20 %. Найменше альbedo у води - 5 % і зораних ґрунтів (чорноземі 5 %, підзоли до 20 %). Це самі теплоємні поверхні. Загальне альbedo земної кулі близько 40 %.

Величина кута ϑ визначається з рівняння

$$\cos \vartheta = (A - B) \cdot \sin \sigma + [C \cdot \sin \omega + (D + E) \cdot \cos \omega] \cdot \cos \sigma. \quad (2)$$

Коефіцієнти A, B, C, D, E обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} A &= \sin \phi \cdot \cos \beta; B = \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma; \\ C &= \sin \beta \cdot \sin \gamma; D = \cos \phi \cdot \cos \beta; \\ E &= \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma, \end{aligned} \quad (3)$$

де ϕ - широта місцевості, де встановлені панелі, град;

β - кутове схилування Сонця, град;

γ - азимутальний кут встановлення приймального майданчика, град., який при розміщенні на південь $\gamma = 0^\circ$; при розвороті на схід γ вважається позитивним, на захід - негативним,

ω - часовий кут Сонця, град.

Зенітний кут Сонця визначається за виразом:

$$\vartheta_z = \arccos[\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega]. \quad (4)$$

Кут висоти підйому Сонця над обрієм h обчислюється за формулою:

$$h = 90^\circ - \vartheta_z \quad (5)$$

Азимутальний кут положення Сонця A_z є рішенням рівняння:

$$\cos A_z = \frac{\sin \phi \cdot \sin h - \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos h}. \quad (6)$$

Часовий кут обчислюється за формулою:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12 - T_{\text{ув}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi, \quad (7)$$

де t - поточний офіційний місцевий час;

ΔT_{UTC} - різниця між місцевим офіційним часом та середнім часом за Грінвічем, год;

ψ - географічна довгота точки розміщення приймального майданчика, град.

Часова поправка на рівняння часу визначається за такою формулою:

$$T_{\text{ув}} = 0,11 \cdot \sin(2B) - 0,08 \cdot \cos(B) - \sin(B), \quad (8)$$

де $B = (0,986 \cdot N - 79,866)$ град; N - номер календарного дня з початку року.

Кут похилування знаходиться за формулою:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(0,986 \cdot N + 280,024). \quad (9)$$

Кути сходу ω_n і заходу ω_k Сонця за сонячним часом визначаються з виразів:

$$\omega_n, \omega_k = 0 \pm \arccos[-\tan \phi \cdot \tan \delta]. \quad (10)$$

Для врахування реальних характеристик сонячної радіації, що приходить на певну територію, при моделюванні використовуються середні для заданого місяця значення індексу прозорості атмосфери K_t :

$$K_T = \frac{I_{\text{сум}}^{\text{гор}}}{I_0}, \quad (11)$$

Значення сумарної сонячної радіації, що падає на горизонтальну поверхню $I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$ визначається за даними NASA (Таблиця 1)

I^0 - позаатмосферна радіація на горизонтальну поверхню, що визначається за формулою:

$$I_0 = I_{\text{sun}} \cdot [1 + 0,033 \cdot \cos(0,986 \cdot N)] \cdot \cos(\vartheta_z) \quad (12)$$

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

Для визначення осереднених значень розсіяної та сумарної радіації використовуються матеріали NASA, які надають осереднені протягом 22 років сонячної інсоляції на 1 м^2 поверхні протягом доби (світлового дня) у містах, вказаних в таблиці. Використовуючи дані таблиці 1 визначаємо осереднену сумарну сонячну інсоляцію на горизонтальну поверхню $I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$.

Таблиця 1. Сонячна інсоляція в різних містах України за даними NASA ($I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$)

	січ	лют	бер	квіт	трав	лип	черв	серп	вер	жовт	лист	груд	рік
Симферополь	1,27	2,06	3,05	4,30	5,44	5,84	6,20	5,34	4,07	2,67	1,55	1,07	3,58
Вінниця	1,07	1,89	2,94	3,92	5,19	5,3	5,16	4,68	3,21	1,97	1,10	0,9	3,11
Луцьк	1,02	1,77	2,83	3,91	5,05	5,08	4,94	4,55	3,01	1,83	1,05	0,79	2,99
Дніпро	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,70	5,08	3,66	2,27	1,20	0,96	3,36
Донецьк	1,21	1,99	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,09	3,67	2,24	1,23	0,96	3,34
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83	3,04
Ужгород	1,13	1,91	3,01	4,03	5,01	5,31	5,25	4,82	3,33	2,02	1,19	0,88	3,16
Запоріжжя	1,21	2,00	2,91	4,20	5,62	5,72	5,88	5,18	3,87	2,44	1,25	0,95	3,44
Івано-Франківськ	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94
Київ	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86	3,10
Кропивницький	1,20	1,95	2,96	4,07	5,47	5,49	5,57	4,92	3,57	2,24	1,14	0,96	3,30
Луганськ	1,23	2,06	3,05	4,05	5,46	5,57	5,65	4,99	3,62	2,23	1,26	0,93	3,34
Львів	1,08	1,83	2,82	3,78	4,67	4,83	4,83	4,45	3,00	1,85	1,06	0,83	2,92
Миколаїв	1,25	2,10	3,07	4,38	5,65	5,85	6,03	5,34	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Одеса	1,25	2,11	3,08	4,38	5,65	5,85	6,04	5,33	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Полтава	1,18	1,96	3,05	4,00	5,40	5,44	5,51	4,87	3,42	2,11	1,15	0,91	3,25
Ровно	1,01	1,81	2,83	3,87	5,08	5,17	4,98	4,58	3,02	1,87	1,04	0,81	3,01
Суми	1,13	1,93	3,05	3,98	5,27	5,32	5,38	4,67	3,19	1,98	1,10	0,86	3,16
Тернопіль	1,09	1,86	2,85	3,85	4,84	5,00	4,93	4,51	3,08	1,91	1,09	0,85	2,99
Харків	1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46	5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,9	3,26
Херсон	1,30	2,13	3,08	4,36	5,68	5,76	6,00	5,29	4,00	2,57	1,36	1,04	3,55
Хмельницький	1,09	1,86	2,87	3,85	5,08	5,21	5,04	4,58	3,14	1,98	1,10	0,87	3,06
Черкаси	1,15	1,91	2,94	3,99	5,44	5,46	5,54	4,87	3,40	2,13	1,09	0,91	3,24
Чернігів	0,99	1,80	2,92	3,96	5,17	5,19	5,12	4,54	3,00	1,86	0,98	0,75	3,03
Чернівці	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94

Індекс K_T , коректніше записати у вигляді

$$K_T = I_{\text{сум}}^{\text{гор}} / \int_0^{24} I_0(t) \quad (13)$$

оскільки табличні дані дають саме добову значення сумарного випромінювання.

Величина розсіяної радіації визначається з залежності

$$I_{розс}^{гор} = \frac{I_{сум}^{гор}}{1 + e^{(-5+8,6 \cdot K_T)}} \quad (14)$$

Показники, які ми визначили на основі осереднених значень $I_{пр}^{гор}$, $I_{розс}^{гор}$, $I_{сум}^{гор}$ не дають нам інформації по зміні падаючого випромінювання протягом доби.

Єдиний результат, прив'язаний до доби та часу доби – результат залежності 12. В рамках виконання лабораторного завдання зміню $I_{сум}^{гор}(t)$ протягом доби проводиться з залежностей:

$$\begin{aligned} I_{сум}^{гор}(t) &= K_T \cdot I_0(t) \\ I_{розс}^{гор}(t) &= \frac{K_T \cdot I_0(t)}{1 + e^{(-5+8,6 \cdot K_T)}} \\ I_{відобр}^{гор}(t) &= \rho \cdot I_{сум}^{гор}(t) \\ I_{пр}^{гор}(t) &= I_{сум}^{гор}(t) - I_{розс}^{гор}(t) - I_{відобр}^{гор}(t) \\ I_{сум}^{\beta\gamma}(t) &= I_{пр}^{гор}(t) \cdot \frac{\cos\vartheta}{\cos\vartheta_z} + I_{розс}^{гор}(t) \cdot \frac{1+\cos\beta}{2} + I_{відобр}^{гор}(t) \cdot \frac{1-\cos\beta}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

Миттєвий показник сонячної радіації визначається за формулою 15, результуючий – інтегруванням

$$W_{сут}(N) = \int_0^{24} I_{сум}^{\beta\gamma} dt. \quad (16)$$

Матеріали для захисту лабораторної роботи:

1. Лістинг програми;
2. Графік (таблицю) змін величини сонячної інсоляції протягом доби один день у грудні, квітні, липні, вересні.
3. Графік (таблицю) залежності сумарної радіації, падаючої на поверхню сонячної панелі при зміні кута нахилу (β)/ напряму розміщення (γ) панелі.

Бажаючи можуть виконати роботу не спираючись на запропоновану модель, а використовуючі інші матеріали, які дозволяють побудувати звіт з наданням інформації в об'ємі, наведеному вище. В такому випадку необхідно надати додатково посилання на матеріал, який став основою моделі.

Додаткова інформація

Студентам, хто зацікавлений у завершенні роботи зі створенням моделі, яка пов'язує інтенсивність сонячного випромінювання з результуючою генерацією електричної енергії пропоную завершити роботу з урахуванням формул 17-19 та даних панелей з їх технічних характеристик.

Максимальна вихідна потужність сонячної панелі розраховується з використанням залежності:

$$P_{PV} = C_{FF} \cdot \eta_{conv} \cdot I_{сум}^{\beta\gamma} \cdot \ln(10^{6 \cdot I_{сум}^{\beta\gamma}}) / T_{FM} \quad (17)$$

де C_{FF} – постійний коефіцієнт сонячної панелі, η_{conv} – ККД перетворювача з контролером максимальної потужності, T_{FM} – температура сонячної панелі.

$$C_{FF} = \frac{FF \cdot T_{ref}}{G_{ref}} \cdot \frac{[I_{SC} + k_I \cdot (T_{FM} - T_{ref})] \cdot [I_{OC} + k_V \cdot (T_{FM} - T_{ref})]}{\ln(10^{6 \cdot G_{ref}})} \quad (18)$$

де FF- коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики сонячної панелі; T_{ref} , G_{ref} – температура та освітленість сонячної панелі в стандартних умовах, k_I , k_V – температурні коефіцієнти струму короткого замикання і напруги холостого ходу сонячної панелі, відповідно.

Коефіцієнт заповнення ВАХ (вольт-амперної характеристики) сонячної панелі визначається за даними її технічної специфікації:

$$FF = I_{\text{MPP}} \cdot V_{\text{MPP}} / I_{\text{SC}} \cdot V_{\text{OC}} \quad (19)$$

де I_{MPP} , V_{MPP} - паспортні значення струму та напруги сонячної панелі у точці максимальної потужності за стандартних умов, I_{SC} , V_{OC} - паспортні значення струму короткого замикання та напруги холостого ходу сонячної панелі за стандартних умов.

Звіт про роботу

Звіт про роботу повинен містити:

1. Титульний лист
2. Лістінг програми
3. Графік (таблицю) зміни величини сонячної інсоляції протягом доби один день у грудні, квітні, липні, вересні.
4. Графік (таблицю) залежності сумарної радіації, падаючої на поверхню сонячної панелі при зміні кута нахилу (β)/ напрямку розміщення (γ) панелі.
5. Висновки.