

**ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ РІШЕННЯ  
ДЛЯ СИСТЕМ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Вступ   | 6  |
| 1 Фізико-технічні основи фотоелектричної сонячної енергетики    | 9  |
| 1.1 Сонячне випромінювання                                      | 9  |
| 1.2 Сонячні фотоелектричні елементи                             | 14 |
| 1.3 Сонячні панелі  | 19 |
| 1.4 Електричні характеристики сонячної панелі                   | 21 |
| 1.5 Номінальна потужність сонячної панелі                       | 22 |
| 2 Локальна сонячна енергосистема                                | 28 |
| 2.1 Автономні фотоелектричні енергосистеми                      | 28 |
| 2.2 Сполучені з мережею сонячні фотоелектричні енергосистеми    | 29 |
| 2.3 Резервні енергосистеми                                      | 30 |
| 2.4 Підтримуюча конструкція                                     | 31 |
| 2.5 Контролери заряду-розряду                                   | 32 |
| 2.5.1 Контролери з широтно-імпульсною модуляцією струму заряду  | 33 |
| 2.5.2. Контролер зі стеженням за точкою максимальною потужності | 34 |
| 2.6 Інвертори для фотоелектричних систем                        | 37 |
| 3 Практична частина   | 40 |
| 3.1 Контролер зарядного пристрою                                | 40 |
| 3.2 3.2 Моделювання роботи контролеру                           | 49 |

## ВСТУП

Останніми десятиліттями світова сонячна енергетика розвивається високими темпами, сонячні електростанції стають частиною енергетичної інфраструктури багатьох країн. Розвиток сонячних технологій істотно впливає на економіку. Очікується, що в найближчі десятиліття сонячна енергетика стане стимулом для економічного розвитку країн і регіонів, які мають максимальний «сонячний» ресурс.

До Землі доходить лише частина енергії, яку виробляє Сонце. Оцінки показують, що технічний потенціал енергії Сонця (розрахований за допомогою існуючих техніко-технологічних засобів), що потрапляє на нашу планету щорічно, на багато порядків перевищує доведені запаси всього органічного палива (вугілля, торф, нафта, природний газ), зосередженого в земній корі. Якщо енергію, яка постачається на нашу планету Сонцем за рік, перевести в умовне паливо, то ця цифра становитиме близько 100 трильйонів тонн. Це в десять тисяч разів більше за необхідну нам кількість [1].

Удосконалення технологій сонячної енергетики призвело до того, що собівартість виробництва 1 кВтг енергії на сонячних електростанціях або порівняння, або нижче за собівартість виробництва енергії з «нетрадиційних» джерел вуглеводневої сировини. Крім того, слід врахувати і антропогенну дію спалюваного з метою отримання енергії органічного палива, яке вже призвело до змін біосфери нашої планети.

Передбачається, що глобальна виробнича потужність c-Si-елементів і фотоелектричних модулів наприкінці 2021 року буде ще більше зростати до понад 470 ГВт через продовження розширення потужності [2]; частка ринку близько 95% для c-Si і близько 5% для тонкоплівкових технологій вважається незмінною [3].

Ринок фотоелектричних модулів у 2021 році продемонстрував значне зростання до 183 ГВт. Це зростання було реалізовано, незважаючи на проблеми

з постачанням полі-Si, логістикою та матеріалами [4,5,6,7].

Перехід ринку модулів c-Si на моно-Si продовжувався паралельно з впровадженням незліченної кількості модульних продуктів, які розгортали все більше і більше форматів пластин M10 і M12 разом із технологією двосторонніх модулів. Середньозважена ціна модулів c-Si зросла в 2021 році приблизно на 10% порівняно з кінцем 2020 року, майже на 15% без урахування річної інфляції [8]. Продукти на основі моно-Si відчували значне зростання цін, тоді як наприкінці 2021 року надбавки до ціни на двосторонні та потужні модулі майже зникли. Спотова ринкова ціна на фотоелектричні модулі зросла вперше за більше ніж 10 років приблизно на 10%. Кінцевим користувачам за межами Китаю довелося нести додатковий тягар у діапазоні від 2 до 4 \$ct/Wp через величезне зростання логістичних цін на контейнерні перевезення з Азії до світу [9, 10]. Зниження конкурентоспроможності продуктів на основі mc-Si призвело до подальшого зменшення частки ринку до 13%.

Підвищення ефективності технології PERC та розгортання більших пластин у більшому модулі призвели до підвищення середньої ефективності модуля. Використання пластин більшого розміру дозволило створити нові класи потужності модулів від 600 Вт і вище. У 2021 році виробники фотоелектричних батарей продовжили встановлення нових виробничих потужностей PERC-осередків та модулів, здатних до нових форматів осередків. Вони також інвестували в модернізацію існуючих виробничих ліній, щоб підвищити ефективність елементів і дозволити використовувати нові формати пластин. Крива цінового досвіду продовжувалася з історичним навчанням, і рівень навчання (LR) був розрахований на рівні 24,1 %. Фотоелектрична промисловість може підтримувати LR протягом наступних років, продовжуючи перевірену комбінацію заходів щодо зниження витрат та впровадження досконалості осередку, з покращеним матеріалом пластини, покращеною передньою та задньою сторонами осередку, удосконаленим макетом, впровадженням концепцій дволицьових осередків, покращеним модулем. технологій, а також із

впровадженням нових клітинних технологій. Впровадження більших форматів осередків сприяє зниженню вартості фотоелектричної системи. Покращення в усіх галузях призведуть до збільшення ефективності площі модулів: сучасні модулі на основі моно-Si p-типу досягають ефективності 21%, яка зросте до 22,5% протягом наступних 10 років, модулі на основі n-типу, включаючи гетероперехід (SHJ), забезпечують модулі найвищої потужності із сьогоdnішнім ККД близько 22%, який зросте до 24% протягом наступних 10 років. Очікується, що тандемні елементи та модулі на основі кремнію почнуться в масовому виробництві приблизно в 2026 році, починаючи з ефективності модуля 26%. Поєднання оптимізованих виробничих витрат і підвищення продуктивності елементів і модулів підтримає зниження витрат на фотоелектричні системи і, таким чином, забезпечить довгострокову конкурентоспроможність виробництва фотоелектричної енергії.

Таким чином розробка локальної сонячної енергосистеми постійного струму для загородного будинку є актуальним завданням.

# 1 ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

## 1.1 Сонячне випромінювання

Кількість енергії, що потрапляє на земну поверхню від Сонця, величезна. Так, наприклад, потужність потоку сонячної радіації, що надходить на площу  $10 \text{ км}^2$ , у безхмарний день сягає 7-9 мільйонів кВт. Сонячні енергетичні технології перетворюють електромагнітне випромінювання Сонця на форми тепла та електроенергії. Існують три основні технології використання сонячної енергії:

- Сонячні колектори для нагрівання рідкого або газоподібного теплоносія.
- Технологія концентрованої сонячної енергії, в якій сонячне тепло використовується для одержання пари, за допомогою якої турбіни виробляють електроенергію (рис. 1.1).
- Фотоелектричні технології, що дозволяють безпосередньо перетворювати сонячне випромінювання на електрику.



Рисунок 1.1 - Установка концентрованої сонячної енергії

Сьогодні сонячна електрика широко використовується у віддалених районах, де немає централізованого електропостачання, або для електропостачання будинків, офісів та інших будівель у місцях, де є централізована мережа електропостачання. В останні роки саме це застосування забезпечує близько 90% ринку сонячних панелей. У переважній більшості випадків сонячні панелі працюють паралельно з мережею та генерують екологічно чисту електрику для мереж централізованого електропостачання. У багатьох країнах існують спеціальні механізми підтримки сонячної енергетики, наприклад, спеціальні підвищені тарифи на постачання електроенергії від сонячних панелей до мережі, податкові пільги, пільги при отриманні кредитів для придбання устаткування тощо. На етапі становлення фотоенергетики такі механізми діяли у Європі, США, Японії, Китаї, Індії та інших країнах. На жаль, Росія щодо цього відстала, і реально діючих механізмів підтримки відновлюваної енергетики немає. В даний час сонячна енергетика забезпечує трохи більше 1% генерації електрики у світі. Проте, у низці європейських країн ця частка істотно вища. Приміром, у Німеччині ця цифра становить близько 6% [11].

Інтенсивність сонячного світла, яка досягає Землі, змінюється в залежності від часу доби, року, місця розташування та погодних умов. Загальна кількість енергії, підрахована за день або за рік, називається іррадіацією (або «приходом сонячної радіації») і показує, наскільки потужним було сонячне випромінювання. Іррадіація вимірюється в  $[Вт \cdot ч / м^2]$  щодня чи інший період.

Інтенсивність сонячного випромінювання у вільному просторі на віддаленні, що дорівнює середній відстані між Землею та Сонцем, називається сонячною постійною. Її величина  $1353 \text{ Вт} / \text{м}^2$  [12]. При проходженні через атмосферу сонячне світло послаблюється, в основному, через поглинання інфрачервоного випромінювання парами води, ультрафіолетового – озоном, та розсіювання випромінювання частинками атмосферного пилу та аерозолями. Показник атмосферного впливу інтенсивність сонячного випромінювання, доходить до земної поверхні, називається «повітряної масою» (AM).

На рис. 1.2 показано спектральне розподілення інтенсивності сонячного випромінювання в різних умовах. Верхня крива (AM0) відповідає сонячному спектру поза земної атмосфери (наприклад, на борту космічного корабля), тобто за нульової повітряної масі. Вона апроксимується розподілом інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла за температури 5800 К. Криві AM1 і AM2 ілюструють спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в зеніті, і при куті між Сонцем і зенітом  $60^\circ$ , відповідно. При цьому повна потужність випромінювання становить близько 925 та 691 Вт/м<sup>2</sup>. Середня інтенсивність випромінювання Землі приблизно збігається з інтенсивністю випромінювання при AM1.5 (Сонце перебуває під кутом  $45^\circ$  до горизонту) [12].

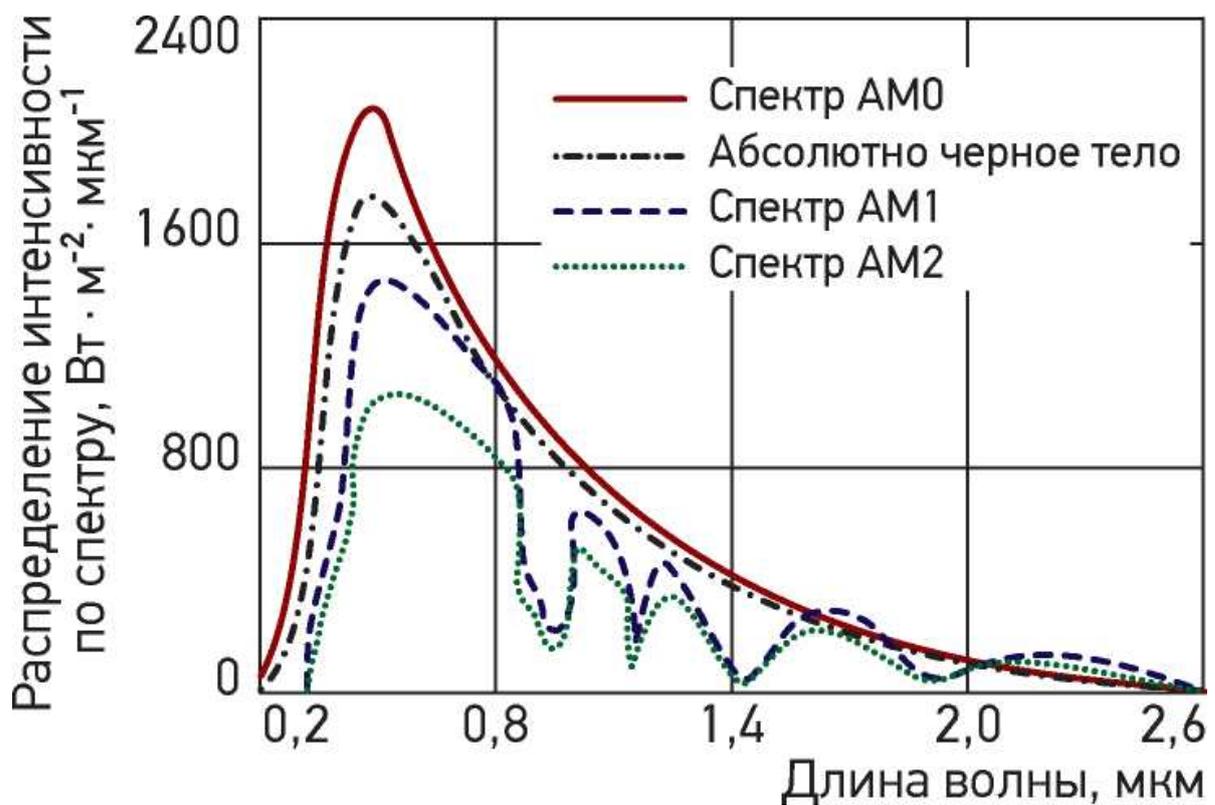


Рисунок 1.2 - Спектральний розподіл інтенсивності сонячного випромінювання у різних умовах

Для поверхні Землі можна прийняти середню величину інтенсивності

сонячної радіації  $635 \text{ Вт/м}^2$ , дуже ясний сонячний день ця величина коливається від  $950 \text{ Вт/м}^2$  до  $1220 \text{ Вт/м}^2$ , а середнє значення становить приблизно  $1000 \text{ Вт/м}^2$  [12].

Для спрощення обчислення приходу сонячної енергії його зазвичай виражають у годинах сонячного сяйва з інтенсивністю  $1000 \text{ Вт/м}^2$ . Тобто 1 година відповідає приходу сонячної радіації  $1000 \text{ Втч/м}^2$ . Це приблизно відповідає періоду, коли сонце світить влітку всередині сонячного безхмарного дня на поверхню, перпендикулярну сонячним променям.

Іррадіація змінюється протягом дня та від місця до місця, особливо у гірських районах. Вона змінюється в середньому від  $1000 \text{ кВтг/м}^2$  на рік для північноєвропейських країн до  $2000\text{-}2500 \text{ кВтг/м}^2$  на рік для пустель. Погодні умови та відмінювання сонця (що залежить від широти місцевості) також призводять до відмінностей у приході сонячної радіації.

В Україні є достатньо сприятливі умови для використання сонячної енергії. Річний технічно досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії є еквівалентним  $6 \text{ млн.т у.п.}$ , його використання дозволило б замінити близько  $5 \text{ млрд.м}^3$  природного газу. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на  $1 \text{ м}^2$  поверхні, на території України знаходиться в межах від  $1070 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$  в її північній частині до  $1400 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$  і вище на півдні України (рис. 1.3) [13]. В Запорізькій області вона складає приблизно  $1300 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$ .

Важливим елементом клімату є тривалість сонячного сяйва, тобто час, протягом якого прямі сонячні промені освітлюють земну поверхню. Вона залежить від довжини дня, обумовленою географічною широтою і порою року, а також від хмарності, яка не пропускає пряму радіацію.

Для оцінки сонячного сяйва в окремі інтервали були взяті матеріали спостережень за багаторічний період метеорологічних станцій в Запорізькій області [14]. Усереднені значення, занесені до таблиці 1.1, з урахуванням допустимої похибки можуть адекватно відобразити тривалості сонячного

сяйва.

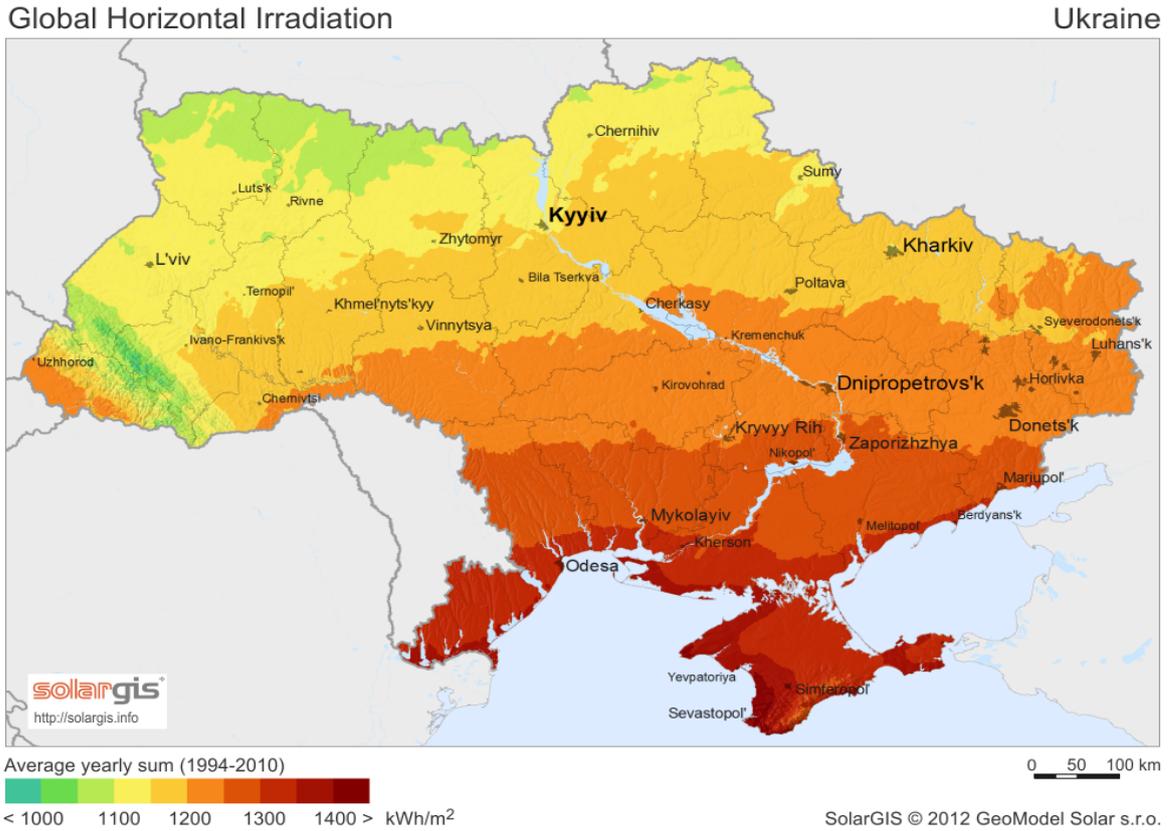


Рисунок 1.3 – Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню

Таблиця 1.1 - Тривалість сонячного сяйва в Запорізькій області

| Місяці   | Час доби, часи |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 4-5            | 5-6  | 6-7  | 7-8  | 8-9  | 9-10 | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14 | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 | 18-19 | 19-20 |
| Січень   |                |      |      | 0,3  | 3,3  | 6,2  | 8,1   | 9,7   | 9,8   | 9,8   | 9,8   | 7,4   | 0,9   |       |       |       |
| Лютий    |                |      | 0,1  | 1,7  | 5,3  | 8,6  | 10,3  | 10,8  | 11,0  | 11,1  | 10,2  | 8,9   | 4,4   | 0,5   |       |       |
| Березень |                |      | 2,0  | 7,5  | 12,0 | 14,5 | 15,4  | 16,2  | 15,8  | 15,7  | 14,6  | 13,1  | 10,0  | 3,9   | 0,4   |       |
| Квітень  |                | 1,3  | 9,6  | 14,6 | 15,7 | 17,6 | 18,7  | 18,1  | 17,4  | 17,4  | 16,7  | 15,7  | 14,4  | 11,4  | 2,3   |       |
| Травень  | 0,6            | 8,5  | 15,5 | 18,0 | 19,5 | 20,8 | 21,3  | 21,0  | 20,6  | 21,0  | 20,4  | 19,9  | 19,1  | 17,5  | 12,0  | 1,0   |
| Червень  | 1,7            | 15,0 | 20,3 | 22,5 | 23,7 | 24,0 | 23,9  | 24,3  | 23,3  | 23,2  | 22,1  | 21,4  | 20,5  | 19,6  | 15,6  | 2,7   |
| Липень   | 1,1            | 15,0 | 21,8 | 25,4 | 26,1 | 26,5 | 26,8  | 27,0  | 26,0  | 26,0  | 25,6  | 25,0  | 24,1  | 22,0  | 16,3  | 1,8   |
| Серпень  |                | 6,0  | 21,8 | 25,2 | 26,7 | 27,0 | 27,5  | 27,4  | 26,9  | 26,9  | 25,9  | 25,5  | 23,5  | 21,7  | 9,0   | 0,1   |
| Вересень |                | 0,4  | 10,5 | 20,1 | 22,8 | 24,1 | 24,2  | 24,2  | 23,7  | 23,7  | 23,1  | 22,5  | 21,1  | 13,2  | 0,5   |       |
| Жовтень  |                |      | 0,8  | 10,0 | 15,7 | 18,1 | 19,0  | 20,0  | 19,5  | 20,3  | 20,5  | 19,4  | 15,1  | 1,7   |       |       |
| Листопад |                |      |      | 1,0  | 4,4  | 6,6  | 9,1   | 9,8   | 10,0  | 9,8   | 10,0  | 8,6   | 2,6   |       |       |       |
| Грудень  |                |      |      | 0,3  | 2,8  | 5,6  | 8,0   | 8,5   | 8,9   | 8,9   | 8,4   | 6,1   | 0,4   |       |       |       |
| Рік      | 3              | 46   | 102  | 147  | 178  | 200  | 213   | 217   | 213   | 214   | 207   | 194   | 156   | 112   | 56    | 6     |

У Запорізькій області тривалість сонячного сйва за рік становить 2000 - 2200 годин.

Аналіз даних (рис. 1.4) показує, що найбільш сонячні місяці – травень-серпень, найменше сонця у листопаді-лютому.

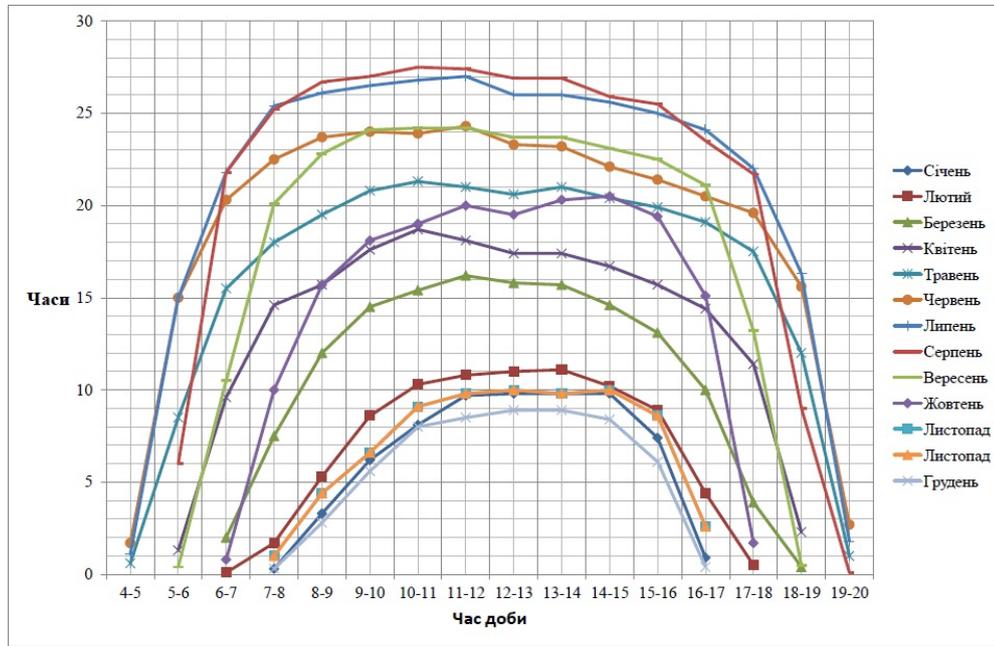


Рисунок 1.4 – Розподілення тривалості сонячного сйва по місяцям

Термін ефективної експлуатації геліоенергетичного обладнання в Запорізькій області – 7 місяців (з квітня по жовтень). Тому фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися на протязі всього року.

## 1.2 Сонячні фотоелектричні елементи

На рис. 1.5 представлені дані динаміки зростання світових виробничих потужностей електроенергії (1) і зростання виробничих потужностей наявних у світі сонячних батарей (2). Пунктирами показані екстраполяції двох можливих сценаріїв майбутнього зростання глобальних потужностей сонячних батарей.

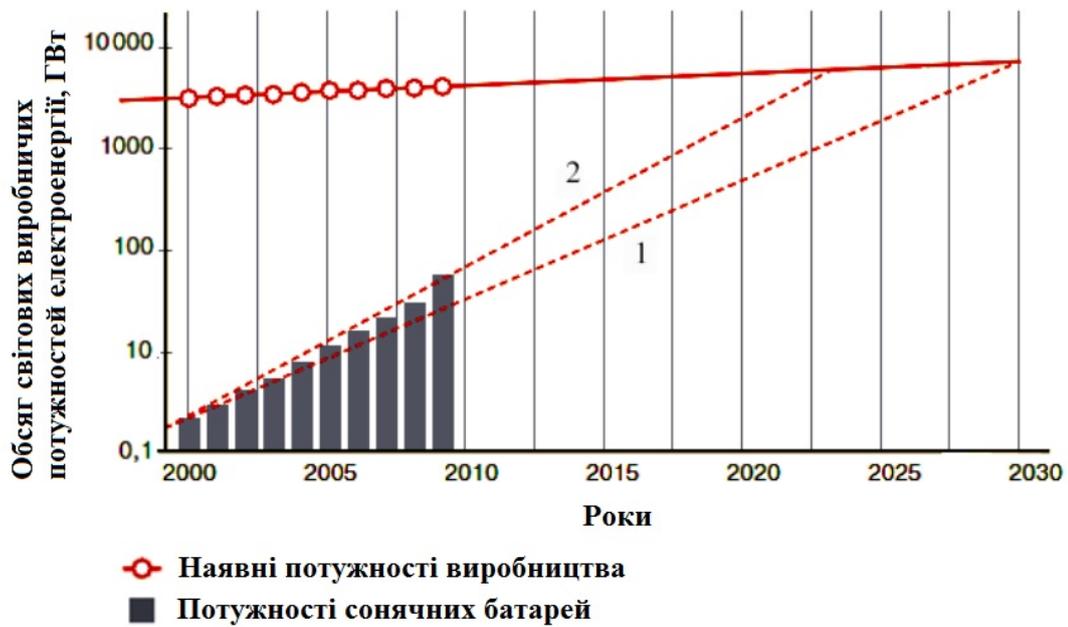


Рисунок 1.5 — Динаміка зростання світових виробничих потужностей електроенергії (1) і зростання виробничих потужностей наявних у світі сонячних батарей (2)

Сонячні фотоелектричні елементи – це електронні прилади, що здійснюють пряме перетворення сонячного світла в електричну енергію. Енергія може використовуватися як безпосередньо різними навантаженнями постійного струму, так і запасатися в акумуляторних батареях для подальшого використання або покриття пікового навантаження, а також перетворюватися в змінний струм. Напруга сонячних батарей сягає десятків вольт, а потужність – десятків кіловат.

ФМ складається з кількох об'єднаних фотоелектричних перетворювачів (фотоелектричних елементів). Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі – це прилади, принцип дії яких заснований на фотоелектричному ефекті – явищі виникнення фото-ЕРС в електричному р-п переході при опроміненні його світловим потоком.

Залежно від матеріалу, конструкції і способу виробництва виділяють три

покоління ФЕП:

- ФЕП першого покоління на основі пластин кристалічного кремнію. За способом виготовлення розрізняють полікристалічні і монокристалічні пластини кремнію. В даний час ФЕП першого покоління завдяки низької собівартості набули найбільшого поширення;

- ФЕП другого покоління на основі тонких плівок, дозволяють виготовляти гнучкі і, в перспективі більш дешеві, ФЕП великої площі, але з меншим коефіцієнтом перетворення в порівнянні з ФЕП першого покоління;

- ФЕП третього покоління на основі органічних і неорганічних матеріалів знаходяться в даний час на стадії досліджень [15].

Для опису сонячних елементів застосовується набір спеціальних параметрів і характеристик, що дозволяє проводити порівняльну оцінку сонячних елементів різного типу. До спеціальних характеристик сонячного елемента відносяться вольт-амперна (ВАХ) і спектральна характеристики. До спеціальних параметрів сонячного елемента відносяться ККД (ефективність),  $ff$  (фактора заповнення),  $U_{oc}$  (напруга холостого ходу),  $I_{sc}$  (струм короткого замикання) або  $J_{sc}$  (щільність струму короткого замикання).

Вольт-амперна характеристика сонячного елемента показує залежність вихідного струму сонячного елемента від напруги на його виводах (рис. 1.6). При зміні величини світлового потоку, що падає на сонячний елемент, його ВАХ змінюється.

Спектральна характеристика (спектральний відгук) являє собою залежність величини квантової ефективності (значення ефективності сонячного елемента при опроміненні його монохроматичним світлом на певній довжині хвилі) від довжини хвилі падаючого випромінювання.

Ефективність (ККД) СЕ показує, яку частину (у процентному відношенні) сонячної енергії світла, що падає на нього, він може перетворити в електричну енергію.

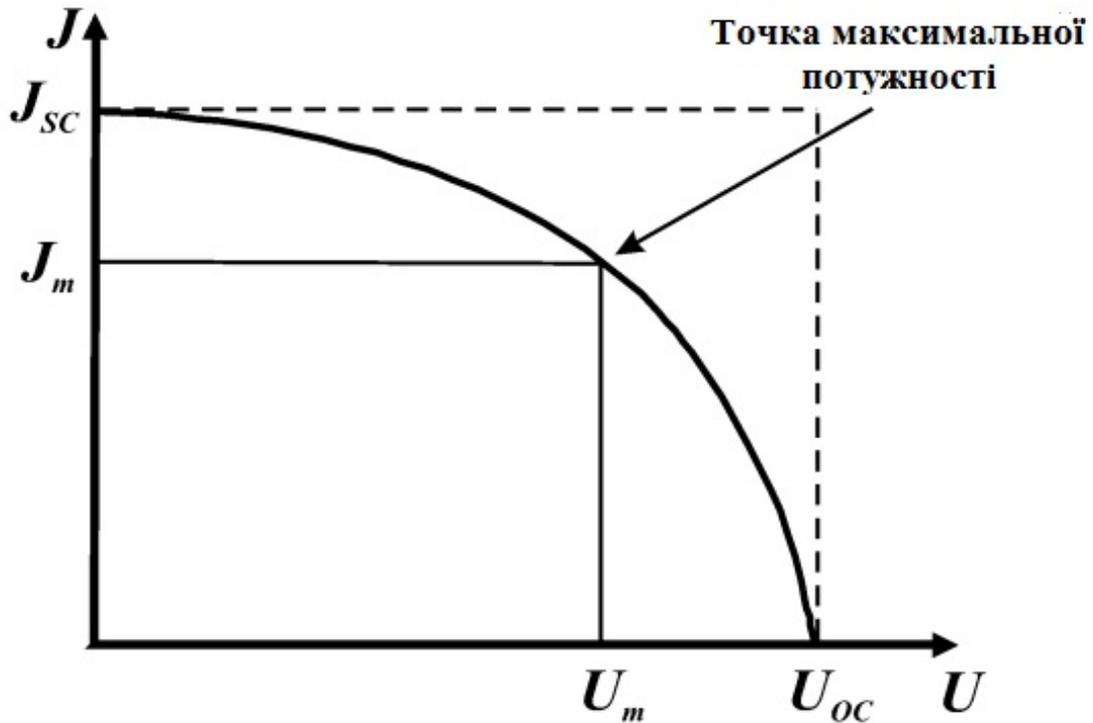


Рисунок 1.6 – Вольт-амперна характеристика сонячного елемента

Розрізняють ККД по активній площі поверхні ( $\eta_{акт}$ ) і ККД по загальній площі поверхні ( $\eta_{заг}$ ):

$$\eta_{акт} = \frac{P_{ел}}{S_{акт} \cdot \Phi_0}, \quad (1.1)$$

$$\eta_{заг} = \frac{P_{ел}}{S_{заг} \cdot \Phi_0}, \quad (1.2)$$

де  $P_{ел}$  – електрична потужність, що виробляється сонячним елементом при опроміненні;  $\Phi_0$  – щільність потоку світла, що падає на сонячний елемент;  $S_{акт}$  і  $S_{заг}$  – площі активної (доступної світлу) і загальної (що включає як поверхню, що доступна світлу, так і ділянки поверхні, що затінені електродною сіткою або скрайбовані від поглинаючого шару) поверхні сонячного елемента.

Напруга холостого ходу ( $U_{oc}$ ) – це максимальне напруження, що виникає на розімкнутих виводах сонячного елемента при його опроміненні сонячним світлом.

Струм короткого замикання ( $I_{sc}$ ) – це максимальний струм, що протікає через виводи сонячного елемента при їх короткому замиканні.

Щільність струму короткого замикання визначається як відношення струму короткого замикання до площі поверхні сонячного елемента

Фактор заповнення ( $ff$ ) показує, яка частина потужності, що виробляється сонячним елементом, використовується в навантаженні. Значення фактора заповнення визначається вибором режиму роботи сонячного елемента, тобто значеннями  $I_w$  і  $U_w$ . Значення  $ff$  може бути знайдено як відношення потужності на навантаженні, що підключено до виводів сонячного елемента, до повної електричної потужності, що виробляється сонячним елементом:

$$ff = \frac{I_w \cdot U_w}{\int_0^{U_{oc}} I(U) dU} \quad (1.3)$$

де  $I_w$  – струм, що протікає через навантаження в робочому режимі;  $U_w$  – робоча напруга сонячного елемента;  $I(U)$  – вольт-амперна характеристика сонячного елемента.

Фактор заповнення вимірюється в % і варіюється від 50 до 85% для різних типів сонячних елементів.

Моделі характеризуються тим же набором параметрів і характеристик, що і сонячні елементи. Однак у них, як правило,  $U_{oc}$  і  $I_{sc}$  на порядок більше, ніж для сонячних елементів.

Недоліком фотоелектричного перетворювача є висока вартість і низький ККД. В даний час у фотоелементах на основі монокристалічного і полікристалічного кремнію ККД досягає 20-25%, фотоелементів на основі тонких плівок – 20%, надвисокі значення ККД вище 40% мають сонячні батареї, які містять кі-

лька р-п переходів (заснованих на напівпровідниках III-V груп), потенційно дешеві фотоелементи на основі органічних матеріалів мають ККД більше 6%.

Термін служби перетворювачів сонячної енергії:

- монокристалічні модулі – 30 і більше років;
- полікристалічні модулі – 20 і більше років;
- з аморфного кремнію (тонкоплівкові, або гнучкі) від 7 (перше покоління тонкоплівкових технологій) до 20 років (друге покоління тонкоплівкових технологій), тонкоплівкові модулі зазвичай втрачають від 10 до 40% потужності в перші два роки експлуатації.

Витрати на створення геліоустановок, навіть якщо врахувати при цьому тільки витрати на виробництво фотоелементів, за своєю питомою вартістю все ще перевершують витрати на створення атомних, теплових та гідроелектростанцій. Це пояснюється низькою щільністю сонячного випромінювання. Необхідно збирати сонячне випромінювання з великих площ, покриваючи їх дорогими напівпровідниковими фотоелементами. Вартість електроенергії, що одержується, значно перевершує вартість електроенергії, що виробляється традиційними способами. З часом відбувається зниження вартості сонячних елементів, головним чином, за рахунок зниження вартості напівпровідникових матеріалів. На даний момент собівартість сонячних елементів складає приблизно 2-3 дол/Вт. Вартість фотоелектричних геліоустановок в збірці доходить до 3-4 дол/Вт при вартості електроенергії 0,25-0,56 дол/Вт [16].

### 1.3 Сонячні панелі

Сонячні панелі (вони фотоелектричні або сонячні модулі) складаються з сонячних елементів. Оскільки один сонячний елемент не виробляє достатньої кількості електроенергії, кілька таких елементів збирають у сонячні панелі, щоб виробляти більше електрики (рис. 1.12).

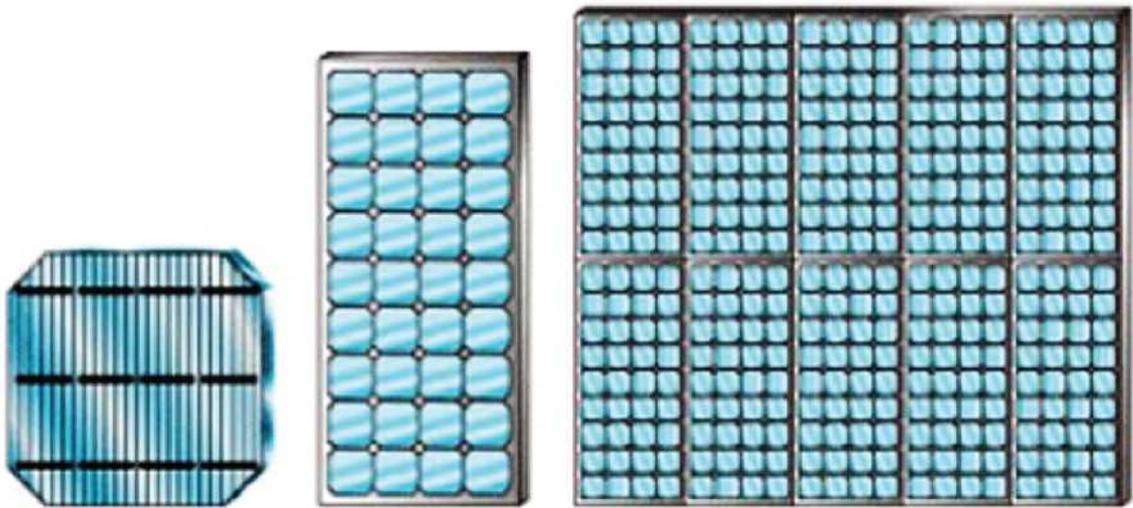


Рисунок 1.12 - Сонячний елемент, сонячна панель  
(фотоелектричний модуль), сонячна батарея

Панель являє собою фотоелектричний генератор, що складається зі скляної плити, з тильного боку якої між двома шарами плівки, що герметизує, розміщені сонячні елементи, електрично з'єднані між собою металевими шинами. Нижній шар герметизуючої плівки захищений від зовнішніх дій захисним шаром. До внутрішньої сторони корпусу панелі прикріплено блок терміналів, під кришкою якого розміщені електричні контакти для підключення (рис. 1.13).

Герметизуючий матеріал необхідний, щоб забезпечити повну герметичність сонячних елементів під час роботи на відкритому повітрі цілий рік. При попаданні повітря або вологи всередину сонячної панелі відбувається окислення та руйнування контактів сонячних елементів, що призводить до виходу з ладу. Як герметизуюча зазвичай застосовується етиленвінілацетатна (EVA) плівка. На жаль, вона і є одним з факторів старіння фотоелектричних панелей, тому що з часом втрачає свою прозорість. Зараз у всьому світі ведуться роботи із заміни EVA-плівки на інші матеріали, але поки що, в основному, застосовується саме цей матеріал.

Сонячні панелі виготовляються багатьох типів та розмірів. Найбільш типові - кремнієві сонячні панелі потужністю 40-260 Втпк (тобто з макси-

мальною потужністю 40-260 Вт при ККД панелей коливається від 5 до 20% [17], тобто така кількість сонячної енергії буде трансформована в електрику.

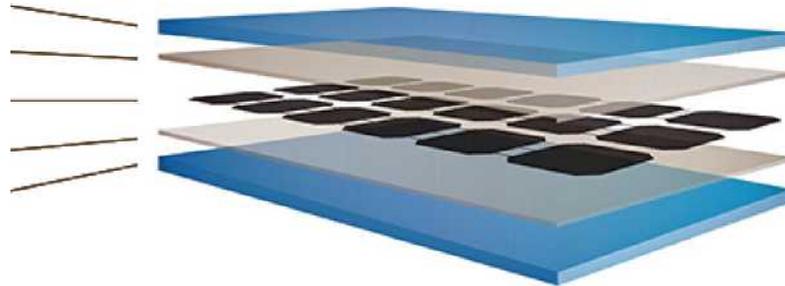


Рисунок 1.13 - Структура сонячної панелі (яскраве сонце) [18]. Така сонячна панель має розмір від 04 до 25 м<sup>2</sup>. Панелі можуть з'єднуватися між собою в сонячні батареї для більшої потужності (наприклад, дві панелі 50 Вт<sub>пик</sub>, з'єднані разом, еквівалентні панелі потужністю 100 Вт<sub>пик</sub>).

#### 1.4 Електричні характеристики сонячної панелі

Сонячна панель може працювати за будь-якої комбінації напруги і струму. Однак насправді вона працює в одній точці зараз. Ця точка вибирається не панеллю, а електричними характеристиками ланцюга, якого дана панель (або сонячна батарея) підключена.

Насправді сонячна панель працює при комбінації струму і напруги, коли виробляється достатня потужність. Найкраще їхнє поєднання називається точкою максимальної потужності (ТММ). Відповідні напруга та струм позначаються  $U_p$  (номінальна напруга) та  $I_p$  (номінальний струм). Саме для цієї точки визначаються номінальна потужність та ККД сонячної панелі.

При прямому з'єднанні сонячної панелі до акумуляторної батареї (АБ) вона працює при напрузі, що дорівнює напрузі акумуляторної батареї в даний момент. У міру заряду АБ її напруга зростає, тому панель може працювати в діапазоні від 10 до 14,5 (для панелі з номінальною напругою 12 В; для панелей з номінальною напругою 24 В значення напруги потрібно помножити на 2). Чо-

му не можна зробити панелі так, щоб вони видавали 12? Якщо зробити так, то панелі будуть видавати необхідну для заряду АБ напругу тільки коли вони холодні, в ідеальному стані та при яскравому сонці. Зазвичай таких умов немає в реальності. Тому панелі повинні мати запас напруги для можливості заряджати АБ при зниженій освітленості, під пилом і нагрітими на сонці. Попри логіку, сонячні панелі працюють краще за холодної погоди. За нормальних умов, коли сонячна панель нагрівається до 40-45 °С, її потужність знижується на 15-17% [19].

Отже, для заряду АБ напругою 12 В необхідно довести напругу панелі до 14,5 (або навіть до 15 В при заряді при низьких температурах). Напруга сонячної панелі в реальних умовах виявляється нижчою за номінальну. По-перше, при нагріванні сонячної панелі її напруга знижується приблизно на 0,5 В. По-друге, існують втрати напруги у сполучних дротах. Також рідко буває, що рівень освітленості дорівнює 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Все це призводить до того, що реальна напруга на панелі знижується, і насправді виявляється дуже близькою до 14,5 В. З іншого боку, при низьких температурах напруга може бути більшою за номінальну.

### 1.5 Номінальна потужність сонячної панелі

Сонячний елемент (ВЕ) виробляє електрику, коли освітлюється світлом. Залежно від інтенсивності світла сонячний елемент виробляє більше або менше електрики: яскраве сонячне світло краще, ніж тінь, і тінь краща, ніж електричне світло. Для порівняння СЕ та панелей необхідно знати так звану номінальну потужність елемента чи панелі. Номінальна потужність, виражена в Ват пікової потужності ( $P_{\text{пик}}$ ), це міра того, скільки електроенергії може виробити сонячна панель за оптимальних умов.

Щоб можна було порівняти панелі між собою, виробники домовилися випробувати їх за певних умов. Спочатку було запроваджено Standard Test Conditions (STC), тобто звані «стандартні тестові умови».

Параметри STC відображають роботу сонячної панелі в ідеальних умовах, які зазвичай досягаються при короткочасному спалаху тестера сонячних панелей у заводських або лабораторних умовах. При цьому освітленість має бути  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , температура сонячної панелі  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , спектр випромінювання повинен відповідати масі повітря AM1.5, а швидкість вітру має дорівнювати нулю [19, 20].

Саме параметри при STC позначені на шильдику всіх сонячних панелей (рис. 1.14). Вони є обов'язковими всім виробникам. Якщо йдеться про потужність сонячної батареї, вказується потужність при STC.

|  <b>InEcoEnergo.com</b> |                 |
|--|-----------------|
| <b>Model Type</b>  | <b>G200M-36</b> |
| <b>Rated Max Power (Pmax)</b>  | <b>200W</b>     |
| <b>Current at Pmax (Imp)</b>   | <b>5.82A</b>    |
| <b>Voltage at Pmax (Vmp)</b>   | <b>34.4V</b>    |
| <b>Short-Circuit Current (Isc)</b>   | <b>6.31A</b>    |
| <b>Open-Circuit Voltage (Voc)</b>  | <b>43.2V</b>    |
| <b>Normal Operating Cell Temp (Tnoct)</b>  | <b>45°C</b>     |
| <b>Weight</b>  | <b>14.00kg</b>  |
| <b>Max System Voltage</b>  | <b>1000V DC</b> |
| <b>All technical data at standard test conditions</b><br><b>AM=1.5 E=1000W/m<sup>2</sup> Tc=25°C</b>     |                 |

Рисунок 1.14 - Інформація на шильдику сонячної панелі

Однак умови STC рідко трапляються при реальній експлуатації сонячних панелей. Якщо ви встановили на своєму даху панель номінальною потужністю 250 Вт, це зовсім не означає, що ви отримаєте від неї потужність 250 Вт за будь-яких умов. STC не відображає ефективність та продуктивність сонячної

панелі в реальних умовах. Тому робляться спроби визначити умови, за яких параметри панелі ближчі до тих, що мають місце насправді.

Останнім часом все більше виробників вказують параметри панелі в нормальних умовах (NOCT), тобто при температурі панелі 40-45 °С і освітленості 800 Вт/м<sup>2</sup>. Тим не менш, NOCT також не відображає реальну потужність панелі, оскільки під час роботи сонячної батареї освітленість може бути навіть вищою за 1000 Вт/м<sup>2</sup>, а температура суттєво нижча за 45 °С [19, 20].

Все частіше для порівняння панелей замість STC застосовуються тестові умови PVUSA (Photovoltaics for Utility Systems Applications) Test Conditions (PTC), які є більш реалістичними. Однак далеко не всі виробники вказують параметри PTC. Зазвичай PTC вказується для панелей, вироблених американського ринку.

Параметри тестів PTC показують результати тестів сонячних панелей в умовах, більш наближених до реальних, ніж STC. PTC також мають на увазі освітленість в 1000 Вт/м<sup>2</sup>, але температура нормується не самого сонячного елемента, як в STC, а навколишнього повітря. Панелі повинні бути на висоті 10 м над рівнем землі, температура повітря повинна бути 20 °С, а швидкість вітру повинна бути 1 м/с [19, 20].

Параметри PTC є меншими на 10-15%, ніж STC, що відображає вплив реальних умов експлуатації сонячних панелей.

Проте ні PTC, ні STC не відбивають всіх чинників, які впливають зміна потужності панелей у реальних умовах. Треба враховувати й інші фактори, що впливають на продуктивність сонячної електростанції, наприклад, втрати у дротах, інверторі, контролері тощо. Також це може бути нормальна деградація сонячних панелей з часом, зниження потужності за рахунок пилу, бруду, надмірного нагрівання панелей або їх затінення, різниця потужності панелей у послідовних ланцюжках тощо. Вплив цих факторів може змінюватись в залежності від сезону, географічного положення, способу монтажу, азимуту та нахилу панелей. Тож у реальних умовах сонячна панель вироблятиме близько 75-85%

від її пікової потужності (зазначеної на шильдику). Тобто сонячна панель потужністю 100 Вт, розташована під оптимальним кутом та орієнтована на південь, видаватиме влітку в середньому 7585 Вт, залежно від методу встановлення. Звичайно, будуть дні, коли ви отримаєте повну пікову потужність від сонячної панелі або навіть більше за неї. Це потрібно враховувати під час проектування сонячної електростанції.

Потужність сонячної панелі змінюється залежно від освітленості майже прямо пропорційно (рис. 1.15). При певному значенні освітленості панель може припинити вироблення. Наприклад, для кристалічних панелей це приблизно 150-200 Вт/м<sup>2</sup>, а для аморфних - близько 100 Вт/м<sup>2</sup> [20].

Також потужність сонячної панелі залежить від її температури і зазвичай падає за її підвищення (рис. 1.16). Типовий температурний коефіцієнт для кристалічних панелей становить -0,45%/К (тобто за підвищення температури панелі за кожен градус її вироблення зменшується на 0,45%) [20]. Для аморфних панелей цей показник зазвичай у 2 рази менший, а останні розробки триперехідних аморфних панелей навіть мають позитивний температурний коефіцієнт потужності

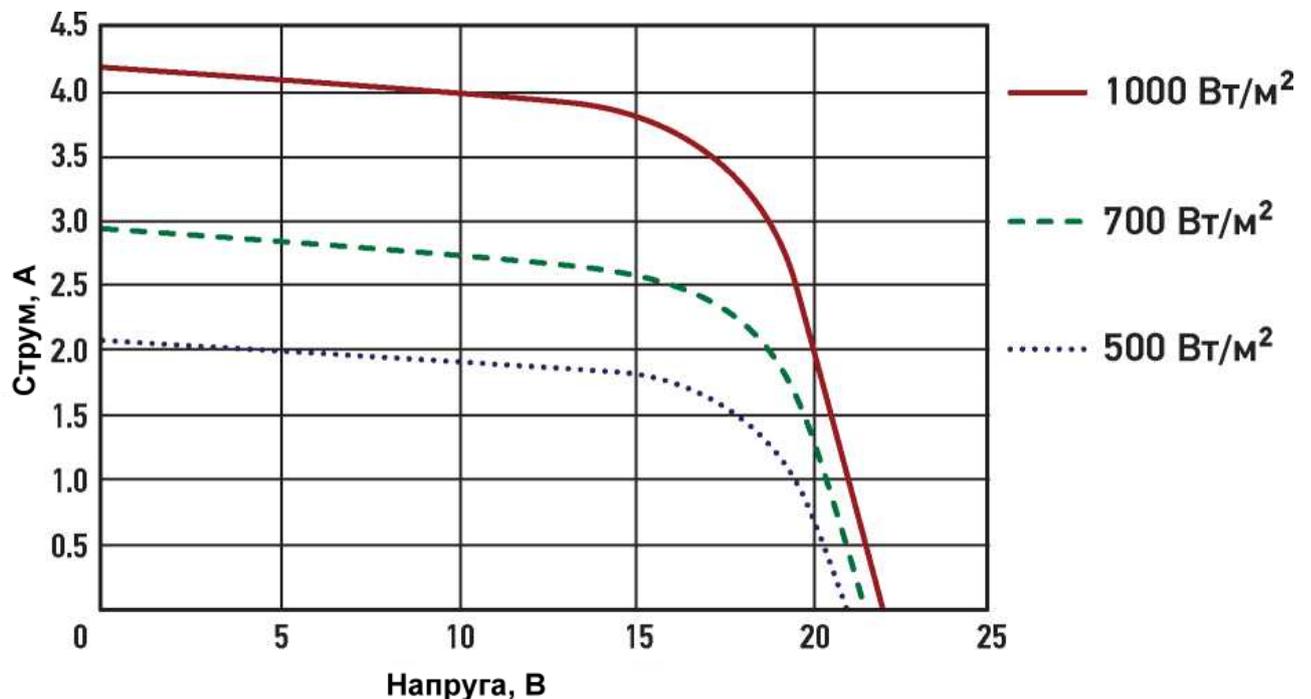


Рисунок 1.15 - Вольт-амперна характеристика сонячної панелі

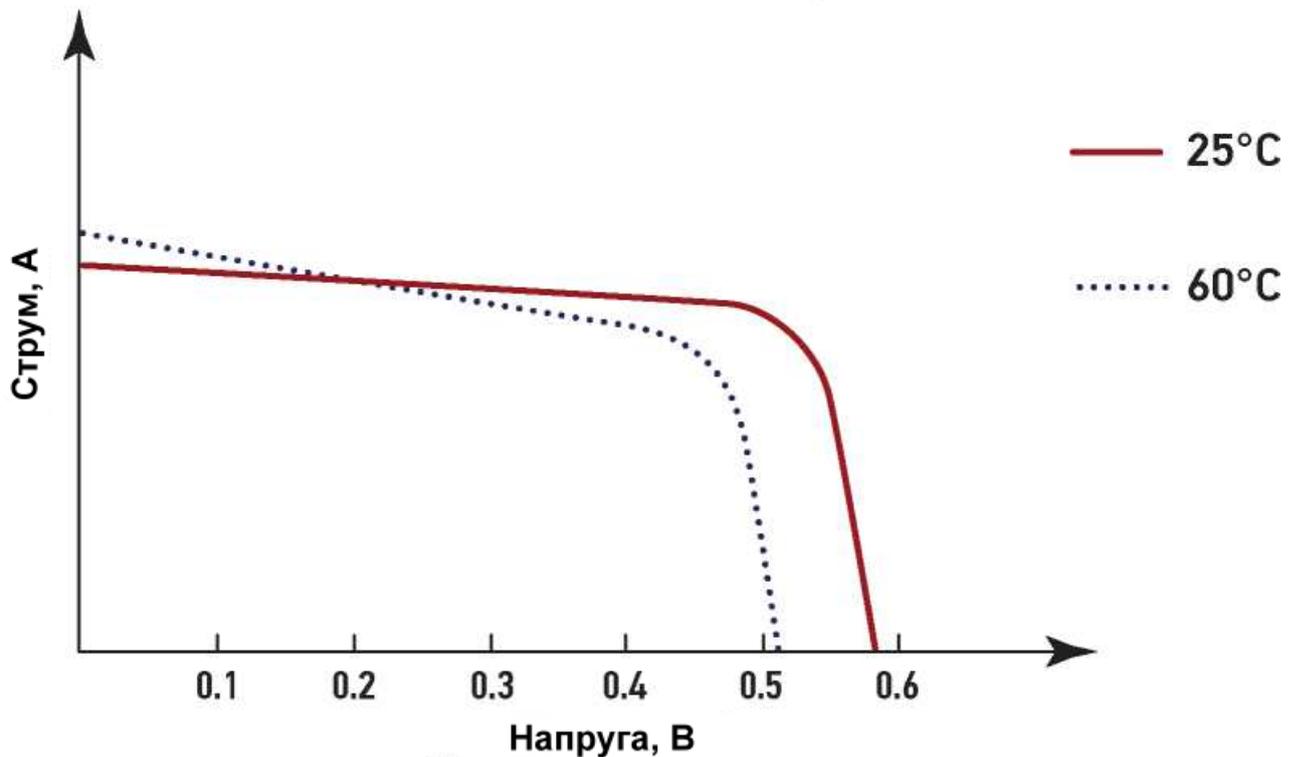


Рисунок 1.16 - Вольт-амперна характеристика сонячної панелі в залежності від температури панелі

Сонячна панель під впливом світла виробляє як електроенергію, а й тепло. У звичайній сонячній панелі в точці максимальної потужності тільки 10-15% сонячної енергії, що падає на неї, перетворюється на електрику, інше перетворюється на тепло [20]. Чинниками, що впливають на нагрівання сонячної панелі, є:

- Відображення від лицьової поверхні.

Світло, відбите від лицьової поверхні сонячної панелі, не бере участі у виробництві електроенергії. Таке світло вважається джерелом втрат, які необхідно мінімізувати. Він також не нагріває панель. Тому максимальне нагрівання панелі розраховується як потужність падаючого сонячного випромінювання, помножена на коефіцієнт відображення. Для звичайної сонячної панелі зі скляною лицьовою поверхнею коефіцієнт відображення становить близько 4%.

- Робоча точка та ККД панелі.

Робоча точка та ефективність панелі визначають, яка частина світла, поглиненого панеллю, буде перетворена на електрику. Якщо сонячний елемент працює у режимі короткого замикання чи холостого ходу, він не виробляє електроенергії, і тому вся поглинена енергія перетворюється на тепло.

- Поглинання світла на панелі.

Світло, яке поглинається в панелі не сонячним елементом, також братиме участь у її нагріванні. Кількість поглиненого та відбитого світла визначається кольором та матеріалом заднього шару панелі.

- Поглинання інфрачервоного світла.

Світло з енергією менше енергії забороненої зони сонячного елемента не впливає на електричну потужність, але якщо воно поглинеться в сонячному елементі або панелі, воно сприятиме їх нагріванню. Інфрачервоне світло добре поглинається алюмінієм на задній поверхні сонячного елемента. В елементах, які не мають алюмінію на задній поверхні, інфрачервоне світло не поглинається і може пройти через панель наскрізь.

- Рівень заповнення панелі сонячними елементами.

Сонячні елементи створюються спеціально для ефективного поглинання сонячного випромінювання. Вони будуть виробляти значну кількість тепла, зазвичай більше за інші частини панелі. Тому високий рівень заповнення панелі сонячними елементами збільшує кількість тепла, що виробляється на одиницю поверхні.

## 2 ЛОКАЛЬНА СОНЯЧНА ЕНЕРГОСИСТЕМА

Щоб сонячні панелі були надійним джерелом електроенергії, необхідні додаткові елементи в системі: кабелі, що підтримує структура та, залежно від типу системи (з'єднана з мережею, автономна або резервна), ще й електронний інвертор та контролер заряду з акумуляторною батареєю. Така система називається сонячною фотоелектричною системою або сонячною станцією.

Є три основні типи сонячних фотоелектричних систем [19, 20]:

- Автономні, які зазвичай застосовуються для електропостачання окремих будинків.
- З'єднані із мережею.
- Резервні.

### 2.1 Автономні фотоелектричні енергосистеми

Автономні фотоелектричні системи використовуються там, де немає мереж централізованого електропостачання. Для забезпечення енергією в темний час доби або в періоди без яскравого сонячного світла потрібна акумуляторна батарея (АБ). Автономні фотоелектричні системи часто використовують для електропостачання окремих будинків. Малі системи дозволяють жити базове навантаження (освітлення і іноді телевізор або радіо), потужніші системи можуть жити водяний насос, радіостанцію, холодильник, електроінструмент тощо. Така система складається із сонячної панелі, контролера, акумуляторної батареї, кабелів, електричного навантаження та підтримуючої структури (рис. 2.1).

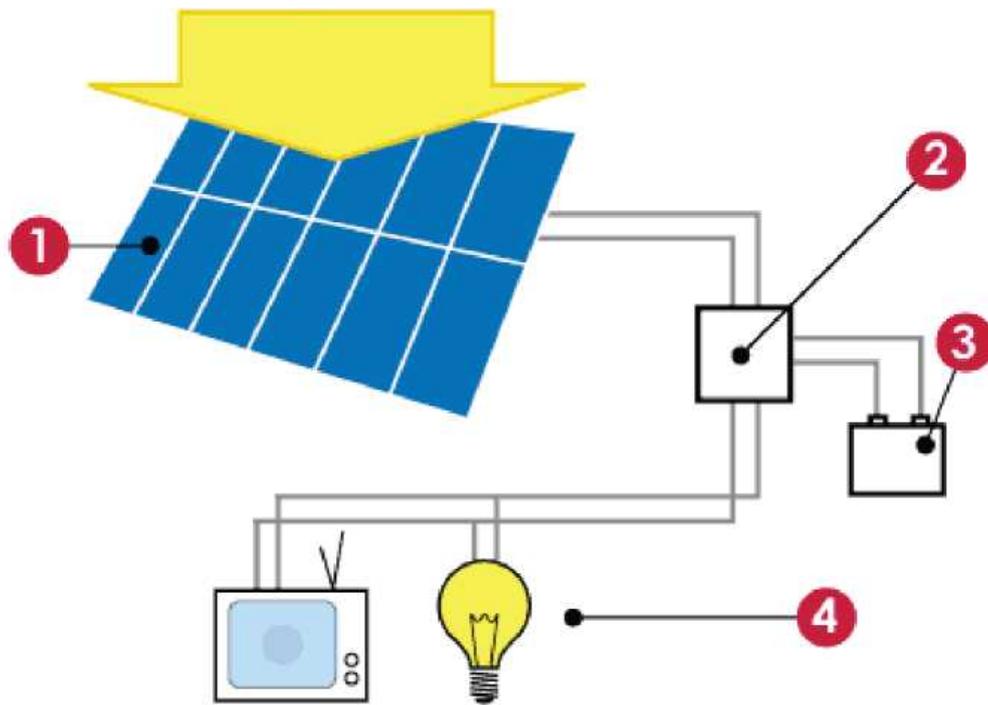


Рисунок 2.1 - Автономна фотоелектрична система:  
1 – сонячні панелі; 2 – контролер; 3 – АБ; 4 – навантаження

## 2.2 Сполучені з мережею сонячні фотоелектричні енергосистеми

Коли є мережа централізованого електропостачання, але бажання мати електроенергію від чистого джерела, сонячні панелі можуть бути з'єднані з мережею. При підключенні достатньої кількості сонячних панелей певна частина навантаження в будинку може їсти від сонячної електрики. Сполучені з мережею фотоелектричні системи зазвичай складаються з однієї або кількох панелей, інвертора, кабелів, що підтримує структури та електричного навантаження (рис. 2.2). Інвертор використовується для підключення сонячних панелей до мережі. Існують також звані АС-панелі, у яких інвертор вбудований у її задню частину.

Надлишок електричної енергії може продаватися електромереж. Якщо використовуються спеціальні підвищені тарифи для сонячної електрики, то встановлюють два лічильники – один на генерацію, інший на споживання. При цьому вся електроенергія, вироблена сонячною панеллю, продається мережам

за підвищеною ціною, а потреби будинку в електроенергії забезпечуються покупкою електроенергії у мереж за звичайною ціною.

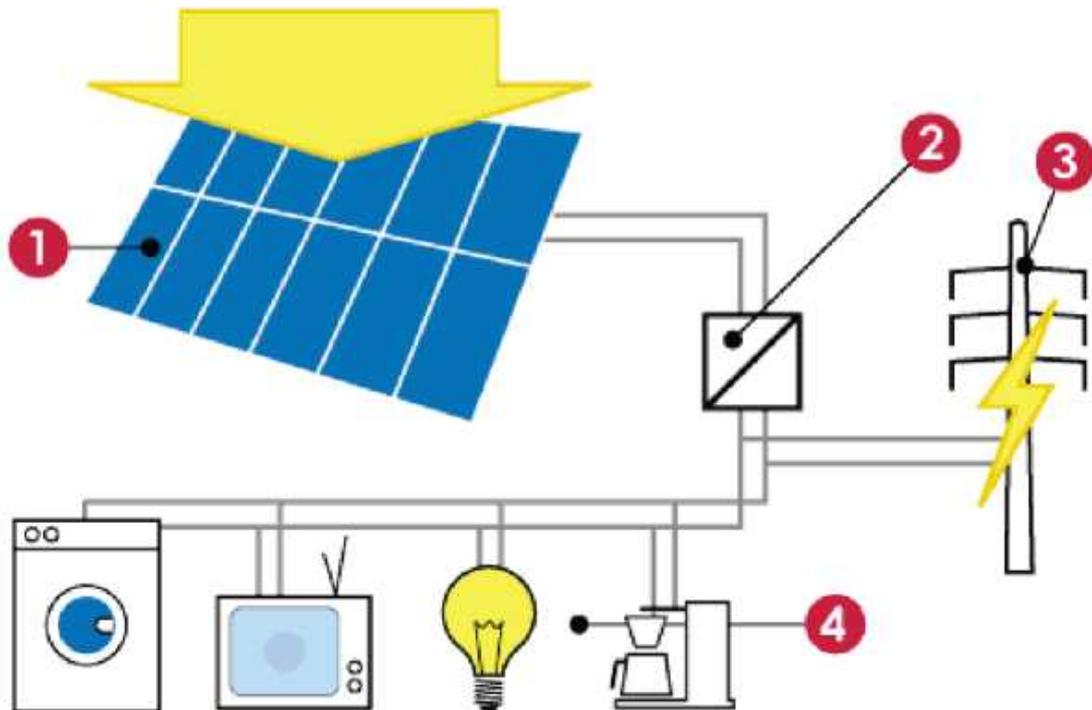


Рисунок 2.2 - Сполучена з мережею сонячна фотоелектрична система:

1 – сонячні панелі; 2 – інвертор; 3 – мережа; 4 – навантаження

Таким чином можна забезпечити не тільки нульові витрати за витратами на електроенергію протягом року, але й нульове споживання електроенергії за рік (влітку надлишок енергії поставляється мережам, а взимку, за нестачі сонця, будинок живиться в основному від мереж).

### 2.3 Резервні енергосистеми

Резервні сонячні системи використовують там, де є з'єднання з мережею централізованого електропостачання, але вона ненадійна. Резервні системи можуть використовуватись для електропостачання в періоди, коли немає напруги в мережі. Малі резервні сонячні системи електропостачання можуть використовуватись для освітлення, постачання енергією комп'ютера та зв'язку (телефон, радіо, факс тощо). Більші системи можуть постачати енергією та холоди-

льник під час відключення мережі. Чим більша потужність, необхідна живлення відповідального навантаження, і що довше періоди відключення мережі, то більша потужність фотоелектричної системи необхідна. Якщо мережа є, система зазвичай працює як з'єднана з нею.

Система складається з сонячних панелей, контролера, акумуляторної батареї (АБ), кабелів, інвертора, навантаження та підтримуючої структури (рис. 2.3).

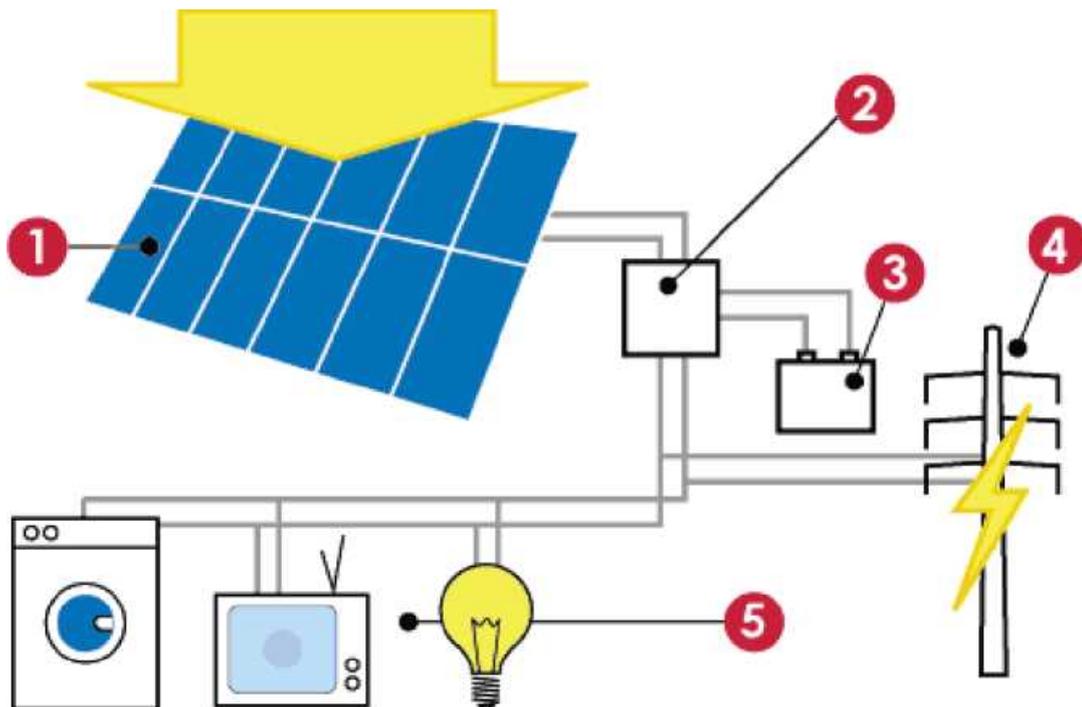


Рисунок 2.3 - Резервні системи: 1 – сонячні панелі; 2 – інвертор; 3 – АБ; 4 – мережа; 5 – навантаження

#### 2.4 Підтримуюча конструкція

Важливою частиною сонячної фотоелектричної системи є конструкція, що підтримує, для сонячних панелей. Вона забезпечує правильний кут нахилу панелей та необхідну жорсткість усієї системи. Комбінація підтримуючої конструкції із сонячними панелями повинна витримувати пориви вітру та інші дії навколишнього середовища. Різноманітність конструкцій величезна - від саморобних до промислових для великих фотоелектричних систем. Така конструкція може бути виготовлена із металу або синтетичного матеріалу.

Є кілька типів підтримуючих конструкцій, залежно від місця встановлення фотоелектричної системи. Для з'єднаних з мережею систем це може бути плоска конструкція або з малим нахилом дах або для фасаду будівлі. Сполучені з мережею системи можуть бути елементом конструкції будівлі (інтегровані сонячні системи).

## 2.5 Контролери заряду-розряду

Контролери заряду використовуються в автономних фотоелектричних системах захисту акумуляторних батарей від глибокого розряду, коли є перевитрата енергії, або перезаряду, коли батарея заряджена, а сонячна панель виробляє надлишок електрики (рис. 2.4). Використання контролерів заряду необхідно, тому що він вимикає навантаження, коли акумулятор неприпустимо розряджений. Зазвичай контролером заряду постачаються фотоелектричні сонячні комплекти. При цьому навантаження ніколи не підключається безпосередньо до акумуляторної батареї, минаючи контролер заряду, інакше акумуляторна батарея може вийти з ладу.



Рисунок 2.4 - Контролер заряду-розряду

### 2.5.1 Контролери з широтно-імпульсною модуляцією струму заряду

Найпростіші контролери просто відключають джерело енергії (сонячну батарею), якщо напруга на акумуляторній батареї (АБ) досягла приблизно 14,4 (для АБ номінальною напругою 12 В). При зниженні напруги на АБ до 12,5-13В знову підключається сонячна батарея, і заряд відновлюється. У цьому максимальний рівень зарядженості АБ становить 60-70%. При регулярному недозаряді відбувається різке скорочення терміну служби АБ.

Сучасні контролери на завершальній стадії заряду використовують так звану широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) струму заряду. У цьому можливий заряд АБ до 100%.

На рис. 2.5 показано чотири стадії заряду акумуляторної батареї від сонячної батареї [19].



Рисунок 2.5 - Стадії заряду акумуляторної батареї від сонячної панелі

1) Заряд максимальним струмом. На цій стадії АБ отримує весь струм, що надходить від сонячних панелей.

2) ШІМ-заряд. Коли напруга на АБ досягає певного рівня, контролер починає підтримувати постійну напругу за рахунок ШІМ струму заряду. Це запобігає перегріву та газоутворенню в акумуляторі. Струм поступово зменшується в міру заряджання акумуляторної батареї.

3) Вирівнювання. Багато батарей з рідким електролітом покращують роботу при періодичному заряді до газоутворення, при цьому вирівнюються

напруги на різних банках АБ, очищаються пластини та переміщується електроліт.

4) Підтримуючий заряд. Коли АБ повністю заряджена, зарядна напруга зменшується, щоб уникнути подальшого нагрівання або газоутворення в батареї, і вона підтримується у зарядженому стані.

### 2.5.2. Контролер зі стеженням за точкою максимальною потужності

Якщо необхідно збільшити вироблення енергії сонячними батареями без додавання сонячних панелей, потрібно замінити сонячний контролер на «Maximum Power Point Tracker» (MPPT) зі стеженням за точкою максимальної потужності (ТММ) сонячної батареї.

Типовий MPPT-контролер постійно відслідковує струм і напруга на сонячній батареї, перемножує їх значення та визначає пару струм-напруга, при яких потужність сонячної батареї буде максимальною. Вбудований процесор також стежить, на якій стадії заряду знаходиться акумуляторна батарея (наповнення, насичення, вирівнювання, підтримка) і на підставі цього визначає, який струм повинен подаватися в неї. Одночасно процесор може давати команди на індикацію параметрів на табло (за наявності), зберігання даних тощо.

Крапка максимальної потужності може обчислюватися різними способами. Методи пошуку точки максимальної потужності (ТММ) також різні [19].

1) Зазвичай використовується метод "Perturb and Observe". Тобто проводиться періодичне повне сканування всієї вольт-амперної характеристики сонячної батареї (зазвичай раз на дві години), знаходиться ТММ, і до наступного повного сканування контролер шукає та обчислює коливання потужності сонячної батареї та зсуває робочу точку на нову напругу, якщо при ній потужність більша. Майже у всіх контролерах застосовується саме цей метод. Недоліком його вважається стала необхідність проводити вимірювання, під час яких

генерація енергії від панелей переривається. Різні виробники підбирають параметри пошуку – глибину та частоту ітерацій, періодичність повного сканування, щоб найбільш оптимально відстежувати точку максимальної потужності сонячної батареї та отримувати оптимальну кількість енергії від Сонця.

2) Другий метод – «Scan and Hold». Після первинного сканування напруга встановлюється лише на рівні знайденої точки і до наступного повного сканування. Такий метод хороший там, де немає хмар та затінення панелей. Переваги – висока швидкість роботи, практично немає переривання генерації на виміри.

3) Третій метод - "Percentage of open circuit voltage". Заміряється напруга холостого ходу ( $U_{xx}$ ), і робоча точка вибирається на рівні ( $U_{xx} \cdot k$ ), де може бути від 0 до 1 (за замовчуванням до дорівнює 0,8). Крапка тримається до наступного сканування. Такий метод хороший там, де немає хмар та затінення панелей. Переваги – висока швидкість роботи, практично немає переривання генерації на виміри.

4) Четвертий метод – жорсткий вибір робочої точки. Призначається будь-яку напругу, яку контролер підтримуватиме. Ніяких вимірів і обчислень він не робить, тобто працює постійно. Недолік - обрана напруга може бути далекою від реальної ТММ. Однак, якщо точно відомо, при якій напрузі батарея виробляє максимальну потужність, і сонячна батарея працює завжди при ясному небі, то можна використовувати і цей метод. При запуску системи потрібно задати напругу, яку контролер підтримуватиме; воно обчислюється за параметрами конкретної сонячної батареї.

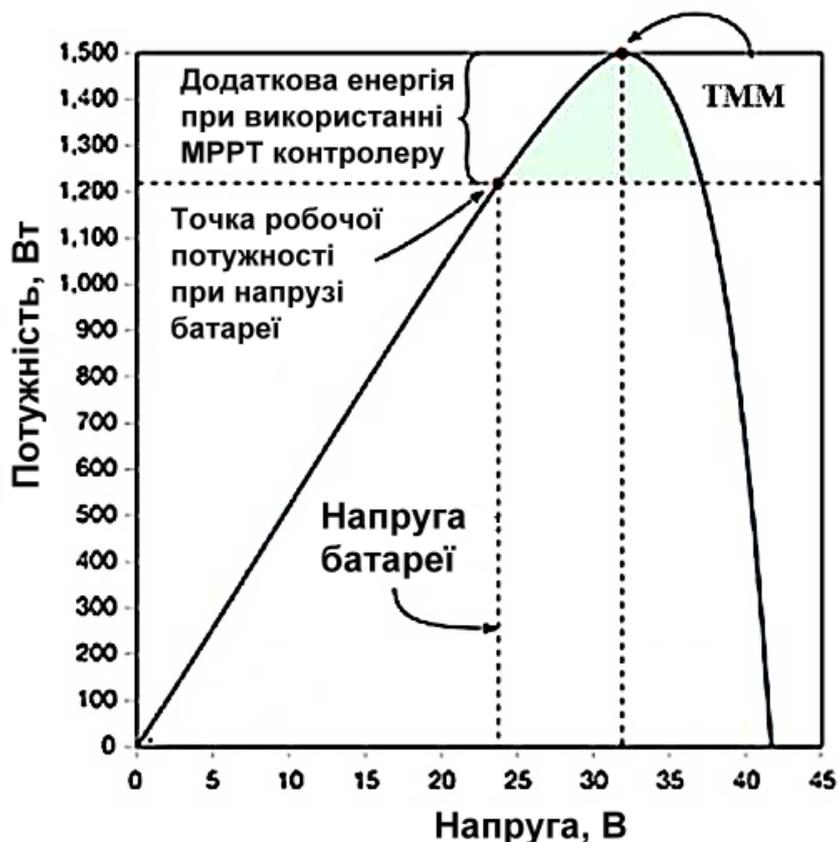
Положення ТММ залежить від освітленості панелей, температури, різниці температур панелей і т.д. Контролер періодично намагається трохи "відійти" від знайденої на попередній стадії точки в обидві сторони, і якщо потужність при цьому збільшується, він переходить на роботу в цій точці. Теоретично, при пошуку ТММ втрачається трохи енергії, але ця втрата дуже незначна, у порівнянні з додатковою енергією, яку забезпечує МРРТ-контролер. Кількість додатково отриманої енергії важко визначити однозначно. Основними фа-

кторами, що впливають на додаткове вироблення, є температура і рівень зарядженості акумуляторної батареї. Найбільша добавка до вироблення буде за низьких температур панелі та розряджених батарей (рис. 2.6).

Напруга сонячної панелі в точці максимальної потужності може змінюватись за різних температур панелі (рис. 2.7).

Чим гарячіша сонячна панель, тим менша напруга, а значить, і вироблення енергії сонячною батареєю. У якісь моменти точка максимальної потужності може бути нижчою за напругу на АБ, і в цьому випадку немає жодного виграшу в порівнянні зі звичайним контролером. Це відбувається і при частковому затіненні сонячної батареї.

Поточна ціна МРРТ-контролерів дозволяє ефективно їх застосовувати при потужності панелей від 200 Вт або нестандартному напрузі панелі.



Номинальна потужність батареї - 1800Вт    Номинальна напруга батареї та акумулятора - 24В

Рисунок 2.6 - Кількість додатково отриманої енергії під час використання МРРТ-контролера

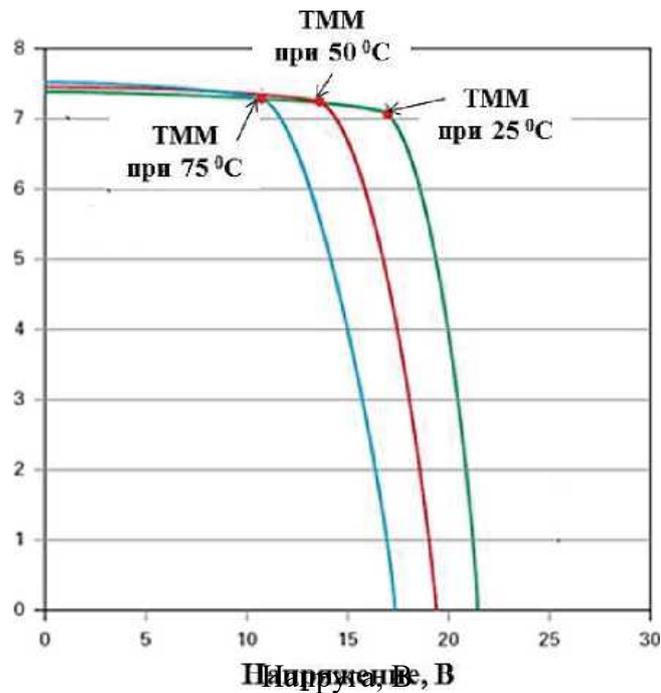


Рисунок 2.7 - Напруга сонячної панелі у точці максимальної потужності залежно від температури панелі

## 2.6 Інвертори для фотоелектричних систем

Інвертори використовуються для перетворення постійного струму від акумуляторних батарей (АБ) або сонячних панелей на змінний, аналогічний струму в мережах централізованого електропостачання.

У сполучених із мережею системах інвертори приймають енергію від сонячних панелей і перетворюють її на змінний струм, який подається в мережу. Більшість сонячних панелей генерує постійний струм. Існують панелі з інтегрованими інверторами, так звані АС-панелі з мікроінверторами (рис. 2.8). Їх перевагою є просте налаштування та можливість легкого масштабування фотоелектричної системи шляхом простого додавання таких панелей. Такі інвертори використовуються лише у сполучених із мережею системах.

В автономних системах для живлення стандартних побутових пристроїв та приладів потрібно перетворити постійний струм від АБ та сонячних батарей у змінну напругу 220 В.



Рисунок 2.8 - Мікроінвертор на задній стороні сонячної панелі

У резервних системах те саме завдання - перетворити постійний струм від АБ на змінний для живлення звичайних приладів.

Є багато різних інверторів, що відрізняються потужністю та типом. Деякі їх мають дуже високу ефективність. Якщо інвертор буде часто перебувати без навантаження, то необхідно вибирати такий, який має низьке споживання в режимі очікування. Якщо ж він буде більшу частину часу навантажувати, то необхідно вибирати інвертор з максимальним ККД.

Сонячні панелі виробляють постійний струм, і АБ зберігають енергію у вигляді постійного струму, але більшість приладів і споживачів енергії вимагають змінний струм напругою 220 або 380 В. Інвертор перетворює низьку напругу 12, 24, 32, 36, 48, 96 струму у високу напругу 220 В змінного струму. Частина енергії неминуче втрачається при перетворенні – від 5% до 20%, залежно від якості інвертора та режиму його роботи [19, 20].

Інвертори бувають різної потужності, які тип вибирається залежно від застосування. Малопотужні інвертори (100 - 1000 Вт) зазвичай використовуються в малих автономних системах для живлення, наприклад, лампочок, телевізора,

радіо та інших приладів. Вони бувають на вхідну напругу 12 або 24 і вихідну 220 В. Більш потужні інвертори мають вхідну напругу 24 або 48 (а іноді 96 і вище).

Дешеві інвертори генерують ступінчасту або прямокутну форму напруги - так звану квазісинусоїдальну або модифіковану синусоїду. Така форма напруги який завжди підходить до приладів. Інвертори із синусоїдальною формою напруги забезпечують якість енергії таку ж, як у мережі, і можуть жити без проблем будь-яке навантаження змінного струму.

Функції сучасних інверторів [19]:

- Вимірювання. На дисплеї інвертора відображаються напруга та струм, частота та потужність.
- Можливість автозапуску генератора. В інверторі є додаткові реле для автоматичного запуску та зупинки резервного генератора в залежності від напруги на батареї. Часто ця функція представлена у вигляді опції як окремий блок до інвертора. Сучасні інвертори можуть заряджати АБ від мережі лише у певний час або запускати генератор лише у денний час (через шум).
- Робота паралельно із мережею. Мережеві інвертори безпосередньо постачають енергію від сонячних батарей до мережі без АБ. Це суттєво зменшує вартість системи, а отже, і здешевлює електроенергію.
- Вбудований зарядний пристрій. Такі інвертори для заряду АБ можуть використовувати енергію від мережі чи генератора. Одночасно вони можуть транслювати енергію від цих джерел безпосередньо в навантаження. Сучасні інвертори можуть задавати або динамічно змінювати зарядний струм, щоб уникнути перевантаження генератора.
- Паралельне з'єднання. Деякі інвертори можуть бути з'єднані паралельно збільшення потужності.

Оскільки в завданні на розробку енергосистеми для загородного будинку є вимога в використанні постійного струму, то структурна схема системи буде відповідати рис. 2.1.

### 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Аналізуючи ринок сонячних панелей для потреб загородних будинків оптимальним вибором є панель BLACK·FE·MONO·100·12, с технічними параметрами:

- Потужність: 100 Вт±1Вт
- Номінальна напруга: 12 В
- Напруга в точці максимальної потужності – 19,04 В
- Оптимальний робочий струм 5,16 А
- Напруга холостого ходу: 22,8 В
- Струм короткого замикання: близько 5,55 А
- Розміри: 1200×553×35 мм
- Вага: 8,3 кг
- Параметри виміряні за стандартних умов (освітленості 1000 Вт/м<sup>2</sup> та температурі 25 °С).

#### 3.1 Контролер зарядного пристрою

Для проектування локальної сонячної енергосистеми постійного струму на основі параметрів сонячної панелі було проведено аналіз існуючих рішень та обрано інтегрований контролер зарядного пристрою CN3722.

Мікросхема CN3722 є контролером зарядного пристрою з перемикачем ШІМ, який може живитися від фотогальванічного елемента з функцією відстеження точки максимальної потужності. Мікросхема CN3722 спеціально розроблена для заряджання одно- або багатоелементних літій-іонних акумуляторів або акумуляторів LiFePO<sub>4</sub> в режимі постійного струму та постійної напруги. У режимі постійної напруги напруга регулювання визначається зовнішнім резистивним дільником. Постійний зарядний струм програмується за допомогою одного струмовимірювального резистора.

Глибоко розряджені акумулятори автоматично заряджаються при 15% за-

програмованого постійного зарядного струму, доки напруга елемента не перевищить 66,7% регульованої напруги. У режимі постійної напруги зарядний струм поступово зменшується, цикл заряду буде припинено, коли зарядний струм впаде до 9,5% від повного струму, і новий цикл заряду автоматично перезапуститься, якщо напруга батареї впаде нижче 95,8% від регулювання, в режимі постійної напруги. Мікросхема CN3722 автоматично переходить у сплячий режим, коли вхідна напруга нижче напруги батареї. Інші функції включають блокування при зниженій напрузі, контроль температури батареї та індикацію стану тощо. Мікросхема CN3722 випускається у компактному 16-контактному корпусі TSSOP.

Функції мікросхеми CN3722:

- Відстеження точки максимальної потужності фотогальванічного елемента
- Широка вхідна напруга: від 7,5 до 28 В.
- Повний контролер зарядного пристрою для 1- або багатoelementної літій-іонної батареї або LiFePO<sub>4</sub>.
- Струм заряду до 5А
- Висока частота перемикачання ШІМ: 300 кГц
- Постійна зарядна напруга, що встановлюється зовнішнім резистивним дільником
- Зарядний струм програмується за допомогою чутливого резистора
- Автоматичне кондиціонування глибоко розряджених акумуляторів
- Контроль температури батареї
- 2 індикатори стану
- М'який старт
- Захист від перенапруги батареї
- Робоча температура навколишнього середовища від -40 °С до +85 °С.

Призначення виводів показано на рис. 3.1, а типова схема підключення на рис. 3.2.



Таблиця 3.1 — Призначення виводів мікросхеми.

| Вивод | Назва | Опис   |
|-------|-------|--|
| 1     | VG    | Внутрішній регулятор напруги VG внутрішньо подає живлення на драйвер затвора, підключіть конденсатор 100нФ між контактами VG та VCC.   |
| 2     | PGND  | Силова земля.  |
| 3     | GND   | Аналогова земля.   |
| 4     | CHRG  | Вихід із відкритим стоком. Коли акумулятор заряджається, цей вивід замикається внутрішнім перемикачем. Інакше цей вивід перебуває у стані високого імпедансу.  |
| 5     | DONE  | Вихід із відкритим стоком. Коли заряджання припиняється, внутрішній перемикач перетворює цей контакт на низький рівень. Інакше цей вивід перебуває у стані високого імпедансу.   |
| 6     | TEMP  | Вхід контролю за температурою батареї. Підключіть резистор NTC від цього контакту до GND.  |
| 7     | MPPT  | Відстежує максимальну потужність фотогальванічного елемента. Підключіть цей контакт до ділянки зовнішнього резистора, щоб відстежувати точку максимальної потужності. У стані відстеження точки максимальної потужності напруга на виведенні MPPT регулюється до 1,04 В (25°C) з температурним коефіцієнтом $-0,4\%/C$ . |
| 8     | COM1  | Вхід компенсації контуру 1. Підключіть конденсатор ємністю 470 пФ від цього контакту до GND..  |
| 9     | COM2  | Вхід компенсації контуру 2. Підключіть конденсатор 220 нФ послідовно з резистором 120 Ом від контакту до GND.  |
| 10    | FB    | Вхід зворотного зв'язку напруги батареї. Потрібно підключити до зовнішнього резисторного ділянки.  |
| 11    | COM3  | Вхід компенсації контуру 3. Підключіть конденсатор ємністю 100 нФ від контакту до GND.   |
| 12    | NC    | Не використовується  |
| 13    | CSP   | Позитивний вхід для виміру зарядного струму. Виводи CSP та BAT вимірюють падіння напруги на чутливому резисторі $R_{cs}$ для забезпечення необхідних струмових сигналів.   |
| 14    | BAT   | Негативний вхід для вимірювання струму заряду. Виводи BAT та CSP вимірюють падіння напруги на чутливому резисторі $R_{cs}$ для забезпечення необхідних струмових сигналів.   |
| 15    | VCC   | Вхід зовнішнього джерела постійного струму. VCC також є джерелом живлення або внутрішнім ланцюгом. Зашунтуйте цей вивід конденсатором.   |
| 16    | DRV   | Управління затвором зовнішнього Р-канального MOSFET.   |

Абсолютні максимальні значення при використанні мікросхеми:

- Напруга від VCC, VG DRV, CHRG, DONE до GND від -0,3 до 30 В
- Напруга від CSP, BAT до GND від -0,3 до 28 В
- Напруга від COM3 до GND 6,5 В
- Напруга від інших контактів до GND від -0,3 до VCOM3+0,3 В
- Температура зберігання - 65 °С - 150 °С
- Робоча температура навколишнього середовища - 40 °С --- 85 °С
- Температура свинцю (пайка, 10 секунд) 300 °С.

Цикл заряду мікросхеми CN3722 починається, коли виконуються такі 3 умови:

(1) Напруга на виводі VCC перевищує рівень UVLO.

(2) Напруга виведення VCC більша, ніж напруга батареї на поріг відключення сплячого режиму VSLPR.

(3) Напруга на виводі VCC не менша за максимальну напругу точки живлення, встановленого зовнішніми резисторами. На початку циклу заряду, якщо напруга батареї менше  $66,7\% \cdot V_{REG}$ , зарядний пристрій переходить у режим безперервного заряду. Струм безперервного заряду внутрішньо встановлений на 15% (типово) від повного струму. Коли напруга батареї перевищує  $66,7\% \cdot V_{REG}$ , зарядний пристрій переходить у повномасштабний режим заряджання постійним струмом. У режимі постійного струму струм заряду встановлюється зовнішнім резистивним сенсором  $R_{CS}$  та внутрішньою опорною напругою 200 мВ, тому струм заряду дорівнює  $200 \text{ мВ} / R_{CS}$ . Коли напруга батареї наближається до регульованої напруги, зарядний пристрій переходить у режим постійної напруги і струм заряду починає зменшуватися. У режимі постійної напруги цикл заряду буде завершено, коли струм заряду знизиться до 9,5% повного струму. У стані закінчення заряду вивод DRV підтягується до VCC, а внутрішній компаратор відключає внутрішній N-канальний МОП-транзистор зі зниженням напруги на виводі CHRG, інший внутрішній N-канальний МОП-транзистор зі зниженням напруги на виводі DONE включається. для індикації

стану завершення.

Щоб перезапустити цикл заряджання, просто зніміть і знову подайте вхідну напругу. Крім того, новий цикл заряджання почнеться автоматично, якщо напруга батареї впаде нижче за порогову напругу перезарядки  $95,8\% \cdot V_{REG}$ . За відсутності вхідної напруги зарядний пристрій переходить у режим сну.

Термістор NTC з номінальним опором 10 кОм може бути підключений від виводу TEMP до землі для визначення температури батареї. Цикл заряджання припиняється, якщо температура батареї виходить за межі допустимого діапазону.

Компаратор перенапруги захищає від стрибків напруги при перехідних процесах ( $> 8\%$  регульованої напруги). У цьому випадку Р-канальні МОП-транзистори відключаються доти, доки не буде усунено стан перенапруги. Ця функція корисна для скидання навантаження або раптового виймання батареї.

Профіль заряджання показаний на рис. 3.3.

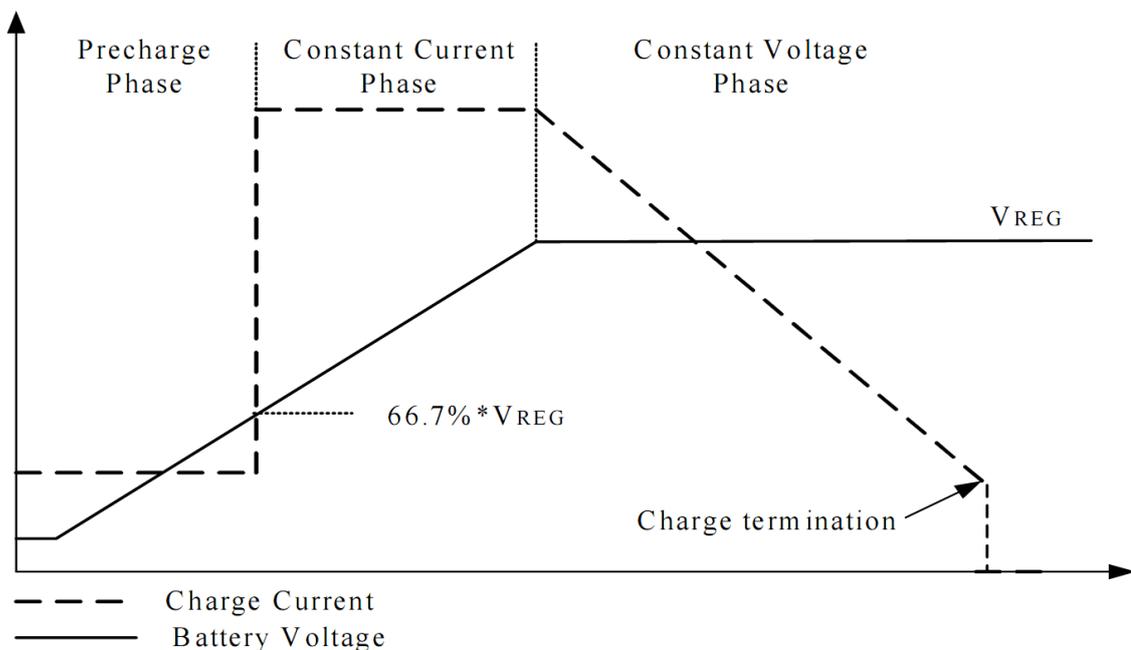


Рисунок 3.3 - Профіль зарядки

Основні розрахункові формули для різних режимів роботи.

а) Блокування зниженої напруги (UVLO).

Схема блокування при зниженій напрузі відслідковує вхідну напругу і відключає зарядний пристрій, якщо напруга VCC падає нижче 6В (зазвичай).

б) Встановлення напруги регулювання в режимі постійної напруги

Як показано на рис. 3.2, напруга батареї передається на вивод FB через резисторний дільник, що складається з резисторів R6 та R7. Мікросхема CN3722 визначає стан заряджання на основі значення напруги FB. Коли напруга FB наближається до 2,416, зарядний пристрій переходить в режим постійної напруги. У режимі постійної напруги струм заряду поступово зменшується, а напруга акумулятора залишається незмінною.

З урахуванням струму зміщення виводу FB напруга регулювання в режимі постійної напруги визначається наступним рівнянням:

$$V_{\text{BAT}} = 2,416 \cdot (1 + R7/R6) + I_B \cdot R7$$

де  $I_B$  — струм усунення виведення FB, який зазвичай становить 50 нА.

З наведеного вище рівняння видно, що помилка вноситься через наявність струму зсуву  $I_B$ , помилка дорівнює  $I_B \cdot R7$ . Якщо  $R7 = 500 \text{ кОм}$ , похибка становить близько 25 мВ, тому похибка слід враховувати при проектуванні резисторного дільника.

Діапазон регульованої напруги, який можна встановити, становить від 3 до 25 В.

Для акумулятора 12В, номінали R6 – 47 кОм, R7 – 200 кОм.

$$V_{\text{BAT}} = 2,416 \cdot (1 + 200/47) + 50 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^3 = 12,7 \text{ В.}$$

в) Відстеження максимальної потужності

CN3722 використовує метод постійної напруги для відстеження точки максимальної потужності фотогальванічного елемента. Судячи з ВАХ фотогальванічного елемента за заданої температури, напруги фотогальванічного елемента в точці максимальної потужності майже постійні, незалежно від різної освітленості. Таким чином, точка максимальної потужності може бути відсте-

жена, якщо вихідна напруга фотогальванічного елемента регулюється до постійної напруги. Але максимальна напруга в точці живлення має температурний коефіцієнт  $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$ .

При  $25^{\circ}\text{C}$  напруга на виводі MPPT мікросхеми CN3722 регулюється до  $1,04\text{В}$  з температурним коефіцієнтом  $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$  для відстеження точки максимальної потужності, що працює з резисторним дільником поза мікросхеми (R3 і R8 на рис. 3.2).

При  $25^{\circ}\text{C}$  максимальна напруга в точці живлення визначається наступним рівнянням:

$$V_{\text{MPPT}} = 1,04 \cdot (1 + R8/R3)$$

$$V_{\text{MPPT}} = 1,04 \cdot (1 + 100/10) = 12,04\text{В}.$$

Таким чином,  $R8 = 100 \text{ кОм}$ ,  $R3 = 10 \text{ кОм}$ .

Мікросхема CN3722 живиться як від адаптера змінного струму, так і від фотогальванічного елемента

Для живлення CN3722 можна використовувати адаптер змінного струму, так і фотогальванічний елемент. Струм заряду можна встановити залежно від можливостей адаптера змінного струму, який зазвичай більший, ніж у фотогальванічного елемента. Коли використовується фотогальванічний елемент, мікросхема CN3722 може автоматично регулювати струм заряду відповідно до максимального струму в точці живлення фотогальванічного елемента. Слід зазначити, що вихідна напруга адаптера змінного струму повинна бути не меншою за напругу MPPT фотогальванічного елемента.

г) Режим безперервного заряду

На початку циклу заряду, якщо напруга батареї нижче  $66,7\% \cdot V_{\text{REG}}$ , зарядний пристрій переходить у режим безперервного заряду, при цьому струм заряду знижується до  $15\%$  від повного струму.

д) Налаштування струму заряду

Повний струм заряду, а саме струм заряду в режимі постійного струму визначається за такою формулою

$$I_{CH} = 200\text{mV} / R_{CS}$$

де  $I_{CH}$  - повний струм заряду.

$R_{CS}$  – це резистор між виводом CSP та виводом BAT.

$$I_{CH} = 200\text{mV} / R_{CS} = 0.2 / 0.035 = 5.7\text{A}.$$

е) Припинення заряджання

У режимі постійної напруги цикл заряду буде завершено, коли струм заряду знизиться до 9,5% повного струму.

ж) Автоматична перезарядка батареї

Після завершення циклу заряджання, коли акумулятор і вхідне джерело живлення (мережевий адаптер) все ще підключені, почнеться новий цикл заряджання, якщо напруга акумулятора впаде нижче  $95,8\% \cdot V_{REG}$  через саморозряд або зовнішній навантаження. Це дозволить постійно підтримувати ємність акумулятора на рівні понад 90% без ручного перезапуску циклу заряджання.

з) Моніторинг температури батареї

Термістор з негативним температурним коефіцієнтом (NTC), розташований поруч із батарейним блоком, може використовуватися для контролю температури батареї і не дозволяє заряджати її, якщо температура батареї не знаходиться у допустимому діапазоні. Підключіть термістор 10 кОм від контакту TEMP до землі. В мікросхемі для високої температури поріг низької напруги встановлений на рівні 175 мВ, що дорівнює  $50^{\circ}\text{C}$  ( $R_{NTC} \approx 3,5 \text{ кОм}$ ). Для низьких температур поріг високої напруги встановлюється на рівні 1,61, що відповідає  $0^{\circ}\text{C}$  ( $R_{NTC} \approx 32\text{k}\Omega$ ) зі струмом підтяжки 50 мкА.

Як тільки температура вийде за допустимі межі, цикл заряду буде припинено, і цикл заряду відновиться, якщо температура повернеться до допустимого діапазону.

Підтягуючий струм контакту TEMP становить близько 50 мкА, тому опір термістора NTC має бути 10 кОм при  $25^{\circ}\text{C}$ , близько 3,5 кОм при порозі високої температури та близько 32 кОм при порозі низької температури. Термістор NTC, такий як TH11-3H103F, MF52 (10 кОм), QWX-103 та NCP18XH103F03RB,

може добре працювати з CN3722. Наведені вище номери деталей наведено лише для довідки, користувачі можуть вибрати правильний номер деталі термістора NTC відповідно до своїх вимог.

Якщо функція контролю температури батареї не потрібна, просто підключіть резистор 10 кОм від контакту TEMP до GND.

#### і) Індикація стану

Мікросхема CN3722 має 2 виходи стану з відкритим стоком: CHRG та DONE. Вивод CHRG отримує низький рівень, коли зарядний пристрій перебуває у стані зарядки, інакше CHRG стає високоімпедансним. Вивод DONE переводиться в низький рівень, якщо зарядний пристрій перебуває в стані завершення заряджання, інакше вивод DONE стає високим імпедансом.

Коли батарея відсутня, зарядний пристрій швидко заряджає вихідний конденсатор до регульованої напруги, потім напруга на виводі BAT повільно знижується до порога перезарядки через низький струм витoku на виводі BAT, що призводить до пульсації сигналу на виводі BAT, тим часом контакт CHRG видає імпульс, що вказує на відсутність батареї.

Вихід зі станом відкритого стоку, який не використовується, має бути заземлений. Передбачається, що червоний світлодіод підключено до контакту CHRG, а зелений світлодіод підключено до контакту DONE.

Індуктивність обирається для струму 5А рівною 8 мкГн.

Діоди Шотки обрані марки SB1045L з параметрами: напруга 45В, середній струм 10А.

### 3.2 Моделювання роботи контролера

Моделювання проводилось в програмі Micro-Cap 12, яка вільно розповсюджується. Програма дозволяє проводити аналіз електронних пристроїв в режимах постійного струму та перехідних процесів.

Для моделювання будемо використовувати модель силової частини, яка показана на рис. 3.4. Результати моделювання показані на рис. 3.5.

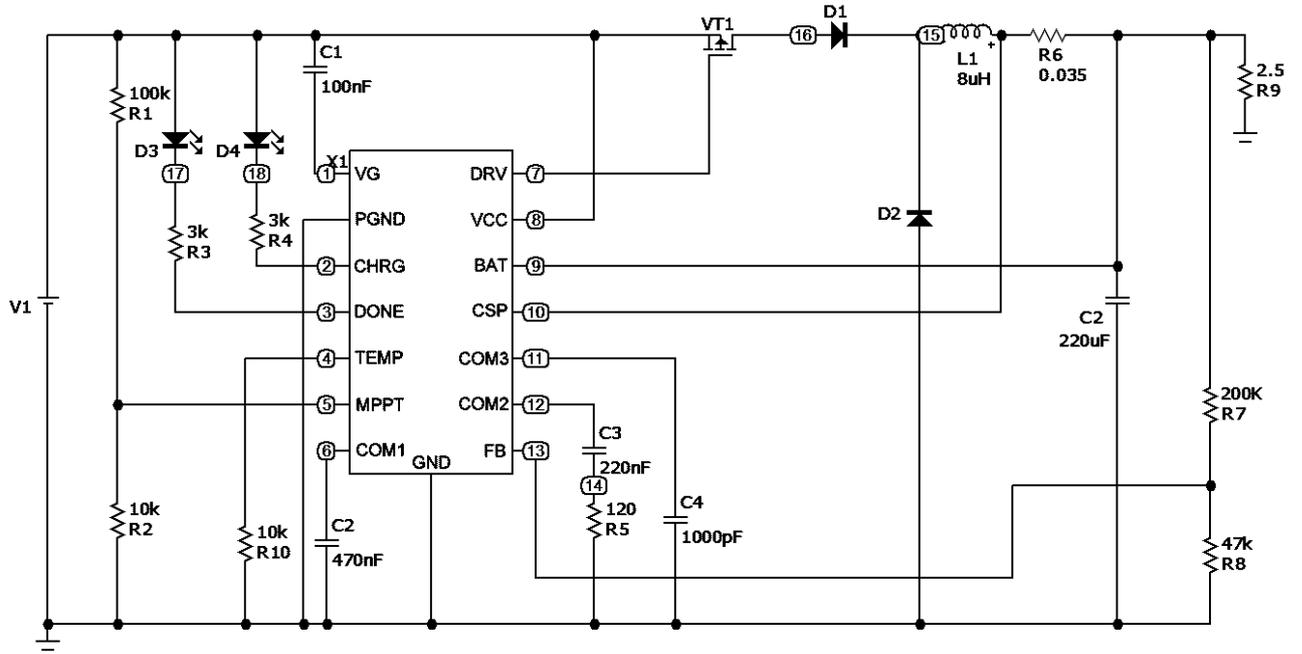


Рисунок 3.4 — Схема для моделювання



Рисунок 3.5 — Результати моделювання

Результати моделювання показали правильність розрахунків номіналів елементів схеми. Вихідна напруга після старту моделювання становить 12.7В при струмі 5А.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

2. “Solar cell and module: The big picture outlook for prices and demand”, PV InfoLink, November 18, 2021, <https://www.infolink-group.com/en/solar/analysis-trends/Solar-cell-and-module-The-big-picture-outlook-for-prices-and-demand>.
3. S. Philipps et al., “Photovoltaics report”, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, July 2021, Freiburg, Germany, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
4. A. Hsieh, “Polysilicon outlook for 2022”, PV InfoLink, November 26, 2021, <https://www.infolink-group.com/en/solar/analysis-trends/2020-polysilicon-industry-outlook>
5. “GLOBAL SUPPLY CHAIN WOES DEEPEN AFTER SUEZ CANAL global-supply-chain-woes-deepen-after-suez-canal-blockage/.
6. C. Lin, “PV manufacturers call to action amid challenges brought by China’s power rationing”, PVInfoLink, October 1, 2021, <https://www.infolink-group.com/en/solar/analysis-trends/PV-manufacturers-call-to-action-amid-challenges-brought-by-China’s-power-rationing>
7. C. Lin, “China’s dual-control on energy intensity target to hit PV supply chain in Q4”, PVInfoLink, September 17, <https://www.infolink-group.com/en/solar/analysis-trends/China’s-dual-control-on-energy-intensity-target-to-hit-PV-supply-chain-in-Q4>.
8. Historical Consumer Price Index for All Urban Consumers (CPI-U), Bureau of Labor Statistics, U.S. Department of Labor, NE Washington D. C., 2021, <https://www.bls.gov/cpi/tables/supplemental-files/historical-cpi-u-202112.pdf>