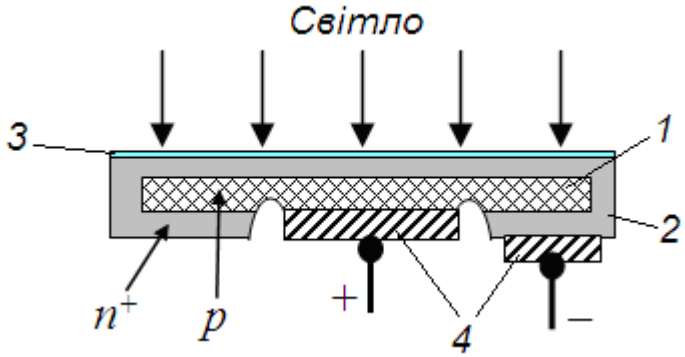
Лекція 12. Фотоелектричні перетворювачі

12.1 Напівпровідникові фотоелементи

У напівпровідниковому фотоелементі з p-n переходом відбувається безпосереднє перетворення світлової енергії в електричну. Структура кремнієвого фотоелемента приведена на рисунку 12.1. Він є плоскою пластиною кремнію з електропровідністю p-типу, на поверхні якої створений тонкий шар з провідністю n+-типу. Висока провідність цього шару дозволяє створити омічний контакт у вигляді кільця або рамки на нижній поверхні фотоелемента, залишивши всю верхню поверхню кристала відкритою для освітлення.



1 – кремній p-типу; 2 – кремній n-типу; 3 – плівка з діоксиду кремнію; 4 - електроди

Рисунок 12.1 – Конструкція кремнієвого фотоелемента

Вольтамперна характеристика фотоелемента аналогічна ВАХ фотодіода (рис. 12.2).

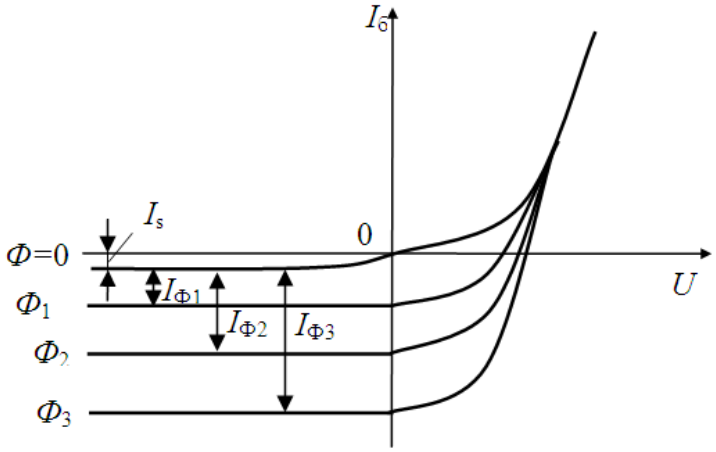


Рисунок 12.2 - Вольтамперна характеристика фотоелемента

Частини кривих, розташовані в третьому квадранті (при зворотній напрузі) відповідають фотодіодному режиму роботи p-n перехода; частини кривих, розташовані в четвертому квадранті, відповідають режиму генерації фото-ЕРС.

Фотоелемент працює без зовнішніх джерел живлення, а сам є джерелом електричної енергії (четвертий квадрант на ВАХ p-n перехода (рис. 12.3).

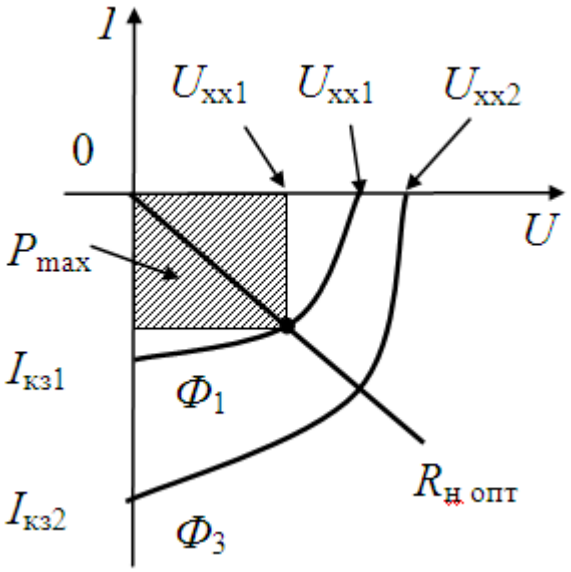


Рисунок 12.3 – Вольт-амперна характеристика фотоелемента при освітленні $\Phi_1 < \Phi_2$

Якщо до фотоелемента підключити зовнішнє навантаження (рис. 12.4), то при освітленні p-n перехода по колу потече струм.

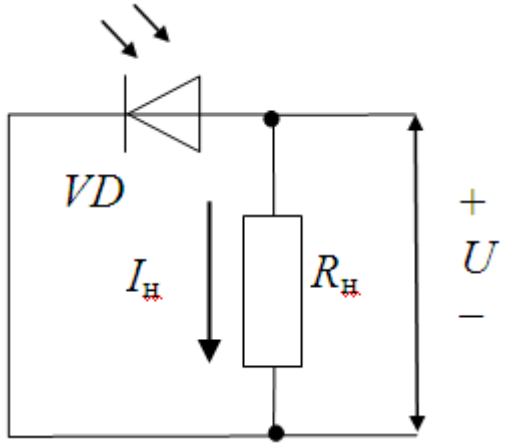


Рисунок 12.4 - Схема включення фотоелемента

Точки пересічення ВАХ з віссю струмів (U = 0) відповідають значенням струмів короткого замикання ($R_н = 0$). З рівняння при U = 0

$$I = I_S\left(\exp\frac{qU}{kT} - 1\right) - I_ф\ . \tag{12.1}$$

і рівняння

$$K_ф = I_ф/Ф. \tag{12.2}$$

отримаємо

$$I_{кз} = -I_ф = -K_ф Ф. \tag{12.3}$$

Струм короткого замикання залежить від площі фотоелемента

$$I_{кз} = -K_ф ES.$$

У кремнієвих фотоелементів щільність струму короткого замикання $I_{кз}/S = 20 \div 25$ мА/см^2 = $200 \div 250$ А/м^2 при середній освітленості сонячним світлом.

Точки пересічення ВАХ з віссю напруги (при $R_н = \infty$) відповідають значенням фото-ЕРС φ_0 або напрузі холостого ходу $U_{хх}$. Прийнявши в рівнянні (12.1) I = 0, можна знайти напругу холостого ходу:

$$U_{хх} = \varphi_ф = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_ф}{I_S} + 1\right) = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{K_ф\, Ф}{I_S} + 1\right). \tag{12.4}$$

де $I_s = I_{nE} + I_{pE}$ – зворотний струм p-n перехода.

Формула (12.4) справедлива, поки концентрація неосновних носіїв багато менше концентрації основних носіїв заряду. При великій інтенсивності світла максимальне значення фото-ЕРС прагне до величини контактної різниці потенціалів p-n перехода φ_0.

В кремнієвих фотоелементів фото-ЕРС складає 0,5 ÷ 0,55 В. Точки пересічення ВАХ з віссю струмів відповідають значенням струмів короткого замикання, які залежать від площі p-n переходу фотоелемента.

По ВАХ при різних освітленостях фотоелемента можна вибрати оптимальний опір навантаження $R_{н\ опт}$, при якому в навантаженні виділятиметься максимальна потужність P_{max}. Для цього необхідно провести пряму наванта-

ження з початку координат $I = -U/R_н$ (рис. 12.3). Точка перетину ВАХ з прямою навантаження визначає напругу $U_н$ і струм навантаження $I_н$. Потужність, яка виділяється в навантаженні $P_н = U_н \cdot |I_н|$.

Для кремнієвих фотоелементів при оптимальному навантаженні $U_н = 0{,}35 \div 0{,}4$ В і $I_н = 15 \div 20$ мА/см^2. Таким чином, при середній освітленості електрична потужність з одного квадратного сантиметра фотоелемента складає $P = 5 \div 8$ мВт.

Світлові характеристики фотоелемента (рис. 12.5) показують залежність напруги холостого ходу $U_{хх} = \varphi_ф$ і струму короткого замикання $I_{кз} = I_ф$ від освітленості, яка створюється лампою розжарювання з температурою вольфрамової нитки $T = 2842$ К: $U_{хх} = f(E)$ і $I_{кз} = f(E)$. Залежність $I_{кз}$ від освітленості в широких межах зміни освітленості лінійна (рис. 12.5, суцільна лінія), а напруга холостого ходу пропорційна логарифму освітленості (рис. 12.5, штрихова лінія).

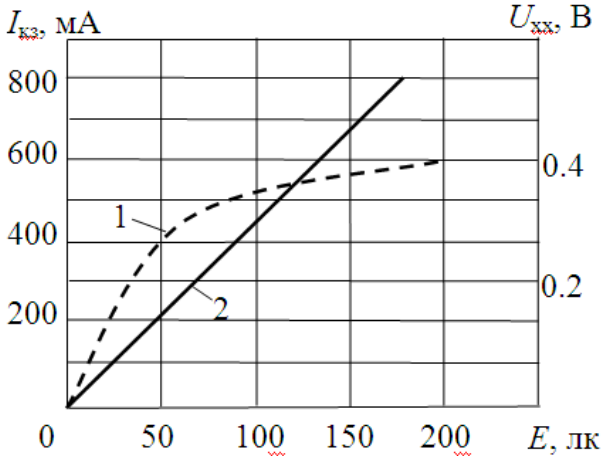


Рисунок 12.5 - Світлові характеристики фотоелемента: 1 – $U_{хх} = f(E)$, 2 – $I_{кз} = f(E)$

Відношення $K_{инт} = I_{кз}/E$ називається інтегральною чутливістю фотоелемента.

Спектральна характеристика фотоелемента – це залежність струму короткого замикання від довжини хвилі падаючого світла $I_{кз} = f(\lambda)$ при E = const. Максимум спектральної характеристики кремнієвих фотоелементів (рис. 12.6) майже збігається з максимумом спектрального розподілу енергії

сонячного світла. Тому кремнієві фотоелементи широко використовують для створення сонячних батарей.

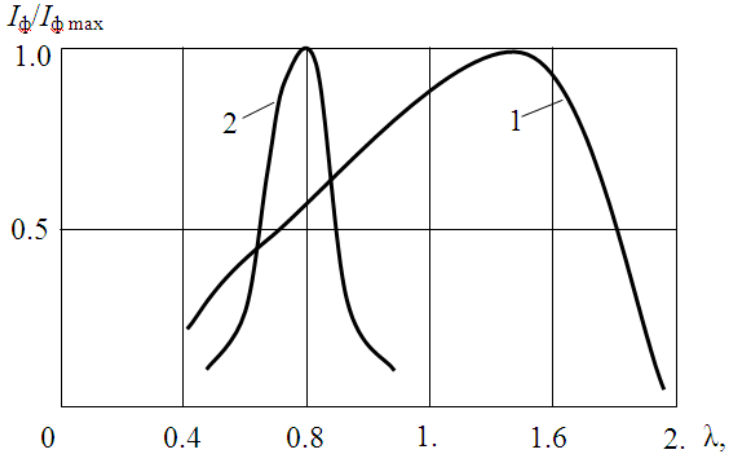


Рисунок 12.6 - Нормована спектральна характеристика для фотодіодів: 1 – германієвих, 2 – кремнієвих

Коефіцієнт корисної дії фотоелемента

$$\eta = P_{max}/P_ф,$$

де $P_ф$ – потужність світлового потоку, який падає на робочу поверхню фотоелемента. Теоретична межа ККД, кремнієвого сонячного фотоелемента складає 23%.

Зменшення ККД фотоелементів відбувається із-за часткового віддзеркалення випромінювання від поверхні напівпровідника, поглинання квантів світла без утворення пар електрон – дірка, рекомбінації нерівноважних носіїв до їх розділення електричним полем в p-n переході, втрати потужності при проходженні струму через об'ємний опір бази фотоелемента. В результаті ККД кремнієвих фотоелементів, які випускаються промисловістю, складає порядку 12%.

12.2 Електричні характеристики фотоелементів

Параметри фотоелементів вимірюють для визначення їх здібності виробляти необхідну кількість електроенергії при певній щільності потоку випромінювання і фіксованій робочій температурі.

Вимірювальна установка складається в основному з джерела світла, навантаження, підключеною до вихідних кінців сонячних елементів, і приладів для виміру електричного струму і напруги.

На рисунку 12.7 показані еквівалентна схема фотоелемента і схема для вимірів електричних характеристик. Р - потік випромінювання; G - генератор постійного струму; VD1 - діод, який працює в режимі прямого зсуву, що характеризує діодні властивості p-n переходу; С1 - ємність переходу; R2 - послідовний опір; R1 - шунтуючий опір; PA1 - міліамперметр з низьким вхідним опором; PV1 - вольтметр з високим вхідним опором; $Р_н$ - змінний опір навантаження.

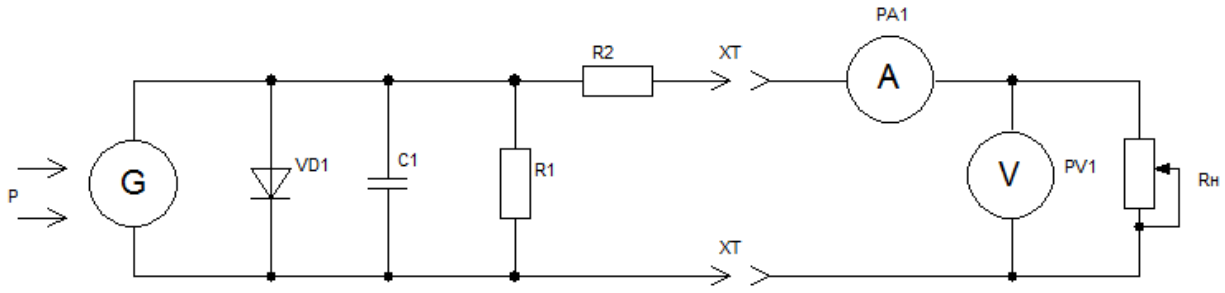


Рисунок 12.7 - Еквівалентна електрична і вимірювальна схеми фотоелемента

Якщо опір навантаження $R_н$ невеликий, то напруга на елементі теж невелика і струм через $R_н$ можна вважати рівним струму короткого замикання – $I_{кз}$. З збільшенням $R_н$ струм через резистор навантаження зменшується а напруга на елементі зростає до тих пір, поки не настане момент, коли $R_н = \infty$, а струм дорівнюватиме нулю. Цей режим називається режимом холостого ходу, а напруга відповідно - напругою холостого ходу $U_{хх}$. Знаючи струм і напругу, можна побудувати вольт-амперну характеристику.

Форма і розмір вольт-амперної характеристики залежать від параметра, який характеризує якість переходу, значень шунтуючого і послідовного опорів і від сумарної енергії випромінювання, перетвореної в електричну енергію незалежно від спектрального розподілу інтенсивності випромінювання. Наприклад, якщо під дією деякого випромінювання з довжиною хвилі від 0,4 до 0,7 мкм в елементі виникає певний струм короткого замикання $I_{кз}$, то йому

відповідатиме відповідна вольт-амперна характеристика. Якщо при тій же температурі інше випромінювання в спектральному діапазоні від 0,8 до 1,0 мкм викликає таке ж значення $I_{кз}$, як і в попередньому випадку, то йому відповідатиме та ж вольт-амперна крива . Невелика пульсація потоку випромінювання може робити вплив на точність запису показань реєструючої апаратури. Наприклад, на ксенонових лампах, які працюють від змінного струму або від незгладженого постійного, часто отримують менш прямокутну характеристику, ніж на лампах з живленням від постійного струму.

Оскільки при високих інтенсивностях випромінювання фотоелементи мають малий внутрішній опір, то щоб уникнути похибок прилади для виміру струму повинні також володіти невеликими внутрішнім опором. Наприклад, для виміру струму короткого замикання внутрішній опір приладу має бути 0,1 Ом і нижче. При малих рівнях світлового потоку внутрішній опір сонячного елементу стає високим, і це викликає труднощі при виміру напруги. Наприклад, аби правильно виміряти напругу холостого ходу при щільності потоку випромінювання рівному 0,01 сонячної постійної, вхідний опір вольтметра має бути не менше 10 МОм.

12.3 Фотоелектричні перетворювачі

Пристрої для безпосереднього перетворення сонячної енергії в електричну енергію називаються фотоперетворювачі. Сонячний елемент (СЕ) є первинним перетворювачем фотоелектричної системи, який перетворює світлову енергію сонця в електричну енергію (рис. 12.8).

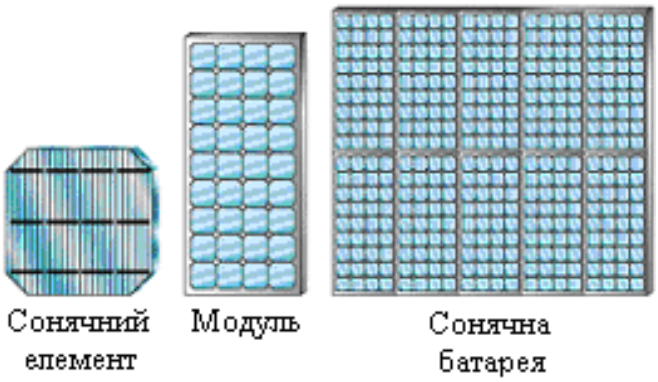


Рисунок 12.8 – Фотоелектричні перетворювачі

ККД доступних модулів варіюється в межах 5 – 15%. Це означає, що 5 – 15% від кількості енергії, падаючої на сонячний елемент, буде трансформовано в електрику. Дослідницькі лабораторії у всьому світі розробляють нові матеріали для СЕ з вищим ККД (до 30%). Вартість виробництва також дуже важлива. Деякі нові технології (такі як, наприклад, тонкоплівкові), дозволяють виробляти СЕ у великих масштабах, що значно понизить вартість елементів і модулів.

При роботі з будь-яким джерелом живлення необхідно уявляти собі, який зв'язок між собою напруги і струму, а також залежність їх від навантаження. В більшості випадків взаємозв'язок визначається законом Ома. Кремнієві сонячні елементи являються нелінійними пристроями і їх поведінка не може бути описана простою формулою. Замість неї для пояснення характеристик елемента можна користуватися сімейством вольт-амперних характеристик (рис. 12.9). 100 мВт/см^2 відповідають енергетичній освітленості, яка створюється прямим потоком сонячного випромінювання на поверхні землі на рівні моря опівдні при ясному піднебінні; 75 мВт/см^2 відповідають 3/4; 50 мВт/см^2 1/2; 25 мВт/см^2 1/4 цій освітленості.

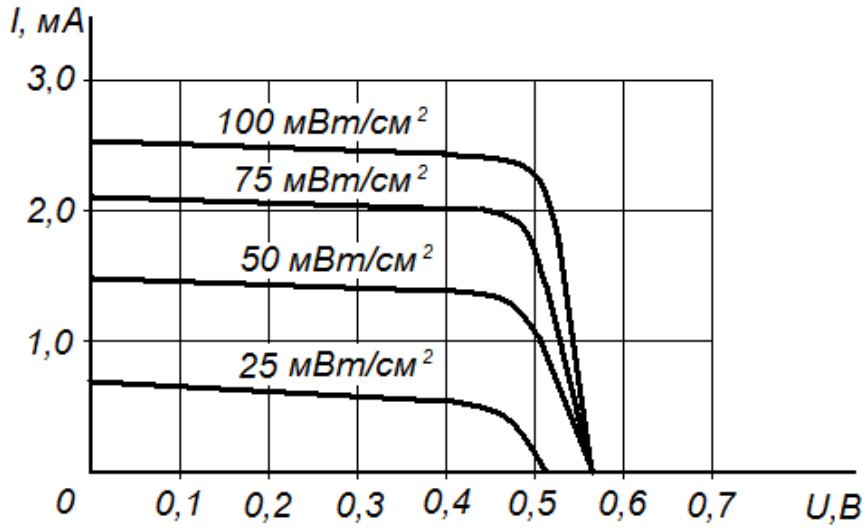


Рисунок 12.9 – Сімейство вольт-амперних характеристик фотоелектричних перетворювачів

Досліджувати вольт-амперні характеристики можна більш детально за допомогою схеми, представленої на рисунку 12.10. У схемі вимірюються вихідна напруга і струм, який протікає через змінне резистивне навантаження. Інтенсивність світла в процесі виміру залишається постійною.

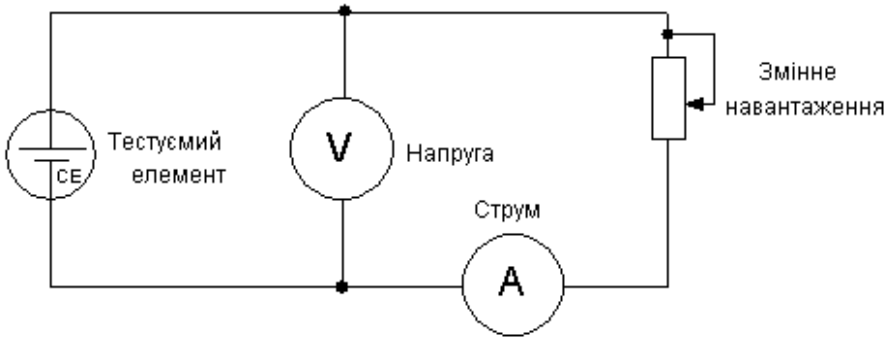


Рисунок 12.10 – Схемне дослідження вольт-амперної характеристики

Спочатку за допомогою потенціометра встановлюється максимальне значення опору. При цьому фактично в колі немає жодного струму і результуючу вихідну напругу можна рахувати рівною напрузі холостого ходу, напрузі яку генерує елемент, коли до нього не підключено ніякого навантаження. Вона складає близько 600 мВ (0,6 В). Величина цієї напруги може злегка змінюватися при переході від одного елементу до іншого в одній партії і від однієї фірми виготівника до іншої. При зменшенні опору резистора елемент більш навантажується. Як і у разі звичайної батареї живлення, це визиває зростання споживаного струму. Одночасно вихідна напруга злегка падає, як це і повинне статися з не стабілізованим джерелом живлення. Потім досягається таке положення, коли із зменшенням опору навантаження вихідний струм не збільшується. На практиці цей струм називають струмом короткого замикання. По суті, сонячний генератор став джерелом постійного струму. Напруга постійно зменшуватиметься пропорційно зростанню навантаження. Як тільки опір навантаження стане рівним нулю, напруга впаде до нуля. Коротке замикання фотоелектричного перетворювача не наводить до виходу його з строю. Сила струму, яку може розвинути елемент, залежить від інтенсивності світла.

12.4 Крива потужності

Графік залежності вихідної потужності від напруги являє собою криву (рис. 12.11). На одному кінці графіка є максимальний струм при нульовій напрузі. Жодної потужності в цій точці не виділяється через відсутність напруги. На іншому кінці графіка є максимальна напруга при нульовому струмі, внаслідок чого потужність також не виділяється.

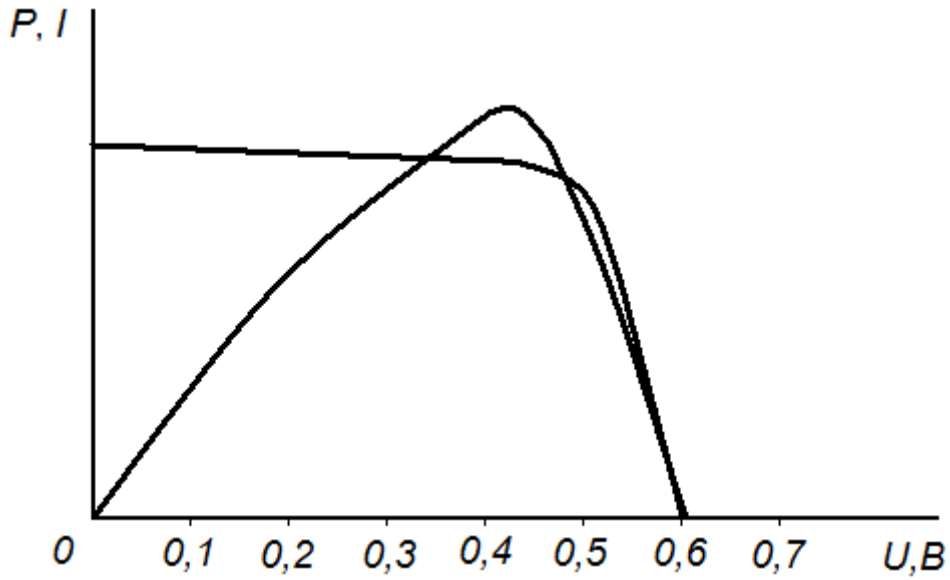


Рисунок 12.11 – Залежність вихідної потужності від напруги

Між цими двома межами при роботі фотоелектричного перетворювача в навантаженні виділяється потужність, причому пікова потужність виділяється лише в одній точці. Саме у ній сукупність всіх чинників забезпечує відбір найбільшої енергії від сонячного елементу. Пікова потужність відповідає напрузі близько 450 мВ (0,45 В).

Сімейство кривих струму має однакову форму, це означає, що максимальна потужність завжди вийде при одній і тій же напрузі незалежно від яскравості сонця. Фактична потужність залежатиме від інтенсивності сонячного випромінювання у даний час, проте пікова потужність спостерігатиметься при одній і тій же напрузі. Для правильної оцінки якості кремнієвого сонячного елемента, необхідно навантажити його так, щоб вихідна напруга дорівнювала 0,45 В, а потім виміряти вихідну потужність. Цей метод ефективний

не лише для порівняння елементів між собою в однакових умовах, але і для оцінки якості окремого елемента.

12.5 Експлуатація сонячних панелей

Положення Сонця на небосхилі визначається двома координатами - схиленням і азимутом (рис. 12.12). Схилення - це кут між лінією, яка з'єднує спостерігача і Сонце, і горизонтальною поверхнею. Азимут - це кут між напрямом на Сонце і напрямом на південь.

На практиці сонячні панелі повинні бути орієнтовані під певним кутом до горизонтальної поверхні. Невеликі відхилення від цієї орієнтації не відіграють істотної ролі, тому що протягом дня Сонце рухається по небу зі Сходу на Захід. Наприклад, частка виробленої енергії фотоелектричною системою при куті нахилу ФЕМ у 45° для широти місцевості 52° північної широти складає: на захід - 78%; на південний захід - 94%; на південь - 97%; на південний схід - 94%; на схід - 78%.

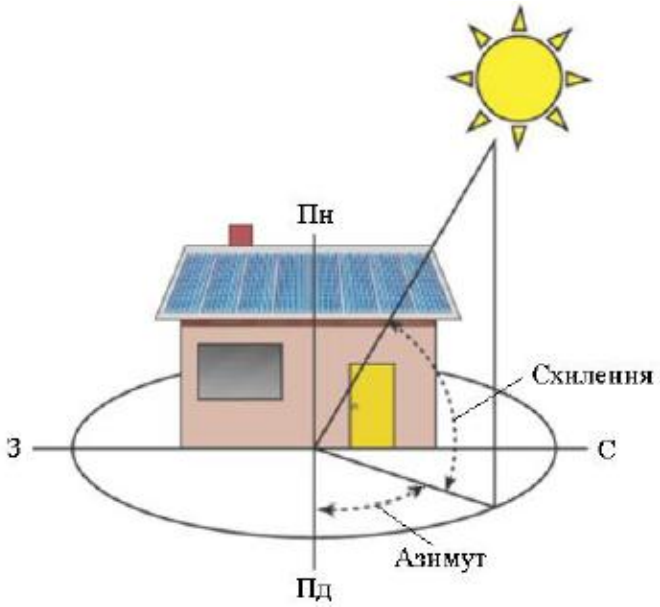


Рисунок 12.12 Координати, які визначають положення Сонця на небосхилі

Сонячні панелі зазвичай розташовуються на даху або підтримуючій конструкції у фіксованому положенні і не можуть стежити за місцем положення Сонця протягом дня. Тому вони не розташовані під оптимальним ку-

том (90°) протягом усього дня. Кут між горизонтальною площиною і сонячною панеллю називають кутом нахилу.

Внаслідок руху Землі навколо Сонця мають місце також сезонні варіації кута нахилу. Взимку Сонце не досягає того ж кута, що і влітку. В ідеалі сонячні панелі повинні розташовуватися влітку більш горизонтально, ніж взимку. Тому кут нахилу для роботи влітку вибирається меншим, ніж для роботи взимку. Якщо немає можливості змінювати кут нахилу двічі на рік, то панелі повинні розташовуватися під оптимальним кутом, значення якого лежить десь посередині між оптимальними кутами для літа та зими. Для кожної широти є свій оптимальний кут нахилу панелей. Для весни і осені оптимальний кут нахилу сонячних панелей приймається рівним значенню широти місцевості, для зими - до цього значення додається 10…15 градусів, а влітку - від цього значення віднімається 10…15 градусів. Невеликі відхилення до 5 градусів від цього оптимуму майже не змінюють продуктивність панелей. Різниця в погодних умовах в більшій мірі впливає на вироблення електрики.

Підвищення робочої температури ФЕП істотно знижує ефективність виробництва електричної енергії (напруга і потужність панелі при підвищенні температури зменшуються, а струм підвищується).

При нагріванні елемента на один градус більше за 25ºС він втрачає напругу в 0,002В, тобто 0,4%/градус. На рисунку 12.13 приведено сімейство кривих ВАХ для температур 25º С і 60º С.

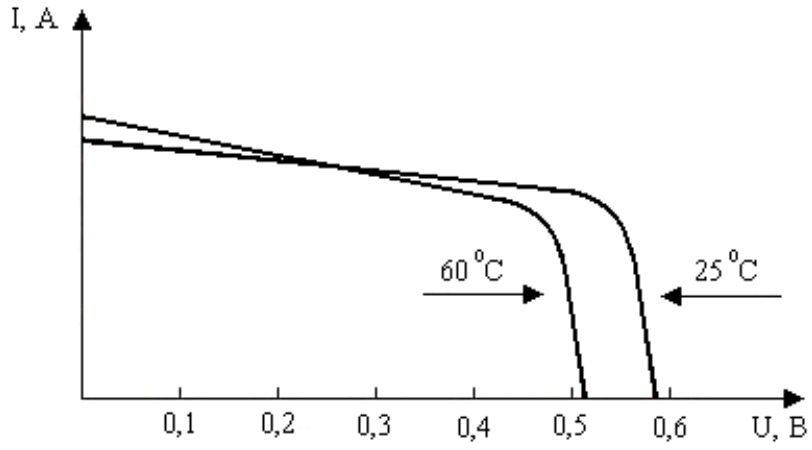


Рисунок 12.13 - Сімейство кривих ВАХ для температур 25º С і 60º С

Проблема більш повного використання енергії Сонця вирішується шляхом інтеграції фотоелектричних (ФЕ) панелей і сонячних колекторів (СК) в один технологічний пристрій – когенераційний фотоелектричний тепловий модуль - ФЕТМ (англ., «Photovoltaic thermal modules») (рис. 12.14). В них сонячна енергія за рахунок ФЕП перетворюється в електричну, а за рахунок теплового абсорбера – в теплоту. ФЕТМ з тепловим абсорбером «лист-труба» один з найпоширеніших типів модулів і являє собою традиційний СК, на робочій поверхні якого розміщена фотоелектрична панель.

Рисунок 12.14 - Фотоелектричний тепловий модуль