

УДК 621.315.592

# ПРОГНОЗУВАННЯ І РОЗРАХУНОК ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ЗАДАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Я. С. Буджак

Доктор фізико-математичних наук, професор\*  
Контактний тел.: (0322) 58-26-27

В. Ю. Єрохов

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*  
Контактний тел.: 097-131-88-48  
E-mail: verohov@polynet.lviv.ua

І. І. Мельник

Кандидат технічних наук  
Співробітник університету Констанца, Німеччина  
E-mail: imelnyk@mail.ru

\*Кафедра «Напівпровідникова електроніка»  
Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013

*Показана побудова моделі структури ФЭП для створення математичного алгоритму розрахунку ФЭП із визначеними характеристиками. Проведена оптимізація математичного апарату моделі універсальної структури ФЭП. Умовно об'єдналися два підходи до її роботи.*

*Ключові слова:* фотоелектричні перетворювачі, кремній, ефективність перетворення.

*Показано построение модели структуры ФЭП для создания математического алгоритма расчета ФЭП с заданными характеристиками. Проведена оптимизация математического аппарата построения модели универсальной структуры ФЭП. Условно объединились два подхода к ее работе.*

*Ключевые слова:* фотоэлектрические преобразователи, кремний, эффективность преобразования.

*The construction of solar cells (SC) model for creation of mathematical algorithm of calculation with specific performances is shown. The mathematical means optimization of SC model construction was realized.*

*Keywords:* solar cells, silicon, conversion efficiency.

## Вступ

Світова фотоенергетика є однією із самих перспективних галузей сучасної промисловості, що інтенсивно розвиваються, в якій за останні роки спостерігався один із найбільш великих приростів виробництва електроенергії. Ціни на традиційні джерела енергії постійно ростуть, що пов'язано з ростом населення планети, інтенсивним ростом споживання промислових виробництв енергії. Прагнення до зниження вартості і підвищенню технічних і фотоелектричних параметрів веде до розробки нових систем, а вона багато чисельніша і всебічна в цій області. При цьому станом за останнє десятиріччя більшість наземних фотоелектричних систем розроблялися на основі кристалічного кремнію з середнім значенням ефективності перетворення  $\eta \approx 16\%$ .

Висока ефективність роботи, технологічна простота, низька вартість виготовлення і достатня деградаційна стійкість є обов'язковими критеріями до фотоелектричних перетворювачів (ФЭП) наземної фотоенергетики всіх рівнів. В широкомасштабному використанні сьогоднішні ФЭП не відповідають приведеним вимогам повною мірою і не залишаються достатньо рентабельними [1, 2].

В роботах по теорії фотоелектричного ефекту в ФЭП з р-п переходом достатньо розширено містять теоретичний опис роботи ФЭП сонячної енергії [3, 4, 5]. Одні з них розглядають ефект фотовольтаїчного (ФВ) перетворення узагальнено [6] і тому носять наближений характер, а інші, навпаки, детально описують конкретну

структуру ФЭП [5] і тому не володіють універсальністю. Якщо метою моделювання ставиться теоретичний опис фотоперетворення у певному типі ФЭП без врахування непринципових конструктивних особливостей, то ні перший і ні другий підхід до моделювання роботи ФЭП не може використовуватися. Тому доцільно провести оптимізацію математичного алгоритму побудови моделі універсальної структури ФЭП, умовно об'єднавши два згаданих підходи її роботи з метою одержання універсальної математичної моделі кремнієвих ФЭП з р-п переходом. Вона повинна забезпечувати необхідний рівень точності розрахунку і в той же час описуватися б достатньо простими математичними алгоритмами.

Мета даної роботи є побудова моделі універсальної структури ФЭП для створення ефективного математичного алгоритму побудови математичної моделі універсальної структури ФЭП і розрахунок по ній вольт-амперних характеристик (ВАХ) кремнієвих ФЭП з р-п переходом для прогнозування роботи фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками.

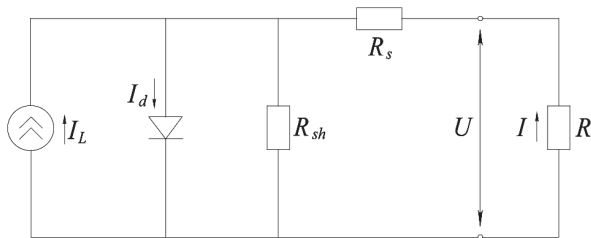
## 2. Моделювання фотоелектричного ефекту в кремнієвих ФЭП з р-п переходом

Аналіз процесу ФВ перетворення структури, в основі якої лежить генерація квантами сонячного світла з енергією, більшою ширини забороненої зони кремнію ( $h\nu > E_g$ ), пар вільних носіїв заряду, потрібен для побудови мате-

матичної моделі та розрахунку вольт-амперної характеристики (ВАХ) кремнієвих ФЕП з р-п переходом [7, 8]. Для розрахунку вихідних електричних параметрів ФЕП в режимі стаціонарної оптичної генерації використовуємо представлення ФЕП в вигляді еквівалентної електричної схеми [5]. Виходячи з рівності струмів, фотоперетворення в представленій електричній схемі (рис. 1), визначає струм  $I$ , який протікає через опір навантаження  $R$  і з врахуванням деяких перетворень, одержимо наступний вираз для визначення ВАХ ФЕП:

$$I = I_s \left( \exp \left[ \frac{q(U - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right) + \frac{U - IR_s}{R_{sh}} - I_L, \quad (1)$$

де  $I_s$  – струм насичення;  $n$  – діодний коефіцієнт якості, який визначається механізмом протікання струму та параметрами напівпровідника, а всі інші позначення мають своє традиційне значення.



**Рис. 1.** Спрощена еквівалентна електрична схема ФЕП з врахуванням паралельного  $R_{sh}$  та послідовного  $R_s$  опорів структури [5]

### 2.1. Вихідні електричні параметри ФЕП

Співвідношення (1) визначає форму кривої навантаження ФЕП, яка містить при заданому значенні фотоструму  $I_L$  дві характерні точки – перетин з віссю струмів ( $I_{sc}$ ) та перетин з віссю напруг ( $V_{oc}$ ). Дані точки ВАХ відображають відповідно значення струму короткого замикання та напруги холостого ходу, які являють собою основні вихідні електричні параметри ФЕП.

**2.1.1. Розрахунок струму короткого замикання.** Швидкість генерації електронно-діркових пар на відстані  $x$  від поверхні напівпровідника визначається виразом:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda) \times [1 - R(\lambda)] \exp(-\alpha(\lambda)x), \quad (2)$$

де  $\alpha(\lambda)$  – коефіцієнт оптичного поглинання напівпровідника.

Таким чином, для визначення фотоструму та одержання ВАХ ФЕП, необхідно вирішити систему рівнянь, які описують процес генерації нерівноважних носіїв в освітленій напівпровідниковій структурі з р-п переходом. Завдяки складності цих рівнянь дану задачу доводиться вирішувати наближено, розглядаючи окремо процеси та відповідні їм рішення в кожній з трьох областей ФЕП, а саме: в п-області, в р-області та в області р-п переходу (ОПЗ). Об'єднавши потім одержані рішення між собою, можна отримати вираз для ВАХ ФЕП. При цьому до уваги прийматимемо тільки стаціонарний режим роботи ФЕП, при якому інтенсивність його освітлення є постійною у часі.

Завдяки цьому вважатимемо, що число електронів та дірок, які знаходяться в будь-якому елементі об'єму структури ФЕП, не змінюється з часом, а різні процеси, які впливають на концентрацію носіїв, взаємозрівноважуються.

В області збіднення ( $x_j < x < h$ ) має місце різкий перепад концентрації електронів і дірок та зумовлене ним сильне електричне поле. Тому при записі рівняння балансу носіїв врахуємо те, що дифузійний та дрейфові потоки значно перевищуватимуть фотоперетворення та рекомбінаційні члени цього рівняння. Потрібно запобігти ускладненню процесу обрахунку густини фотоструму, що протікає через область збіднення, для чого використати наближений метод [5]. Він базується на тому, що величезний дифузійний струм в ОПЗ компенсується практично рівним йому по величині та протилежно напрямленим дрейфовим струмом. Подальше спрощення досягається при нехтуванні в ОПЗ рекомбінаційними втратами фотоперетворення носіїв. Це припущення є повністю правомірним, оскільки напруженість електричного поля в збідненому шарі є настільки високою, що вільні носії, які з'являються тут під дією світла, виносяться з ОПЗ перш ніж встигнуть між собою рекомбінувати.

За таких умов припустимо, що фотострум ОПЗ в одиничному спектральному інтервалі є рівним числу фотонів, що поглинаються в ньому за одиницю часу:

$$J_{dr}(\lambda) = qF(1 - R) \exp(-\alpha x_j) [1 - \exp(-\alpha W)], \quad (3)$$

де  $W$  – ширина ОПЗ.

Одержавши співвідношення, що виражають густину струмів, згенерованих світлом певної довжини у фронтальній, тильній та ОПЗ ФЕП, опустивши всі проміжні перетворення для формул фронтальної, тильної та ОПЗ ФЕП, кінцеву результуючу густину фотоструму можна отримати у вигляді:

$$J_L = \int_0^{\lambda_m} (J_n(\lambda) + J_p(\lambda) + J_{dr}(\lambda)) d\lambda = q \int_0^{\lambda_m} F(\lambda) (1 - R(\lambda)) \left[ \frac{\alpha L_n \exp(-\alpha h)}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \times \left\{ \alpha L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{H'}{L_n} \right) - \exp(-\alpha H') \right] + \operatorname{sh} \left( \frac{H'}{L_n} \right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\left( \frac{S_n L_n}{D_n} \right) \operatorname{sh} \left( \frac{H'}{L_n} \right) + \operatorname{ch} \left( \frac{H'}{L_n} \right)} \right\} + \left( \frac{\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \times \left\{ \left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - e^{-\alpha x_j} \left[ \frac{S_p L_p}{D_p} \operatorname{ch} \left( \frac{x_j}{L_p} \right) + \operatorname{sh} \left( \frac{x_j}{L_p} \right) \right] - \alpha L_p e^{-\alpha x_j} \right\} + e^{-\alpha x_j} (1 - e^{-\alpha W}) \right) \right] \quad (4)$$

**2.1.2. Розрахунок напруги холостого ходу.** У випадку, коли величина опору  $R$  в еквівалентній схемі ФЕП (рис. 1) прямує до безмежності, буде реалізовано режим холостого ходу, який тотожний роботі ФЕП без навантаження. Струм  $I$  при цьому протікати в колі не буде, отже величину вихідної напруги можна визначити з рівняння ВАХ (1), прийнявши  $I = 0$ . Вплив паралельного опору  $R_{sh}$  (навіть при низьких його значеннях) на вихідну напругу ФЕП є незначним і тому можемо скористатися більш простим виразом для обрахунку напруги холостого ходу

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left[ \frac{I_L}{I_s} + 1 \right]. \quad (5)$$

**3. Ефективність фотовольтаїчного перетворення в ФЕП з р-п переходом**

Існує цілий ряд методик [6, 9, 10] визначення ККД процесу фотовольтаїчного перетворення в структурах ФЕП, однак в їх основі лежить єдиний принцип: обчислення відношення добутку вихідних електричних характеристик, які генерує ФЕП в точці максимальної вихідної потужності, до потужності падаючого світлового потоку  $P_{in}$ :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} \tag{6}$$

Оскільки величина максимального струму та напруги ФЕП поряд з параметрами самого ФЕП в значній мірі залежить також і від опору навантаження, то очевидно, що вираз (6) не є універсальним при практичному використанні. У зв'язку із цим, при визначенні ККД ФЕП доцільно оперувати значенням струму короткого замикання та напруги холостого ходу, які пов'язані з  $I_m$  та  $V_m$  наступним співвідношенням:

$$V_{oc} \cdot I_{sc} = \frac{V_m \cdot I_m}{FF} \tag{7}$$

де  $FF$  — коефіцієнт заповнення ВАХ, який згідно його геометричній інтерпретації являє собою площу прямокутника з сторонами  $I_m$  та  $V_m$  на графіку ВАХ.

Скориставшись виразом для  $P_m$ , що приведений в [6], та нехтуючи при цьому впливом  $R_{sh}$ , запишемо співвідношення для визначення  $FF$  у вигляді:

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{\left(\frac{nkT}{q}\right) I_L (1-\gamma) \ln\left(\gamma \frac{I_L}{I_s}\right) - R_s I_L^2 (1-\gamma)^2}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \tag{8}$$

де

$$\gamma = \left[ 1 + \frac{1}{1 + 2R_s I_L \gamma \left(\frac{q}{nkT}\right) \ln\left(\gamma \frac{I_L}{I_s}\right)} \right]^{-1} \tag{9}$$

При врахуванні в (6) формул (8) та (9), отримаємо співвідношення для обрахунку ККД ФЕП, як функції його структурних параметрів:

$$\eta = \frac{\left(\frac{nkT}{q}\right) I_L (1-\gamma) \ln\left(\gamma \frac{I_L}{I_s}\right) - R_s I_L^2 (1-\gamma)^2}{P_{in}} \tag{10}$$

**4. Розрахунок верхньої межі теоретичного ККД кремнієвих ФЕП**

При моделюванні роботи ФЕП сонячної енергії існує два підходи до розрахунку верхньої межі теоретичного ККД. Перший з них, квантово-механічний, використовує ті ж самі методи, які застосовуються для моделювання роботи напівпровідникових приладів, і фотоперетворення на законах квантової механіки [5, 7, 8]. Квантово-механічний підхід [5], попри свою складність забезпечує високу точність розрахунку, однак вимагає детального опису структури фотоперетворювача, завдяки чому не може вважатись універсальним. Другий підхід, термодинамічний, як і для будь-якого фізичного приладу, підпорядко-

ваний вимогам термодинамічних законів. Таким чином, верхня межа ефективності фотоперетворення може бути отримана безпосередньо з цих законів. Цей тип наближення дає верхні теоретичні межі ККД для ідеальних приладів і тому не потребує повного знання структури чи матеріалу ФЕП [11]. В той же час, термодинамічний метод дозволяє дати швидку оцінку ККД ФЕП, проте не забезпечує високої точності обрахунку.

Для того, щоб уникнути ускладнення, але забезпечити достатню точність розрахунку верхньої межі теоретичного ККД кремнієвих ФЕП з р-п переходом доцільно об'єднати квантово-механічний та термодинамічний методи. При цьому пропонується використати наступну методику розрахунку:

1) за допомогою термодинамічного методу розрахувати ККД ідеального кремнієвого ФЕП без деталізації його конструкції;

2) за допомогою квантово-механічного підходу здійснити уточнення розрахованого значення ідеального ККД для реальної структури ФЕП з р-п переходом.

Як вихідне наближення моделювання за даною методикою приймемо, що ФЕП зображується квантовою системою, яка в результаті поглинання випромінювання переходить в збуджений стан із збільшенням вільної енергії. Наслідком цього є збудження електронно-діркових пар, які потім віддають свою додаткову енергію для зовнішнього використання. При цьому верхня межа теоретичного ККД для кремнієвого ФЕП може бути отримана шляхом термодинамічних обчислень, що включають баланс енергії та ентропії.

**4.1. Термодинамічний ККД кремнієвих ФЕП**

Для всіх типів ФЕП сонячної енергії верхня межа термодинамічного ККД може бути оцінена без врахування фізики процесів перетворення, розглядаючи тільки баланси швидкостей потоків енергії та ентропії. Як перший крок такого підходу можна прийняти припущення про ідентичність сонячного випромінювання та випромінювання абсолютно чорного тіла, нагрітого до температури  $T_1$ . Якщо температура самого ФЕП при цьому підтримується рівною  $T_2$ , то за певних умов теоретично можливий ККД фотоперетворювача можна визначити з циклу Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{11}$$

По-перше, слід врахувати, що в ФЕП повинно проходити проміння тільки вузької спектральної області, яка відповідає робочому спектральному діапазону ФЕП:

$$\Delta\nu = \frac{kT_2}{h} \tag{12}$$

По-друге, вказана спектральна область повинна бути обмежена з однієї сторони частотою краю поглинання  $\nu_0$ , оскільки проміння з меншою частотою не генерує в структурі ФЕП електронно-діркові пари і повинно бути відбито від його поверхні щоб уникнути підвищення температури фотоперетворювача. З іншої сторони, в процесах фотоперетворення напівпровідника, електрони займають енергетичні рівні, що лежать в інтервалі  $kT$  над дном зони провідності. У зв'язку із цим світлові кванти, енергія яких перевищує  $h\nu_0$  більше ніж на  $kT$ , при поглинанні створюють електронно-діркові пари з надлишком кінетичної енергії. Цей енергетичний надлишок

внаслідок ефекту термалізації «горячих» носіїв передається кристалічній ґратці, що приводить до додаткового нагрівання структури ФЕП. Тому, для забезпечення проривності використання співвідношення (12), випромінювання з частотою  $\nu > \nu_0 + kT/h$  також повинно відбиватись від поверхні ФЕП. Тому в ідеальному випадку на ФЕП повинно падати випромінювання з потужністю:

$$G_0(\nu_0, T_1) \cdot \frac{kT_2}{h}, \quad (13)$$

де  $G_0(\nu_0, T_1)$  – спектральний розподіл інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла, нагрітого до температури  $T_1$ .

Використавши рівняння ВАХ фотоперетворювача, після ряду перетворень, згенерована ФЕП максимальна потужність після ряду перетворень буде визначатись як:

$$P_m = \frac{E_g I_L}{q} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \left[1 - \frac{\ln \left[ \frac{E_g}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \right] + 1}{\frac{E_g}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)}\right]. \quad (14)$$

З метою одержання результативного виразу для визначення верхньої межі термодинамічного ККД ФЕП, розділимо величину згенерованої ФЕП потужності на потужність випромінювання, яке поглинулося в його структурі. При цьому вважатимемо, що кількість поглинутих фотонів рівна  $I_L/q$ , а їх енергія становить  $2\pi h\nu_0 = E_g$ . При справедливості цих припущень співвідношення, що виражатиме ККД циклу Карно, матиме вигляд:

$$\eta_K = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \left[1 - \frac{\ln \left[ \frac{E_g}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \right] + 1}{\frac{E_g}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)}\right]. \quad (15)$$

## 6. Ефективність перетворення в кремнієвій структурі ФЕП з р-п переходом

У випадку фотовольтаїчного перетворення сонячної енергії в структурі ФЕП, в першу чергу, до уваги слід прийняти незворотність даного процесу. Тобто врахування відбивання від поверхні структури ФЕП фотоперетворення випромінювання не має сенсу, оскільки під ККД слід розуміти відношення згенерованої електричної потужності до потужності падаючого світлового потоку. У зв'язку із цим необхідно прийняти наступні припущення, які дозволять з достатньою точністю використовувати ККД циклу Карно (15) в подальших розрахунках:

1) освітлення ФЕП здійснюється абсолютно чорним тілом, нагрітим до такої температури  $T_1$ , при якій в діапазоні частот  $kT_2/h$  кількість фотонів його випромінювання відповідає кількості фотонів випромінювання Сонця;

2) у структуру ФЕП проходить тільки світловий потік, який відповідає робочому спектральному діапазону ФЕП, а все інше випромінювання відбивається від його поверхні спеціальним селективним покриттям і не бере участі в процесі фотоперетворення.

Перша умова передбачає, що еквівалентна температура абсолютно чорного тіла  $T_1$  вже не може бути прирівняною до температури Сонця ( $T_C = 5800$  К), а повинна бути додатково визначена. З цією метою можна використати

умову рівності числа фотонів сонячного випромінювання та випромінювання абсолютно чорного тіла:

$$\frac{4n^2 G_0(\nu_0, T_1)}{h\nu_0} \cdot \frac{kT_2}{h} = \int_{\nu_0}^{\infty} \zeta G_0(\nu, T_C) \frac{d\nu}{h\nu}, \quad (16)$$

де  $\zeta$  – квадрат відношення радіуса Сонця до відстані між Сонцем та Землею;  $G_0(\nu, T_C)$  – спектральний розподіл інтенсивності випромінювання Сонця при температурі  $T_C$ , для визначення якого можна скористатись формулою Планка:

$$G_0(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (17)$$

Із врахуванням (17) формула (16) переписеться у вигляді:

$$\frac{1}{\exp\left(x_0 \frac{T_C}{T_1}\right) - 1} = \left(\frac{\zeta T_C}{4n^2 T_2}\right) \frac{1}{x_0^2} \int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2}{\exp(x) - 1} dx \approx \approx \left(\frac{\zeta T_C}{4n^2 T_2}\right) \exp(-x_0) \left(1 + \frac{2}{x_0} + \frac{2}{x_0^2}\right), \quad (18)$$

де  $x_0 = \frac{h\nu_0}{kT_C}$ .

Виразивши  $T_1$  з отриманого співвідношення отримаємо формулу для розрахунку числового значення температури абсолютно чорного тіла, яке буде задовольняти умові незворотності процесу фотоперетворення:

$$T_1 = \frac{T_C}{1 + \frac{1}{x_0} \ln \frac{4n^2 T_2}{\zeta T_C} - \frac{1}{x_0} \ln \left(1 + \frac{2}{x_0} + \frac{2}{x_0^2}\right)}. \quad (19)$$

Ще одним важливим моментом, який необхідно прийняти до уваги при розрахунку практичного ККД ФЕП, є те, що потужність сонячного випромінювання

$$P_C = \int_0^{\infty} \zeta G_0(\nu, T_C) d\nu, \quad (20)$$

більша за величиною від потужності випромінювання абсолютно чорного тіла

$$P_0 = G_0(\nu_1, T_1) \frac{kT_2}{h} 4n^2. \quad (21)$$

У зв'язку із цим, при визначенні теоретичної межі ККД фотовольтаїчного перетворення сонячної енергії необхідно уточнити розрахунок за формулою (15) шляхом її множення на коефіцієнт  $\eta_C$ , який становить відношення  $P_0/P_C$ :

$$\eta_C = \frac{G_0(\nu_0, T_1) \frac{kT_2}{h} 4n^2}{\int_0^{\infty} \zeta G_0(\nu, T_C) d\nu}. \quad (22)$$

Перетворивши (22) із врахуванням співвідношення (18) одержимо:

$$\eta_C = \frac{h\nu_0 \zeta \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{G_0(\nu, T_C)}{h\nu} d\nu}{\int_0^{\infty} \zeta G_0(\nu, T_C) d\nu} = \frac{x_0 \int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2}{\exp(x) - 1} dx}{\int_0^{\infty} \frac{x^2}{\exp(x) - 1} dx} \approx \approx \frac{15}{\pi^4} x_0^3 \exp(-x_0) \left(1 + \frac{2}{x_0} + \frac{2}{x_0^2}\right). \quad (23)$$

Таким чином, для визначення максимального ККД кремнієвого ФЕП  $\eta_{\max}$ , можна скористатися формулою для обчислення ККД циклу Карно за умови врахування при цьому величини та спектрального розподілу інтенсивності сонячного проміння та незворотності самого процесу фотоперетворення. Тобто:

$$\eta_{\max} = \eta_K \cdot \eta_C \cdot \tag{24}$$

З метою одержання результативного виразу для  $\eta_{\max}$  підставимо в (24) формули (15) та (23):

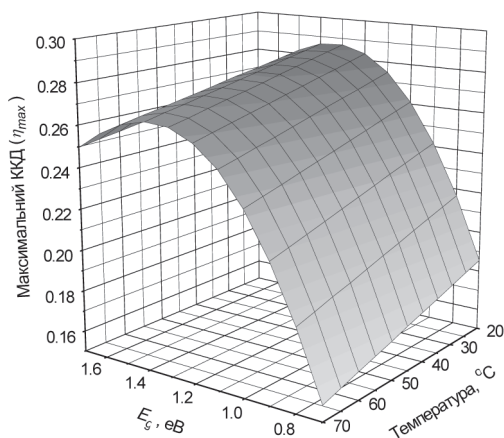
$$\eta_{\max} = \frac{15x_0^3 \exp(-x_0)}{\pi^4} \left(1 + \frac{2}{x_0} + \frac{2}{x_0^2}\right) \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times \left[1 - \frac{\ln \left[ \frac{E_g}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \right] + 1}{\frac{E_g}{kT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)}\right] \tag{25}$$

### 7. Теоретична межа ККД фотовольтаїчного перетворення кремнієвих ФЕП

Аналіз розрахунку максимального ККД для визначення  $\eta_{\max}$  допоможе виявити основні фактори, що визначають його величину. Як випливає з (15), ККД Карно, в основному, визначається значенням ширини забороненої зони напівпровідника  $E_g$ , температурою структури ФЕП та випромінювача ( $T_2$  та  $T_1$  відповідно).

Поряд із розрахунком числового значення  $\eta_{\max}$  представляє інтерес також виявлення ступеня залежності теоретичної межі ККД фотоперетворення від визначаючих його величину факторів. Це дає можливість оцінити перспективність використання кремнію у порівнянні з іншими напівпровідниками з точки зору досягнення вищої ефективності роботи, а також виявити оптимальний діапазон робочих температур.

Результати проведеного розрахунку представлені на рис. 2. Слід відзначити, що залежність  $\eta_{\max}(E_g, T_2)$  містить у собі основні тенденції, що були виділені раніше для множників формули (24) —  $\eta_C(E_g)$  та  $\eta_K(E_g, T_2)$ . Очевидно, внаслідок сумарного впливу двох даних факторів, вплив робочої температури зменшується із збільшенням  $E_g$  [13].



**Рис. 2.** Максимальний ККД процесу фотовольтаїчного перетворення сонячної енергії, як функції ширини забороненої зони напівпровідника ( $E_g$ ) та робочої температури

Проведений розрахунок вказує на те, що максимальним ККД фотоелектричного перетворення, який можна досягнути при використанні кремнієвого ФЕП з р-п переходом, є величина 27,5 % для температури 20 °С (див. [12]). При підвищенні робочої температури фотоперетворювача до 70 °С теоретична межа ККД знижується до 25,05 %.

### Висновки

Перераховані вище втрати енергії в процесі фотовольтаїчного перетворення можна умовно розділити на три основні типи: втрати по струму та напрузі, що визначаються шириною забороненої зони кремнію; оптичні втрати та резистивно-рекомбінаційні втрати. На основі отриманих співвідношень для обчислення ККД ФЕП було оцінено вагову долю кожного типу втрат та виявлено механізм перерозподілу енергії в кремнієвому ФЕП в процесі фотоперетворення. Завдяки своїй спектральній чутливості кремнієвий ФЕП може використати для перетворення в електричну енергію тільки 42 % падаючого світлового потоку. При цьому близько 14 % енергії втрачається в самому ФЕП внаслідок термалізації гарячих носіїв, неповного поглинання короткохвильового проміння та нагрівання структури ФЕП. Дані втрати по напрузі та струму понижують теоретичну межу ККД кремнієвого ФЕП до рівня ~28 % і в основному визначаються шириною забороненої зони кремнію. Подальші втрати ефективності фотоперетворення пов'язані з рекомбінаційно-генераційними та оптичними процесами, що мають місце в структурі ФЕП, і відповідно складають 3 ÷ 6 % і 4 ÷ 7 %. У результаті такого енергетичного перерозподілу, енергія на виході ФЕП може складати тільки 15 ÷ 21 %, однак оптимізація структури ФЕП зменшує кожен з трьох видів втрат приблизно на 2 %. Це може сприяти розширенню діапазону досяжних значень межі ККД фотоперетворення до 25 % і вище [14].

### Література

1. Macabebe, E. Q. B. Parameter extraction from I–V characteristics of PV devices [Текст] / Macabebe E. Q. B., Sheppard C. J., Van Dyk E. E. // Solar Energy. — 2011. — v. 85(1). — pp. 12–18.
2. Glunz S. W. High-efficiency crystalline silicon solar cells [Текст] / Glunz S. W. // Adv.Opto.Electron. — 2007. — Article ID 97370.
3. Полупроводниковые преобразователи энергии излучений [Текст]: учеб. / под. ред. Ю. П. Маслаковца и В. К. Сабашиева. — М.: Изд-во иностранной литературы. — 1959. — 236 с. — (Техbook).
4. Пикус Г. Е. Фотовольтаический эффект в структуре с р-п переходом [Текст] / Пикус Г. Е., Бир Г. Л. // ЖТФ. — 1957. — 27, № 3. — С. 467–473.
5. Полупроводниковые фотопреобразователи [Текст]: учеб. пособие / Васильев А. М., Ландсман А. П. — М.: Изд-во «Советское радио», 1971. — 241 с.
6. Bucher E. Solar cell materials and their basic parameters [Текст] / Bucher E. // Appl. Phys. — 1978. — V. 17. — pp. 1–25.

7. The Physics of Solar cells [Текст] / Nelson J. — Imperial College Press, London. — 2003.
8. Shivaganaik H. Modeling and analysis of multi-junction solar cells [Текст] / Shivaganaik H., Jangamshetti S. H. // International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology 2011. — ICETECT 2011. — pp. 174–179.
9. Солнечные элементы [Текст] : учеб. / под ред. М. М. Колтуна. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 280 с.
10. De Vos A. Photovoltaics in a single dimension [Текст] / De Vos A. // Solid-St. Electron. — 1987. — V. 30. — pp. 853–858.
11. Baruch P. On some thermodynamic aspects of photovoltaic solar energy conversion [Текст] / Baruch P., De Vos A., Landsberg P.T., Parrott J.E. // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 1995. — V. 36. — pp. 201–222.
12. Green M. A. Solar cell efficiency tables (version 35) [Текст] / M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta // Prog. Photovolt: Res. Appl. — 2010. — V. 18. — pp. 144–150.
13. Yerokhov V. Model conception of macroporous silicon surface for cost-effective solar cell textures [Текст] / V. Yerokhov, O. Tsisaruk, I. Semochko // International Conference on Porous Semiconductors: Science and Technology, ICPST-2000. — Spain, Madrid, 2000. — P. 34.
14. Polyakov V. I. Matrix solar cells for conversion of concentrated radiation [Текст] / V. I. Polyakov, D. S. Strebkov // Light and Engineering. — 2010. — V. 18(3). — pp. 5–8.

УДК: 621.331

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ «УМОВНИХ ВТРАТ» ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ

**В. Г. Кузнецов**

Кандидат технічних наук, доцент, докторант\*

E-mail: vkuz@i.ua

**Ю. М. Сергати́й**

Начальник лабораторії

Дорожня електротехнічна лабораторія

Одеська залізниця

Вокзальний провулок, 2, м. Одеса, Україна, 65017

Контактний тел.: (048) 727 26 27

E-mail: sergatiy@ukr.net

**Т. І. Кирилюк**

Аспірантка\*

E-mail: Tanya\_kir@bigmir.net

\*Кафедра «Електропостачання залізниць»

Дніпропетровський національний університет

залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна

вул. акад. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010

Контактний тел.: (0562) 33-19-11, (0562) 47-18-66

*Розглянута природа появи умовних втрат. Проведено експериментальне дослідження «умовних втрат» електроенергії на ділянках Одеської залізниці. Дані рекомендації по зниженню «умовних втрат».*

*Ключові слова: витрати електроенергії, умовні втрати, тягова мережа, електрорухомий склад, лічильник.*

*Рассмотрена природа появления условных потерь. Проведено экспериментальное исследование «условных потерь» электроэнергии на участках Одесской железной дороги. Даны рекомендации по снижению «условных потерь».*

*Ключевые слова: расход электроэнергии, условные потери, тяговая сеть, электроподвижной состав, счетчик.*

*The nature of the emergence of conditional losses. An experimental study of «conditional loss» power to parts of the Odessa railway. Recommendations to reduce «contingent losses».*

*Keywords: energy consumption, Contingencies, losses, power train, of electro compound meter.*

### Вступ

Обсяг втрат електроенергії в електричних мережах — найважливіший показник економічності їхньої роботи, наочний індикатор стану системи обліку електроенергії, ефективності енергозбутової діяльності енергопостачальних організацій. Цей індикатор чітко свідчить про проблеми, які вимагають невідкладних рішень у розвитку, реконструкції і технічному переозброєнні електричних мереж, удосконаленні методів і засобів їхньої експлуатації й керування, у підвищенні точності обліку електроенергії, ефективності збору коштів за спо-

житу електроенергію тощо. Відносні втрати електроенергії при її передачі і розподілі в електричних мережах можна вважати задовільними, якщо вони не перевищують 4–5 %. Втрати електроенергії на рівні 10 % можна вважати максимально припустимими з погляду фізики передачі електроенергії мережами.

У зв'язку з малими інвестиціями у розвиток і технічне переозброєння електричних мереж, в удосконалювання систем керування їхніми режимами, в облік електроенергії, виникла низка тенденцій, що негативно впливають на рівень втрат у мережах, адже йдеться про: застаріле обладнання, фізичне й моральне зношування засобів обліку