

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

(назва факультету)

КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ І ФІЗИКИ

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

другого (магістерського) рівня вищої освіти

(рівень вищої освіти)

на тему Визначення параметрів вольт-амперної характеристики сонячного
елемента

Виконав: студент 2 курсу групи БЕЛ
спеціальності 141. Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

освітньо- Нетрадиційні та відновлювані
професійної джерела енергії
програми (назва ОПП)

Мороз С.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доц. Курак В.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. Мешков Ю.Є.
(прізвище та ініціали)

Хмельницький – 2026 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему «Визначення параметрів вольт-амперної характеристики сонячного елемента» включає в себе пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка містить 74 сторінки формату А4, 19 рисунків, 11 таблиць, 25 використаних джерел, 15 слайдів електронної презентації, 1 додаток.

Ключові слова: сонячний елемент, вольт-амперна характеристика, струм насичення, коефіцієнт ідеальності, внутрішній опір, моделювання.

Запропоновано та апробовано методику, що дозволяє визначити параметри світлових вольт-амперних характеристик сонячних елементів в однодіодній моделі. В середовищі Matlab/Simulink за визначеними параметрами здійснено моделювання світлових вольт-амперних характеристик модулів сонячних елементів на основі кристалічного кремнію. Шляхом порівняння розрахункових електричних параметрів модулів з їх значеннями, вказаними в технічній документації, доведено коректність результатів, отриманих при використанні запропонованої методики. Дана методика може бути використана при розробці комплексу лабораторних робіт з дисципліни «Основи сонячної електроенергетики» для студентів, що навчаються за спеціальністю G3 Електрична інженерія.

У розділі «Економічна частина» проведено розрахунок витрат на виконання науково-дослідної роботи та оцінено її економічну ефективність.

У розділі «Охорона праці» розглянуто теоретичні засади охорони праці на підприємствах, проаналізовано шкідливі фактори виробничого середовища та способи протидії цим факторам, виконано розрахунок штучного освітлення виробничого приміщення.

ABSTRACT

The qualification work on the topic "Determination of the parameters of the volt-ampere characteristic of a solar cell" includes an explanatory note and a graphic part. The explanatory note contains 74 pages of A4 format, 19 figures, 11 tables, 25 literature sources, 15 slides of an electronic presentation, 1 appendix.

Keywords: solar cell, volt-ampere characteristic, saturation current, ideality coefficient, internal resistance, modeling.

A method that allows determining the parameters of the light current-voltage characteristics of solar cells in a single-diode model has been proposed and tested. Using the specified parameters and Matlab/Simulink model the light current-voltage characteristics of crystalline silicon solar modules were simulated. The correctness of the results obtained by the proposed methodology was proven by comparing the calculated electrical parameters of the modules with their values specified in the technical documentation. This methodology can be used in the development of a set of laboratory works on the discipline "Fundamentals of Solar Power Engineering" for students studying in the specialty G3 Electrical Engineering.

In the section "Economic part", the costs for carrying out the research work are calculated and its economic efficiency is assessed.

The section "Labor Safety" presents the theoretical principles of labor safety at enterprises. Harmful factors of the production environment and ways to counteract these factors were analyzed, and artificial lighting of the production premises was also calculated.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА.....	6
1.1 Принцип дії та основні параметри сонячних елементів	6
1.2 Світлові вольт-амперні характеристики сонячних елементів	10
1.3 Параметри, що описують світлові вольт-амперні характеристики сонячних елементів.....	11
1.4 Способи визначення параметрів, що описують світлові вольт-амперні характеристики сонячних елементів.....	14
1.5 Висновки.....	15
2 МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА.....	17
2.1 Опис однодіодної моделі сонячного елемента	17
2.2 Опис методики визначення параметрів світлової вольт- амперної характеристики сонячного елемента в однодіодній моделі....	19
2.3 Висновки.....	24
3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	25
3.1 Визначення послідовного та шунтуючого опорів сонячного елемента.....	25
3.2 Визначення струму насичення	31
3.3 Визначення коефіцієнту ідеальності вольт-амперної характеристики	33
3.4 Перевірка коректності методики.....	36
3.5 Висновки.....	40
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	42
4.1 Методика визначення економічної ефективності науково- дослідної роботи.....	42
4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження та економічної ефективності науково-дослідної роботи.....	47
4.3 Висновки.....	50

5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	52
5.1 Теоретичні засади охорони праці на підприємстві	52
5.2 Аналіз шкідливих факторів виробничого середовища та способи протидії їм	53
5.3 Виробниче освітлення та його види.....	57
5.4 Висновки.....	63
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТОК А Результати апробації роботи	72

ВСТУП

Одними з найбільш перспективних джерел відновлюваної енергетики для розвитку розподіленої електричної генерації в Україні на сьогоднішній день є вітрова та сонячна енергії [1], а також, зважаючи на розвиток аграрного сектору, біоенергетичні системи [2]. Втім, найбільшого поширення на даний момент отримали фотоелектричні системи, що обумовлено такими їх перевагами, як безшумність, модульність, мінімальний рівень потреби в технічному обслуговуванні та тривалий термін експлуатації.

Прогнозування енергетичних показників фотоелектричних систем потребує залучення засобів моделювання, що базуються на використанні рівняння вольт-амперної характеристики основної перетворювальної комірки цих систем – фотоелектричного перетворювача. Параметри, що описують вольт-амперну характеристику, можуть бути доволі різноманітними в залежності від конструкції та типу фотоелектричного перетворювача, матеріалу, що використовується для його створення. У зв'язку з цим, для побудови моделі сонячного елемента, здатної коректно описати його поведінку при зміні зовнішніх умов, необхідно попередньо визначити всі параметри його вольт-амперної характеристики.

Метою даної роботи є розробка методики визначення параметрів, що описують рівняння вольт-амперної характеристики сонячного елемента.

Об'єктом дослідження є світлова вольт-амперна характеристика сонячного елемента.

Предметом дослідження є параметри світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента.

Задачі дослідження:

- Проаналізувати основні моделі фотоелектричних перетворювачів та відповідні їм рівняння вольт-амперної характеристики.
- Обрати модель фотоелектричного перетворювача для реалізації дослідження.

- Розробити методику визначення параметрів, що описують вольт-амперну характеристику фотоелектричного перетворювача в обраній моделі.
- Використовуючи розроблену методику, визначити параметри вольт-амперної характеристики на прикладі фотоелектричних перетворювачів кількох типів.
- Проаналізувати відповідність результатів моделювання експериментальним вольт-амперним характеристикам сонячних елементів.

Методи дослідження: розрахунковий метод, моделювання, аналіз отриманих результатів та їх узагальнення.

В результаті виконання досліджень розроблено методику визначення параметрів вольт-амперної характеристики в однодіодній моделі сонячного елемента. Показано, що рівняння вольт-амперної характеристики з параметрами, визначеними у відповідності до розробленої методики, дозволяє коректно описати реальні характеристики кристалічних сонячних елементів на основі кремнію.

Тези «Моделювання процесу анаеробної переробки відходів тваринництва» опубліковані в Матеріалах VII Всеукраїнської наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики» (25 травня 2023 р., м. Хмельницький). Копію цих тез представлено в додатку А.

1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Принцип дії та основні параметри сонячних елементів

Принцип дії сучасних сонячних елементів базується на фотовольтаїчному ефекті в бар'єрній напівпровідниковій структурі, в якості якої в конструкціях кристалічних фотоелектричних перетворювачах використовується р-п- перехід (рис. 1.1).

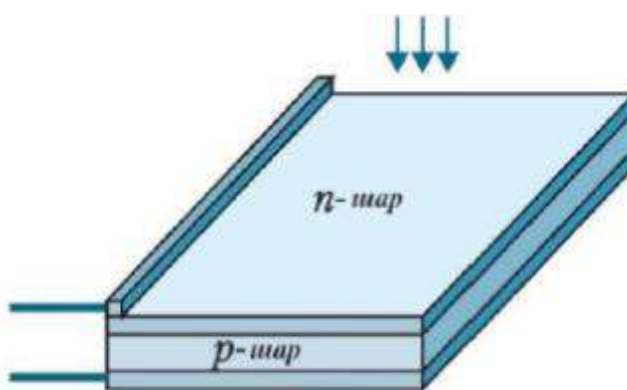


Рисунок 1.1 – Конструкція найпростішого сонячного елемента

Конструкція найпростішого фотоелектричного перетворювача (ФЕП) містить р-п- перехід, що розташований на малій глибині від поверхні напівпровідникової пластини р-типу провідності. До емітерної n-області сформовано металевий контакт у вигляді гребінки або сітки, залишаючи вільні від металізації ділянки, що освітлюються потоком сонячного випромінювання. Тильний металевий контакт до базової області з р-типом провідності виконується суцільним шаром або у вигляді сітки.

При освітленні ФЕП поглинені фотони з енергією, не меншою за ширину забороненої зони напівпровідника, генерують в напівпровіднику нерівноважні електронно-діркові пари. Нерівноважні дірки, що генеруються в емітерному n-шарі поблизу р-п-переходу, дифундують до р-п- переходу і полем області просторового заряду спрямовуються до базової р-області.

Аналогічно процеси відбуваються з нерівноважними електронами, генерованими в базовій р-області, які спрямовуються полем області просторового заряду до еміторного n-шару (рис. 1.2, а).

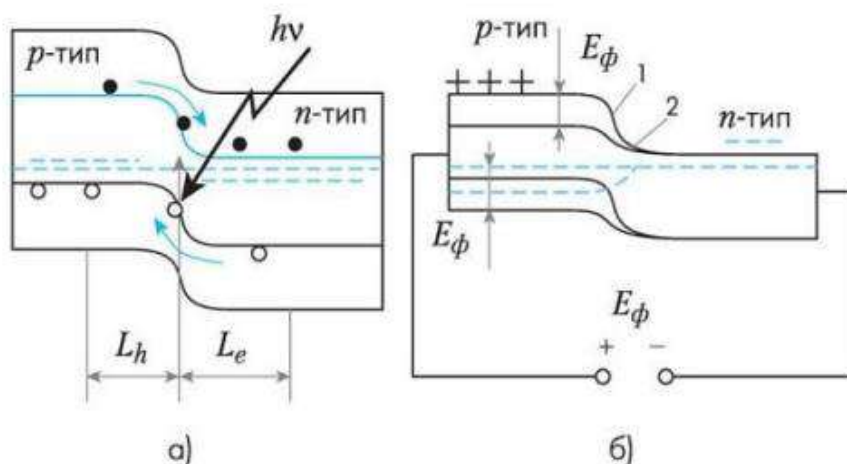


Рисунок 1.2 – Зонна діаграма розімкнутого р-п-переходу в початковий момент освітлення (а) та під дією стаціонарного світлового потоку з виникненням фото-ЕРС (б)

У результаті процесу просторового розділення генерованих світлом нерівноважних носіїв заряду n-шар набуває надлишкового негативного заряду, а р-шар – позитивного. Початкова висота потенційного бар'єру між р- і n-шарами напівпровідникової структури зменшується, а на зовнішніх контактах з'являється напруга (рис. 1.2, б). Полярність цієї напруги є такою, що негативному потенціалу джерела відповідає n-шар, а позитивному – р-шар. При освітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності та розімкненому зовнішньому електричному колі ця напруга відповідає напрузі холостого ходу, величина якої визначається виразом [3]:

$$U_{xx} = \frac{AkT}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 \right) \approx \frac{AkT}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} \right), \quad (1.1)$$

де I_{ϕ} – фотострум;

I_0 – струм насичення;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура;

e – заряд електрона;

A – параметр ідеальності діода.

При з'єднанні контактів ФЕП провідником реалізується інший крайній режим роботи освітленого р-п- переходу – режим короткого замикання, що характеризується максимальним за даного рівня освітлення струмом – струмом короткого замикання. В ідеальному ФЕП струм короткого замикання дорівнює величині фотоструму I_ϕ , який при освітленні монохроматичним світлом з енергією фотонів $h\nu$ становить [4]:

$$I_\phi = e \frac{P_0}{h\nu}, \quad (1.2)$$

де P_0 – потужність поглинутого випромінювання.

У випадку, коли освітлений р-п- перехід підключено до опору навантаження R_n , напруга ФЕП прийме проміжне значення між 0 (режим короткого замикання, $R_n = 0$) та напругою холостого ходу U_{xx} ($R_n = \infty$). Струм і напруга ФЕП в загальному випадку пов'язані між собою рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ), яке для ідеального сонячного елемента має вигляд [1]:

$$I = I_\phi - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right]. \quad (1.3)$$

Роботу сонячного елемента описують низкою електричних параметрів, основними з яких є наступні [4]: струм короткого замикання $I_{кз}$, напруга холостого ходу U_{xx} , максимальна потужність P_{max} , струм I_m та напруга U_m в

точці максимальної потужності, фактор заповнення ВАХ FF , ККД або ефективність η .

Струм короткого замикання $I_{кз}$ – це максимальне значення струму, який генерує ФЕП при заданому рівні освітленості та температурі за умови нульового опору навантаження.

Напруга холостого ходу U_{xx} є максимальним значенням напруги, яку генерує сонячний елемент при розімкненому зовнішньому колі при заданих рівнях освітленості та температури.

Максимальна потужність P_{max} – це максимальне значення електричної потужності, що генерується сонячним елементом при заданому рівні освітленості та температурі за умов підключення оптимального опору навантаження R_{opt} .

Струм в точці максимальної потужності I_m – струм в колі сонячного елемента, при якому забезпечується його максимальна електрична потужність.

Напруга в точці максимальної потужності U_m – напруга на сонячному елементі, при якій забезпечується його максимальна електрична потужність.

Фактор заповнення FF – це відношення максимальної електричної потужності сонячного елемента до добутку його струму короткого замикання на напругу холостого ходу:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{кз} U_{xx}}. \quad (1.4)$$

ККД або ефективність сонячного елемента η – це відношення максимальної електричної потужності сонячного елемента до потужності потоку сонячного випромінювання P_r , що надходить на його приймальну поверхню. Ефективність ФЕП визначають за виразом [4]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_r} = \frac{I_{кз} U_{xx} FF}{P_r} = \frac{I_{кз} U_{xx} FF}{p_{0r} S}, \quad (1.5)$$

де p_{0r} – густина потужності випромінювання; S – площа приймальної поверхні сонячного елемента.

Всі перелічені параметри ФЕП визначають експериментальним шляхом з вимірювань його світлових ВАХ.

1.2 Світлові вольт-амперні характеристики сонячних елементів

Світлова ВАХ сонячного елемента будується як залежність струму I від напруги U . Типова світлова ВАХ схематично представлена на рис. 1.3.

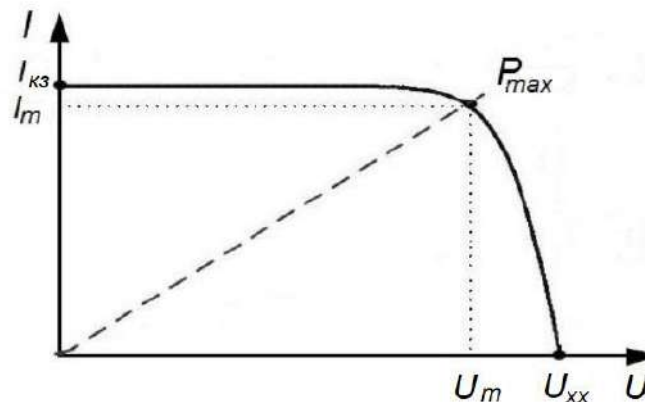


Рисунок 1.3 – Світлова вольт-амперна характеристика сонячного елемента

З аналізу експериментально вимірюної ВАХ можна безпосередньо визначити такі параметри сонячного елемента, як струм короткого замикання $I_{кз}$ та напругу холостого ходу $U_{хх}$ [4].

Струм I та напруга U у робочій точці ФЕП в загальному випадку визначаються точкою перетину його світлової ВАХ з ВАХ опору навантаження R_n , яка показана на рис. 1.3 пунктирною лінією. Окремим випадком є робота ФЕП на оптимальний опір навантаження R_{opt} . Тоді точка перетину світлової ВАХ з ВАХ опору R_{opt} дає можливість знайти струм I_m і

напругу U_m в точці максимальної потужності, а добуток цих величин – максимальну електричну потужність ФЕП за даного рівня освітленості:

$$P_{max} = I_m U_m. \quad (1.6)$$

Світлова ВАХ сонячного елемента, а відповідно і його основні параметри, суттєво залежать від інтенсивності світлового потоку та температури ФЕП. Поведінку світлових ВАХ сонячного елемента на основі кристалічного кремнію під впливом радіаційних і температурних факторів демонструє рис. 1.4.

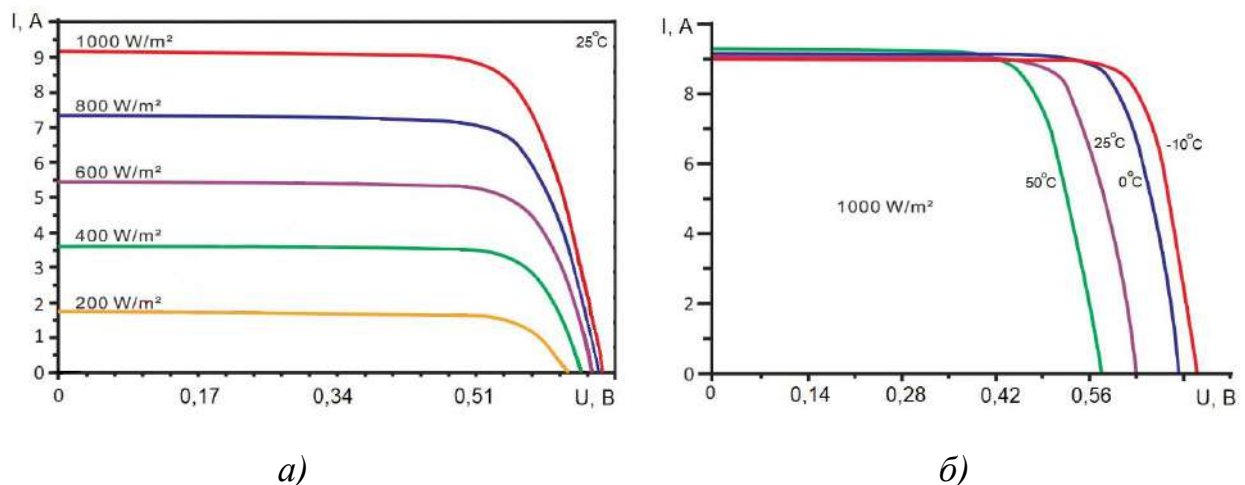


Рисунок 1.4 – Світлові вольт-амперні характеристики кремнієвого сонячного елемента при різних інтенсивностях світлового потоку (а) та температурах (б)

1.3 Параметри, що описують світлові вольт-амперні характеристики сонячних елементів

Математичний вираз, що описує рівняння світлової ВАХ сонячного елемента, залежить від його прийнятої еквівалентної схеми, найбільш поширеними з яких є однодіодна [5,6] та дводіодна [7,8].

Однодіодна еквівалентна схема сонячного елемента представлена на рис. 1.5.

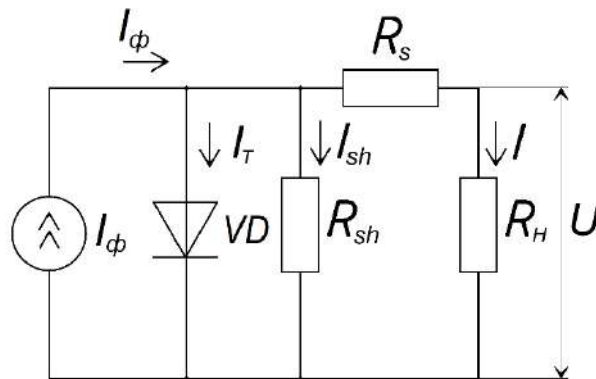


Рисунок 1.5 – Однодіодна еквівалентна схема сонячного елемента

В цій схемі діод VD моделює неосвітлений p-n- перехід, що знаходиться під напругою прямого зміщення U . Через діод протікає струм прямозміщеного p-n- переходу I_T , а через навантаження R_H – струм I . Еквівалентна схема містить джерело незалежного від напруги на p-n- переході фотоструму I_ϕ , а також внутрішній послідовний опір R_s та шунтуючий опір R_{sh} , що враховують наявність втрат в реальних сонячних елементах.

Світлова ВАХ сонячного елемента у відповідності до однодіодної еквівалентної схеми записується у вигляді:

$$I = I_\phi - I_0 \left[\exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}. \quad (1.7)$$

Як видно з рівняння (1.7), в однодіодній моделі для опису світлової ВАХ сонячного елемента при температурі T необхідно задати наступні п'ять параметрів:

- фотострум I_ϕ ;
- струм насичення I_0 ;

- параметр ідеальності діода A ;
- внутрішній послідовний опір R_s ;
- внутрішній шунтуючий опір R_{sh} .

Дводіодна еквівалентна схема сонячного елемента представлена на рис. 1.6, а відповідне рівняння світлової ВАХ в дводіодній моделі – виразом (1.8).

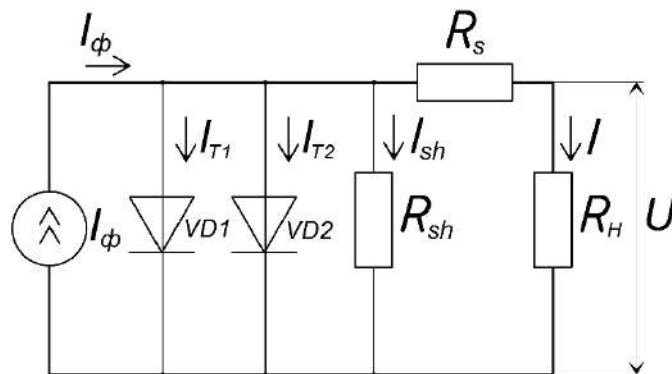


Рисунок 1.6 – Дводіодна еквівалентна схема реального сонячного елемента

$$I = I_\phi - I_{01} \left[\exp \left(\frac{e(U + IR_s)}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{e(U + IR_s)}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (1.8)$$

де I_{01} та I_{02} – струми насичення першого та другого діоду, відповідно;

A_1 та A_2 – параметри ідеальності першого та другого діоду, відповідно.

Як показано в [4,8], рівняння ВАХ сонячного елемента в дводіодній моделі дозволяє більш точно описати реальні світлові ВАХ, ніж одnodіодна. Втім, застосування рівняння (1.8) для опису світлових ВАХ сонячних елементів потребує більшої кількості параметрів:

- фотострум I_ϕ ;
- струм насичення першого діоду I_{01} ;
- струм насичення другого діоду I_{02} ;
- параметр ідеальності першого діода A_1 ;
- параметр ідеальності другого діода A_2 ;

- внутрішній послідовний опір R_s ;
- внутрішній шунтуючий опір R_{sh} .

Отже, в дводіодній моделі ФЕП для опису світлової ВАХ мають бути відомими для обох діодів такі параметри, як їх струми насичення та параметри ідеальності, визначення яких є більш складним завданням в порівнянні з одnodіодною схемою.

Дводіодна модель найчастіше застосовується для опису ВАХ сонячних елементів на основі тонких плівок аморфних напівпровідників, в той час як одnodіодна модель достатньо коректно описує світлові ВАХ кристалічних ФЕП, наприклад, на основі моно- і мультикристалічного кремнію [4, 8].

1.4 Способи визначення параметрів, що описують світлові вольт-амперні характеристики сонячних елементів

В літературних джерелах викладено ряд методик, що дозволяють визначити параметри ВАХ сонячного елемента, базуючись на аналізі експериментально виміряних як темнових, так і світлових ВАХ, в одnodіодній та дводіодній моделях [7-9].

Приймаючи до уваги той факт, що більш проста одnodіодна модель сонячного елемента є в переважній більшості прийнятною і потребує меншої кількості параметрів, а також те, що в технічних характеристиках фотоелектричних модулів наводяться лише їх світлові ВАХ, варто зосередитись на методиках, що дозволяють визначати параметри ВАХ з аналізу саме світлових ВАХ у відповідності до одnodіодної еквівалентної схеми.

Для визначення внутрішнього послідовного R_s і шунтуючого R_{sh} опорів ФЕП найчастіше застосовують підхід, що базується на аналізі нахилу ділянок світлової ВАХ поблизу напруги холостого ходу та струму короткого замикання: за нахилом лінійної ділянки світлової ВАХ поблизу напруги

холостого ходу визначають послідовний опір ФЕП, а за нахилом лінійної ділянки світлової ВАХ в області низьких напруг – шунтуючий [4].

Визначення струму насичення I_0 та параметру ідеальності A ґрунтується на записі та розв'язанні системи з двох рівнянь світлової ВАХ, складених у відповідності до однодіодної моделі для пари точок на графіку цієї ВАХ поблизу точки максимальної потужності [8]. Для реалізації цієї методики необхідно попередньо визначити внутрішній послідовний та шунтуючий опори досліджуваного ФЕП, а також фотострум, який в першому наближенні може бути прийнятим таким, що дорівнює струму короткого замикання [4].

На основі методик, викладених в [4] та [8], можна реалізувати визначення параметрів ВАХ сонячних елементів, використовуючи графіки світлових ВАХ, наведені в технічній документації кристалічних ФЕП та модулів, для наступного моделювання їх роботи.

1.4 Висновки

В сонячних елементах на основі кристалічних напівпровідників в переважній більшості випадків використовується фотовольтаїчний ефект в р-п- переході.

Основними електричними параметрами сонячних елементів є струм короткого замикання, напруга холостого ходу, максимальна потужність, струм та напруга в точці максимальної потужності, фактор заповнення вольт-амперної характеристики, а також ефективність, які визначаються з аналізу експериментально отриманих світлових вольт-амперних характеристик.

Рівняння світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента може бути записаним у відповідності до однодіодної або дводіодної еквівалентної схеми. Для опису світлової вольт-амперної характеристики в однодіодній моделі потрібно задати п'ять параметрів, а саме: фотострум, струм насичення діоду, параметр ідеальності діоду, внутрішній послідовний та шунтуючий опори. В той же час, в дводіодній моделі потрібно додатково

задавати струми насичення та коефіцієнти ідеальності для обох діодів еквівалентної схеми.

Однодіодна модель достатньо коректно описує світлові вольт-амперні характеристики сонячних елементів, виготовлених з моно- і мультикристалічного кремнію.

Для визначення набору параметрів, що описують вольт-амперну характеристику сонячного елемента в однодіодній моделі, застосовують методики, що базуються на аналізі нахилу ділянок цієї характеристики поблизу точок холостого ходу та короткого замикання, а також запис системи рівнянь для пари точок, розташованих в околицях точки максимальної потужності.

2 МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис однодіодної моделі сонячного елемента

Для побудови світлових ВАХ сонячного елемента за однодіодною моделлю з наступним визначенням його параметрів і їх порівнянням з даними, зазначеними в технічному паспорті, використано середовище MATLAB/Simulink. При моделювання світлових ВАХ за наперед визначеними їх параметрами застосовано модель, запропоновану в [8], блочна схема якої представлена на рис. 2.1.

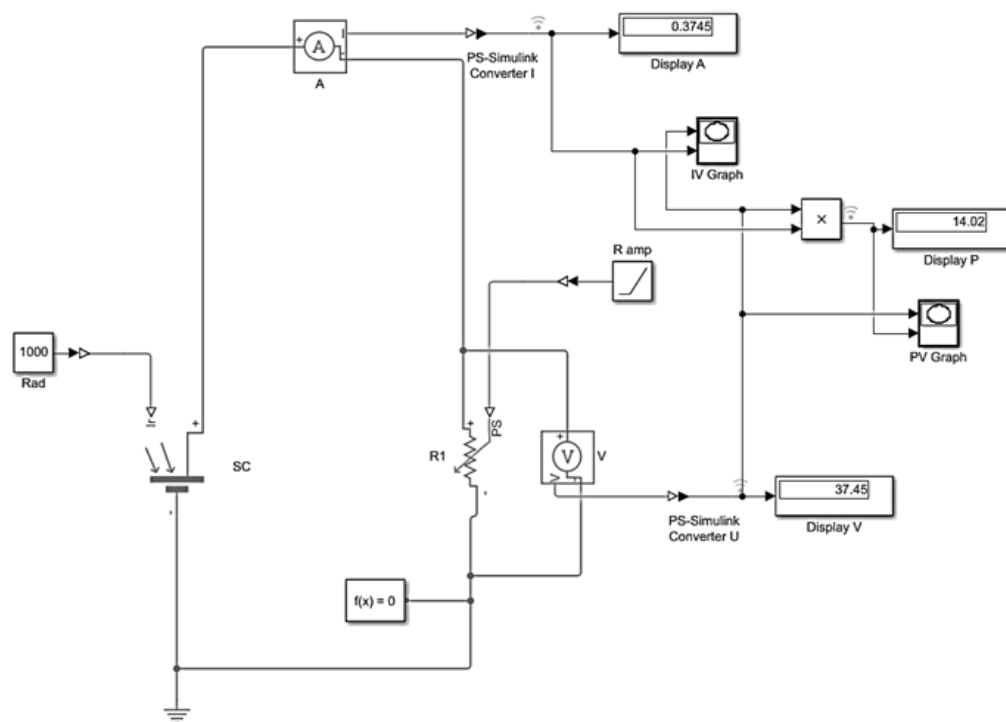


Рисунок 2.1 – Блочна модель для побудови світлових ВАХ сонячного елемента в середовищі MATLAB/Simulink [8]

Модель побудована з використанням стандартних блоків бібліотеки Simulink, а саме: блоку Solar Cell (SC), блоку констант Rad, змінного резистора R1, опір якого керується блоком Ramp, блоків ідеальних

амперметру A та вольтметру V. Індикація поточних значень струму, напруги та потужності в електричному колі в процесі моделювання забезпечується відповідними блоками Display.

Наявність блоків IV Graph та PV Graph дозволяє здійснити побудову за заданої в блоці Rad величини світлового потоку не лише вольт-амперних, але й вольт-ватних характеристик ФЕП, з аналізу яких і визначались параметри сонячного елемента та модуля, складеного з послідовно з'єднаних таких ФЕП. Аналіз вольт-амперних та вольт-ватних характеристик здійснювався засобами Simulation Data Inspector.

Блок Solar Cell (рис. 2.2) дозволяє реалізувати модель сонячного елемента та модуля з послідовно з'єднаних однотипних елементів як у відповідності до однодіодної, так і згідно дводіодної еквівалентних схем. Вхідними параметрами моделі сонячного елемента, які задаються користувачем, в загальному випадку є: струм короткого замикання та напруга холостого ходу при обраній щільності потоку сонячного випромінювання та температурі, струми насичення діодів, коефіцієнти якості діодів, внутрішній послідовний та шунтуючий опір.



Рисунок 2.2 – Блок Solar Cell

Під час досліджень використовували однодіодну еквівалентну схему, яка описується рівнянням світлової ВАХ, що має вигляд формули (1.7). В межах однодіодної моделі користувач має можливість увести в діалогове вікно блоку Solar Cell набір з чотирьох вхідних даних, на основі яких автоматично визначаються параметри ВАХ сонячного елемента. Зокрема,

такими параметрами є струм короткого замикання $I_{кз}$ та напруга $U_{хх}$ холостого ходу при обраній густині потужності світлового потоку p_{0r} та температурі T , параметр ідеальності діоду A , послідовний опір R_s . Значення шунтуючого опору R_{sh} в межах однодіодної моделі блоку Solar Cell приймається нескінченно великим.

Отже, для введення до блоку Solar Cell вхідних даних необхідно з технічної документації ФЕП або модуля взяти значення струму короткого замикання та напруги холостого ходу, а параметр ідеальності діоду і послідовний опір мають бути визначені за окремими методиками аналізу ВАХ, оскільки ці дані не наводяться в технічній документації до сонячних елементів.

2.2 Опис методики визначення параметрів світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента в однодіодній моделі

В технічній документації до ФЕП та модулів наводяться їх світлові ВАХ в стандартних умовах тестування [10]. У зв'язку з цим, визначення параметрів ВАХ сонячних елементів варто проводити за методиками, що базуються на аналізі саме світлових ВАХ.

Визначення параметрів ВАХ сонячного елемента, здійснювали за методикою, описаною в [4] та [8].

2.2.1 Визначення послідовного та шунтуючого опорів

Диференціюванням рівняння світлової ВАХ в однодіодній моделі (1.7) за напругою, враховуючи, що $R_s \ll R_{sh}$, отримаємо:

$$dI = -\frac{e}{AkT} I_T (dU + R_s dI) - \frac{1}{R_{sh}} dU, \quad (2.1)$$

де I_T – темновий струм діода:

$$I_T = I_0 \left[\exp \left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right]. \quad (2.2)$$

Як видно з виразу (2.2), в області малих напруг темновий струм діода незначний і може бути прийнятим таким, що добігає до нуля. Тоді рівняння (2.1) в області низьких напруг можна записати у вигляді:

$$dI \approx -dU/R_{sh}. \quad (2.3)$$

Отже, згідно формули (2.3) нахил ділянки світлової ВАХ поблизу точки короткого замикання визначається шунтуючим опором ФЕП:

$$R_{sh} = - \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U \rightarrow 0}. \quad (2.4)$$

В точці світлової ВАХ, що відповідає напрузі холостого ходу, зовнішнє коло розімкнуте і струм у навантаженні $I = 0$. В цьому випадку весь генерований сонячним елементом фотострум протікає через діод та шунтуючий опір.

Перепишемо рівняння (4.2) у вигляді:

$$dI \left(1 + \frac{e}{AkT} I_T R_s \right) = - \left(\frac{e}{AkT} I_T - \frac{1}{R_{sh}} \right) dU. \quad (2.5)$$

Врахуємо, що поблизу точки холостого ходу величина темного струму прямозміщеного р-п- переходу є значною, що дозволяє знехтувати одиницею в порівнянні з $\frac{e}{AkT} I_T R_s$ в лівій частині рівняння (2.5). Отримаємо:

$$dI(eI_T R_s / AkT) \approx - (eI_T / AkT - 1/R_{sh}) dU. \quad (2.6)$$

Оскільки величина $1/R_{sh}$ в якісних ФЕП прямує до нуля внаслідок великих шунтуючих опорів, то рівняння (2.6) може бути переписане у вигляді:

$$dI(eI_T R_s / AkT) \approx - (eI_T / AkT) dU, \quad (2.7)$$

або:

$$dI \cdot R_s = -dU. \quad (2.8)$$

З (2.8) отримуємо:

$$R_s = - \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U \rightarrow U_{xx}}. \quad (2.9)$$

Отже, рівняння (2.9) показує, що нахил ділянки світлової ВАХ сонячного елемента при високих напругах поблизу холостого ходу визначається послідовним опором ФЕП.

Таким чином, беручи пару точок на лінійній ділянці світлової ВАХ поблизу короткого замикання, визначаємо шунтуючий опір сонячного елемента, а пара точок на лінійній ділянці ВАХ поблизу холостого ходу дає можливість визначити його послідовний опір.

Практичний аспект застосування цієї методики для визначення послідовного та шунтуючого опорів ФЕП за експериментально виміряною світловою ВАХ схематично проілюстровано на рис. 2.3. Варто зазначити, що такий графічний аналіз світлових ВАХ для високоефективних сонячних елементів може бути утрудненим внаслідок малого нахилу дотичної до ВАХ на ділянці поблизу точки короткого замикання, коли ця ділянка є фактично

паралельною до осі напруг. Це часто унеможлиблює коректне визначення шунтуючого опору за графіком світлової ВАХ для сонячних елементів з високими факторами заповнення цієї характеристики [4].

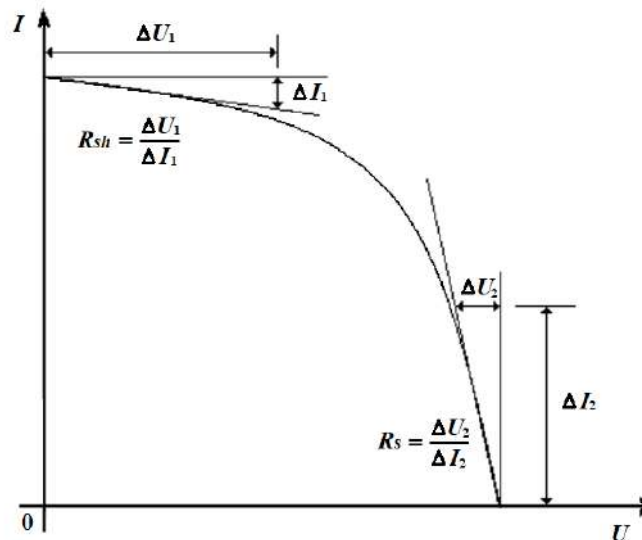


Рисунок 2.3 – Аналіз світлової ВАХ сонячного елемента при визначенні внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів [4]

На основі графічного аналізу відповідних ділянок світлової ВАХ абсолютні значення внутрішнього послідовного R_s та шунтуючого R_{sh} опорів ФЕП визначають за виразами:

$$R_s = \left. \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} \right|_{U \rightarrow U_{XX}} ; \quad (2.10)$$

$$R_{sh} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U \rightarrow 0} . \quad (2.11)$$

2.2.2 Визначення струму насичення та параметра ідеальності зі світлової вольт-амперної характеристики

При визначенні струму насичення I_0 та параметру ідеальності A діоду в

однодіодній еквівалентній схемі сонячного елемента використовували методику, описану в [4]. В цій методиці використовується припущення, що $R_{sh} \rightarrow \infty$, а $I_\phi \approx I_{K3}$, яке справджується для високоефективних ФЕП з мінімальними втратами потужності на внутрішніх опорах. При таких припущеннях рівняння світлової ВАХ сонячного елемента (1.7) може бути записане у вигляді:

$$I = I_{K3} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right]. \quad (2.12)$$

Записавши рівняння (2.12) для пари точок з координатами (U_1, I_1) та (U_2, I_2) з околиці точки максимальної потужності та логарифмуючи ці рівняння, отримуємо наступну систему:

$$\begin{cases} \ln(I_{K3} - I_1) = \ln I_0 + \frac{e(U_1 + I_1 R_s)}{AkT}, \\ \ln(I_{K3} - I_2) = \ln I_0 + \frac{e(U_2 + I_2 R_s)}{AkT}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Розв'язавши систему рівнянь (2.13) відносно невідомих величин I_0 та A , отримаємо:

$$A = \frac{e[U_1 - U_2 + R_s(I_1 - I_2)]}{kT \ln\left(\frac{I_{K3} - I_1}{I_{K3} - I_2}\right)}; \quad (2.14)$$

$$\ln I_0 = \ln(I_{K3} - I_1) - \frac{U_1 + I_1 R_s}{U_1 - U_2 + R_s(I_1 - I_2)} \ln\left(\frac{I_{K3} - I_1}{I_{K3} - I_2}\right). \quad (2.15)$$

Взявши величину струму короткого замикання $I_{KЗ}$ зі світлової ВАХ сонячного елемента, попередньо визначивши величину внутрішнього послідовного опору R_s за методикою, що була викладена вище, та підставивши в рівняння (2.14) та (2.15) координати точок цієї ВАХ поблизу точки максимальної потужності, можна визначити роздільно струм насичення I_0 та параметр ідеальності діоду A .

Параметри сонячного елемента, визначені з використанням описаних методик, використовувались в якості вхідних даних для моделювання світлових ВАХ сонячних елементів і модулів на їх основі.

2.3 Висновки

Описано модель сонячного елемента, створену в середовищі MATLAB/Simulink, що використовувалась для побудови світлових вольт-амперних характеристик фотоелектричних перетворювачів у відповідності до однодіодної еквівалентної схеми.

Представлено методики, що використовувались при визначенні вхідних параметрів моделі для побудови світлових вольт-амперних характеристик, зокрема, таких як внутрішній послідовний та шунтуючий опір, параметр ідеальності та струм насичення діоду.

З ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Визначення послідовного та шунтуючого опорів сонячного елемента

Для моделювання світлових ВАХ було обрано три фотоелектричні модулі на основі кристалічного кремнію: LG290N1C, JAP6(BK) 60-250/3BB, AS-6P30-270W. Всі обрані модулі складаються з шістдесяти послідовно з'єднаних ФЕП.

Модуль LG290N1C (рис. 3.1) номінальною потужністю 290 Вт виготовлений з монокристалічних кремнієвих ФЕП компанією LG Electronics U.S.A. Inc. [11]. Світлові ВАХ цього модуля при різних рівнях сонячної інсоляції представлені на рис. 3.2, а основні його параметри в стандартних умовах тестування STC (густина потужності сонячного випромінювання $p_{0r} = 1000 \text{ Вт/м}^2$, температура сонячних елементів в модулі $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) – в табл. 3.1.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд модуля LG290N1C від компанії LG Electronics U.S.A. Inc. [11]

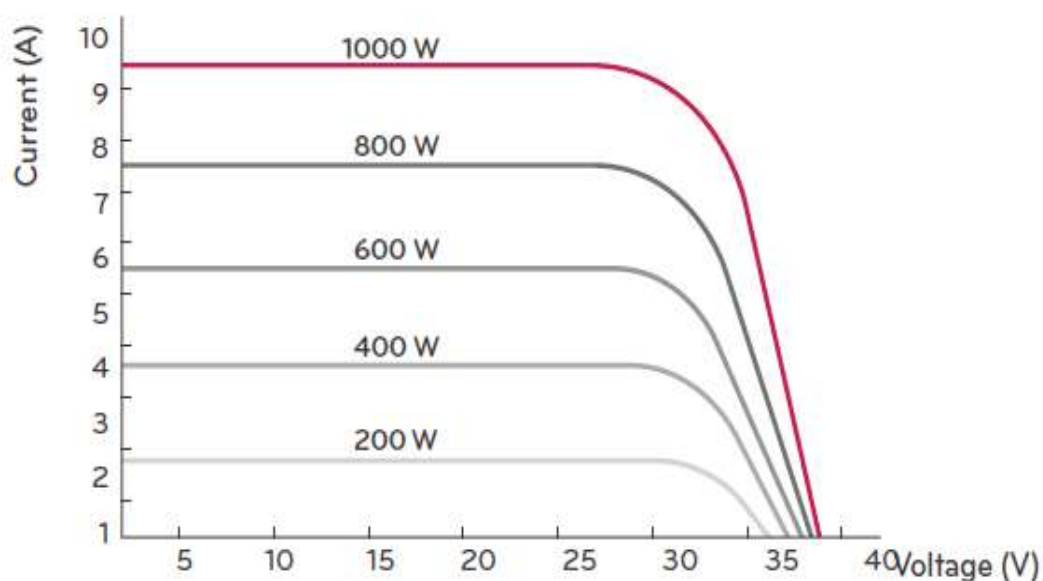


Рисунок 3.2 – Світлові вольт-амперні характеристики модуля LG290N1C при різних рівнях сонячної інсоляції [11]

Таблиця 3.1 – Основні параметри модуля LG290N1C в умовах STC [11]

Параметр	Значення
Струм короткого замикання, $I_{кз}$, А	9,8
Напруга холостого ходу, $U_{хх}$, В	39,2
Максимальна потужність, P_{max} , Вт	290
Струм в точці максимальної потужності, I_m , А	9,19
Напруга в точці максимальної потужності, U_m , В	31,8
Ефективність, η , %	17,7

Модуль JAP6(BK) 60-250/3BB номінальною потужністю 250 Вт (рис. 3.3) виготовлений на основі ФЕП з мультикристалічного кремнію компанією JA Solar Holdings Co., Ltd. [12]. Як і попередній модуль, він складається з шістдесяти ФЕП, з'єднаних між собою послідовно. Світлові ВАХ цього модуля, взяті з технічної документації, представлені на рис. 3.4, а основні електричні параметри в умовах STC зазначені в табл. 3.2.



Рисунок 3.3 - Зовнішній вигляд модуля JAP6(BK) 60-250/3BB від компанії JA Solar Holdings Co., Ltd. [12]

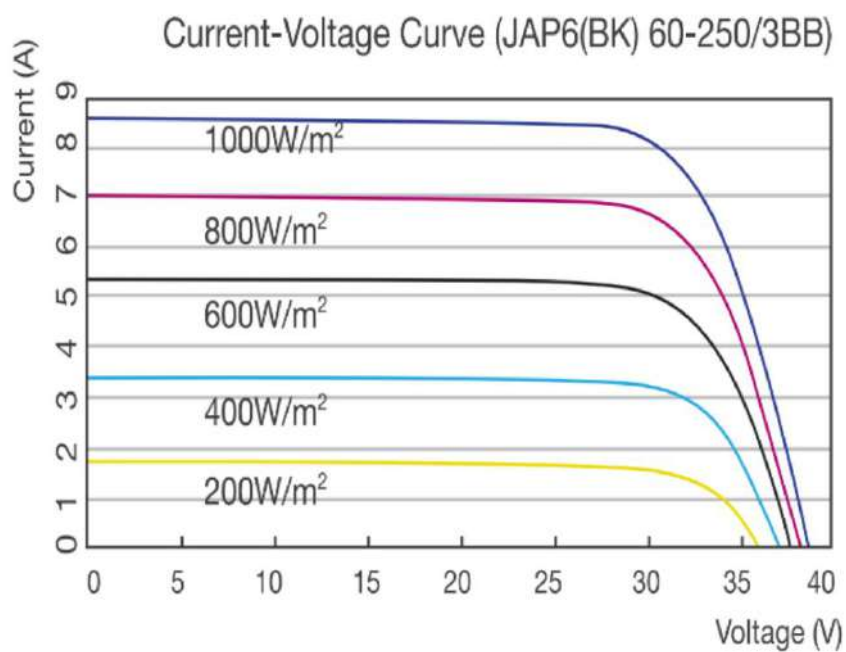


Рисунок 3.4 – Світлові вольт-амперні характеристики модуля JAP6(BK) 60-250/3BB при різних рівнях сонячної інсоляції [12]

Таблиця 3.2 – Основні параметри модуля JAP6(BK) 60-250/3BB в умовах STC [12]

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Струм короткого замикання, $I_{кз}$, А	8,92
Напруга холостого ходу, $U_{хх}$, В	37,66
Максимальна потужність, P_{max} , Вт	250
Струм в точці максимальної потужності, I_m , А	8,35
Напруга в точці максимальної потужності, U_m , В	29,94
Ефективність, η , %	15,29

Останній модуль, що досліджувався – це модуль AS-6P30-270W на основі ФЕП з мультикристалічного кремнію від компанії Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd. [13]. Цей модуль номінальною потужністю 270 Вт складається з шістдесяти ФЕП, що послідовно з'єднані один з одним. Зовнішній вигляд модуля AS-6P30-270W представлений на рис. 3.5, його світлові ВАХ при різних температурах та густині потоку сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2 – на рис. 3.6, а основні електричні параметри в умовах STC – в табл. 3.3.

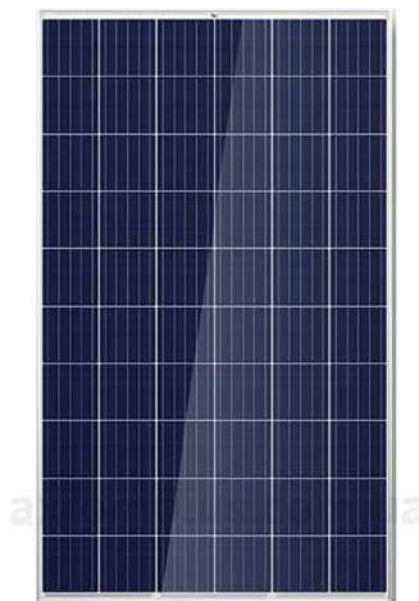


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд модуля AS-6P30-270W [13]

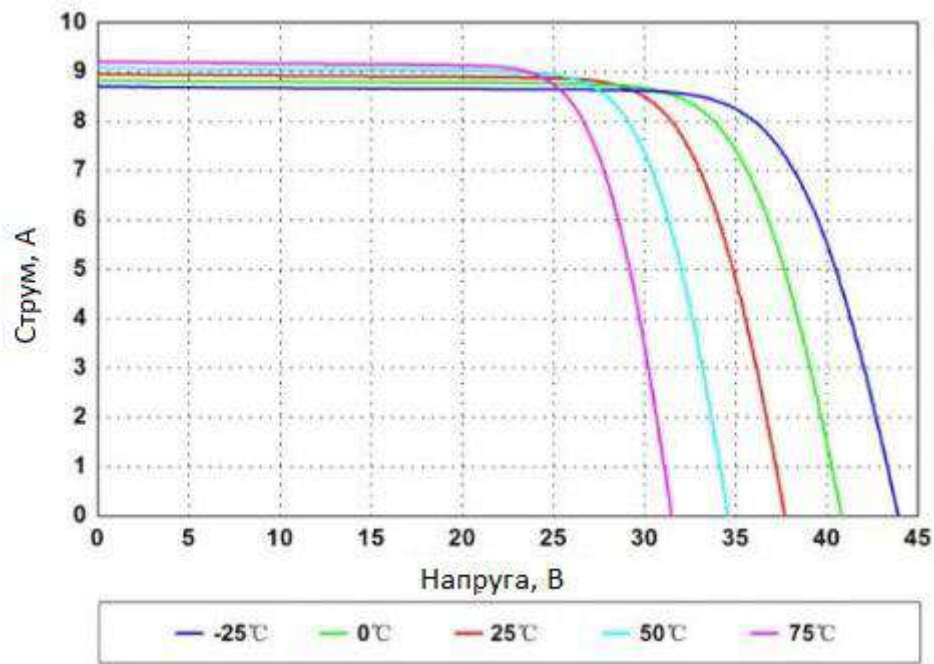


Рисунок 3.6 – Світлові вольт-амперні характеристики модуля AS-6P30-270W при густині потоку сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2 та різних температурах [13]

Таблиця 3.3 – Параметри модуля AS-6P30-270W в умовах STC [13]

Параметр	Значення
Струм короткого замикання, $I_{кз}$, А	9,09
Напруга холостого ходу, $U_{хх}$, В	38,4
Максимальна потужність, P_{max} , Вт	270
Струм в точці максимальної потужності, I_m , А	8,69
Напруга в точці максимальної потужності, U_m , В	31,1
Ефективність, η , %	16,6

Для визначення внутрішнього послідовного опору окремого ФЕП, що складають дані модулі, спочатку знаходили з графіків світлових ВАХ (рис. 3.2, рис. 3.4, рис. 3.6) внутрішній послідовний опір всього модуля $R_{s \text{ mod}}$ за методикою, описаною в пункті 2.2.1. Далі знаходили опір окремого ФЕП R_s , враховуючи послідовне з'єднання сонячних елементів в досліджуваних

модулях, за наступною формулою [8]:

$$R_s = \frac{R_{s\ mod}}{N_s}, \quad (3.1)$$

де N_s – кількість послідовно з'єднаних ФЕП у складі модуля.

Визначення конкретного значення шунтуючого опору R_{sh} за світловими ВАХ, представленими в технічній документації досліджуваних модулів, з використанням методики п. 2.2.1, є вкрай складним, оскільки ділянки світлових ВАХ всіх зразків поблизу режиму короткого замикання є майже паралельними до осі напруг. Втім, це дозволило вважати, що шунтуючий опір всіх ФЕП є значним і для моделювання може бути прийнятим таким, що дорівнює нескінченності.

В той же час, нахил графіків світлових ВАХ для всіх досліджуваних модулів на ділянках, близьких до холостого ходу, є таким, що дозволяє визначити послідовний опір ФЕП R_s без утруднень. Отримані з використанням MS Excel результати щодо значень внутрішнього послідовного опору ФЕП для відповідних модулів представлено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення внутрішнього послідовного опору сонячних елементів у складі модулів

Модуль	LG290N1C	JAP6(BK) 60-250/3BB	AS-6P30-270W
R_s , Ом	0,0053	0,0065	0,01

Ці дані використовувались надалі для визначення таких параметрів ВАХ сонячних елементів, як струм насичення діоду та його параметр ідеальності.

3.2 Визначення струму насичення

Струм насичення діоду визначали за двома точками на ділянці світлової ВАХ поблизу точки максимальної потужності. Розрахунок струму насичення здійснювали за формулою (2.15), що має наступний вигляд:

$$\ln I_0 = \ln(I_{K3} - I_1) - \frac{U_1 + I_1 R_s}{U_1 - U_2 + R_s(I_1 - I_2)} \ln\left(\frac{I_{K3} - I_1}{I_{K3} - I_2}\right).$$

Для модуля LG290N1C на ділянці його світлової ВАХ поблизу точки максимальної потужності для розрахунку за формулою (2.15) було обрано дві точки з наступними координатами:

- 1) перша точка – при напрузі $U_{mod1} = 30$ В та струмі $I_1 = 9,4$ А;
- 2) друга точка – при напрузі $U_{mod2} = 35$ В та струмі $I_2 = 6,3$ А.

Оскільки в модулі LG290N1C всі 60 ФЕП з'єднані послідовно, то для визначення відповідних напруг U_1 та U_2 , що припадають на один сонячний елемент, потрібно поділити значення U_{mod1} та U_{mod2} на кількість сонячних елементів у модулі N_s . Тоді:

$$U_1 = \frac{U_{mod1}}{N_s} = \frac{30}{60} = 0,5 \text{ В};$$

$$U_2 = \frac{U_{mod2}}{N_s} = \frac{35}{60} = 0,583 \text{ В}.$$

Струм короткого замикання модуля LG290N1C в умовах STC у відповідності до даних табл. 3.1 становить $I_{K3} = 9,8$ А, а внутрішній

послідовний опір одного ФЕП $R_s = 0,0053$ Ом (див. табл. 3.4). Підставляючи ці дані до рівняння (2.15), маємо:

$$\ln I_0 = \ln(9,8 - 9,4) - \frac{0,5 + 9,4 \cdot 0,0053}{0,5 - 0,583 + 0,0053(9,4 - 6,3)} \ln \left(\frac{9,8 - 9,4}{9,8 - 6,3} \right) = -14,15.$$

Тоді $I_0 = 7,14 \cdot 10^{-7}$ А.

Аналогічну процедуру визначення струму насичення діоду було проведено для ФЕП, з яких побудовано модуль JAP6(ВК) 60-250/3ВВ. Координати точок на графіку його світлової ВАХ (рис. 3.4) поблизу точки максимальної потужності приймали наступними:

- 1) перша точка – при напрузі $U_{mod\ 1} = 30$ В та струмі $I_1 = 8,3$ А;
- 2) друга точка – при напрузі $U_{mod\ 2} = 35$ В та струмі $I_2 = 4,1$ А.

При струмі короткого замикання $I_{кз} = 8,92$ А (див. табл. 3.2) та внутрішньому послідовному опорі $R_s = 0,0065$ Ом (див. табл. 3.4) за рівнянням (2.15) отримуємо $I_0 = 4,44 \cdot 10^{-6}$ А.

Для ФЕП, що складають модуль AS-6P30-270W, з використанням графіку його світлової ВАХ (див. рис. 3.6) та даних табл. 3.3 та табл. 3.4 отримано $I_0 = 1,36 \cdot 10^{-6}$ А.

Дані щодо визначених струмів насичення діодів для ФЕП досліджуваних модулів зведено до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Значення струмів насичення діодів для сонячних елементів досліджуваних модулів

Модуль	LG290N1C	JAP6(ВК) 60-250/3ВВ	AS-6P30-270W
$I_0, 10^{-6}$ А	0,71	4,44	1,36

Аналіз табл. 3.5 показує, що найменший струм насичення має сонячний

елемент модуля LG290N1C, який виготовлено з монокристалічного кремнію. В той же час для мультикристалічних ФЕП модулів JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W струми насичення вищі, що відповідає загальноприйнятим уявленням про вплив кристалічної структури напівпровідникових матеріалів на величини струмів насичення діодів.

3.3 Визначення коефіцієнту ідеальності вольт-амперної характеристики

Коефіцієнт ідеальності діоду A в однодіодній еквівалентній схемі сонячних елементів визначали за виразом (2.14), що має наступний вигляд:

$$A = \frac{e[U_1 - U_2 + R_s(I_1 - I_2)]}{kT \ln \left(\frac{I_{K3} - I_1}{I_{K3} - I_2} \right)}.$$

В якості координат точок світлової ВАХ обирали ті самі точки поблизу максимальної потужності, що і при визначенні струму насичення діоду в пункті 3.2. Температуру ФЕП приймали $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$, що відповідає умовам STC.

Для модуля LG290N1C:

$$A = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} [0,5 - 0,583 + 0,0053(9,4 - 6,3)]}{1,38 \cdot 10^{-23} 298 \ln \left(\frac{9,8 - 9,4}{9,8 - 6,3} \right)} = 1,2.$$

Для ФЕП модуля JAP6(BK) 60-250/3BB за тих самих координат точок світлової ВАХ, що і при визначенні струму насичення діоду, та температурі $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$A = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} [0,5 - 0,583 + 0,0065(8,3 - 4,1)]}{1,38 \cdot 10^{-23} 298 \ln \left(\frac{8,92 - 8,3}{8,92 - 4,1} \right)} = 1,11.$$

Аналогічно для сонячних елементів модуля AS-6P30-270W маємо:

$$A = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} [0,5 - 0,583 + 0,01(8,7 - 5,7)]}{1,38 \cdot 10^{-23} 298 \ln \left(\frac{9,09 - 8,7}{9,09 - 5,7} \right)} = 1,0.$$

Результати визначення коефіцієнтів ідеальності діодів в еквівалентних схемах ФЕП для модулів LG290N1C, JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W зведено до табл. 3.6. Вони є типовими для кристалічних ФЕП [5, 8].

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти ідеальності діодів для сонячних елементів досліджуваних модулів

Модуль	LG290N1C	JAP6(BK) 60-250/3BB	AS-6P30-270W
A , од.	1,2	1,11	1,0

З урахуванням визначених параметрів можна записати рівняння світлових ВАХ для сонячних елементів досліджуваних модулів, приймаючи $R_{sh} \rightarrow \infty$.

Для ФЕП модуля LG290N1C згідно рівняння (2.12) маємо:

$$\begin{aligned} I &= 9,8 - 0,71 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} (U + 5,3 \cdot 10^{-3} I)}{1,2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} T} \right) - 1 \right] = \\ &= 9,8 - 0,71 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{U + 5,3 \cdot 10^{-3} I}{1,04 \cdot 10^{-4} T} \right) - 1 \right]. \end{aligned}$$

Для ФЕП модуля JAP6(BK) 60-250/3BV:

$$\begin{aligned} I &= 8,92 - 4,44 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} (U + 6,5 \cdot 10^{-3} I)}{1,11 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} T} \right) - 1 \right] = \\ &= 8,92 - 4,44 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{U + 6,5 \cdot 10^{-3} I}{0,96 \cdot 10^{-4} T} \right) - 1 \right]. \end{aligned}$$

Для ФЕП модуля AS-6P30-270W:

$$\begin{aligned} I &= 9,09 - 1,36 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} (U + 10 \cdot 10^{-3} I)}{1,0 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} T} \right) - 1 \right] = \\ &= 9,09 - 1,36 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{U + 0,01 I}{0,86 \cdot 10^{-4} T} \right) - 1 \right]. \end{aligned}$$

Отримані рівняння можуть бути використані при моделюванні температурної залежності світлових ВАХ відповідних модулів при густині потоку сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2 . При інших світлових потоках необхідно задати відповідну їм величину фотоструму I_ϕ (струму короткого замикання $I_{кз}$). Тоді рівняння світлових ВАХ мають бути записані у наступному вигляді:

- для сонячних елементів модуля LG290N1C:

$$I = I_\phi - 0,71 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{U + 5,3 \cdot 10^{-3} I}{1,04 \cdot 10^{-4} T} \right) - 1 \right]; \quad (3.2)$$

- для сонячних елементів модуля JAP6(BK) 60-250/3BV:

$$I = I_\phi - 4,44 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{U + 6,5 \cdot 10^{-3} I}{0,96 \cdot 10^{-4} T} \right) - 1 \right]; \quad (3.3)$$

- для сонячних елементів модуля AS-6P30-270W:

$$I = I_{\phi} - 1,36 \cdot 10^{-6} \left[\exp \left(\frac{U + 0,01 I}{0,86 \cdot 10^{-4} T} \right) - 1 \right]. \quad (3.4)$$

3.4 Перевірка коректності методики

Перевірку коректності результатів, отриманих за описаною методикою, здійснювали шляхом порівняння електричних параметрів модулів ФЕП, визначених на основі графіків світлових ВАХ, побудованих за винайденими рівняннями (3.2) – (3.4), з параметрами, зазначеними в технічній документації модулів LG290N1C, JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W для умов STC.

Побудову графіків світлових ВАХ та їх аналіз здійснювали в середовищі MATLAB/Simulink з використанням блочної моделі сонячного елемента, представленої на рис. 2.1. Вхідні дані, що вносились до діалогового вікна блоку Solar Cell (рис. 3.7) для побудови світлових ВАХ, представлені в табл. 3.7.

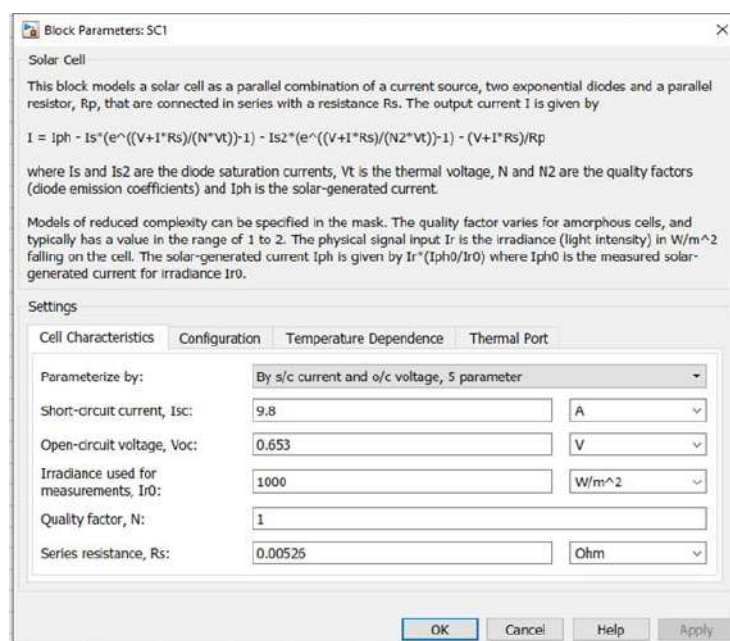


Рисунок 3.7 – Діалогове вікно блоку Solar Cell з вхідними даними

Таблиця 3.7 – Вхідні параметри сонячних елементів для побудови світлових вольт-амперних характеристик модулів в умовах STC

Модуль	I_{ϕ} , А	U_{xx} , В	A	R_s , Ом	T , °С
LG290N1C	9,8	0,653	1,2	0,0053	25
JAP6(ВК) 60-250/3ВВ	8,92	0,628	1,11	0,0065	25
AS-6P30-270W	9,09	0,640	1,0	0,01	25

Всі сонячні елементи в межах кожного модуля приймалися однаковими. Кількість послідовних сонячних елементів у всіх модулях дорівнює 60.

На рис. 3.8 – рис. 3.10 зображено побудовані в MATLAB/Simulink світлові ВАХ модулів LG290N1C, JAP6(ВК) 60-250/3ВВ та AS-6P30-270W в умовах STC. Ці характеристики відображались блоком IV Graph (див. рис. 2.1).

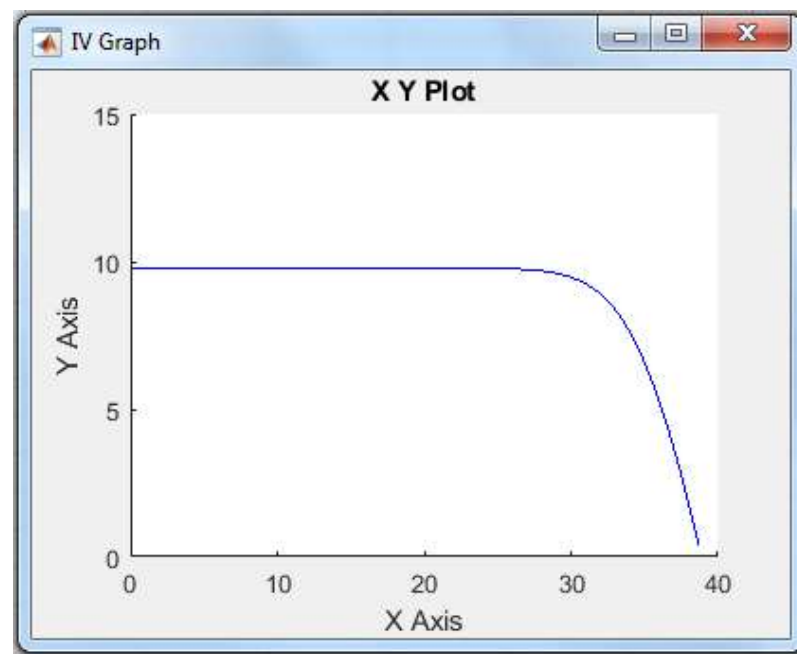


Рисунок 3.8 – Світлова ВАХ модуля LG290N1C в умовах STC, побудована в MATLAB/Simulink

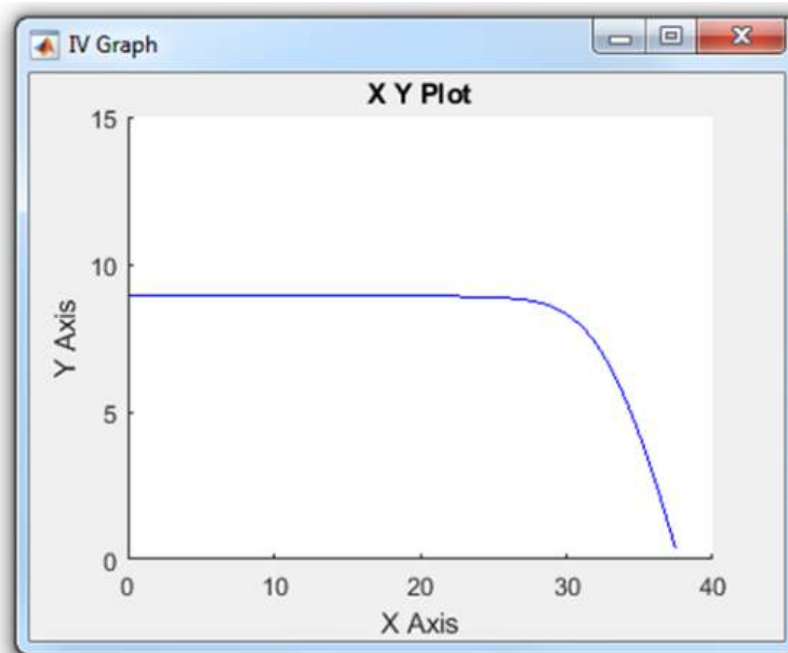


Рисунок 3.9 – Світлова ВАХ модуля JAP6(BK) 60-250/3BB в умовах STC, побудована в MATLAB/Simulink

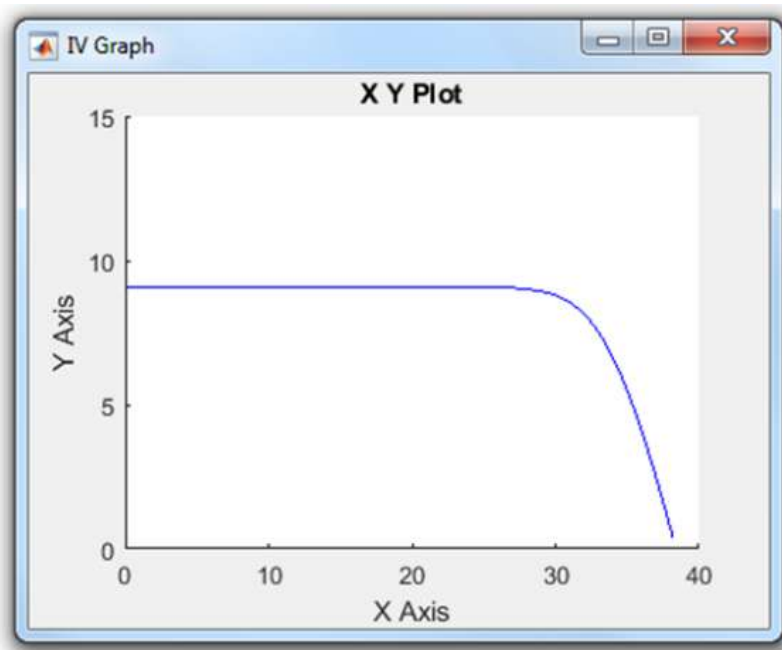


Рисунок 3.10 – Світлова ВАХ модуля AS-6P30-270W в умовах STC, побудована в MATLAB/Simulink

Аналіз побудованих графіків здійснювався засобами Simulation Data Inspector.

Побудовані світлові ВАХ модулів дозволили безпосередньо визначити такі їх параметри, як струм короткого замикання $I_{кз}$ та напругу холостого ходу $U_{хх}$.

Окрім світлових ВАХ будувались також вольт-ватні характеристики у вигляді залежності електричної потужності модуля від його напруги, що відображались за допомогою блоку PV Graph. З аналізу цих характеристик визначали максимальну електричну потужність P_{max} та напругу в точці максимальної потужності U_m . Після цього за світловою ВАХ при напрузі U_m визначали відповідне значення струму в точці максимальної потужності I_m .

Ефективність модуля η розраховувалась у відповідності до виразу (1.5) при $p_{0r} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ і площі модуля S , взятій з його технічної документації.

Порівняння основних електричних параметрів модуля з їх значеннями, взятими з технічного паспорту, представлено в табл. 3.8. В цій таблиці також наведено відповідні відносні відхилення розрахункових результатів від паспортних значень ε , визначених відповідно до формули:

$$\varepsilon = \frac{X_p - X_n}{X_n} 100\%, \quad (3.5)$$

де X_p – розрахункове значення параметру;

X_n – паспортне значення параметру.

Типовими відхиленнями реальних параметрів модулів від паспортних їх значень є $\pm 3\%$ [3]. Отже, відхилення розрахункових параметрів модуля від паспортних значень в зазначеному діапазоні можуть вважатися такими, що знаходяться в межах виробничих допусків, і є прийнятними.

Таблиця 3.8 – Результати порівняння розрахункових електричних параметрів модуля з їх паспортними значеннями

Параметр	$I_{кз}, A$	U_{xx}, B	$P_{max}, Bт$	I_m, A	U_m, B	$\eta, \%$
Модуль LG290N1C						
Розрахунок	9,8	39,18	287,96	9,20	31,30	17,56
Паспортне значення	9,8	39,2	290	9,19	31,8	17,7
$\varepsilon, \%$	-	0,05	0,70	0,11	1,57	0,79
Модуль JAP6(BK) 60-250/3BB						
Розрахунок	8,92	37,45	249,43	8,39	29,73	15,25
Паспортне значення	8,92	37,66	250	8,35	29,94	15,29
$\varepsilon, \%$	-	0,56	0,23	0,48	0,70	0,26
Модуль AS-6P30-270W						
Розрахунок	9,09	38,35	264,97	8,60	30,81	16,29
Паспортне значення	9,09	38,4	270	8,69	31,1	16,6
$\varepsilon, \%$	-	0,13	1,86	1,03	0,93	1,87

Як видно з аналізу даних табл. 3.8, відхилення жодного розрахункового параметру від паспортного значення для всіх модулів не перевищує допустимі 3% відсотки. Це означає, що методика, застосована для визначення параметрів світлових ВАХ сонячних елементів, є коректною.

3.5 Висновки

Описано паспортні електричні параметри трьох фотоелектричних модулів LG290N1C, JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W, обраних для апробації методики визначення параметрів світлових вольт-амперних характеристик сонячних елементів.

З використанням паспортних світлових вольт-амперних характеристик обраних модулів для кожного з них визначено такі параметри однодіодної

еквівалентної схеми сонячного елемента, як внутрішній послідовний опір, струм насичення діода та коефіцієнт ідеальності. Показано, що найменший струм насичення має сонячний елемент модуля LG290N1C, виготовлений з монокристалічного кремнію, в той час як для мультикристалічних фотоелектричних перетворювачів, з яких побудовано модулі JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W, струми насичення є дещо вищими. Визначені коефіцієнти ідеальності діодів знаходяться в діапазоні від 1 до 1,2 і є типовими для кристалічних сонячних елементів.

З використанням визначених параметрів однодіодної еквівалентної схеми складено рівняння світлових вольт-амперних характеристик сонячних елементів, з яких побудовано модулі LG290N1C, JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W.

Здійснено перевірку коректності застосованої методики визначення параметрів світлових вольт-амперних характеристик шляхом порівняння розрахункових електричних параметрів модулів, визначених з світлових характеристик, побудованих за розрахунковими параметрами, з відповідними паспортними параметрами модулів. Побудову та аналіз розрахункових світлових вольт-амперних характеристик здійснено із залученням засобів MATLAB/Simulink. Показано, що відхилення розрахункових параметрів від паспортних значень для всіх модулів не перевищує 3%, що вказує на коректність застосованої методики.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

В даному розділі проведено розрахунок витрат на виконання досліджень за темою кваліфікаційної роботи, що носить науково-дослідний характер, а також здійснено оцінку результативності цих досліджень.

4.1 Методика визначення економічної ефективності науково-дослідної роботи

При виконанні розрахунку кошторису витрат на проведення досліджень за темою дипломної роботи враховуються наступні статті витрат: основна заробітна плата дослідників, додаткова заробітна плата, нарахування на заробітну плату, амортизація використаного обладнання, витрати на електроенергію, інші витрати, такі як загальновиробничі витрати, адміністративні витрати, операційні витрати, тощо.

Розрахунок основної заробітної плати дослідників Z_0 виконується у відповідності до наступного виразу:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} t, \text{ грн,} \quad (4.1)$$

де M – місячний посадовий оклад дослідника, грн;

T_p – число робочих днів в місяці, яке становить $T_p = 21 \dots 23$ дні;

t – число днів роботи дослідника, дні.

Посадовий оклад доцента визначається у відповідності до єдиної тарифної системи [14]. До посадового окладу додається додаткова заробітна плата Z_d працівників, що були залучені до дослідження. Додаткова заробітна плата враховує премії, основну та додаткову відпустку, компенсацію невикористаної відпустки, доплату за стаж роботи, науковий

ступінь, вчене звання [15].

Додаткова заробітна плата доцента, який приймає участь у дослідженнях, включає такі доплати: 15% за науковий ступінь, 25% за вчене звання, 30% за вислугу років (коли стаж доцента перевищує 20 років). Врахування вказаних відсотків дає в сумі додаткову заробітну плату на рівні 70% від основної [16].

У відповідності до положень [15, 17] нарахування на заробітну плату $H_{ЗП}$ працівників, що приймали участь у проведенні досліджень, становить 22% від суми основної та додаткової заробітної плати.

Амортизаційні відрахування на обладнання, яке використовувалось під час даного дослідження, є нарахуваннями на амортизацію комп'ютерної техніки та використане програмне забезпечення. Амортизаційні відрахування розраховувались у відповідності з виразом [18]:

$$A = \frac{Ц}{C_{КВ}} \cdot \frac{T}{12}, \text{ грн}, \quad (4.2)$$

де $Ц$ – балансова вартість обладнання, грн;

$C_{КВ}$ – строк корисного використання обладнання, роки (для комп'ютерної техніки, інформаційних систем з вартістю понад 20 000 грн. приймається 2 роки);

T – термін використання обладнання, місяці.

При розрахунку амортизаційних відрахувань на використане програмне забезпечення виходять зі строку використання програми, що встановлюється власником ліцензії.

Витрати на електроенергію B_e для виконання дослідження визначаються за формулою:

$$B_e = B \cdot П \cdot \Phi \cdot K_{П}, \text{ грн}, \quad (4.3)$$

де B – вартість однієї кіловат-години електроенергії, грн/кВт·год;

P – установлена потужність обладнання, кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, год;

K_{Π} – коефіцієнт використання потужності, $K_{\Pi} < 1$.

Інші витрати I_B включають в себе:

- загальновиробничі витрати (витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці, тощо);

- адміністративні витрати (проведення зборів, оплату юридичних послуг, витрати на зв'язок, тощо);

- операційні витрати (штрафи, пеня, неустойки, матеріальна допомога, тощо).

Інші витрати можуть бути прийняті як відсоток від суми основної заробітної плати працівників, що приймали участь у дослідженні. Відсоток цих витрат знаходиться в діапазоні 200...300%

Загальні витрати на розробку B_P являють собою суму статей витрат, зазначених вище.

Оцінка економічної ефективності науково-дослідної роботи враховує низку наступних ефектів [19]:

- науково-технічний, що визначає рівень науково-технічної корисності результатів досліджень (публікація статей, наукові доповіді; визнання результатів роботи у вигляді цитувань в наукових виданнях; кількість захищених магістерських робіт);

- організаційно-виробничий (покращення виробничих показників праці, скорочення циклу виробництва, підвищення рівня автоматизації та механізації виробничих процесів, скорочення втрат робочого часу з причини простоїв, тощо);

- соціальний (покращення умов праці, техніки безпеки, впровадження

прогресивних технологій в навчальний процес);

- економічний (економія матеріальних, трудових та фінансових ресурсів), що вимірюється в грошових одиницях.

Результати наукових досліджень оцінюють шляхом розрахунку відносних показників, зокрема, коефіцієнту наукової значимості результатів досліджень $K_{зн}$:

$$K_{зн} = \frac{\sum_1^3 b_i \cdot d_i}{\sum_1^3 b_{max} \cdot d_i}, \quad (4.4)$$

де b_i – значимість отриманих результатів;

d_i – питома вага характеристики з номером i (табл. 4.1);

3 – кількість характеристик, за якими оцінювались результати науково-дослідної роботи.

При розрахунку коефіцієнту наукової значимості виходили з наступного змісту коефіцієнтів b_i у формулі (4.4): b_1 - ступінь наукової новизни, b_2 - рівень теоретичної обґрунтованості, b_3 - ступінь експериментальної перевірки результатів. В табл. 4.1 наведено бальну характеристику отриманих результатів дослідження.

Також за формулою (4.5) визначали комплексний показник рівня науково-дослідної роботи K_p [19]:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B_p \cdot t}, \quad (4.5)$$

де I - коефіцієнт важливості роботи ($I = 2 \div 5$);

n – коефіцієнт використання результатів роботи;

T_c – коефіцієнт складності роботи ($T_c = 1 \dots 3$);

R – коефіцієнт результативності роботи;

t - час проведення досліджень, років.

Таблиця 4.1 – Показники для розрахунку коефіцієнту наукової значимості результатів науково-дослідної роботи

Характеристики	Питома вага характеристик d_i	Бальна оцінка характеристик		
		Ступінь новизни b_1	Рівень теоретичної обґрунтованості b_2	Ступінь експериментальної перевірки результатів b_3
		1	3...5	7...10
b_1	0,500	Часткове вдосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту тощо	Суттєве вдосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту тощо	Нові напрямки в розробці виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту тощо. Створення принципово нової техніки
b_2	0,333	Позитивне рішення на основі зроблених узагальнень	Встановлення залежностей, які використовувались в інших випадках	Відкриття нових шляхів рішення задачі
b_3	0,167	Експериментальна перевірка не робилась	Результати перевірялись на невеликій кількості даних	Результати перевірені на великій кількості даних

При розрахунку за формулою (4.5) значення коефіцієнту використання результатів роботи n приймається у відповідності до наступного його змісту: $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, якщо

результати роботи використовуватимуться частково; $n = 2$ у випадку, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, якщо результати роботи можуть бути використані без проведення дослідно-конструкторських розробок.

Значення коефіцієнту результативності роботи R обирається згідно наступних міркувань: якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо результати роботи є нижчими за відомі, то $R = 2$; якщо результат роботи є невизначеним, то $R = 1$.

Якщо розрахункове значення комплексного показника рівня науково-дослідної роботи становить $K_p = 1$, то така науково-дослідна робота вважається ефективною і такою, що має високий науковий, технічний та економічний рівень.

4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження та економічної ефективності науково-дослідної роботи

Витрати на оплату праці осіб, які приймали участь у проведенні досліджень при виконанні кваліфікаційної роботи, розраховувались за формулою (4.1). Результати розрахунку зведено до табл. 4.2.

У відповідності до єдиної тарифної системи посадовий оклад доцента як керівника кваліфікаційної роботи визначається 19 тарифним розрядом з тарифним коефіцієнтом 3,42 і становить 11 867 грн [20]. Здобувач вищої освіти, який є виконавцем кваліфікаційної роботи, стипендію не отримує.

При виконанні розрахунку основної заробітної плати дослідників приймалося, що в місяці є 22 робочі дні. Результати розрахунку основної заробітної плати у відповідності до формули (4.1) представлено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Оплата праці дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число робочих днів	Витрати на заробітну плату, грн	Примітка
1. Керівник роботи	11 867,00	539,41	6	3 236,45	
2. Студент	-	-	-	-	Стипендію не отримує
Всього Z_0				3 236,45	

Додаткова заробітна плата керівника роботи становить 70% від основної. Тоді за шість робочих днів вона становитиме:

$$Z_d = 0,7 \cdot 3\,236,45 = 2\,265,52 \text{ грн.}$$

Нарахування на заробітну плату у вигляді єдиного соціального внеску становлять 22% від суми основної та додаткової заробітної плати керівника кваліфікаційної роботи. Тоді:

$$H_{зп} = 0,22 \cdot (3\,236,45 + 2\,265,52) = 1\,210,43 \text{ грн.}$$

Відрахування на амортизацію комп'ютера та програмного забезпечення, за допомогою якого проводилось моделювання світлових вольт-амперних характеристик сонячного елемента, розраховувались за формулою (4.2) при балансовій вартості комп'ютера 22 999 грн та програмного забезпечення Matlab/Simulink, що становить \$2550 або 111 690,00 грн по курсу Національного банку України на 9.05.2026. Результати розрахунків амортизаційних відрахувань представлено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Амортизаційні відрахування

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, роки	Термін використання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн
Комп'ютер	22 999,00	2	2	1 916,58
Програмне забезпечення	111 690,00	5	2	3 723,00
Всього А				5 639,58

Витрати на електроенергію, спожиту комп'ютером при проведенні досліджень, визначались за формулою (4.3). Враховуючи, що під час проведення досліджень в рамках написання кваліфікаційної роботи реалізовувався дистанційний формат навчання, то при розрахунку витрат на електричну енергію приймався тариф для населення:

$$B_e = 4,32 \cdot 0,06 \cdot 352 \cdot 0,7 = 63,87 \text{ грн.}$$

Інші витрати приймаємо такими, що становлять 200% від основної заробітної плати дослідників (табл. 4.2). У відповідності до цього інші витрати дорівнюють 6 472,90 грн.

Тоді загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи, які є сумою всіх розрахованих вище витрат, становитимуть:

$$B_p = 3\,236,45 + 2\,265,52 + 1\,210,43 + 5\,639,58 + 63,87 + \\ + 6\,472,90 = 18\,888,75 \text{ грн.}$$

Коефіцієнт значимості проведених досліджень з визначення параметрів, що описують світлові вольт-амперні характеристики сонячних

елементів, знаходили у відповідності до формули (4.4). Результатом проведених досліджень є захист кваліфікаційної роботи магістра. Розроблена в межах дослідження методика визначення параметрів світлових вольт-амперних характеристик з підтвердженням коректності отриманих результатів має науково-технічну цінність. Результати, отримані під час виконання даної кваліфікаційної роботи, можуть бути використані при розробці лабораторних робіт для студентів спеціальності G3. Електрична інженерія, а отже, робота має і соціальний ефект. Зважаючи на зазначені показники, коефіцієнт значимості результатів роботи становить:

$$K_{\text{зн}} = \frac{5 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,333 + 5 \cdot 0,167}{10 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,333 + 10 \cdot 0,167} = 0,5.$$

Оскільки коефіцієнт значимості не може бути вищим за одиницю, то отримане його значення $K_{\text{зн}} = 0,5$ підтверджує досягнення високого ступеня наукової новизни даного дослідження та достатній рівень теоретичної обґрунтованості отриманих результатів.

Розрахунок комплексного показника рівня науково-дослідної роботи у відповідності до формули (4.5) показав наступний результат:

$$K_p = \frac{2^2 \cdot 2 \cdot 3}{18,88875 \cdot 0,167} = 7,61.$$

Отримане значення $K_p > 1$, що підтверджує високий науковий, технічний та економічний рівні даної науково-дослідної роботи, а також високу результативність та затребуваність отриманих результатів.

4.3 Висновки

Описано методику, згідно якої проведено розрахунок витрат на

науково-дослідну роботу. Загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи склали 18 888 грн 75 коп.

Розраховано коефіцієнт значимості результатів науково-дослідної роботи з визначення параметрів світлових вольт-амперних характеристик сонячного елемента, який склав $K_{\text{зн}} = 0,5$. Отримане значення підтверджує досягнення високого ступеня наукової новизни проведеного дослідження та достатній рівень теоретичної обґрунтованості отриманих результатів..

Значення комплексного показника рівня науково-дослідної роботи $K_p > 1$ підтверджує високий науковий, технічний та економічний рівні даної науково-дослідної роботи, а також високу результативність та затребуваність отриманих результатів.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Теоретичні засади охорони праці на підприємстві

Охорона праці є однією з ключових складових соціальної політики держави та невід'ємною частиною діяльності будь-якого підприємства, установи чи організації. Вона спрямована на забезпечення безпечних і здорових умов праці, збереження життя, здоров'я та працездатності людини у процесі трудової діяльності. У сучасних умовах розвитку виробництва, впровадження новітніх технологій та зростання інтенсивності праці значення охорони праці суттєво зростає, оскільки від рівня її організації залежить не лише добробут працівників, але й ефективність функціонування підприємства загалом.

Згідно чинного законодавства України, охорона праці визначається як система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі праці. Такий комплексний підхід передбачає не лише реагування на небезпечні фактори, але й їх попередження шляхом створення безпечного виробничого середовища.

У законі також визначені обов'язки роботодавця зі створення належних умов праці:

- створення відповідних служб та призначення посадових осіб, які забезпечують вирішення конкретних питань з охорони праці;
- розроблення за участю сторін колективного договору та реалізація комплексних заходів для досягнення встановлених нормативів;
- забезпечення виконання необхідних профілактичних заходів;
- впровадження прогресивних технологій;
- забезпечення належного утримання будівель і споруд;
- забезпечення усунення причин, що призводять до нещасних випадків;

- організація проведення аудиту охорони праці, оцінка технічного стану виробничого обладнання, атестація робочих місць;
- розробка і затвердження положення, інструкції з охорони праці, які діють у межах підприємства;
- здійснення контролю за дотриманням працівником технологічних процесів, правил поводження з машинами тощо [21].

Основними засадами охорони праці є пріоритет життя і здоров'я працівника щодо результатів виробничої діяльності, повна відповідальність роботодавця за створення належних умов праці, соціальний захист працівників, а також використання економічних методів управління охороною праці.

Охорона праці виконує низку важливих функцій, серед яких слід виділити превентивну, спрямовану на запобігання виробничому травматизму та професійним захворюванням; організаційну, що полягає у впровадженні систем управління безпекою праці; контролюючу, яка забезпечує дотримання встановлених норм і правил; а також соціальну функцію, пов'язану із захистом прав працівників та забезпеченням їх соціальних гарантій. Крім того, економічна функція охорони праці проявляється у зниженні витрат, пов'язаних із нещасними випадками, простоєм виробництва та лікуванням працівників.

Таким чином, охорона праці є багатогранною системою, що поєднує у собі правові, організаційні та технічні аспекти і відіграє важливу роль у забезпеченні сталого розвитку підприємства.

5.2 Аналіз шкідливих факторів виробничого середовища та способи протидії їм

Виробничі фактори залежно від наслідків, до яких може привести їх дія, прийнято поділяти на небезпечні та шкідливі.

Небезпечний виробничий фактор - це фактор, вплив якого на працюючого у певних умовах призводить до травми або різкого погіршення здоров'я.

Шкідливий виробничий фактор - це фактор, вплив якого на працюючого у певних умовах приводить до захворювання або зниження працездатності.

За природою дії на організм людини небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів відносяться фактори, що характеризують технологічний процес (рухомі машини та механізми, рухомі частини обладнання, вироби, заготовки та матеріали, що пересуваються, гострі кромки; підвищена або знижена температура поверхонь обладнання або матеріалів; підвищене значення електричної напруги, підвищений рівень статичної електрики), та фактори, що характеризують повітря виробничих приміщень (підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони, підвищений рівень шуму, ультразвукових коливань, вібрації на робочому місці, недостатня освітленість робочої зони тощо).

Одним з різновидів фізичних шкідливих факторів є шум на робочому місці, що являє собою сукупність звуків різної інтенсивності і частоти. Будь-які механічні коливання у діапазоні частот 20-200 Гц сприймаються органом слуху людини як звук. За часовими характеристиками розрізняють шуми постійні і непостійні.

Під впливом шуму зменшується швидкість розв'язання розумових задач, прискорюється втома людини, що призводить до зниження її працездатності, збільшення кількості помилок, до зменшення уваги і реакції на подразники. Шум може бути причиною нервових розладів, серцево-судинних захворювань і глухоти. Він викликає головний біль, дратівливість, швидко втому, часткову або повну втрату слуху, зменшення секреції шлунку,

порушення периферійного кровообігу, підвищення артеріального тиску. Особливо шкідливі шуми високої частоти: дзвінки, шиплячі і свистячі.

Захист від шуму здійснюється колективними та індивідуальними засобами. Боротьба з шумом через зменшення його у джерелі виникнення є найбільш раціональною. Це досягається застосуванням технологічних процесів та обладнання, які не створюють надмірного шуму. При цьому шумні технології замінюють менш шумними, ударні процеси замінюють безударними.

При неможливості знизити рівень виробничого шуму нижче встановлених гігієнічних норм, застосовують протишумові засоби індивідуального захисту: навушники, що закривають раковину вуха ззовні; вкладиші, що закривають слуховий канал; шоломи і каски, а також костюми [22].

Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяються:

- за характером впливу на людину на: токсичні (викликають отруєння організму), дратівні, сенсibiliзуючі (викликають алергію), канцерогенні (викликають злоякісні утворення), мутагенні (впливають на зміну спадковості), репродуктивні;

- за шляхом проникнення в організм людини: проникаючі через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкіру та слизові оболонки.

Основними засобами захисту людини від впливу хімічних шкідливих речовин є гігієнічне нормування їх вмісту у різних середовищах, а також різні методи очищення газових викидів (адсорбція, абсорбція, хімічне перетворення) та стоків (первинне, вторинне та третинне очищення).

Захист працівників від несприятливого впливу хімічних речовин здійснюється за допомогою таких заходів:

- раціонального планування цехів і обладнання (ізоляції шкідливих речовин);

- удосконалення конструкції обладнання (герметизації тощо);

- влаштування місцевої вентиляції для відсмоктування шкідливих речовин безпосередньо від місця їх утворення;
- використання індивідуальних засобів (спецодягу, окулярів, шоломів, масок, протигазів та респіраторів, антисептичних паст тощо);
- контролю за станом повітряного середовища на робочих місцях.

Біологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори містять такі біологічні об'єкти: мікроорганізми (бактерії, віруси та ін.) та продукти їх життєдіяльності, макроорганізми (рослини та тварини).

У комплексі заходів, спрямованих на протибіологічний захист, обов'язковими складовими є дезінфекція (знищення або вилучення хвороботворних мікробів з зовнішнього середовища), дезинсекція (знищення шкідливих для людини комах та кліщів) і дератизація (боротьба з гризунами).

До психофізіологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Розрізняють психологічні фактори потенційної небезпеки постійної дії:

- вади органів відчуття (часткова втрата зору, слуху тощо);
- дефекти координації рухів;
- підвищена емоційність;
- відсутність мотивації до трудової діяльності, незадоволеність роботою, відсутність зацікавленості до роботи.

та психологічні фактори потенційної небезпеки тимчасової дії:

- недостатність досвіду (поява імовірної помилки, невірні дії, напруження нервово-психічної системи, побоювання допустити помилку);
- необережність (може призвести до ураження не лише окремої людини, а й всього колективу);
- втома - зниження продуктивності діяльності через витрату енергетичних ресурсів організму людини. Цей стан виникає через певне ставлення людини до праці, звички до фізичного та розумового напруження.

Об'єктивним показником втоми є уповільнення темпу роботи, а також зниження її якості. Монотонна, нецікава робота призводить до того, що втома настає раніше, ніж у тих випадках, коли робота зацікавлює людину. За наявності хронічної перевтоми погіршується продуктивність праці, знижується опір організму до інфекцій та збільшується кількість помилок та брак у роботі.

Заходи боротьби з психофізіологічними факторами передбачають такі дії:

- раціональна організація режиму праці та відпочинку (перерви, чергування видів діяльності);
- нормування тривалості робочого часу та запобігання перевтомі;
- оптимізація робочого навантаження відповідно до фізичних і психічних можливостей працівника;
- зручне облаштування робочого місця;
- автоматизація та механізація важких і монотонних процесів;
- формування сприятливого психологічного клімату у колективі.

Отже, забезпечення захисту працівників від шкідливих виробничих факторів є важливою складовою виробничого процесу та вимагає постійного контролю і моніторингу з боку керівництва та служби охорони праці, адже дотримання правил і норм безпечності праці є запорукою збереження життя та здоров'я працівників і, як наслідок, повноцінного виробничого процесу [23].

5.3 Виробниче освітлення та його види

Близько 90% всієї інформації, що отримується людиною, приходить на органи зору. Організація освітленості робочих місць відіграє важливу роль у житті людини.

Освітлення - це отримання, розподіл та використання світлової енергії для забезпечення нормальних умов праці.

Освітлення, що відповідає гігієнічним вимогам, сприяє підвищенню продуктивності праці та знижує кількість нещасних випадків. У свою чергу недостатнє освітлення є однією з причин виробничого травматизму.

Для створення оптимальних умов зорової роботи слід кількість та якість освітлення пов'язувати з кольоровим оточенням. Так, якщо інтер'єр зафарбований у темні кольори, то для створення достатньої освітленості необхідно використовувати більш потужні джерела світла, оскільки темні поверхні поглинають значну частину світлового потоку та створюють контрастні світлотіні, що втомлюють очі. Причиною втомлюваності може служити також надмірна блискучість поверхонь оточуючих конструкцій. Блискучі поверхні створюють світлові блики, які викликають тимчасове осліплення.

Залежно від спектрального складу світлових потоків випромінюваних джерелами світла, по різному сприймаються кольори поверхонь оточуючих предметів. Тому при створенні комфортного кольорового клімату у виробничих приміщеннях поруч з правильним рішенням кольорового оточення велике значення має вибір найбільш раціональних джерел світла.

Освітлення робочих приміщень повинне задовольняти таким умовам:

- рівень освітленості робочих поверхонь має відповідати гігієнічним нормам для даного виду роботи;
- мають бути забезпечені рівномірність та стійкість рівня освітленості у приміщенні, відсутність різких контрастів між освітленістю робочої поверхні та навколишнього простору;
- у полі зору предмети не повинні створювати блиску;
- штучне світло, що використовується на підприємствах, за своїм спектральним складом має наближатися до природного.

Виробниче освітлення залежно від джерела світла може бути: природнім, штучним та суміщеним.

Природне освітлення обумовлено прямими сонячними променями та розсіяним світлом небосхилу, змінюється залежно від географічної широти, ступеню хмарності та часу доби.

Штучне освітлення створюється штучними джерелами світла: лампами розжарювання або газорозрядними лампами.

Суміщене освітлення являє собою доповнення природного освітлення штучним у світлий час доби при недостатньому природному освітленні.

За функціональним призначенням штучне освітлення поділяють на: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне та чергове.

Робочим називають освітлення приміщень будинків, а також ділянок відкритих просторів, призначених для роботи, проходу людей та руху транспорту.

Аварійне освітлення використовується для продовження роботи при аварійному відключенні робочого освітлення.

Евакуаційне освітлення передбачається для евакуації людей при аварійному відключенні робочого освітлення. Воно необхідне у проходах, на сходах, у виробничих приміщеннях, де працює більш 50 осіб.

Охоронне освітлення передбачається вздовж меж територій, що охороняються у нічний час.

До чергового освітлення приміщень вдаються у неробочий час, при цьому використовуються частина світильників того або іншого виду освітлення.

За розміщенням джерел світла штучне освітлення поділяється на загальне, місцеве та комбіноване. При місцевому освітленні світловий потік концентрується безпосередньо на робочих місцях. На підприємствах використання лише місцевого освітлення дозволяється тільки для періодичних робіт з переносними лампами. При загальному освітленні світильники розташовуються у верхній зоні, забезпечуючи рівномірну освітленість робочого приміщення. При комбінованому освітленні до загального освітлення додається місцеве.

Штучне освітлення передбачається в усіх виробничих та побутових приміщеннях, де недостатньо природного світла, а також для освітлення приміщень у темний період доби. При організації штучного освітлення необхідно забезпечити сприятливі гігієнічні умови для зорової роботи і одночасно враховувати економічні показники [24].

Освітленість на робочому місці відіграє суттєву роль у процесі роботи, адже недостатній її рівень може спричинити серйозні порушення здоров'я працівників. Саме тому важливо правильно її визначити та обрати саме ті освітлювальні прилади, які якнайкраще освітлюють робочу зону. Для цього у нагоді стає метод коефіцієнта використання, де до уваги приймається висота світильника, встановленого над робочою поверхнею, розрахованого за формулою (5.1):

$$h = H - (h_p + h_c), \quad (5.1)$$

де H – висота приміщення, м;

h_p – відстань робочої поверхні від підлоги: 0,73 м;

h_c – відстань (звис) світильника від стелі: 0,22 м.

$$h = 3,2 - (0,73 + 0,22) = 2,25 \text{ м.}$$

Використовуючи формулу (5.2) можна визначити величину світлового потоку:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta}, \text{ лм} \quad (5.2)$$

де E – задана мінімальна освітленість, лк (прийняти 100 лк);

K_3 – коефіцієнт запасу, дорівнює 1,5;

S – площа освітлення, м²;

z – коефіцієнт нерівномірності освітлення, для люмінесцентних ламп $z=1,1$;

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку в частках одиниці, який розраховується, враховуючи показник приміщення i , застосовуючи формулу (5.3):

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (5.3)$$

де A - довжина приміщення, для якого розраховується освітлення, м.

B - ширина приміщення, для якого розраховується освітлення, м.

$$i = \frac{4,5 \cdot 6,3}{2,25 \cdot (4,5 + 6,3)} = 1,17.$$

Для розрахунку відстані між світильниками у даному приміщенні, використовують формулу (5.4):

$$L = 1,5h. \quad (5.4)$$

Щоб розрахувати кількість світильників, застосовують формулу (5.5):

$$N = \frac{(A \cdot B)}{L^2}, \quad (5.5)$$

де L - відстань між рядами світильників.

З метою визначення потужності освітлювального пристрою, застосовують формулу (5.6):

$$P_y = P_n N, \quad (5.6)$$

де P_n – потужність лампи, Вт.

Маючи вище зазначені дані та розрахунки, розраховується освітленість приміщення, приймаючи до уваги кількість світильників, яка була розрахована вище [25].

$$L = 1,5 \cdot 2,25 = 3,38 \text{ м.}$$

$$N = \frac{4,5 \cdot 6,3}{3,38^2} = 2,48$$

$$\Phi = \frac{100 \cdot 28,35 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2,48 \cdot 2 \cdot 0,6} = 1569,7 \text{ лм.}$$

$$P_y = 28,35 \cdot 2 \cdot 2 = 113,4 \text{ Вт.}$$

У результаті проведених розрахунків, можна дійти висновку, що розрахованому світловому потоку, який становить 1569,7 лм відповідає лампа LED лампа LEDVANCE VALUE CL A100 FR E27 13W 1521 lm 6500K.

Обрана світлодіодна лампа є ефективним джерелом освітлення, яке забезпечує високий рівень яскравості при низькому енергоспоживанні. Завдяки використанню LED-технології лампа споживає приблизно 13-15 Вт електроенергії, що в декілька разів менше, порівняно з традиційними лампами розжарювання аналогічної яскравості.

Лампа оснащена стандартним цоколем E27, що забезпечує універсальність використання у побутових та офісних світильниках. Світловий потік на рівні 1500-1600 лм дозволяє ефективно освітлювати житлові приміщення, робочі зони або виробничі площі. Колірна температура 6500 К створює холодне біле світло, максимально наближене до природного денного освітлення, що сприяє підвищенню концентрації уваги та продуктивності, а кут розсіювання близько 270° забезпечує рівномірне освітлення простору без різких тіней.

Така лампа має високу енергоефективність, економлячи до 80-90% електроенергії, термін її служби становить близько 10-15 років, вона не містить ртуті, безпечна при використанні і не має ефекту мерехтіння при вмиканні.

Отже, обрана LED-лампа повністю задовольняє розрахованому рівню світлового потоку, який становить 1569,7 лм, здатна забезпечити яскраве, стабільне та економне освітлення, що робить її доцільною як для побутового, так і для професійного використання.

5.4 Висновки

У розділі «Охорона праці» визначено, що забезпечення безпечних і здорових умов праці є невід'ємною складовою ефективної діяльності будь-якого підприємства. Підкреслено важливу роль дотримання правил з охорони праці у сучасних умовах розвитку технологій, автоматизації та зростання інтенсивності праці, оскільки вона безпосередньо впливає не лише на збереження життя і здоров'я працівників, а й на продуктивність праці та економічні показники підприємства.

Наведено перелік шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища з огляду на природу їх виникнення: фізичну, хімічну, біологічну та психофізіологічну, а також визначено методи боротьби з ними з акцентом на важливість постійного моніторингу стану виробничого середовища та проведення профілактичних робіт.

Показано, що важливим аспектом робочого середовища є організація виробничого освітлення, яке безпосередньо впливає на працездатність, безпеку та самопочуття працівників.

Проведені розрахунки продемонстрували доцільність використання сучасних світлодіодних джерел світла, які забезпечують необхідний рівень освітленості при мінімальному енергоспоживанні.

Обґрунтовано вибір LED-пристрою, який дозволяє досягти оптимального поєднання економічної ефективності, довговічності та екологічної безпеки.

Таким чином, охорона праці є багатокomпонентною системою, що потребує постійної уваги, вдосконалення та контролю, а її ефективна організація забезпечує не лише збереження здоров'я працівників, але й стабільність виробничих процесів.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел, який показав, що рівняння світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента може бути записаним у відповідності до однодіодної або дводіодної еквівалентної схеми. Для опису світлової вольт-амперної характеристики сонячних елементів на основі кристалічних напівпровідників найчастіше застосовують однодіодну еквівалентну схему, в якій потрібно задати п'ять параметрів, а саме: фотострум, струм насичення діода, параметр ідеальності діода, внутрішній послідовний та шунтуючий опори. Для визначення цього набору параметрів використовують методики, що базуються на аналізі нахилу ділянок світлової вольт-амперної характеристики поблизу точок холостого ходу та короткого замикання, а також на записі системи рівнянь для пари точок, розташованих в околицях точки максимальної потужності.

2. Представлено методики, що використовувались при визначенні вхідних параметрів для побудови світлових вольт-амперних характеристик у відповідності до однодіодної моделі сонячного елемента, зокрема, таких як внутрішній послідовний та шунтуючий опір, параметр ідеальності та струм насичення діода. Описано Simulink-модель сонячного елемента для побудови розрахункових світлових вольт-амперних характеристик за визначеними вхідними параметрами однодіодної еквівалентної схеми.

3. Обрано три фотоелектричні модулі LG290N1C, JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W, для фотоелектричних перетворювачів яких проведено визначення параметрів, що описують їх світлові вольт-амперні характеристики, описано паспортні параметри та характеристики обраних модулів.

4. З використанням методик, що базуються на аналізі експериментальних світлових вольт-амперних характеристик обраних модулів, визначено такі параметри однодіодної еквівалентної схеми сонячного елемента, як внутрішній послідовний опір, струм насичення діода

та коефіцієнт ідеальності. Показано, що найменший струм насичення має сонячний елемент модуля LG290N1C, виготовлений з монокристалічного кремнію, в той час як для мультикристалічних фотоелектричних перетворювачів, з яких побудовано модулі JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W, струми насичення є дещо вищими. Визначені коефіцієнти ідеальності діодів знаходяться в діапазоні від 1 до 1,2 і є типовими для кристалічних сонячних елементів.

5. Складено рівняння світлових вольт-амперних характеристик сонячних елементів, з яких побудовано модулі LG290N1C, JAP6(BK) 60-250/3BB та AS-6P30-270W. Отримані рівняння можуть використовуватись для моделювання залежності світлової вольт-амперної характеристики цих модулів від таких зовнішніх факторів, як інтенсивність сонячного випромінювання та температура.

6. Здійснено перевірку коректності застосованої методики визначення параметрів однодіодної еквівалентної схеми шляхом порівняння розрахункових електричних параметрів модулів, отриманих з аналізу побудованих розрахункових світлових вольт-амперних характеристик, з відповідними паспортними параметрами модулів. Показано, що відхилення розрахункових параметрів від паспортних значень для всіх модулів не перевищує 3%, що вказує на коректність застосованої методики.

7. Розраховано витрати на проведення науково-дослідної роботи з визначення параметрів світлових вольт-амперних характеристик сонячного елемента, які складають 18 888 грн 75 коп. Коефіцієнт значимості результатів науково-дослідної роботи $K_{\text{зн}} = 0,5$ вказує на високий ступінь наукової новизни та достатній рівень теоретичної обґрунтованості результатів дослідження. Оскільки комплексний показник рівня науково-дослідної роботи $K_p > 1$, то дана робота характеризується високим науковим, технічним та економічним рівнями.

8. В розділі з охорони праці розглянуто теоретичні засади охорони праці на підприємствах, проаналізовано шкідливі фактори виробничого

середовища та способи протидії цим факторам, наголошено на важливості створення оптимальних умов зорової роботи на робочому місці. Виконано розрахунок штучного освітлення виробничого приміщення та обґрунтовано вибір LED-пристрою, який дозволяє досягти оптимального поєднання економічної ефективності, довговічності та екологічної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
2. Мороз С.С. Моделювання процесу анаеробної переробки відходів тваринництва / С.С. Мороз, А.А. Вершков, І.Ф. Погребняк // Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали VII Всеукраїнської наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (25 травня 2023 р., м. Хмельницький). – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2023. – С. 106-108.
3. Огляд сучасних технологій сонячних панелей [Електронний ресурс] // EcoTechUkraine [сайт]. – Режим доступу: <https://eco-tech.com.ua/ua/a470336-obzor-sovremennyh-tehnologij.html> (дата звернення: 15.04.2026). – Назва з екрану.
4. Основи сонячної електроенергетики. Навчальний посібник для студентів спеціальності 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка: навч. посіб. / В. В. Курак, О. В. Андропова, Н. Л. Дон. – Херсон: Книжкове вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2024. – 348 с.
5. Курак В.В. Моделювання впливу неоднорідності опромінення приймальної поверхні на параметри фотоелектричної панелі / В.В. Курак, О.В. Андропова, М.О. Мельник // Вісник ХНТУ. – 2023. – №1(84). – С. 25 – 32.
6. Ткачов А. Система слідкування за точкою максимальної потужності сонячного елемента для акумуляторних батарей / А. Ткачов, П. Яганов // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2026. – Т. 361, №1. – С. 470 – 477.
7. Гаєвський О.Ю. Моделювання ВАХ фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення / О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук // Відновлювана енергетика. – 2024. – №3. – С. 54 – 61.

8. Андропова О.В. Моделювання роботи фотоелектричних панелей з використанням середовища MATLAB/SIMULINK / О.В. Андропова, В.В. Курак, Н.Л. Дон // Вісник ХНТУ. – 2021. – №3(78). – С. 11 – 19.

9. Macabebe Erees Q.B. Parameter extraction from dark current–voltage characteristics of solar cells. Erees Q.B. Macabebe, E. Ernestvan Dyk // South African Journal of Science. – 2008. – Vol. 104, N 9. – P. 401-404.

10. Міжнародні тести сонячних батарей STC і PTC [Електронний ресурс] / Кворум [Сайт]. – Режим доступу: <https://kworum.com.ua/rus/mizhnarodni-testi-sonjachnih-batarej-stci-ptc> (дата звернення: 18.04.26). – Назва з екрану.

11. LG290N1C-G3. Product Specifications [Electronic resource]. – Access mode: <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC384/2019-2020/MonoX-Neon-LG290N1C-G3-20140915.pdf>/(last access: 24.04.26). – Title from the screen.

12. Сонячна панель Ja Solar JAP6(BK) 60/240-260/3BB [Електронний ресурс] / АксиомПлюс [Сайт]. – Режим доступу: <https://axiomplus.com.ua/ua/solnechnyie-paneli/product-75901/> (дата звернення: 24.04.26). – Назва з екрану.

13. Сонячна панель Amerisolar AS-6P30-270W [Електронний ресурс] / АксиомПлюс [Сайт]. – Режим доступу: <https://axiomplus.com.ua/ua/solnechnyie-paneli/product-74667/> (дата звернення: 24.04.26). – Назва з екрану.

14. Посадові оклади за ЄТС 2023 – тарифна сітка [Електронний ресурс] / Бухгалтерія [Сайт]. – Режим доступу: <https://oblikbudget.com.ua/article/448-tarifna-stka-2022-posadov-okladi-za-ts> (дата звернення: 09.05.26). – Назва з екрану.

15. Утримання із заробітної плати [Електронний ресурс] / Головбукх [Сайт]. – Режим доступу: <https://www.golovbukh.ua/article/ru/8198-nalogi-s-zarplaty-2020> (дата звернення: 09.05.26). – Назва з екрану.

16. Закон України «Про вищу освіту» [Електронний ресурс] /

Законодавство України [Сайт]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text> (дата звернення: 09.05.26). – Назва з екрану.

17. Закон України «Про збір та облік єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування» №2464-VI від 09.08.2019 [Електронний ресурс] / Законодавство України [Сайт]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2464-17> (дата звернення: 09.05.26). – Назва з екрану.

18. Амортизація основних засобів [Електронний ресурс] / Вісник. Офіційно про податки [Сайт]. – Режим доступу: <http://www.visnuk.com.ua/uk/publication/100006196-amortizatsiya-osnovnikh-zasobiv> (дата звернення: 09.05.26). – Назва з екрану.

19. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

20. Посадові оклади за ЄТС 2026, тарифна сітка, тарифні розряди [Електронний ресурс] / Бухгалтер бюджетної установи [Сайт]. – Режим доступу: <https://buhgalter.com.ua/dovidnik/posadovi-okladi-za-ets/posadovi-okladi-za-yets-2026-tarifna-sitka-tarifni-rozryadi/> (дата звернення: 09.05.26). – Назва з екрану.

21. Закон України Про охорону праці [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення 12.05.26). – Назва з екрану.

22. Білосевич І.А. Охорона праці та навколишнього середовища: навчально-методичний посібник / І.А. Білосевич, М.П. Олексюк, Г.В. Сапожник. – Кременець: ВЦ КОГПА, 2021. – 264 с.

23. Сокурєнко В.В. Безпека життєдіяльності та охорона праці. Підручник / В.В. Сокурєнко. – Харків. ХНУВС, 2021. - 308 с.

24. Мартіросова В.Г. Створення комфортного світлового середовища для робочих місць / В.Г. Мартіросова, О.Д. Галинський, В.М. Сорокін // Науково-практичний журнал «Український журнал з проблем медицини

праці». – 2022. – Вип. 4. – С. 49-57.

25. Кузнєцов С.І. Методичні рекомендації до написання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах підготовки фахівців на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти для всіх спеціальностей, всіх освітньо-професійних програм, всіх факультетів / С.І. Кузнєцов – Херсон: ХНТУ, 2022. – с. 31.

ДОДАТОК А

Результати апробації роботи

УДК 681.51

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АНАЕРОБНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ТВАРИНИЦТВА

Мороз С.С., Вершков А.А., к.т.н., доц. Погребняк І.Ф.
Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
irina.pogrebnyak.ip@gmail.com
Науковий керівник: к.т.н., доц. Погребняк І.Ф.

Зростаючі показники споживання і, як наслідок, обмеження енергоресурсів, впливають на розвиток технологій видобутку енергії з альтернативних джерел. В нашій країні сільське господарство та тваринництво є одними з основних галузей. Одним зі шляхів утилізації сільськогосподарських відходів є біогазова технологія, яка дає змогу не лише розв'язати екологічні проблеми, а й отримувати високоефективні органічні добрива та енергію у вигляді біогазу.

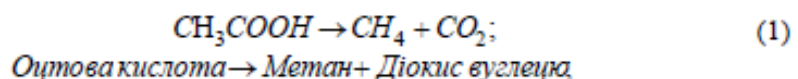
В основі роботи біогазової установки є отримання метану, який в свою чергу отримується шляхом анаеробної переробки. Процес перетворення органічного матеріалу в метан налічує наступні етапи:

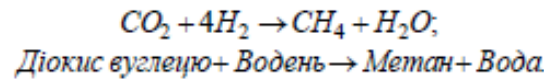
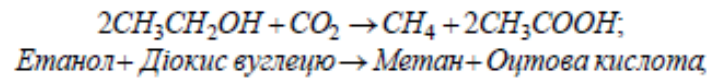
- Гідроліз – органічна речовина ферментується позаклітинними ферментами (клітковина, амілаза, протеаза й ліпаза) мікроорганізмів. Бактерії розкладають довгі ланцюжки складних вуглеводнів – протеїни й ліпіди – у більш короткі ланцюжки.

- Зброджування – кислотопродукуючі бактерії, які беруть участь у другому етапі утворення біогазу, розщеплюють складні органічні сполуки (білки, жири й вуглеводи) у більш прості сполуки. При цьому в зброджуваному середовищі з'являються первинні продукти зброджування – летючі жирні кислоти, нижчі спирти, водень, окис вуглецю, оцтова й мурашина кислоти тощо. Ці органічні речовини є джерелом живлення для метаноутворюючих бактерій, які перетворюють органічні кислоти в біогаз.

- Утворення метану – метанопродукуючі бактерії, залучені на третьому етапі, розкладають сполуки з низькою молекулярною вагою. Вони утилізують водень, вуглекислоту й оцтову кислоту. У природних умовах метаноутворюючі бактерії існують при наявності анаеробних умов, наприклад, під водою, у болотах. Вони дуже чутливі до змін навколишнього середовища, тому від умов, які створюються для життєдіяльності метаноутворюючих бактерій, залежить інтенсивність газовиділення.

Процес утворення метану виражається наступними рівняннями:





Модель процесу анаеробної переробки відходів тваринництва створюється за допомогою середовища MATLAB SIMULINK за різних умов, для вивчення впливу температури, часу протікання реакції та способів подачі на виробництво біогазу. Результати моделювання дозволять підібрати найкращі параметри роботи моделі.

Процес проектування починається з розрахунку розмірів передбачуваної [1, 2] установки

$$V_k = V_m + V_d + V_{зб}. \quad (2)$$

Об'єм ємності (теоретичний) для зберігання метану можна визначити за рівнянням

$$V_m = \frac{V \cdot t}{\zeta}, \quad (3)$$

де V – об'єм сировини, м³/добу;

t – час;

ζ – коефіцієнт безпеки.

На прикладі невеликого фермерського господарства, об'єм сировини 0,5 м³/добу. Для відходів великої рогатої худоби приймаємо t рівним 30 діб, відповідно ζ рівним 0,9. Підставивши в (3), отримаємо 16,67 м³.

В якості підкормки для збільшення вироблення біогазу використовують біопрепарати, що містять живі культури (інокулянти). Враховуючи це, теоретичний об'єм ємності $V_{акт}$ становитиме 20,8 м³. Враховуючи розширення, необхідно залишити 20% активного $V_{акт}$ об'єму, тобто 4,2 м³. Враховуючи все це, отримаємо, що питомий об'єм ємності становитиме 41,7 м³.

Що стосується співвідношення між висотою та діаметром, то зазвичай використовують 1,25:1.

Моделювання анаеробної переробки з використанням середовища MATLAB SIMULINK дозволить визначити найвигідніші параметри роботи моделі.

Процес гідролізу від вихідного матеріалу, температури котла, ефективного об'єму ємності, кількості сировини. Масовий баланс біорозкладних летючих твердих речовин у перерахунку на розчинні наведений у рівнянні [1, 2]:

$$\frac{d(Sbvs)}{dt} = (Sbvs_{in} - Sbvs) \cdot \frac{F_{feed}}{V} + \mu \cdot k_1 \cdot x_{acid}. \quad (4)$$

Процес зброджування наведений у рівняннях:

$$\frac{d(Svfa)}{dt} = (Svfa_{in} - Svfa) \cdot \frac{F_{feed}}{V} + \mu \cdot k_2 \cdot x_{acid} - \mu_c \cdot k_3 \cdot x_{meth}; \quad (5)$$

$$\frac{d(x_{acid})}{dt} = \left[\mu - k_d - \frac{F_{feed}}{V} \right] \cdot x_{acid} ; \quad (6)$$

$$\frac{d(x_{meth})}{dt} = \left[\mu_c - k_{dc} - \frac{F_{feed}}{V} \right] \cdot x_{meth} . \quad (7)$$

Кількість метану, що вийшов з ємності, визначається як

$$F_{meth} = V \cdot \mu_c \cdot k_5 \cdot x_{meth} . \quad (8)$$

Температурна залежність $20^\circ \text{C} < T_{\text{reac}} < 60^\circ \text{C}$.

В моделі, яку розглядали, різні види гною тварин подаються в БГУ як вхідні дані. Така модель дозволяє вивчити вплив різних параметрів на працездатність системи. Температура ємності підтримувалася на рівні 35°C , оскільки вона є найкращою для реакції.

За результатами було отримано, що виробництво метану поступово зростає протягом 40 діб, перш ніж буде постійним.

Список літератури:

1. Kinetic modeling of anaerobic hydrolysis of solid wastes, including disintegration processes / Garcia-Gen S. et al. // Waste Management. – 2015. – Vol. 35. – P. 96-104.
2. Rathnasiri P.G. Dynamic modeling and simulation of pilot scale anaerobic digestion plant treating source separated food waste and effect of recycling sludge / P.G. Rathnasiri // Procedia Environmental Sciences. – 2016. – Vol. 35. – P. 740-748.