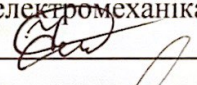
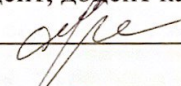


Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

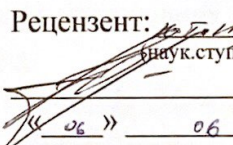
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

СОНЯЧНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА АВТОНОМНОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Виконав: студент 4 курсу групи Е-21б3
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
Черешнюк Д.М. 

Керівник: к.т.н., доцент, доцент каф. ЕСС
Малогулко Ю.В. 

« 04 » серпня 2025 р.

Рецензент:  к.т.н., доцент каф. ЕСС
(наук. ступінь, по звання, назва кафедри)

« 06 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.


« 06 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» 06 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Черешнюк Дмитро Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Сонячна фотоелектрична система автономного електропостачання»

Керівник роботи к.т.н., доцент, доцент каф. ЕСС Малогулко Ю. В.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 року № 97

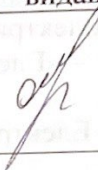
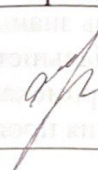
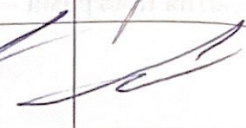
2. Термін подання студентом роботи 3 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Можливості створення побутової сонячної електростанції. 2. Проектування структури фотоелектричної установки. 3. Обґрунтування вибору площі сонячної батареї та ємності накопичувача енергії. 4. Охорона праці. Висновки. Література. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Титульний лист. 2. Актуальність дослідження. 3. Сонячна енергетика у світі. 4. Динаміка зниження вартості сонячних батарей у світі в 2010–2024 рр., €/Вт за даними IRENA, SolarPower Europe". 5. Блок – схема багатокаскадної ФЕУ. 6. Одноступенева схема ФЕУ. 7. Графік споживання електроенергії в житловому будинку. 8. Вибір типу акумуляторної батареї і її системи обслуговування. 9. Оптимальний кут нахилу сонячної батареї. 10. Вибір конструкції і напруги автономної фотоелектричної установки. 11. Вибір типу сонячної батареї. 12. Висновок.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Малогулко Ю. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О.В., д.пед.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання « 20 » березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Вступ. Огляд літературних джерел.	20.03.25	27.03.25	
2	Можливості створення побутової сонячної електростанції.	28.03.25	31.03.25	
3	Проектування структури фотоелектричної установки.	01.04.25	10.04.25	
4	Обґрунтування вибору площі сонячної батареї та ємності накопичувача енергії.	11.04.25	21.04.25	
5	Моделювання сонячної батареї в програмі Simulink і в розділі SimPowerSystem.	22.04.25	04.05.25	
6	Охорона праці.	05.05.25	14.05.25	
7	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки.	15.05.25	24.05.25	
8	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації.	25.05.25	27.05.25	
9	Перевірка БКР на плагіат.	28.05.25	31.05.25	
10	Попередній захист БКР. Рецензування БКР.	01.06.25	03.06.25	
11	Захист БКР	За графіком		

Студент

підпис

Черешнюк Д.М.

Керівник

підпис

Малогулко Ю.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.243

Черешнюк Дмитро Миколайович «Районна електрична мережа з аналізом системи блискавкозахисту». Бакалаврська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Вінниця: ВНТУ, 2025. 92 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 21 назв; рис.: 27, табл. 15.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі було розглянуто питання проектування побутової сонячної електростанції. В роботі проаналізовано останні відомі схеми автономної фотоелектричної установки. Розглянуто підбір інверторів для традиційних автономних сонячних фотоелектричних систем та як знизити втрати в сонячних фотоелектричних системах.

Також досліджено структуру фотоелектричних установок, а саме: побудовано графік споживання електроенергії в житловому будинку, вибрано тип акумуляторної батареї та її системи обслуговування, оптимальний кут нахилу сонячної батареї, конструкції і напруги автономної фотоелектричної установки, проаналізовано традиційну структури автономної фотоелектричної установки. Розраховано площу сонячної батареї та ємності акумуляторної батареї. В роботі також враховано вимоги охорони праці, електробезпеки, виробничої санітарії та пожежної безпеки при експлуатації електричних мереж.

Ключові слова: фотоелектрична станція, акумуляторна батарея, втрати потужності, сонячна батарея.

ABSTRACT

Chereshnyuk Dmytro “District electrical network with lightning protection system analysis”. Bachelor’s qualification work in specialty 141 – “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”, educational program – “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”. Vinnytsia: VNTU, 2025. 92 p.

In Ukrainian. Bibliography: 21 titles; fig.: 27, table. 15.

The bachelor’s qualification work considered the issue of designing a household solar power plant. The work analyzed the latest known schemes of an autonomous photovoltaic installation. The selection of inverters for traditional autonomous solar photovoltaic systems and how to reduce losses in solar photovoltaic systems were considered.

The structure of photovoltaic installations was also studied, namely: a schedule of electricity consumption in a residential building was built, the type of battery and its maintenance system were selected, the optimal angle of inclination of the solar battery, the design and voltage of an autonomous photovoltaic installation were analyzed, the traditional structure of an autonomous photovoltaic installation was analyzed. The area of the solar battery and the capacity of the battery were calculated. The work also took into account the requirements of labor protection, electrical safety, industrial sanitation and fire safety when operating electrical networks.

Keywords: photovoltaic station, battery, power loss, solar battery.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	9
1.1 Сонячна енергетика у світі	9
1.2 Схеми автономної фотоелектричної установки	14
1.2.1 Інвертори для традиційних автономних сонячних фотоелектричних систем	14
1.2.2 Зниження втрат в сонячних фотоелектричних системах	15
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ	17
2.1 Графік споживання електроенергії в житловому будинку	17
2.2 Сучасні рішення для вибору та експлуатації акумуляторних батарей у фотоелектричних установках	22
2.3 Розрахунок оптимального кута нахилу сонячних панелей	27
2.3.1 Вплив кута нахилу сонячної батареї на ефективність роботи системи	28
2.4 Конструктивне рішення та параметри напруги для автономної фотоелектричної системи	31
РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПЛОЩІ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ ТА ЄМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ	33
3.1 Вибір типу сонячної батареї	33
3.2 Вплив температури оточуючого середовища на характеристики сонячної батареї	39
3.3 Моделювання сонячної батареї в програмі Simulink і в розділі SimPowerSystem	44
3.4 Баланс енергії фотоелектричної установки	50
3.4.1 Розрахунок площі сонячної батареї	53
3.4.2 Проектування сонячного модуля з ринкових елементів	55

3.5 Розрахунок робочої циклограми ємності акумуляторної батареї	57
3.5.1 Розрахунок номінальної ємності акумуляторної батареї по її зарядному струму	60
3.5.2 Розрахунок номінальної ємності акумуляторної батареї по розрядному струму	60
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	62
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	64
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	64
4.1.2 Електробезпека	69
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	73
4.2.1 Мікроклімат	74
4.2.2 Склад повітря робочої зони	75
4.3 Виробниче освітлення	76
4.3.1 Виробничий шум	78
4.3.2 Виробничі випромінювання	79
4.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	80
4.4.1 Дослідження безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції при дії іонізуючих випромінювань	81
4.4.2 Дослідження безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції в умовах дії електромагнітного імпульсу	83
4.4.3 Розробка превентивних заходів по підвищенню безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції в умовах надзвичайних ситуацій	85
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	89
ДОДАТКИ	92

ВСТУП

Останні роки стали справжнім злетом для української сонячної фотоенергетики. І це не дивно, адже наша країна має чудові можливості для генерації сонячної енергії завдяки великій кількості сонячних днів. У 2019 році Україна несподівано для багатьох вирвалася в лідери Європи за обсягом нових сонячних електростанцій, додавши до енергосистеми близько 3,5 ГВт. Це чітко показало, що інтерес інвесторів до сонячної енергетики зростає, а ринок активно розвивається.

Одним з головних факторів, що стимулювали розвиток сонячної енергетики, стала система підтримки виробників "зеленої" енергії, зокрема, зелені тарифи. Зелений тариф гарантує високу ціну на сонячну електроенергію протягом тривалого періоду, що є стимулом для інвестицій і сприяє розвитку галузі. Крім того, Україна прийняла низку законів та нормативних актів для підтримки відновлювальних джерел енергії, включаючи сонячну. Наприклад, спростили процедури підключення до електромереж для малих сонячних електростанцій, що збільшило кількість сонячних установок на дахах будинків.

На жаль, війна внесла свої корективи. Сонячна фотоенергетична галузь зіткнулася з новими викликами та обмеженнями. Зрозуміло, що конфлікт негативно впливає на інвестиційний клімат і темпи розвитку нових проєктів.

Одним з найсерйозніших викликів є ризик для безпеки та непередбачуваність, пов'язані з війною. Інвестори можуть вагатися перед тим, як вкладати кошти в сонячну енергетику, зважаючи на нестабільність. Війна також впливає на доступність фінансування для нових проєктів. В умовах конфлікту зменшується кількість доступних кредитів та інвестиційних ресурсів, що ускладнює розвиток галузі.

Не варто забувати і про ризик пошкодження сонячних електростанцій внаслідок бойових дій. Це може призвести до зниження продуктивності систем та збитків для інвесторів.

Проте, незважаючи на всі ці труднощі, деякі сонячні проєкти продовжують реалізовуватися в Україні. Уряд та міжнародні організації намагаються стимулювати розвиток відновлюваної енергетики та підтримувати проєкти сонячної енергії, навіть під час війни.

Сонячні фотоелектричні системи автономного електропостачання використовують сонячну енергію для виробництва електроенергії, яка потім живить різні прилади. Типова система складається з сонячних панелей, контролерів заряду, акумуляторних батарей та інверторів.

Ключовим елементом сонячної системи є сонячні панелі, також відомі як фотоелектричні модулі. Вони складаються з сонячних елементів, які перетворюють сонячне випромінювання в електричний струм. Зазвичай їх встановлюють на даху або на відкритій ділянці, щоб ефективно використовувати сонячну енергію.

Контролер заряду регулює процес заряду акумуляторних батарей, які зберігають надлишкову електроенергію, вироблену сонячними панелями. Він контролює процес заряду, щоб забезпечити ефективну роботу батарей та продовжити термін їх служби.

Акумуляторні батареї є важливою частиною системи, оскільки вони гарантують доступ до електроенергії, навіть коли сонячні панелі не виробляють достатньо енергії, наприклад, вночі або в похмуру погоду. Батареї накопичують електроенергію для подальшого використання.

Інвертор – це ключовий елемент, який перетворює постійний струм, що генерується сонячними панелями та накопичується в акумуляторах, на змінний струм. Саме цей змінний струм живить більшість наших електроприладів. Фактично, інвертори роблять сонячну енергію сумісною зі звичайними електричними мережами, дозволяючи нам використовувати її для живлення будь-чого – від лампочки до холодильника.

Сонячні фотоелектричні системи, що працюють автономно, мають безліч переваг. Найголовніша з них – екологічність. Вони використовують сонце, відновлювальне джерело енергії, що допомагає зменшити викиди вуглецю та

інших шкідливих речовин, які зазвичай пов'язані з традиційними джерелами енергії.

А ще, сонячні системи зменшують нашу залежність від централізованих електромереж, даруючи незалежність в електропостачанні. Це особливо актуально для регіонів, де доступ до центральної мережі обмежений або де часті перебої з електрикою.

Важливим плюсом є і довговічність та невибагливість в обслуговуванні. Сонячні панелі служать довго і не потребують особливого догляду, хіба що періодичного очищення від пилу та бруду для підтримки їхньої продуктивності.

Проте, перед тим, як встановити сонячну систему, варто звернути увагу на декілька важливих моментів:

- По-перше, необхідно правильно розрахувати потужність системи, виходячи з того, скільки електроенергії споживають прилади, які ви плануєте жити від сонячних панелей. Проаналізуйте свої потреби в електроенергії, враховуючи все: освітлення, побутову техніку, опалення та кондиціонування.

- По-друге, максимізуйте продуктивність! Ефективність збору сонячної енергії безпосередньо залежить від правильного розташування, орієнтації та кута нахилу сонячних панелей. При проектуванні враховуйте не тільки географічне положення, а й кліматичні умови та навіть тінь. Тільки так можна отримати максимум електроенергії.

- По-третє, безпека понад усе! Проектування обов'язково повинно включати аналіз ризиків та заходи для забезпечення безпеки системи. Це означає дотримання вимог електробезпеки, захист від перенапруг і перевантажень, а також резервне живлення для безперебійної роботи.

- По-четверте, ефективне використання ресурсів – запорука успіху. Проектування допомагає нам використовувати сонячні панелі та акумулятори з максимальною віддачею. Правильно розрахувавши необхідну потужність і розмір системи, можна уникнути зайвих витрат і оптимально використовувати наявні ресурси. Наприклад, точний розрахунок потужності сонячних панелей

та їхнє оптимальне розташування дозволяють вичавити максимум із сонячної енергії та забезпечити ефективну роботу всієї системи. А правильно підібраний розмір акумуляторів гарантує достатню потужність для зберігання та використання електроенергії, навіть коли сонце не надто щедre.

- І нарешті, економічна доцільність – важливий аргумент. Проектування допомагає визначити, чи вигідна взагалі вся система. Для цього потрібно порахувати, скільки коштуватиме придбання та встановлення сонячної фотоелектричної системи, а також оцінити витрати на її експлуатацію та очікуваний прибуток від інвестицій. Правильне проектування дозволяє знайти баланс між вартістю системи та економічними вигодами, які вона принесе, зокрема, зниженням витрат на електроенергію.

Отже, проектування сонячної фотоелектричної системи – це надзвичайно важливий етап, який визначає, наскільки ефективною, надійною, безпечною та економічно вигідною буде вся система. Враховуючи потреби споживачів, оптимізуючи ресурси та прагнучи до максимальної продуктивності, ми можемо створити дійсно ефективну та стабільну сонячну систему, яка надійно забезпечуватиме автономне електропостачання.

РОЗДІЛ 1 МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

1.1 Сонячна енергетика у світі

Перетворення сонячного випромінювання на електроенергію може здійснюватися двома основними методами:

- фототермічним, коли світлова енергія спочатку перетворюється на теплову, а за потреби — на електричну;
- фотоелектричним, що забезпечує пряме перетворення світлової енергії у електричну.

За прогнозами Європейської асоціації фотоелектричної промисловості (EPIA), у майбутньому сонячна енергетика здатна значно потіснити традиційні джерела енергії, такі як нафта та атомна енергетика. На сьогодні використання сонячних фотоелектричних установок активно зростає, особливо у країнах Європи. Загальна встановлена потужність геліоенергетичних установок у світі вже давно перевищила позначку 100 ГВт. Такий обсяг виробництва електроенергії можна порівняти з потужністю приблизно 16 великих вугільних або атомних електростанцій.

Ще 10 років тому темпи розвитку сонячної енергетики демонстрували стійке зростання (рис. 1.1). У країнах Європейського Союзу сумарна встановлена потужність сонячних батарей досягла 70 ГВт. Наприклад, в Італії близько 7 % електроенергії забезпечують сонячні установки, у Німеччині — 6 %, у Греції — 4 %, а в Болгарії, Чехії, Бельгії та Іспанії — по 3 %.

У 2012 році на території Європейського Союзу було введено в експлуатацію нові фотоелектричні системи загальною потужністю 17 ГВт. З цієї кількості понад половину (8 ГВт) встановила Німеччина. Для порівняння, приріст встановленої потужності вітрових електростанцій у Європі за той же рік склав 12 ГВт, а газових електростанцій — 5 ГВт. Одночасно з експлуатації було виведено електростанції, що працювали на нафті (3 ГВт) та деякі атомні потужності (1 ГВт).

Ці дані свідчать про динамічний розвиток сонячної енергетики в ЄС, незважаючи на те, що у багатьох країнах регіону через географічні особливості рівень сонячної радіації є порівняно невисоким.

Сонячна енергетика продовжує демонструвати стрімке зростання в усьому світі. За даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), у 2024 році глобальна встановлена потужність сонячної фотоелектричної енергетики досягла 2,2 ТВт, що становить 46% загальної потужності відновлюваних джерел енергії.

У 2024 році було додано понад 600 ГВт нових сонячних потужностей, що на 29% більше, ніж у 2023 році. Основними драйверами цього зростання стали Китай, США, Індія, Німеччина та Бразилія.

Регіональні досягнення:

- Китай встановив рекорд, додавши 278 ГВт нових сонячних потужностей у 2024 році, що становить понад 60% світового приросту.
- Європейський Союз встановив 66 ГВт нових сонячних потужностей у 2024 році, довівши загальну потужність до 338 ГВт.
- США додали 38,3 ГВт, а Індія — 24,5 ГВт нових сонячних потужностей у 2024 році.
- Бразилія встановила 11,9 ГВт нових потужностей, увійшовши до десятки лідерів за приростом сонячної енергетики.

Виробництво електроенергії:

У 2024 році глобальне виробництво електроенергії з сонячних фотоелектричних установок зросло на 30%, досягнувши 475 ТВт·год, що стало найбільшим приростом серед усіх джерел електроенергії.

Перспективи:

Очікується, що до 2030 року глобальна встановлена потужність сонячної енергетики перевищить 7 ТВт, що становитиме близько 65% від необхідної потужності для досягнення цілей у сфері відновлюваної енергетики.

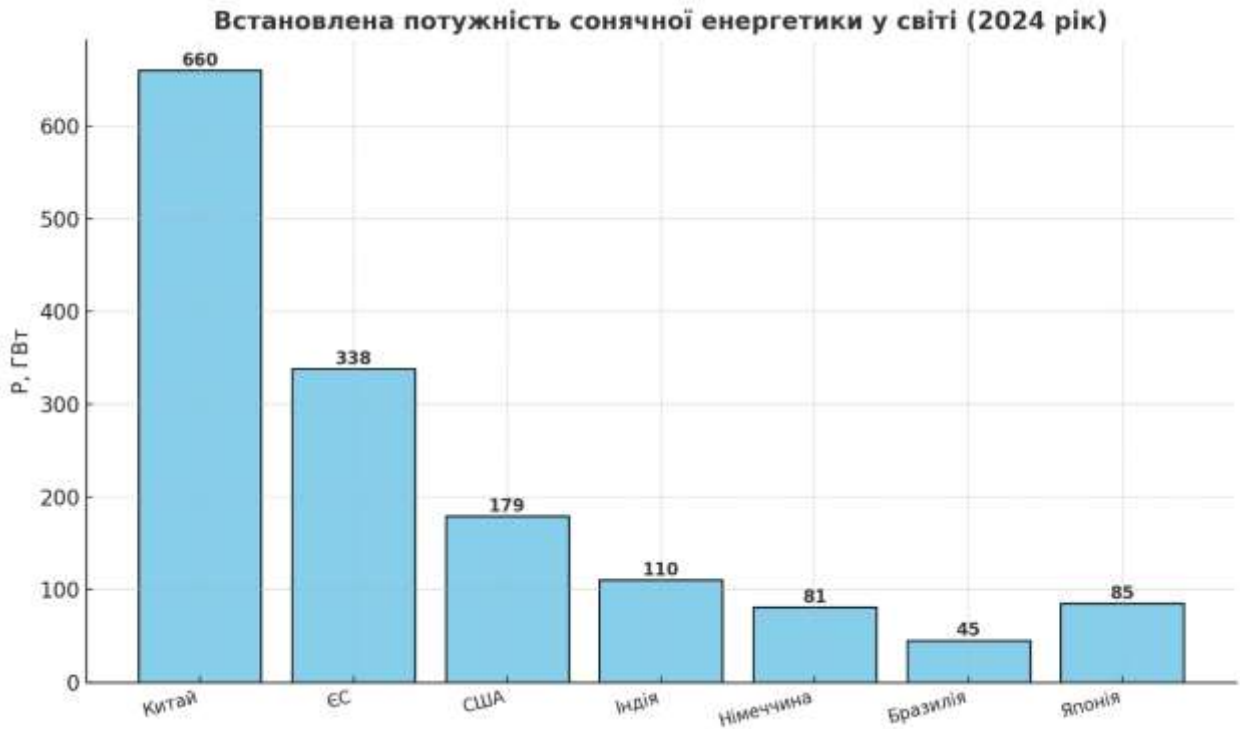


Рисунок 1.1 – Встановлена потужність сонячної енергетики у світі (2024 рік)

У 2023–2024 роках світовий ринок сонячної енергетики демонструє рекордні темпи зростання. Згідно з даними *IEA (International Energy Agency)* та *IRENA*, у 2023 році було введено в експлуатацію понад 400 ГВт нових фотоелектричних потужностей у світі — це майже вдвічі більше, ніж у 2021 році.

Особливо стрімко зростають ринки:

- Китай — абсолютний лідер, у 2023 році ввів понад 216 ГВт нових ФЕУ, що втричі більше, ніж у 2020 році.
- США — у 2023 році ввели понад 32 ГВт нових потужностей, подвоївши річні темпи порівняно з 2020 роком.
- Індія — встановила понад 17 ГВт у 2023 році, що більш ніж у 5 разів перевищує щорічний показник 2011 року.
- Японія — стабільно підтримує приріст у межах 4–5 ГВт щороку, загальна встановлена потужність сягнула понад 85 ГВт у 2024 році.

Прогнозується, що у 2025 році найбільший приріст знову забезпечить Китай (очікується понад 250 ГВт на рік), друге місце займатиме Індія (зростання на тлі розвитку масштабних "зелених коридорів"), третє місце — США, де сонячна енергетика стимулюється завдяки закону Inflation Reduction Act.

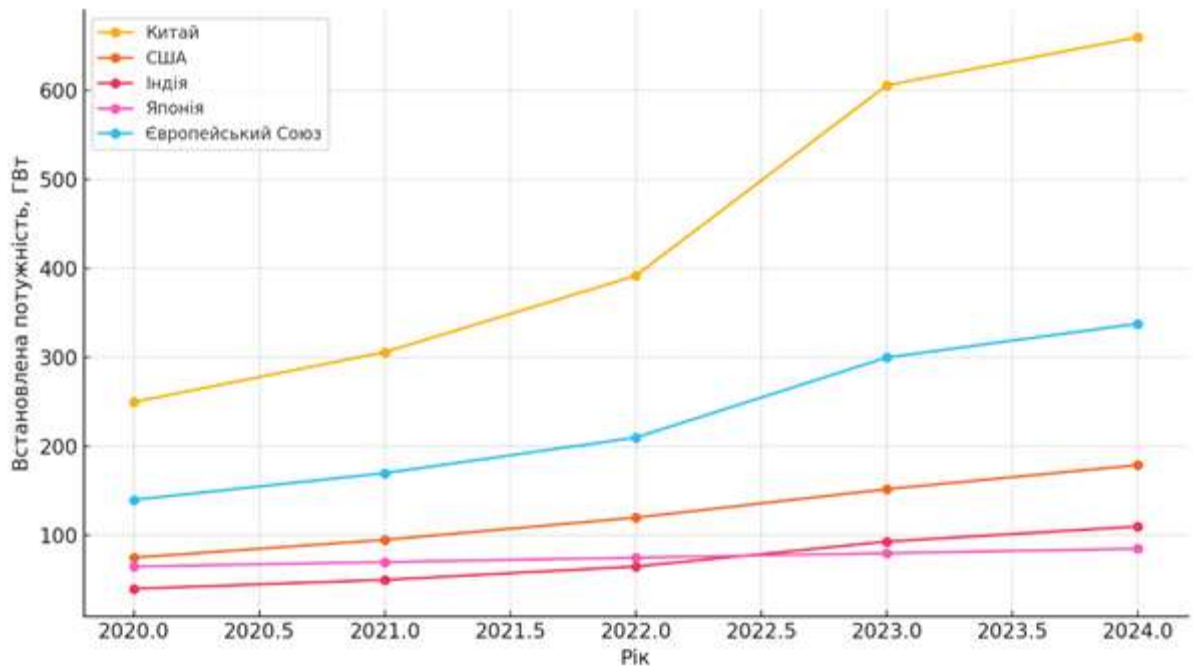


Рисунок 1.2 – Динаміка росту встановленої потужності ФЕУ (ГВт) у провідних країнах світу у 2020–2024 роках

Основною передумовою широкого використання сонячної енергії є низька собівартість виробництва електроенергії. Для порівняння: 20 років тому вартість виробництва 1 кВт·год з сонячної енергії перевищувала 1 євро. На сьогодні у країнах з високим сонячним потенціалом (Іспанія, ОАЕ, Індія, Чилі, Бразилія) собівартість електроенергії зі СЕС знизилася до 2–4 євроцентів/кВт·год на нових об'єктах. У середньому в ЄС вартість складає 5–7 євроцентів/кВт·год.

За прогнозами IEA та SolarPowerEurope, у 2025 році сумарна встановлена потужність сонячної енергетики у світі перевищить 2 ТВт, тобто збільшиться більш ніж у 4 рази порівняно з 2012 роком.

Світові ціни на сонячні модулі також знижуються. Середня ціна на сонячні панелі у 2024 році становить 15–18 євроцентів за Вт (рис. 1.3). Як видно з динаміки останніх років, вартість модулів продовжує зменшуватися завдяки масштабуванню виробництва, розвитку технологій та зростанню конкуренції.

За даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) та SolarPower Europe (колишня EPIA), станом на 2024 рік сумарна встановлена потужність сонячної енергетики у світі зростає більш ніж у 10 разів порівняно з 2012 роком і досягла понад 1,6 ТВт. За прогнозами, у 2025 році цей показник може перевищити 1,8 ТВт.

Водночас продовжує знижуватися вартість фотоелектричних модулів. Ще у 2010 році середня ціна за 1 Вт встановленої потужності становила близько 1,5–2 євро/Вт. У 2024 році — вже 0,15–0,25 євро/Вт для великих проєктів (utility-scale). Тобто вартість СБ зменшилась у понад 10 разів за останні 14 років.

На рисунку 1.3 наведено динаміку зниження вартості сонячних батарей у євро за 1 Вт у період 2010–2024 років. Як видно з графіка, ціни продовжують знижуватись завдяки вдосконаленню технологій та масштабному виробництву.

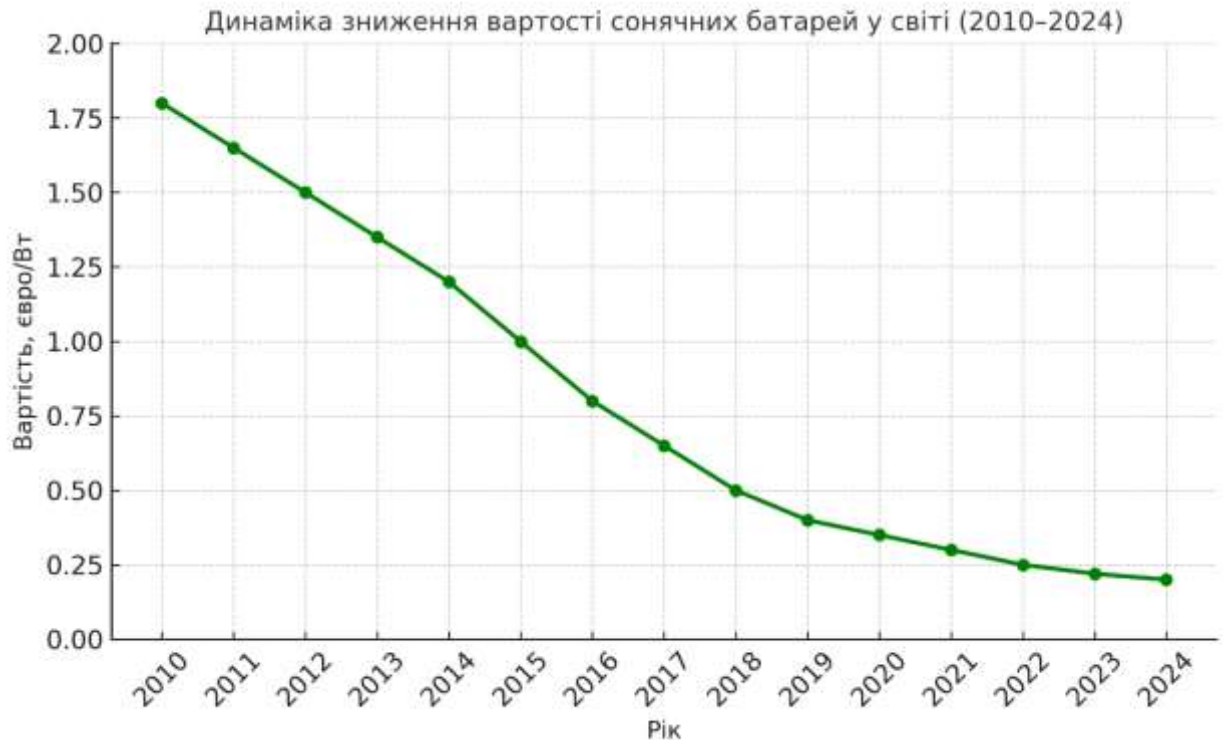


Рисунок 1.3 – Динаміка зниження вартості сонячних батарей у світі в 2010–2024 рр., €/Вт за даними IRENA, SolarPower Europe"

Ці цифри означають, що технічний прогрес робить сонячну енергетику все більш рентабельною і доступною для країн, що розвиваються.

1.2 Схеми автономної фотоелектричної установки

1.2.1 Інвертори для традиційних автономних сонячних фотоелектричних систем

Схема сучасної побутової фотоелектричної установки (ФЕУ) зображена на рис. 1.4. Типова система включає сонячні модулі (фотомодулі), підключені до трекера точки максимальної потужності (MPPT), що інтегрований у інвертор постійного/змінного струму (DC/AC).

У сучасних системах DC/DC-перетворювачі застосовуються у випадку використання оптимізаторів потужності на рівні панелей (наприклад, у рішеннях SolarEdge, Huawei, Tigo), що дозволяє ефективно працювати за частковим затіненням.

Типові робочі напруги на стороні постійного струму — від 200 до 1000 В DC (в залежності від конфігурації стрінгів), а на стороні змінного струму — 230/400 В, 50 Гц, синхронізовано з мережею.

На рис. 1.4 представлена узагальнена схема сучасної однофазної або трифазної побутової ФЕУ з оптимізаторами (опційно) та системою моніторингу.

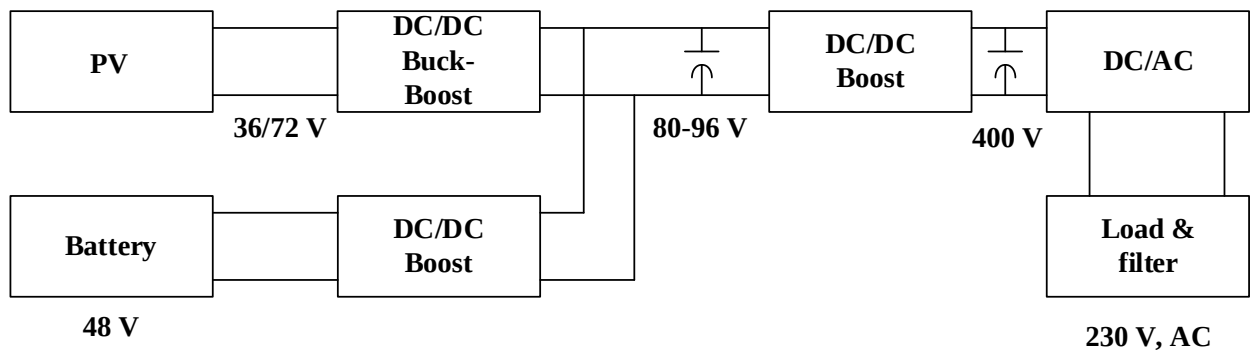


Рисунок 1.4 – Блок – схема багатокаскадної ФЕУ

Для даної схеми застосовується інвертор з трирівневою модуляцією напруги: 0 В, $0,5 U_n$ та U_n . Такий підхід дає змогу знизити масу і габарити пасивного L-C фільтра. Силу схему інвертора з трирівневою напругою наведено на рис. 1.5. У цьому інверторі комутаційні елементи працюють із частотою перемикання 50 кГц для системи потужністю до 5 кВА.

1.2.2 Зниження втрат у сонячних фотоелектричних системах

Недоліком традиційної схеми ФЕУ (рис. 1.5) є значна кількість ступенів енергетичного перетворення (три ступені). Скорочення кількості етапів перетворення дозволяє підвищити загальну ефективність системи та одночасно покращити її надійність.

У рамках дослідження було розглянуто дві альтернативні топології системи, описані нижче. Ефективність запропонованих рішень оцінюється шляхом проведення детального моделювання.

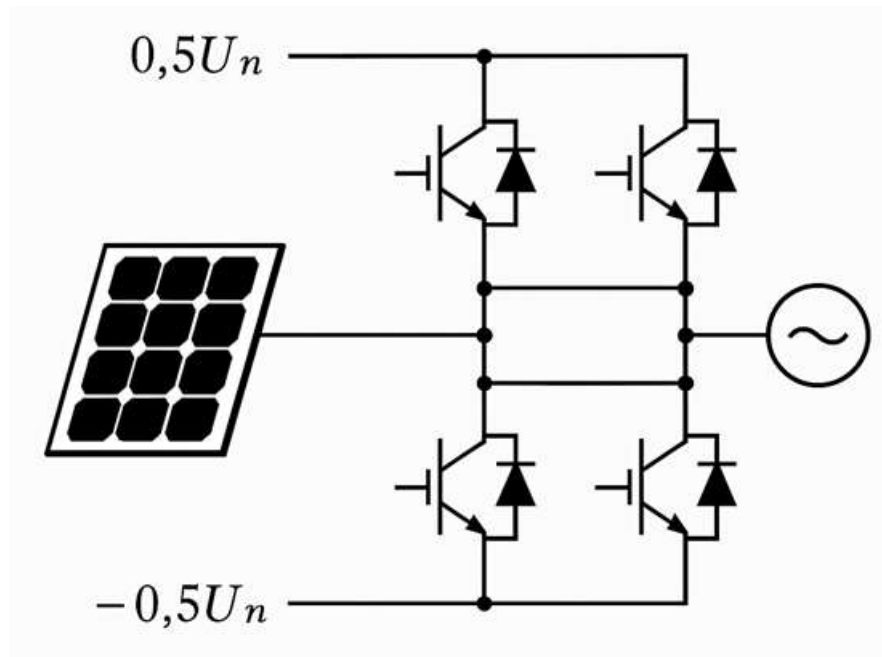


Рисунок 1.5 – Схема інвертора з тривірневою модуляцією напруги для сонячної фотоелектричної установки

Трансформаторна схема, що поєднує інверторну і конверторну частини ФЕУ, та одноступенева система підвищення напруги та інвертування наведені в Додатку Б.

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Графік споживання електроенергії в житловому будинку

Для автономного житлового будинку з постійним проживанням однієї особи типове середньодобове споживання електроенергії становить близько 9 кВт·год (відповідно до даних таблиць 2.1 та 2.2). Відтак, середня споживана потужність будинку складає орієнтовно 375 Вт.

Таблиця 2.1 – Профіль споживання електроенергії у житловому будинку в холодний період року в нічний та ранковий час (01:00–12:00)

Споживач	Споживана потужність (Вт)	Кількість	Годинна споживана енергія (кВт*год)											
			W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8	W 9	W 10	W 11	W 12
Комп'ютер	100	1									0,1	0,1	0,1	
Холодильник	200	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Телевізор	50	1								0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Світлодіодні лампи	40	2	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04							
Лампи	20	2		0,02		0,02								
Чайник	1500	1						0,125				0,125		

Продовження таблиці 2.1 – – Профіль споживання електроенергії у житловому будинку в холодний період року в нічний та ранковий час (01:00–12:00)

Спожи вач	Спожив ана потужні сть (Вт)	Кількі сть	Годинна споживана енергія (кВт*год)											
			W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8	W 9	W1 0	W1 1	W1 2
Праль- на машина	1500	1												1,5
Водя- ний насос	370	1								0,2 8				

Таблиця 2.2 – Споживання електроенергії у житловому будинку протягом доби в холодний період року (13:00–24:00)

Спожи вач	Спожи вана потужн ість (Вт)	Кільк ість	Годинна споживана енергія (кВт*год)											
			W 13	W 14	W 15	W 16	W 17	W 18	W 19	W 20	W 21	W 22	W 23	W 24
Ком- п'ютер	100	1		0,1	0,1	0,1				0,1	0,1			

Продовження таблиці 2.2 – Споживання електроенергії у житловому будинку протягом доби в холодний період року (13:00–24:00)

Спожи- вач	Спожи- вана потужн ість (Вт)	Кількі сть	Годинна споживана енергія (кВт*год)											
			W 13	W1 4	W 15	W1 6	W 17	W 18	W 19	W 20	W 21	W 22	W 23	W 24
Холоди- льник	200	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Телеві- зор	50	1						0,0 5			0,0 5	0,0 5		
Світлоді одні лампи	40	2						0,0 8	0,0 8	0,0 8	0,0 8	0,0 8	0,0 8	0,0 8
Лампи	20	2					0,0 4	0,0 4	0,0 4	0,0 4	0,0 4	0,0 4	0,0 4	0,0 4
Чайник	1500	1				0,1 25								
Пральна машина	1500	1					1,5							
Водяний насос	370	1		0,1 85										

На рис. 2.1 та 2.2 представлені дані таблиці 2.1 та 2.2.

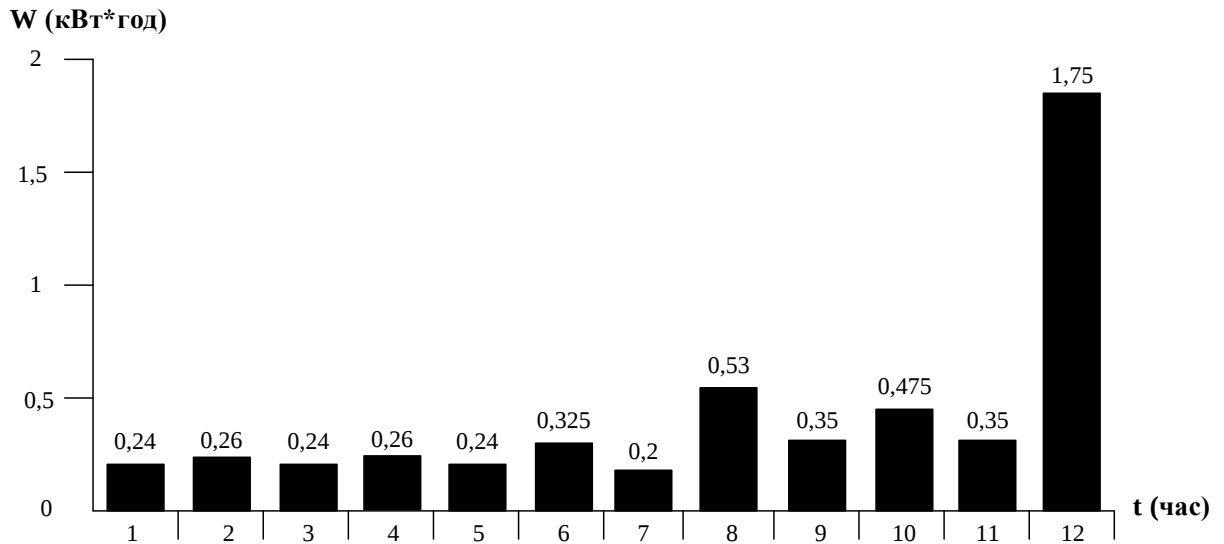


Рисунок 2.1 – Споживання електричної енергії з 01:00 до 12:00 (табл. 2.1)

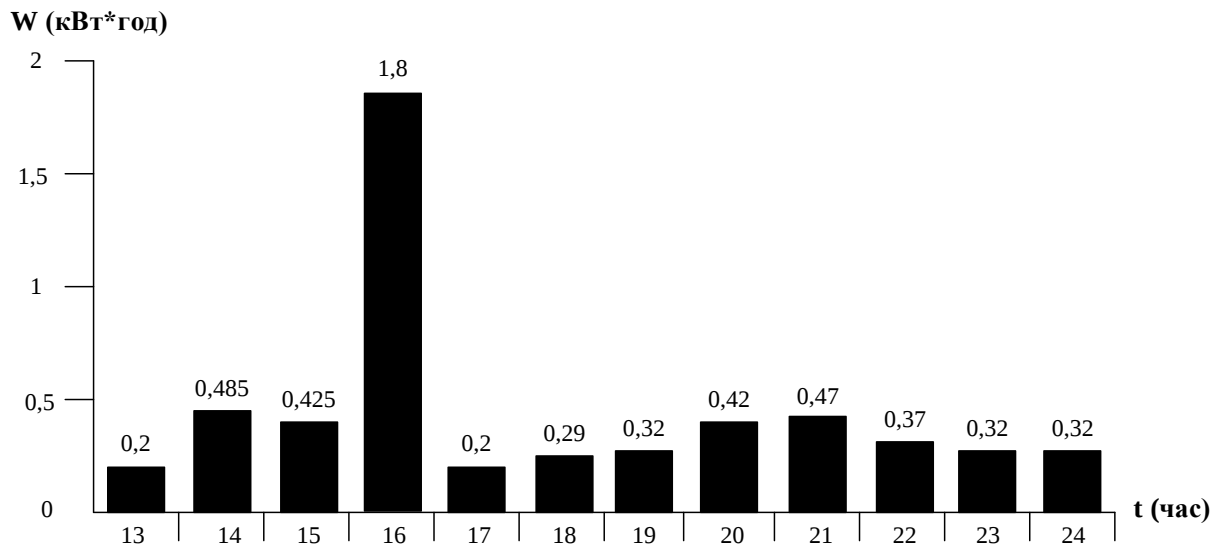


Рисунок 2.2 – Споживання електричної енергії з 13:00 до 24:00 (табл. 2.2)

Сумарна енергія в кіловат-годинах за ніч (табл. 2.1 та 2.2):

$$\begin{aligned}
 \sum W_{\text{ніч}} &= W_{19} + W_{20} + W_{21} + W_{22} + W_{23} + W_{24} + W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = \\
 &= 0,32 + 0,42 + 0,47 + 0,37 + 0,32 + 0,32 + 0,24 + 0,26 + 0,24 + 0,26 + \\
 &+ 0,24 + 0,325 = 3,8 \text{ (кВт} \cdot \text{год)}.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Сумарна енергія в кіловат-годинах за день:

$$\begin{aligned} \sum W_{\text{день}} &= W_7 + W_8 + W_9 + W_{10} + W_{11} + W_{12} + W_{13} + W_{14} + W_{15} + W_{16} + W_{17} + W_{18} = \\ &= 0,2 + 0,53 + 0,35 + 0,475 + 0,35 + 1,75 + 0,2 + 0,485 + 0,425 + 1,8 + \\ &+ 0,2 + 0,29 = 7,05 \text{ (кВт} \cdot \text{год)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Сумарне енергоспоживання за добу

$$\begin{aligned} \sum W_{\text{доба}} &= \sum W_{\text{день}} + \sum W_{\text{ніч}} = 7,05 \text{ кВт} \cdot \text{год} + 3,08 \text{ кВт} \cdot \text{год} = \\ &= 10,85 \text{ (кВт} \cdot \text{год)} \end{aligned}$$

Середня потужність за ніч (рис.2.1)

$$P_{\text{сер.ніч}} = \frac{\sum W_{\text{ніч}}}{T_{\text{ніч}}} = \frac{3,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}}{12 \text{ год}} = 0,3 \text{ (кВт)} \quad (2.3)$$

Середня потужність за день

$$P_{\text{сер.день}} = \frac{\sum W_{\text{день}}}{T_{\text{день}}} = \frac{7,05 \text{ кВт} \cdot \text{год}}{12 \text{ год}} = 0,6 \text{ (кВт)} \quad (2.4)$$

На рисунку 2.3 приведено графік споживаної потужності, пік якої досягає 1,8 кВт через увімкнення пральної машини.

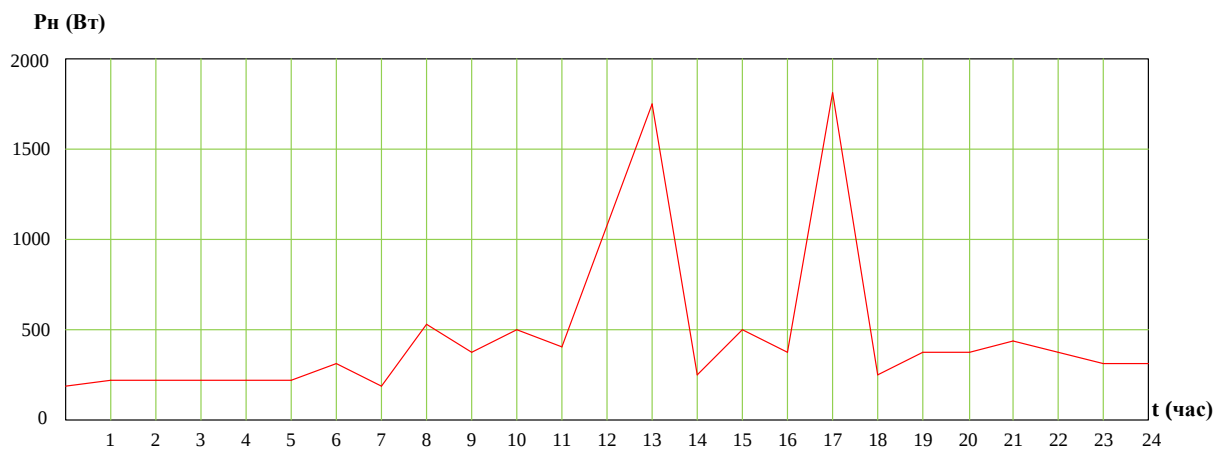


Рисунок 2.3 – Циклограма споживаної потужності з 00:00 до 24:00

Розглядається сценарій, за якого у житловому будинку електроспоживання є стабільним упродовж усього року, включаючи вихідні дні. Пікові навантаження припадають на вечірній та нічний час, коли основне забезпечення споживачів здійснюється за рахунок енергії акумуляторної батареї.

2.2 Сучасні рішення для вибору та експлуатації акумуляторних батарей у фотоелектричних установках

Для забезпечення ефективної роботи системи обирається оптимальний тип акумуляторної батареї (АБ) та визначаються її основні параметри. У таблиці 2.3 наведено розширені характеристичні показники різних типів акумуляторів, що дають змогу обґрунтовано, на основі статистичних даних, здійснити вибір найбільш придатної АБ. При цьому щодо даних таблиці 2.3 слід враховувати такі особливості:

- Внутрішній опір акумуляторної батареї залежить від опору окремих її елементів, типу використовуваної схеми захисту та загальної кількості елементів у батареї. Зокрема, захисні схеми літій-іонних та літій-полімерних батарей, як правило, підвищують внутрішній опір у середньому на 100 мОм (0,1 Ом).
- Тривалість служби АБ суттєво визначається регулярністю обслуговування та застосуванням так званих «відновлювальних» (лікувальних) циклів — періодичних повних циклів заряду-розряду.
- Глибина розряду також впливає на ресурс батареї: часткові розряди сприяють подовженню терміну експлуатації у порівнянні з повними циклами.
- Максимально допустимі струми розряду для нікель-кадмієвих і нікель-металогідридних акумуляторів можливі одразу після заряджання. Водночас, через саморозряд, нікель-кадмієві батареї втрачають близько 10 % ємності протягом перших 24 годин після заряджання, а в подальшому —

приблизно 10 % кожні 30 днів. При цьому інтенсивність саморозряду підвищується з ростом температури.

- Захисні схеми, інтегровані в літій-іонні та літій-полімерні батареї, споживають орієнтовно до 3 % накопиченої енергії за місяць. Типова напруга одного елемента для нікель-кадмієвих та нікель-металогідридних батарей у режимі холостого ходу становить близько 1,25 В, а під навантаженням — 1,2 В.

Для кислотних акумуляторів допускається заряд імпульсами підвищеної сили струму. Серед різних типів акумуляторних батарей, які застосовуються у складі фотоелектричних установок (ФЕУ), найбільш поширеними залишаються свинцево-кислотні та гелеві акумулятори. Для даного проєкту обираються саме гелеві батареї, оскільки вони мають низку важливих переваг: не потребують використання спеціального регулятора зарядного струму, забезпечують велику кількість циклів заряд-розряд, допускають тривале перебування у розрядженому стані без суттєвого зниження ресурсу, характеризуються низьким рівнем саморозряду та можуть експлуатуватися у будь-якому положенні, у тому числі в житлових приміщеннях. Виявлено перспективність застосування саме цього типу акумуляторів у сучасних ФЕУ.

Сьогодні гелеві акумулятори активно застосовуються в електротранспорті, у потужних домашніх системах безперебійного живлення, а також в альтернативній енергетиці. Водночас швидкий розвиток технологій літій-полімерних батарей поступово витісняє гелеві акумулятори у сегменті малих та середніх ємностей. Проте для акумуляторів великої ємності (від 100 А·год і більше) гелеві батареї, ймовірно, залишатимуться актуальними ще протягом тривалого часу завдяки своїй надійності та економічній доцільності. Гелеві акумуляторні батареї потребують лише захисту від перезаряду та оснащення обмежувачем напруги під час заряджання, що дозволяє досягати тривалого терміну служби — понад 700 циклів заряд-розряд.

Слід зазначити, що станом на 2024–2025 роки на світовому ринку систем зберігання енергії для фотоелектричних установок спостерігається зростаюча популярність літій-залізо-фосфатних акумуляторів (LiFePO_4). Цей тип літієвих батарей демонструє високу енергоефективність, тривалий термін служби (до 4000–6000 циклів заряд-розряд при глибокому розряді 80 %), відмінну термічну та хімічну стабільність, низький рівень деградації при довготривалому зберіганні та широкий діапазон робочих температур. Крім того, такі батареї мають вищу питому енергію порівняно з гелевими акумуляторами, що дозволяє зменшити габарити та вагу системи накопичення енергії.

У Європі, США та країнах Азії літій-залізо-фосфатні акумулятори вже стають де-факто стандартом для нових домашніх та комерційних сонячних систем. В Україні, з огляду на зростаючий попит на автономні та резервні системи живлення, використання LiFePO_4 також набуває поширення, особливо у проєктах для приватних домогосподарств та малого бізнесу.

З урахуванням вищезазначених переваг, при проєктуванні нових систем ФЕУ доцільно розглядати як варіант і використання акумуляторів на базі технології LiFePO_4 , поряд з традиційними гелевими батареями, залежно від техніко-економічних вимог конкретного проєкту.

Переваги гелевих акумуляторних батарей:

- повністю необслуговувані (не потребують контролю рівня електроліту);
- можливість транспортування авіаційним транспортом;
- герметичність корпусу — відсутність ризику протікань;
- стійкість до корозійних процесів;
- висока ефективність при глибоких циклах розряду;
- допускається монтаж у горизонтальному положенні (з потенційною втратою ємності близько 10 %);
- відсутнє газовиділення при зарядці (можливе використання в приміщеннях без вентиляції);
- безпечне використання поряд із чутливою електронікою;

- тривалий термін зберігання без втрати ємності (добре переносять довгі періоди простою);
- швидкий процес зарядки (від 0 % до 90 % приблизно за 3,5 години), у сім разів швидший порівняно з класичними свинцево-кислотними АКБ;
- відсутні обмеження по струму підзарядки при досягненні напруги 13,8 В;
- висока стійкість до вібрацій;
- підвищена безпека використання в морських умовах — відсутність утворення вибухонебезпечного газу в трюмах (при контакті електроліту з морською водою);
- універсальність застосування: стартерні, тягові (глибокого розряду), стаціонарні системи;
- працездатність у вологому середовищі, зокрема на глибині до 10 метрів;
- стійкість до низьких температур — у повністю зарядженому стані не замерзають при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- оптимальна питомо-економічна ефективність (найкраще співвідношення ціна/термін служби та ціна/кількість циклів).

Особливості (недоліки) гелевих акумуляторних батарей:

- вища початкова вартість у порівнянні з класичними АКБ;
- більша маса;
- неможливість доливання води у разі тривалого перезаряду (герметична конструкція);
- необхідність використання зарядних пристроїв із температурною компенсацією та регульованою напругою, рекомендованою для продовження терміну служби (не більше 13,8–14,1 В при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Таблиця 2.3 – Характеристика акумуляторних батарей

Характеристики	Типи акумуляторних батарей						
	NiCD	NiMH	Свинцево-кислотні	Li-Ion	Li-Ion полімерні	Перезарядж. алкалінові	Гелієві
Енергетична густина, Вт/кг	45-80	60-120	150	110-160	100-130	80	180
Внутрішній опір, мОм	100-20 (батарея на 6 В)	200-300 (батарея на 6 В)	менше 100 (батарея на 12 В)	150-250 (батарея на 7,2 В)	200-300 (батарея на 7,2 В)	200-2000 (батарея на 6 В)	менше 100 (батарея на 12 В)
Число циклів заряд/розряд до зниження ємності на 80%	1500	300-500	200-300	500-1000	300-500	50 (при зниж. ємн. на 50 %)	700
Час швидкого заряду, ч	1	2-4	8-16	2-4	2-4	2-3	3,5
Допустимий перезаряд	середній	низький	високий	дуже низький	низький	середній	низький
Саморозряд за місяць при кімнатній температурі, %	20	30	5	10	10	0,3	3
Напруга на елементі, В	1,25	1,25	2	3,6	3,6	1,5 – 1,6	2
Струм навантаження відносно ємності (С): піковий, найбільш прийнятний	20С до 1с	5С до 0,5с	5С до 0,5с	> 2С до 1с	> 2С до 1с	5С до 0,2с	5С до 0,2с
Діапазон робочих температур, °С	-40/60	-20/60	-20/60	-20/60	0/60	0/65	-20/60
Обслуговування через	30-60 днів	60-90 днів	3-6 місяці	не регл.	не регл.	не регл.	не регл.
Початок виробництва	1950	1990	1970	1991	1999	1992	2000

2.3 Розрахунок оптимального кута нахилу сонячних панелей

Правильний вибір кута нахилу сонячної батареї (СБ) є важливим фактором для підвищення ефективності перетворення сонячної енергії в електричну. Оптимальний кут нахилу визначається географічною широтою місця встановлення, сезонними коливаннями сонячної інсоляції та призначенням системи (літнє/зимове або річне енергозабезпечення).

Загальне правило для цілорічної роботи СБ: оптимальний кут нахилу приблизно дорівнює географічній широті місцевості.

Для України (на прикладі центральних регіонів, широта $\approx 48-50^\circ$) це:

- для річного використання: кут нахилу = $30-35^\circ$;
- для максимальної генерації взимку: кут = $55-60^\circ$ (більший кут дозволяє краще вловлювати низьке зимове сонце та запобігає накопиченню снігу);
- для максимальної генерації влітку (наприклад, для систем на дачах або для кондиціонування): кут = $20-25^\circ$.

Розрахунок оптимального кута може бути уточнений за допомогою емпіричних формул або програмних пакетів (наприклад, PVsyst, Helioscope, SAM), які враховують:

- середньомісячну сонячну радіацію;
- тривалість сонячного дня;
- хмарність;
- кут піднесення сонця для кожного місяця.

У спрощеному вигляді, для річної оптимізації кута нахилу можна використовувати формулу:

$$\theta_{\text{опт}} = \phi - 10^\circ \text{ (для літнього максимуму)}$$

$$\theta_{\text{опт}} = \phi \text{ (для річного балансу)}$$

$$\theta_{\text{опт}} = \phi + 10^\circ \text{ (для зимового максимуму)}$$

де

- $\theta_{\text{опт}}$ — оптимальний кут нахилу СБ,
- ϕ — географічна широта місця встановлення.

Приклад для Вінниці (широта $\approx 50^\circ$):

- річний баланс — 50° ,
- літній максимум — $\approx 40^\circ$,
- зимовий максимум — $\approx 60^\circ$.

Таким чином, для домашніх фотоелектричних систем в Україні з річним використанням рекомендовано встановлювати СБ під кутом $30\text{--}35^\circ$ (залежно від конкретного регіону та конфігурації даху).

2.3.1 Вплив кута нахилу сонячної батареї на ефективність роботи системи

Для забезпечення максимальної ефективності роботи сонячної батареї необхідно орієнтувати її площину таким чином, щоб промені Сонця падали на неї під якомога прямішим кутом. Найбільша кількість енергії поглинається тоді, коли площина СБ розташована перпендикулярно до напрямку сонячного випромінювання. Оскільки протягом доби та року кут падіння сонячних променів змінюється, важливим є вибір такого нахилу панелей, який забезпечуватиме оптимальну генерацію в середньорічному балансі.

У даному проекті розглядається нерухома установка СБ, розміщена на даху житлового будинку. У такому випадку панелі, як правило, монтуються паралельно площині даху, без застосування складних регульованих конструкцій. Для визначення оптимального кута встановлення орієнтуємося на географічну широту місцевості. У південних регіонах України (наприклад, Одеська область) оптимальний кут фіксованого нахилу становить приблизно $35\text{--}40^\circ$.

Встановлення панелей під кутом даху (40°) забезпечує достатньо високий річний виробіток енергії, хоча деякі втрати спостерігаються в літній період

порівняно з оптимальним нахилом у 23° . Наприклад, у березні–вересні виробіток при $\beta = 40^\circ$ на $\sim 3\%$ нижчий, ніж при $\beta = 23^\circ$. Водночас у зимовий період (грудень–лютий) стрімкіший кут (40°) дозволяє краще вловлювати низьке зимове сонце, що підвищує генерацію у ці місяці.

Варто зазначити, що для дахових СЕС найбільш поширеним і практичним є саме фіксований монтаж під кутом даху, оскільки це значно спрощує конструкцію та знижує витрати на встановлення. У випадку даного проекту, нахил даху у 40° є цілком прийнятним та забезпечує близький до оптимального рівень генерації без необхідності зміни конфігурації покрівлі.

Таким чином, вибір кута нахилу є критично важливим фактором для підвищення ефективності сонячної електростанції. При правильному підході навіть стаціонарна установка може забезпечувати стабільний річний виробіток енергії, максимально використовуючи потенціал сонячного випромінювання у даному регіоні.

Для забезпечення максимальної потужності сонячної батареї (СБ) важливо правильно орієнтувати її площину відносно положення Сонця. Оптимальне засвоєння сонячної енергії досягається тоді, коли площина СБ розташована перпендикулярно до напрямку сонячних променів. Однак протягом доби та року кут падіння сонячного світла змінюється залежно від географічної широти та сезонів.

У даному проєкті розглядається використання стаціонарної СБ, яка монтується на найвищій частині даху будинку. Для ефективного монтажу необхідно визначити оптимальну орієнтацію СБ у просторі з урахуванням регіональних особливостей. Наприклад, для південних регіонів України доцільно підібрати сталий протягом року кут нахилу між горизонтальною площиною і площиною СБ (рис. 2.4).

За умови горизонтального розташування СБ (кут нахилу $\beta = 0^\circ$) питома річна енергія становить **1861,7 кВт·год/м²·рік**. При куті нахилу, що відповідає ухилу типового даху будинку ($\beta_{кр} = 40^\circ$), питома енергія зростає до **1906,01**

кВт·год/м²·рік. Варто зазначити, що нахил даху у 40° також забезпечує ефективний водовідвід під час опадів.

Якщо орієнтувати СБ під кутом, що дорівнює географічній широті місцевості ($\beta = 20,88^\circ$), питома енергія досягає **1976 кВт·год/м²·рік.** Максимальний показник сонячної енергії, **1978 кВт·год/м²·рік,** спостерігається при куті нахилу $\beta = 23^\circ$. Проте для реалізації такої конфігурації потрібна модифікація конструкції даху, оскільки стандартний нахил даху зазвичай становить 40° .

У разі встановлення СБ з кутом нахилу $\beta = 40^\circ$, надходження сонячної енергії у період з березня по вересень буде на **3%** нижчим, ніж при оптимальному куті 23° . Крім того, у літні місяці (травень–липень) кількість сонячної радіації може зменшуватися ще на **19%** внаслідок підвищеної хмарності та опадів.

Таблиця 2.4 – Залежність річної енергії сонячної радіації від β

β	0	10	20	20.88	23	30	50	70	87
$E_{\text{год}}$	1862	1941	1976	1976	1978	1964	1805	1488	1135

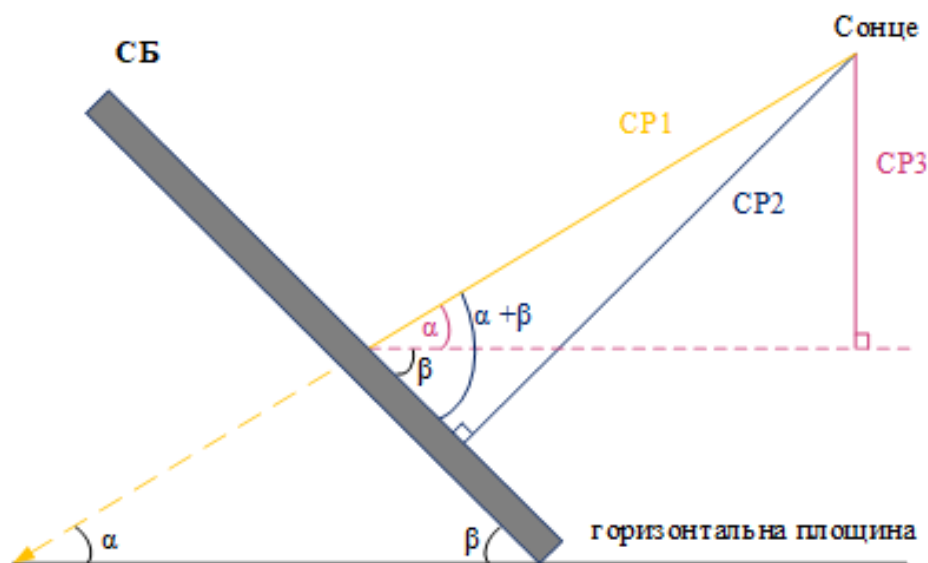


Рисунок 2.4 – Кут нахилу сонячного модуля, де СР – сонячна радіація

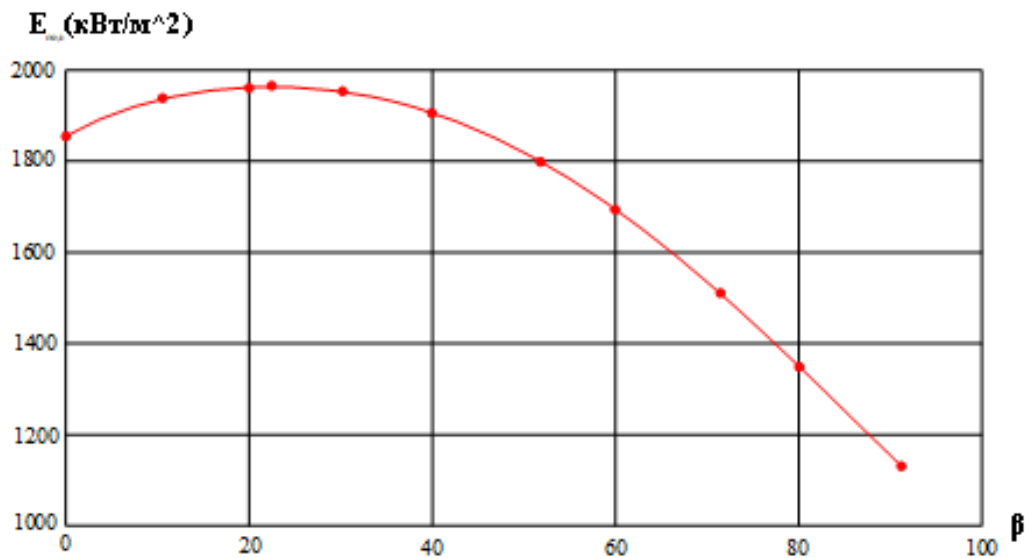


Рисунок 2.5 – Сумарна річна енергія сонячної радіації в рік в залежності від кута нахилу

2.4 Конструктивне рішення та параметри напруги для автономної фотоелектричної системи

Через складність і масивність систем із автоматичним відстеженням положення Сонця (що потребують спеціального електроприводу), у цьому проєкті обрано стаціонарне розміщення сонячних панелей (СБ) на даху будинку під оптимальним кутом нахилу $\beta = 40^\circ$. Сонячна батарея підключається паралельно до акумуляторної батареї (АБ), яка слугує для накопичення енергії.

Для забезпечення споживачів стандартною змінною напругою 220 В, частотою 50 Гц, між АБ та споживачем встановлюється стабілізований перетворювач напруги (інвертор) із синусоїдальною формою вихідної напруги. У нічний час інвертор отримує живлення від АБ, яка заряджається протягом світлового дня.

При виборі робочої напруги СБ та АБ враховуються такі фактори:

1. Безпека експлуатації: підвищення робочої напруги знижує загальну безпеку як СБ, так і АБ.
2. Надійність системи: у схемах із високою напругою (220 В) надійність суттєво зменшується.
3. Складність балансування: акумуляторні батареї з високою напругою вимагають складної системи балансування між елементами для запобігання збоїв у роботі.
4. Технічна зрілість: найбільш надійними й перевіреними є свинцево-кислотні автомобільні акумулятори герметичного типу (з абсорбованим електролітом або гелеві), що працюють у діапазоні 10–14 В.

Остаточний вибір оптимальної робочої напруги для АБ і СБ буде зроблено після додаткового аналізу та моделювання різних варіантів схем перетворювачів у діапазоні 10–220 В з синусоїдальним вихідним сигналом.

Характеристика базової конфігурації автономної сонячної електростанції наведена в Додатку Г. Вибрано структуру ФЕУ з найбільш простою схемою захисту та управління АБ без перетворювача, що підвищує напругу, між СБ і АБ. Незважаючи на оптимальний кут нахилу СБ на надходження сонячної радіації на рік і забезпечує захист від злив.

Показано можливість створення ФЕУ без перетворювача напруги між СБ та АБ. На основі статистичного аналізу обрано гелеву АБ із 7 типів АБ за критерієм: відсутність обслуговування, максимальна енергетична щільність до 180 Вт/кг. Вибрано спосіб захисту АБ від перенапруги закорочення СБ.

РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПЛОЩІ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ ТА ЄМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

3.1 Вибір типу сонячної батареї

На основі аналізу наявних публікацій було сформовано розширені матричні (табличні) характеристики сонячних батарей (СБ), що дають змогу аргументовано обрати їх тип на основі статистичного аналізу. Фотоелектричні перетворювачі умовно поділяються на дві основні групи: перша — кристалічні сонячні батареї, друга — тонкоплівкові. Технологічний процес виготовлення структур із монокристалічного кремнію є досить складним і дорогим, тому значний інтерес викликають альтернативні матеріали, такі як сплави на основі аморфного кремнію ($a\text{-Si:H}$), арсенід галію та полікристалічні напівпровідники.

Тонкоплівкові сонячні елементи (СЕ) складаються з декількох тонких шарів фотоактивних матеріалів, товщина яких варіюється від кількох нанометрів до десятків мікрометрів. Існують різні типи таких елементів, зокрема на основі:

1. кремнію (TF-Si);
2. телуриду кадмію (CdTe).

На рисунку 3.1, у таблиці 3.1 та на рисунку 3.2 вперше представлено вольт-амперні характеристики (ВАХ) різних типів сонячних елементів у єдиному масштабі для порівняння.

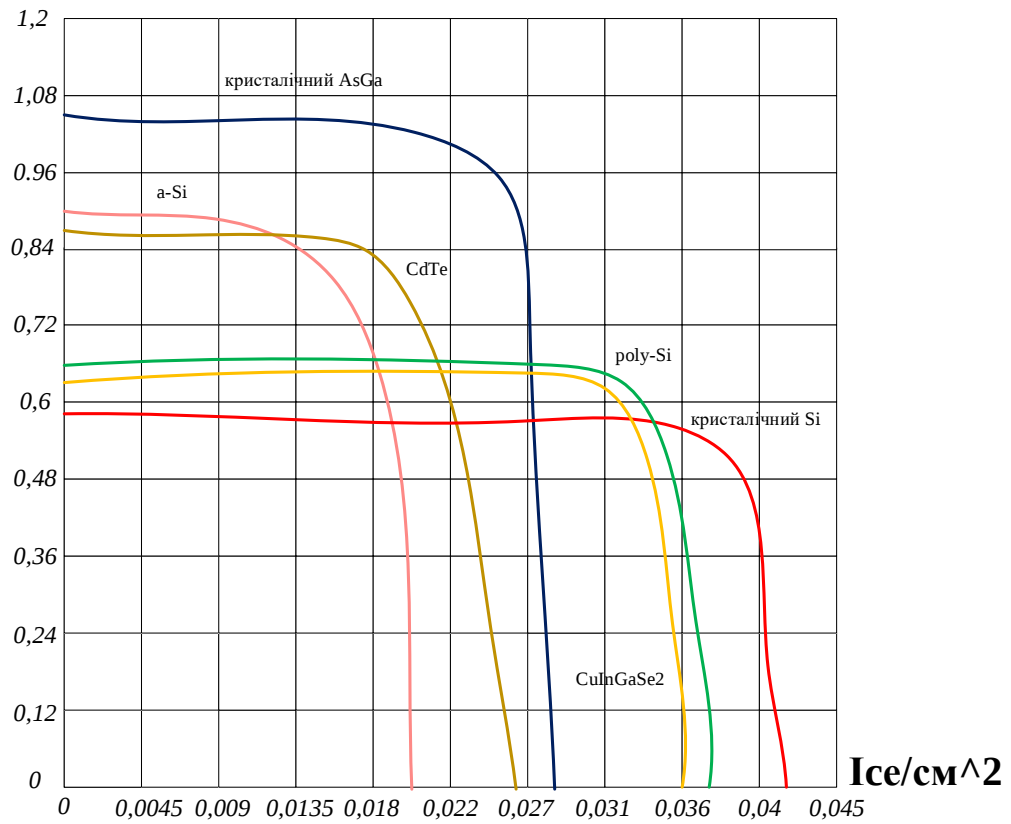
U_{ce} (В)

Рисунок 3.1 – ВАХ для різнотипних сонячних батарей

Таблиця 3.1 – ВАХ для різнотипних сонячних батарей

Тип СБ	$I_{кз}$	$U_{хх}$	$I_{опт}$	$U_{опт}$	$P_{макс}$	ξ	η
C-Si	42,2	0,672	40,4	0,59	23,85	0,842	24
AsGa	28,2	1,034	27,422	0,942	25,826	0,886	26
Poly-Si	38,1	0,644	36,409	0,564	20,54	0,837	20,5
a-Si	19,4	0,723	18,619	0,64	11,916	0,85	11,9
CuInGaSe2	35,7	0,66	34,120	0,58	19,791	0,84	19
CdTe	25,9	0,726	24,882	0,643	15,995	0,851	16

У табл. 3.1: $I_{кз}$ – питомий струм короткого замикання, $U_{хх}$ – напруга холостого ходу, $I_{опт}$ – питомий оптимальний струм, $U_{опт}$ – оптимальна напруга, P_{max} – питома максимальна потужність, ζ – коефіцієнт заповнення, η – ККД в точці максимальної потужності.

$I_{кз}$ (мА/см²)

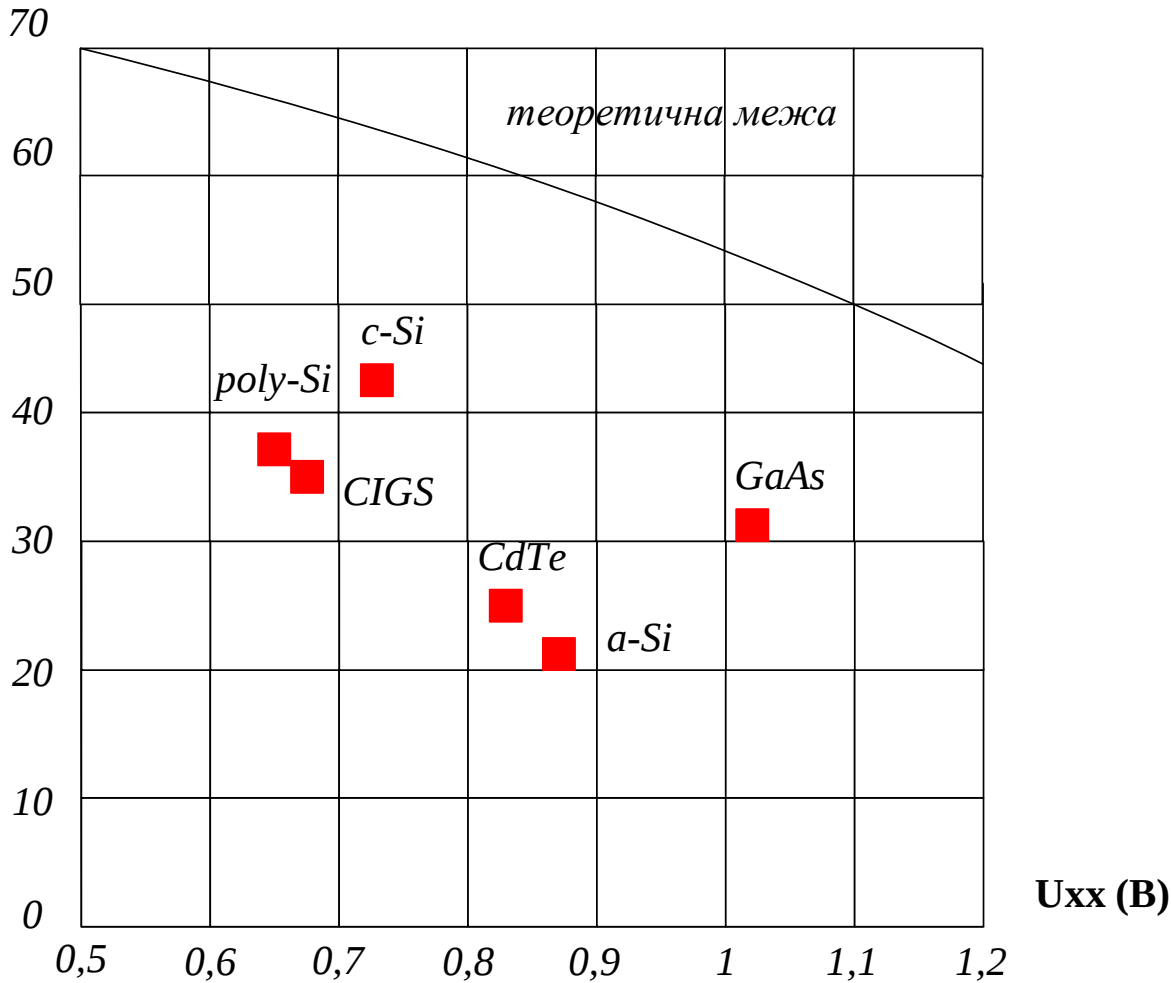


Рисунок 3.2 – Графік граничної питомої сили струму КЗ для різних типів сонячних елементів

На основі даних таблиці 3.1 видно, що найвищий коефіцієнт корисної дії (ККД) демонструють два типи сонячних батарей (СБ): на основі кристалічного кремнію (C-Si) та арсеніду галію (AsGa). Оскільки СБ типу AsGa значно дорожчі й виготовляються під індивідуальні замовлення, для проєктованої

автономної фотоелектричної установки (ФЕУ) було обрано більш доступний і масово застосовуваний варіант — батареї на основі кристалічного кремнію (С-Si).

Важливим показником ефективності сонячної батареї є коефіцієнт заповнення (fill factor, FF), що визначається як відношення максимальної вихідної потужності до добутку струму короткого замикання на напругу холостого ходу сонячного елемента (СЕ). Цей параметр дозволяє оцінити якість роботи СБ. Для більшості комерційних панелей коефіцієнт заповнення становить понад 0,70. Панелі нижчого класу (категорії В) зазвичай мають коефіцієнт у межах 0,4–0,7. Високий коефіцієнт заповнення свідчить про менші втрати, пов'язані з внутрішніми послідовними та паралельними опорами.

На рисунку 3.3 наведено залежність вихідного струму та потужності сонячного елемента від напруги. Характеристика потужності СЕ ($P = I_{CE} \cdot U_{CE}$), побудована при зміні вихідної напруги від напруги холостого ходу (U_{XX}) до нуля, демонструє наявність єдиної точки С, у якій досягається максимальна вихідна потужність ($\max P$). Ця точка є оптимальною робочою точкою ВАХ сонячного елемента, а відповідні значення напруги та струму в ній називають оптимальною напругою (U_{OPT}) та оптимальним струмом (I_{OPT}). При проектуванні автономної ФЕУ прагнуть забезпечити роботу сонячної батареї саме в цій оптимальній точці для досягнення максимальної ефективності.

$$\xi = \frac{I_{OPT} \cdot U_{OPT}}{I_{K3} \cdot U_{XX}} = \frac{\text{площа}(A)}{\text{площа}(B)} = K_i \cdot K_u, \quad (3.1)$$

$$\text{де } K_i = \frac{I_{OPT}}{I_{K3}}, \quad K_u = \frac{U_{OPT}}{U_{K3}}.$$

Для AsGa СБ відносно значення оптимального струму і напруги коефіцієнту заповнення $\zeta = 0,75 \div 0,89$.

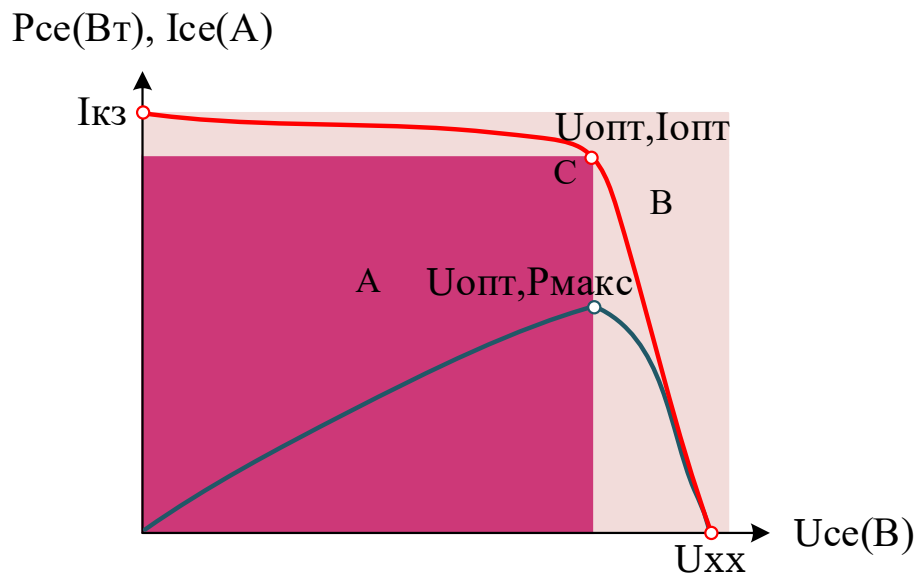


Рисунок 3.3 – ВАХ і потужність сонячного елемента

Для вибраних сонячних батарей на основі кристалічного кремнію (C-Si) коефіцієнт заповнення становить у межах 0,8–0,84, що враховується при подальших розрахунках. Коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного елемента визначається як відношення вихідної електричної потужності до потужності сонячного випромінювання, яке падає на поверхню елемента. Значення ККД залежить від спектрального складу, інтенсивності сонячної радіації та температури самого сонячного елемента.

Для коректного порівняння характеристик різних сонячних елементів випробування проводяться за стандартних умов. Наземні сонячні елементи тестують при атмосферній масі AM1.5 та температурі 25 °C, що відповідає умовам середніх широт при куті підйому Сонця близько 41°49'. Для сонячних елементів, призначених для використання в космічному просторі, застосовують умови AM0, що відповідають ситуації за межами атмосфери Землі.

Зазвичай енергетичні параметри сонячних батарей визначаються за умовами номінального освітлення (21000 мВт/см²). При цьому ККД готової

сонячної панелі, як правило, на 1–3% нижчий порівняно з ККД окремого сонячного елемента. Це пояснюється додатковими втратами, зокрема відбиттям світла склом і рамкою, затіненням, підвищенням робочої температури та іншими конструктивними особливостями.

$$ККД(\%) = \frac{U_{xx} \cdot I_{кз} \cdot \xi}{P_c}. \quad (3.2)$$

Для різних типів СБ ККД приведений в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти корисної дії для різних типів СБ

Тип СБ	Коефіцієнт корисної дії
Кремнієві	
Si (кристалічний)	24,7
Si (полікристалічний)	20,3
Si (тонкоплівкова передача)	16,6
Si (тонкоплівковий субмодуль)	10,4
Арсенід-галієві	
GaAs (кристалічні)	25,1
GaAs (тонкоплівкові)	24,5
GaAs (полікристалічні)	18,2
Тонкі плівки халькогенідів	
GIGS (фотоелемент)	19,9
Тип СБ	Коефіцієнт корисної дії
Тонкі плівки халькогенідів	
GIGS (фотоелемент)	19,9
GIGS (субмодуль)	16,6
GdTe (фотоелемент)	16,5
Амфорний/Нанокристалічний кремній	
Si (амфорний)	9,5
Si (нанокристалічний)	10,1
Фотохімічні	
На базі органічних красителів	10,4

На базі органічних (субмодуль)	7,9
Органічні	
Органічний полімер	5,15
Багатошарові	
GaInP/GaAs/Ge	32
GaInP/GaAs	30,3
GaAs/CIS (тонкоплівковий)	25,8
a-Si/mc-Si (тонкий субмодуль)	11,7

Різноманітність розроблених типів СБ дозволяє вибирати СБ найбільше, що підходить за такими умовами: вартість, термін служби, ККД, доступність.

3.2 Вплив температури оточуючого середовища на характеристики сонячної батареї

Основною особливістю РБ при робочому режимі є сильна залежність електричної потужності від зовнішніх умов, температури та інтенсивності фотоструму ІФ. Струм ІСЕ СЕ лінійно залежить від інтенсивності світлового потоку,

$$I_{ce} = I_{\phi} - I_{\delta} \left(e^{\frac{qU_{ce}}{kT}} - 1 \right), \quad (3.3)$$

де;

I_{ϕ} - світловий струм;

I_{δ} - струм насичення;

q – заряд електрона;

k – постійна Больцмана ($k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$);

T – абсолютна температура, °K.

Відповідно до [14] напруга СЕ U_{ce} при кімнатній температурі $T = 293^{\circ}\text{K}$ зростає за логарифмічним законом зі збільшенням інтенсивності фотоструму I_{ϕ} . Вольт-амперну характеристику СБ можна побудувати із формули (3.3)

$$U_{ce} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{\phi} - I_{ce}}{I_{\delta}} \right) + 1, \quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) показує, що напруга СЕ залежить від фотоструму, струму насичення та температури. Струм насичення I_{δ} залежить від носіїв заряду рекомбінації в СЕ. Для високоякісного кристалічного СЕ на основі кремнію напруга холостого ходу U_{xx} досягає 730 мВ, а для типового комерційного СЕ на основі кремнію полікристалічного в мультипрозорому корпусі типово значення 600 мВ. Напруга холостого ходу використовується нижче при створенні моделі СЕ. Представимо фотострум СБ I_{ϕ} в залежності від температури та освітленості наступним чином:

$$I_{\phi} = (I_{\phi n} + K_i \cdot \Delta T) \frac{G}{G_n}, \quad (3.5)$$

де $\Delta T = T - T_n$, T – поточна температура, T_n – номінальна температура 25°C, K_i – температурний коефіцієнт струму, G – поточне освітлення від Сонця. G_n – номінальне освітлення, $I_{\phi n}$ – номінальний фотострум при температурі 25 °C і при G_n .

Розраховуємо діодний струм СБ I_{δ} в залежності від температури:

$$I_{\delta} = I_{\delta n} \cdot \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q \cdot \Delta W}{a \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (3.6)$$

де $\Delta W = 1,2eV$ – енергія, що відповідає ширині забороненої зони, a – параметр, що забезпечує узгодження з реальними характеристиками СБ і дорівнює 1.3; $I_{\delta n}$ – номінальний діодний струм:

$$I_{\partial H} = \frac{I_{\kappa\lambda CBH}}{\exp\left(\frac{U_{\chi\chi CBH}}{aV_{th}}\right) - 1}. \quad (3.7)$$

У формулі 3.7 позначено: $U_{\chi\chi CBH}$ - напруга холостого ходу за стандартних умов (при $1000 \frac{Bm}{M^2}$ і $25^\circ C$), температурний потенціал

$V_{th} = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q}$. У якому параметри K , T і q позначені вище, а N_s - кількість послідовно з'єднаних СЕ модуль.

Напруга холостого ходу кремнієвого елемента лінійно залежить від температури:

$$\Delta U_{\chi\chi} / \Delta T = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ В} / C^\circ. \quad (3.8)$$

Це відповідає зменшенню напруги холостого ходу на 0,5 % зі збільшенням температури на $1^\circ C$. Струм короткого замикання $I_{\kappa\lambda}$ кремнієвого елемента менше залежить від температури, він зростає на $(1,5 \div 3) 10^{-5}$ А при збільшенні температури на $1^\circ C$, тому залежність вихідної потужності від температури переважно визначається залежністю напруги $U_{\chi\chi}$ від температури.

Температурні коефіцієнти струму $K_i = \left(\frac{dI_{\kappa\lambda}}{dT} \right)$ та напруги холостого ходу $K_u = \left(\frac{dU_{\chi\chi}}{dT} \right)$ залежать від багатьох факторів, наприклад, від матеріалу, з якого виготовлений елемент СБ, від конструкції сонячного елемента та технології виготовлення. Усереднені значення температурних коефіцієнтів наступні:

для Si елементів

$$\begin{aligned} (dU_{xx} / dT) / U_{xx}(60^{\circ}C) &= -0,005 / ^{\circ}C; \\ (dI_{кз} / dT) / I_{кз}(60^{\circ}C) &= 0,001 - 0,002 / ^{\circ}C; \end{aligned} \quad (3.9)$$

для AsGa елементів

$$\begin{aligned} (dU_{xx} / dT) / U_{xx}(75^{\circ}C) &= -0,0019 / ^{\circ}C; \\ (dI_{кз} / dT) / I_{кз}(60^{\circ}C) &= 0,0016 / ^{\circ}C; \end{aligned} \quad (3.10)$$

На рис. 3.4 та табл. 3.3 представлені ВАХ для двох типів СБ (С-Si, AsGa) залежно від температури навколишнього середовища відповідно до рівнянь (3.9 і 3.10).

Побудовані ВАХ за різних температур від $-60^{\circ}C$ до $+60^{\circ}C$. Для елементів Si вплив температури сильніше позначається на напрузі холостого ходу U_{xx} , ніж на струмі $I_{кз}$; для елементів GaAs температурні коефіцієнти приблизно рівні. Насправді часто використовується таке вираз:

$$U_{xx, \text{модуль}} = K_i \left(\frac{B}{^{\circ}C} \right) \cdot [T_n(^{\circ}C) - T(^{\circ}C)] + U_{xxCBn}(B), \quad (3.11)$$

де $U_{xx, \text{модуль}}$ - напруга холостого ходу за даної температури.

U_{сб} (В)

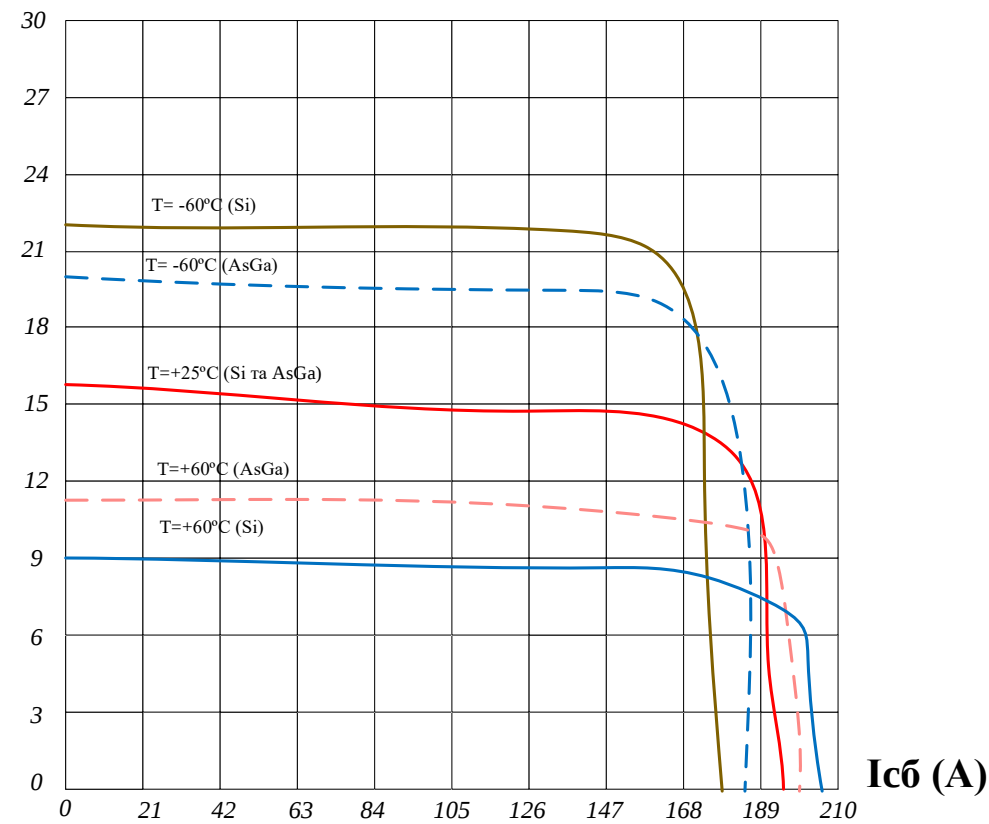


Рисунок 3.4 – Вплив температури на ВАХ СБ

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку параметрів СБ при зміні температури навколишнього середовища

Тип СБ	Температура СБ, T _{сб} (°C)	Напруга холостого ходу, U _{хх} (В)	Струм короткого замикання, І _{кз} (А)	Напруга в точці максимальної потужності, U _{опт} (В)	Струм в точці максимальної потужності, І _{опт} (А)	Потужність в точці U _{опт} і І _{опт} , Р _{сб.макс}
Si	-60	22,2	184,6	19,3	175,4	3,39
AsGa	-60	19,9	189,2	17,6	172,1	3,03
Si	25	15,4	193,5	13,5	183,8	2,47
AsGa	25	15,4	193,5	13,5	183,8	2,47
Si	60	8,72	202,2	7,58	192,1	1,46
AsGa	60	10,9	198,7	9,64	180,8	1,73

При зміні температури від +60°C до -60°C напруга C-Si СБ збільшується в 2,54 рази, що призводить до збільшення потужності в 1,75 - 2,3 рази. Це є

підставою для ширшого використання ФЕУ у гірських районах М'янми. Розрахунок ВАХ СБ може бути проведений за формулами (3.4 ÷ 3.11).

3.3 Моделювання сонячної батареї в програмі Simulink і в розділі SimPowerSystem

Запропоновано універсальну модель сонячної батареї, сумісну з розділом SimPowerSystems у програмі Matlab, що дозволяє моделювати систему електропостачання з урахуванням зміни сонячної радіації, температури навколишнього середовища. Особливість моделі - вольт-амперна характеристика СБ проходить за трьома точками: напруга холостого ходу, струм короткого замикання, точка максимальної потужності СБ. Модель СБ складається з джерела струму PV1 (рис. 3.5), рівного струму короткого замикання СБ, джерела напруги U , резистора r і діода VD , значення яких розраховані з наведених нижче рівнянь. Для моделі СБ з близькою до реальної вольт-амперної характеристики розрахуємо значення її параметрів (рис. 3.5):

На холостому ходу:

$$U_{xx} = U + U_{VD} + I_{K3} \cdot r. \quad (3.12)$$

В точці максимальної потужності:

$$(I_{K3} - I_{om}) \cdot r + U_{VD} + U = U_{om}. \quad (3.13)$$

З рівнянь (3.12 та 3.13) розраховуємо невідомі параметри U та r :

$$U = U_{xx} \frac{(K_i + K_u - 1)}{K_i} - U_{VD}, \quad (3.14)$$

$$r = \frac{U_{xx}}{I_{K3}} \left(\frac{1 - K_u}{K_i} \right). \quad (3.15)$$

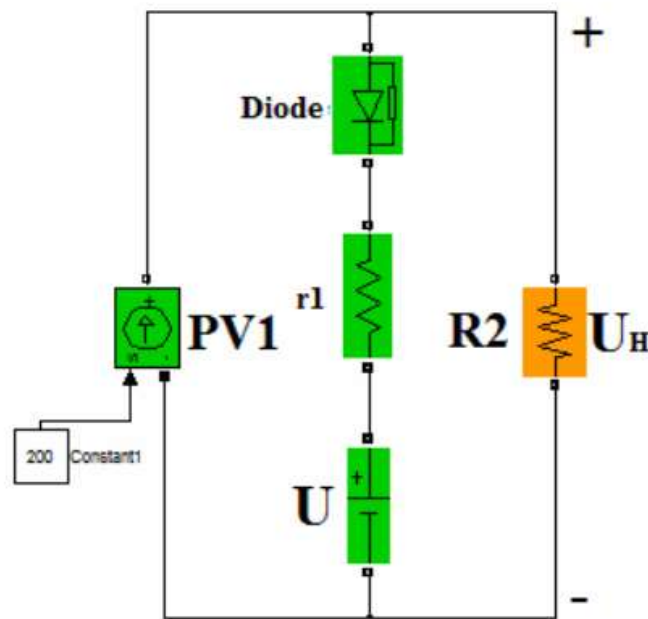


Рисунок 3.5 – Модель СБ

Використані раніше невідомі моделі СБ, адаптовані до розділу SimPowerSystem, що дозволяють досліджувати роботу паралельно з іншими джерелами енергії (рис. 3.5). При моделюванні СБ, напруга та струм у точці максимальної потужності відповідають реальній вольт-амперній характеристиці.

Напруга навантаження U_n - напруга на опір R_2 , значення напруги джерела U менше U_n . Спеціально розроблений показаний на рис. 3.6 блок (PV solar cell3), який при моделюванні дає точну ВАХ СБ (рис. 3.10).

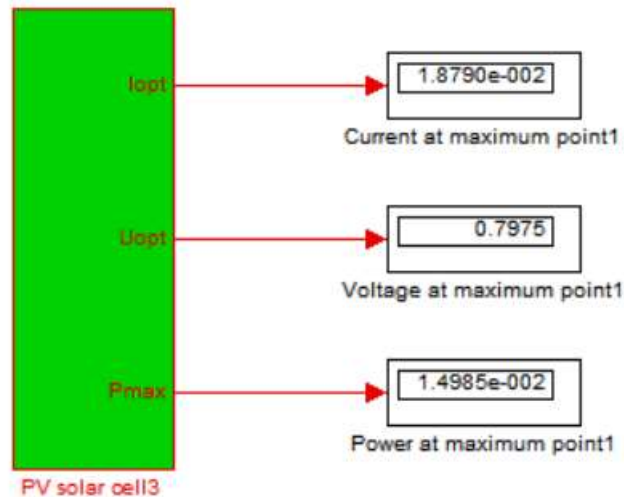


Рисунок 3.6 – Триточкова модель СБ

Особливість моделі – можна моделювати не лише сонячний елемент, а й сонячний модуль, знаючи струм короткого замикання та напругу холостого ходу. При моделюванні використовують ВАХ з відповідним значенням струму та напруги (рис.3.7).

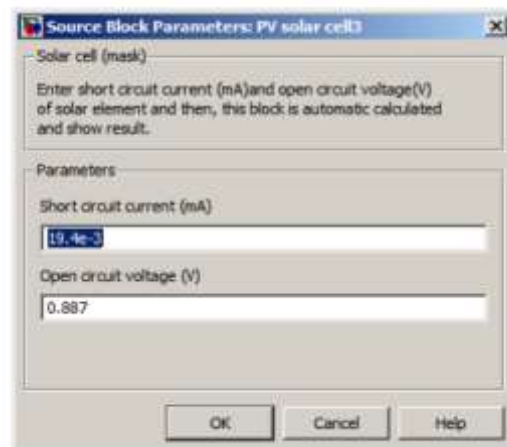


Рисунок 3.7 – ВАХ СБ

Ця модель призначена для моделювання СЕ відповідно до рівняння (3.4). Щоб створити модель СЕ, спочатку треба написати математичні рівняння М-file, згідно з рівняннями (3.2, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.11). Створення М-file показано

у додатку П.7. Після цього можна створити блок (PV solar cell3). Для створення моделі вибирається блок Subsystem у розділі Simulink \ Ports & Subsystems, потім треба натиснути праву кнопку і вибрати функцію Mask Subsystem (рис. 3.8). Коли готовий M-file (розрахунок як тексту), треба його копіювати і ввести текст з M-file у полі Initialization commands, як показано на рис. 3.8.

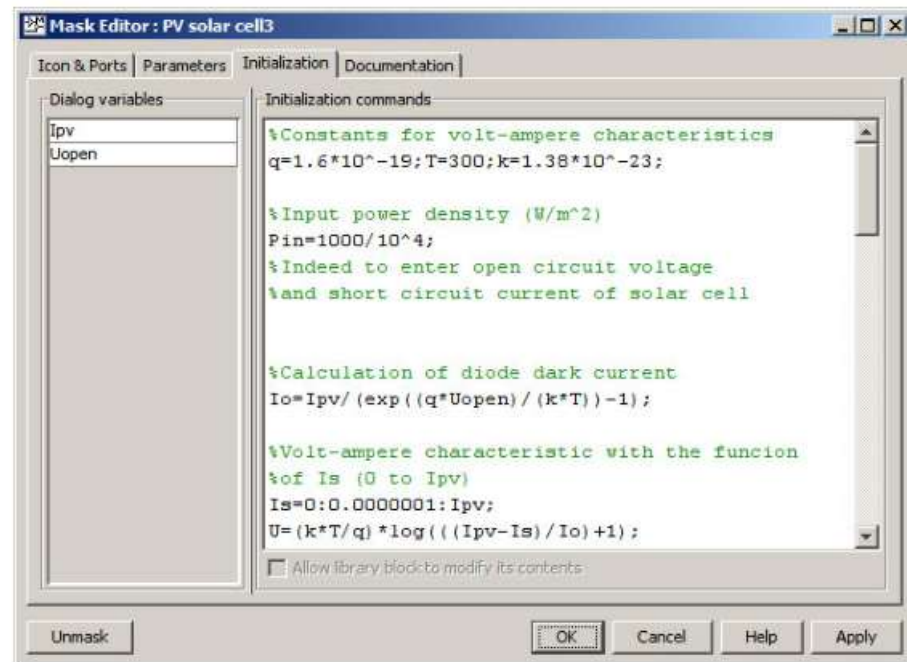


Рисунок 3.8 – Вікно параметрів блоку Subsystem\Initialization

Щоб зробити потрібні параметри змінними, можна вибрати поле Parameters U_{xx} і I_{k3} як показано на рис. 3.9.

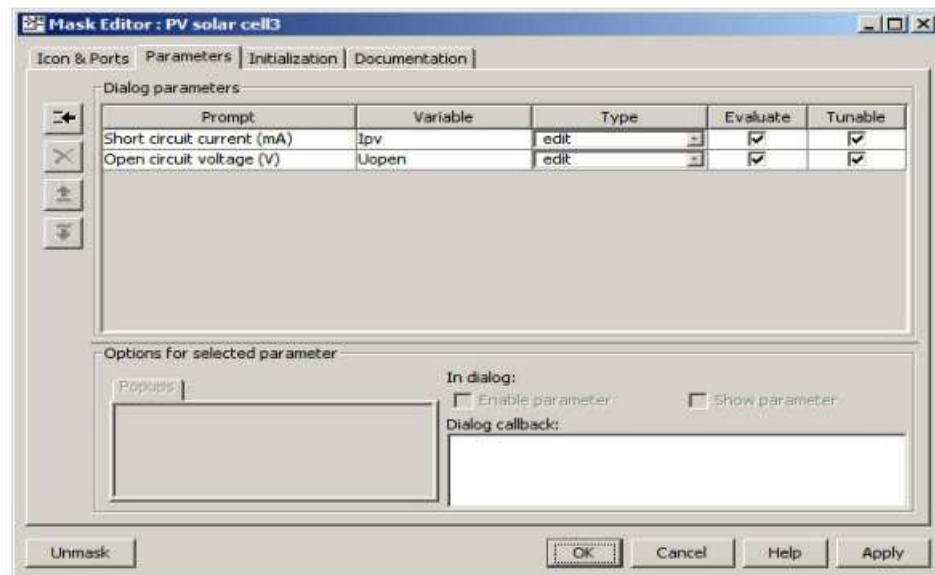


Рисунок 3.9 – Вікно параметрів Subsystem\Parameters

Щоб запрацював блок (PV solar cell 3) розділ SimPowerSystem, його треба з'єднати з іншими керованими джерелами, як показано на рис. 3.11. Моделювання сонячного модуля показано на рис.3.12. Результати моделювання СЕ показано на рис. 3.10. Інші параметри, наприклад, коефіцієнт заповнення ζ (КЗ) (%), коефіцієнт корисної дії (ККД), температурний коефіцієнт напруги і струму можна побачити в робочому полі Matlab в такому вигляді:

```
Current coefficient Ki: 0.96857
Voltage coefficient Ku: 0.89907
The value of FF: 0.87081
Efficiency(1000(W/m^2)): 14.9847
By algorithm U3: 0.69457
By algorithm r3: 4.7646
By algorithm Uvd: 0.1
Pmax(W): 0.014985
Uopt(V): 0.79747
Iopt(A): 0.01879
```

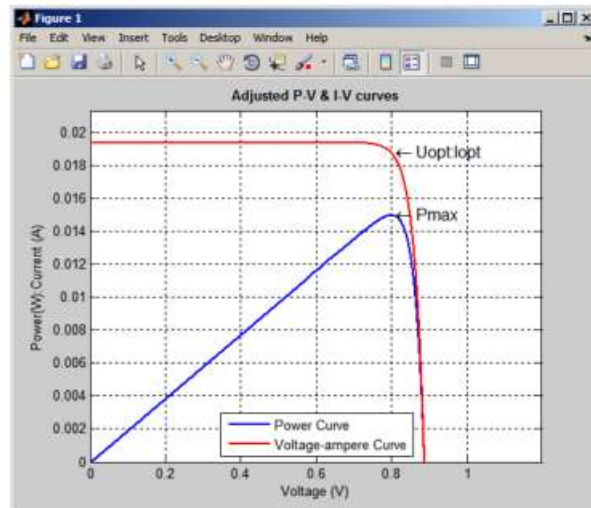


Рисунок 3.10 – Вікно параметрів ВАХ СБ

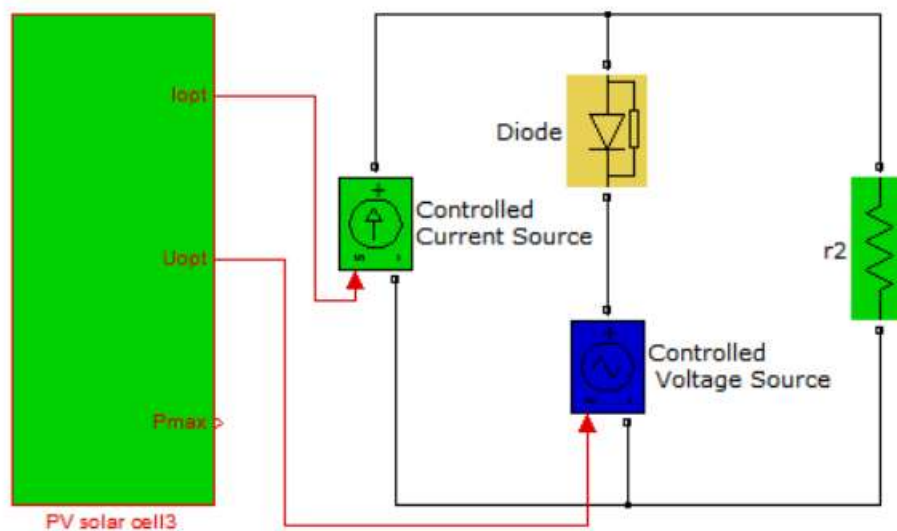


Рисунок 3.11 – Схема включення «PV Solar cell3» в SimPowerSystem

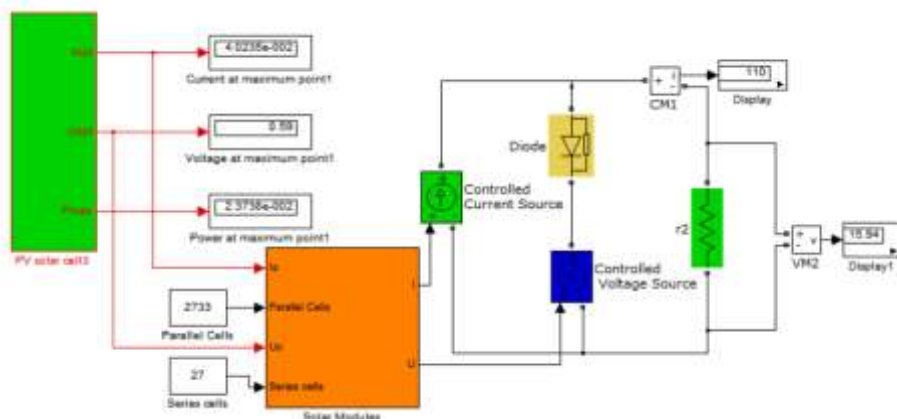


Рисунок 3.12 – Включення сонячного модуля «PV Solar cell3» в SimPowerSystem

ВАХ СЕ (рис. 3.5) позначена пунктиром на рис. 3.13, а суцільною лінією тут же позначена ВАХ СЕ (рис. 3.11).

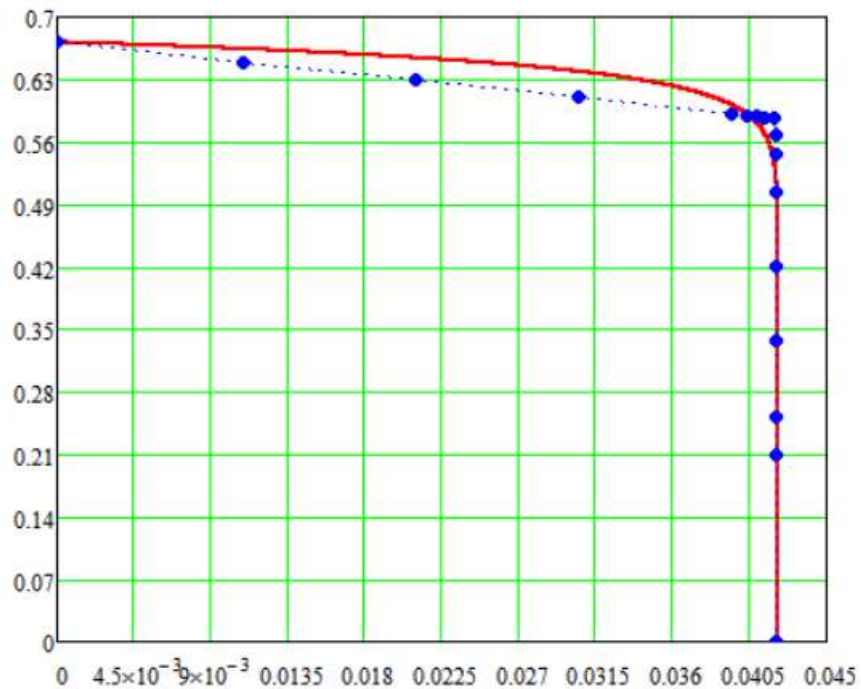


Рисунок 3.13 – ВАХ по рис. 3.5 та 3.11

Створено модель ФЕУ, адаптовану до експлуатації. У розділі SimPowerSystem не було готової моделі СЕ. Ця модель (рис. 3.11) створена для отримання ВАХ автоматично з більш точними результатами, порівняно з рис. 3.5 та легко з'єднується з іншими елементами SimPowerSystem. Рекомендується у перспективі використовувати модель СБ (рис. 3.11) на дослідження ФЕУ.

3.4 Баланс енергії фотоелектричної установки

Баланс енергії проведено для добового споживання згідно з табл. 2.1 та 2.2. СБ починає заряджати АБ, коли освітленість зростає і $U_{\text{ххСБ}}$ стає більше $U_{\text{АБ min}}$. У процесі заряду АБ робоча точка (рис. 3.14) переміщається з точки 2 до точки 1.

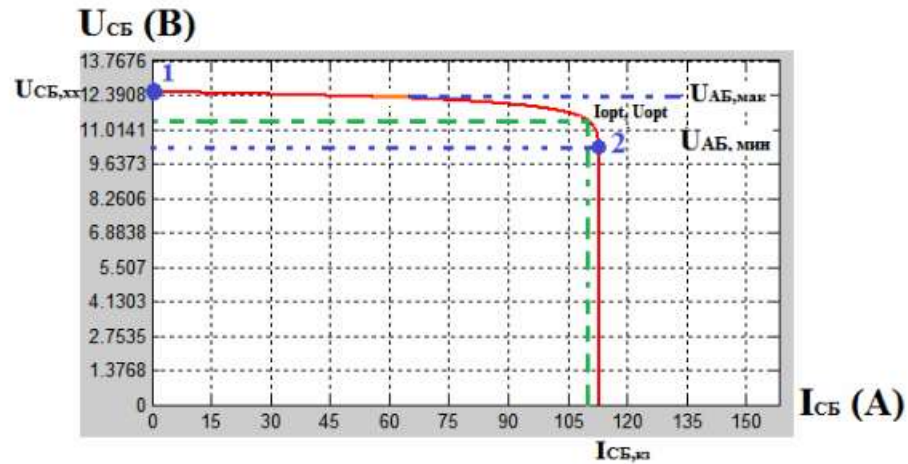


Рисунок 3.14 – Узгодження характеристик СБ і АБ

При цьому зарядний струм АБ зменшується від значення $I_{кз}$ до оптимального значення $I_{опт}$ і далі зменшується до нуля точка 1 $U_{ххСБ} = U_{СБмакс}$. У цьому проекті ФЕУ працює з обмеженням напруги АБ. При розрядній напрузі АБ, $U_{AB} = 12V$ середній розрядний струм АБ $I_{сер.раз.ніч}$ (А) дорівнює:

$$I_{сер.раз.ніч} = \frac{P_{сер.ніч}}{U_{AB}} = \frac{0,3кВт}{12V} = 25A. \quad (3.16)$$

Середній розрядний струм на навантаження днем (рис. 3.15) $I_{сер.раз.день}$:

$$I_{сер.раз.день} = \frac{P_{сер.день}}{U_{AB}} = \frac{0,6кВт}{12V} = 50A. \quad (3.17)$$

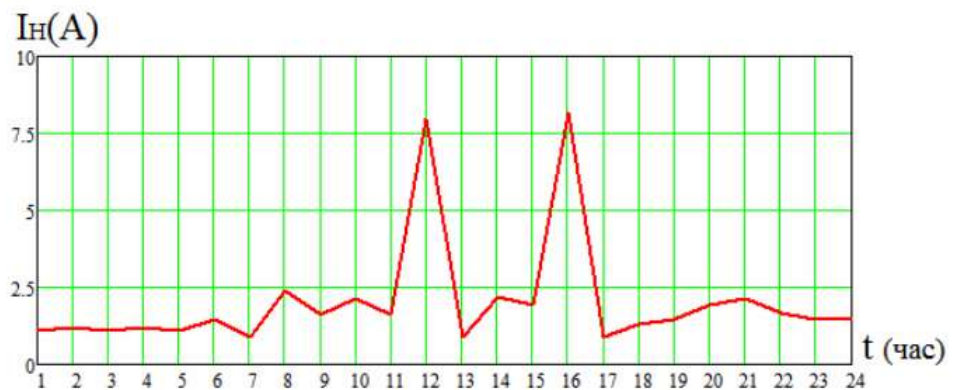


Рисунок 3.15 – Циклограма струму навантаження

ККД для свинцевих АБ $\eta_{розряд} = 0,85$. Розрядна ємність АБ для нічної експозиції $Q_{AB,раз.ніч}$ ($A \cdot год$) з урахуванням ККД розряду та $T_{ніч} = T_{день} = 12$ годин:

$$Q_{AB,раз.ніч} = \frac{I_{сер.раз.ніч} \cdot T_{ніч}}{\eta_{розряд}} = \frac{25A \cdot 12 год}{0,85} = 352,94 (A \cdot год). \quad (3.18)$$

Розрядна ємність АБ на навантаження днем $Q_{AB,раз.день}$ ($A \cdot год$):

$$Q_{AB,раз.день} = I_{сер.раз.день} \cdot T_{день} = 50A \cdot год = 600 (A \cdot год). \quad (3.19)$$

Сумарний заряд, що віддається СБ днем на заряд АБ та живлення навантаження $\sum Q_{CB}$ ($A \cdot год$):

$$\sum Q_{CB} = Q_{AB,раз.ніч} + Q_{AB,раз.день} = 353A \cdot год + 600A \cdot год = 953(A \cdot год). \quad (3.20)$$

Середнє значення струму СБ $I_{срСБ}$ (А):

$$I_{срСБ} = \frac{\sum Q_{CB}}{T_{день}} = \frac{953A \cdot год}{12 год} = 79(A). \quad (3.21)$$

Максимальне значення струму СБ, що віддається, визначає габарити батареї. Для неорієнтованих СБ середнє значення струму змінюється по синусоїдальному закону:

$$I_{срСБ} = \frac{2}{\pi} I_{максСБ} = 0,64 I_{максСБ} (A). \quad (3.22)$$

З рівняння (3.22) визначаємо максимальний струм СБ: при нехтуванні втрат енергії при $U_{CB} \leq U_{AB}$:

$$I_{максСБ} = \frac{I_{срСБ}}{0,64} = \frac{79A}{0,64} = 123(A). \quad (3.23)$$

3.4.1 Розрахунок площі сонячної батареї

Максимальна питома потужність, що віддається СБ з C-Si $P_{CB} \left(\frac{Вт}{м^2} \right)$:

$$P_{CB} = P_c \cdot \eta = 1000 \frac{Вт}{м^2} \cdot 0,24 = 240 \left(\frac{Вт}{м^2} \right). \quad (3.24)$$

Середня питома потужність навантаження $P_{CБC}$ буде дорівнювати:

$$P_{CБC} = P_{CB} \cdot \frac{t_{день}}{t_{день} + t_{ніч}} = 240 \frac{Вт}{м^2} \cdot \frac{12 год}{24 год} = 120 \left(\frac{Вт}{м^2} \right). \quad (3.25)$$

Середня потужність навантаження P_{HC} (Вт) за 24 години:

$$P_{HC} = P_{сер.ніч} + P_{сер.день} = 0,3кВт + 0,6кВт = 0,9(кВт). \quad (3.26)$$

З рівняння середньої потужності навантаження і середньої питомої потужності СБ розрахуємо площу СБ S_{CB} :

$$S_{CB} = \frac{P_{HC}}{P_{CБC}} = \frac{900}{120} \frac{Вт}{Вт / м^2} = 7,5(м^2). \quad (3.27)$$

В таблиці 3.4 приведені результати розрахунків параметрів ФЕУ для 6 типів СЕ з використанням розробленої моделі сонячного модуля (рис. 3.12).

Таблиця 3.4 – Результати уточненого розрахунку площі шести різних типів СБ

Тип СБ	AsGa	C-Si	poly-Si	a-Si	CuInGaS	CdTe
Максимальна потужність СБ	1670,3	1752	1734	1757	1718	1694
Напруга холостого ходу	16,6	18,1	18	18,07	17,82	17,4
Струм короткого замикання	112,9	114,7	115	114,44	114,91	114,42
Напруга в точці максимальної потужності	15,1	15,9	15,7	15,97	15,62	15,4
Струм в точці максимальної потужності	109,9	109,9	110	109,98	110	109,9
Площа сонячного модуля	6,41	8,82	8,45	14,75	8,69	10,60
ККД СБ	26	23,8	20,513	11,914	19,767	15,981
Температурний коефіцієнт струму	0,973	0,958	0,956	0,961	0,957	0,961
Температурний коефіцієнт напруги	0,910	0,878	0,874	0,884	0,876	0,884

Продовження таблиці 3.4 - Результати уточненого розрахунку площі шести різних типів СБ

Тип СБ	AsGa	C-Si	poly-Si	a-Si	CuInGaS	CdTe
Максимальна питома потужність, що віддається СБ	260	230	205,1	119,14	197,67	160
Середня питома потужність СБ	130	115	102,5	60	98,83	80

При розрахунку площі C-Si з моделлю (див. рис. 3.12) було отримано значення $S_{CB} = 8,82 \text{ м}^2$, в 1,02 рази більше площі, що була розрахована на основі енергобалансу (3.27). Це пов'язано з тим, що нами було виконано уточнення розрахунку внутрішніх параметрів СЕ. З 6-ти типів СБ найбільш доступна на ринку СБ з C-Si, яка використовується для котеджів.

3.4.2 Проектування сонячного модуля з ринкових елементів

При проектуванні використовувався сонячний елемент з наступними електричними характеристиками (див. табл. 3.5). Струм короткого замикання сонячного модуля $I_{CB.KЗ}$ розрахуємо через коефіцієнт по струму

$$K_i = \frac{I_p}{I_{KЗ}} = \frac{1,6}{1,9} = 0,842 \quad (\text{табл. 3.5}) \quad \text{з} \quad \text{урахуванням} \quad (3.23):$$

$$I_{CB.KЗ} = \frac{I_{\text{максСБ}}}{K_i} = \frac{123}{0,842} = 146 \text{ А}.$$

Таблиця 3.5 – Електротехнічні характеристики сонячного елементу

Параметр	Значення
Розмір	78x78 мм
Напруга холостого ходу	0,6 В
Напруга робоча	0,47 В
Струм короткого замикання	1,9 А
Струм робочий	1,6 А
ККД	15 %
Параметри вказані для умов	
Параметр	Значення
Освітленість	1000 Вт/м ²
Температура	25 °С
Спектр	АМ 1,5

Напруга холостого ходу сонячного модуля $U_{CB.XX}$ розрахуємо через коефіцієнт по напрузі $K_u = \frac{U_P}{U_{XX}} = \frac{0,47}{0,6} = 0,783$ (табл. 3.5) з урахуванням $U_{CB.OPT} = 12В$:

$$U_{CB.XX} = \frac{U_{CB.OPT}}{K_u} = \frac{12В}{0,783} = 15,32В. \quad (3.28)$$

Розрахуємо кількість послідовно з'єднаних СЕ N_{CE} :

$$N_{CE} = \frac{U_{CB.OPT}}{U_{CE.O}} = \frac{12В}{0,47В} = 25,5 \approx 26. \quad (3.29)$$

Розрахуємо кількість паралельно з'єднаних СЕ M_{CE} з урахуванням (табл. 3.5) $I_P = I_{CE.OPT}$ та $I_{макс.СБ} = I_{CB.OPT}$:

$$M_{CE} = \frac{I_{CB.OPT}}{I_{CE.OPT}} = \frac{123А}{1,6А} = 76,87 \approx 77. \quad (3.30)$$

Сумарна кількість СЕ

$$\sum_{CE} = N_{CE} + M_{CE} = 26 \cdot 77 = 2002. \quad (3.31)$$

Розрахуємо довжину сонячного модуля

$$l_{CB} = M_{CE} \cdot 78\text{мм} = 77 \cdot 78\text{мм} = 6\text{м}. \quad (3.32)$$

Розрахуємо ширину сонячного модуля

$$b_{CB} = N_{CE} \cdot 78\text{мм} = 26 \cdot 78\text{мм} = 2\text{м}. \quad (3.33)$$

Площа сонячного модуля

$$S_{CB} = l_{CB} \cdot b_{CB} = 6\text{м} \cdot 2\text{м} = 12\text{м}^2. \quad (3.34)$$

Збільшення площі СБ з $7,5\text{м}^2$ (3.27) до 12м^2 (3.34) пояснюється використанням ринкової СБ з низьким ККД.

3.5 Розрахунок робочої циклограми ємності акумуляторної батареї

Щоб побудувати циклограму ємності Q_u , спочатку потрібно підрахувати зарядну і розрядну ємності: $+Q_{AB}$ - заряд АБ, $-Q_{AB}$ - розряд (табл. 3.6). Розрахуємо за кожну годину приріст зарядної і розрядної ємності АБ:

$$Q_{AB} = Q_{CB} - Q_H. \quad (3.35)$$

Таблиця 3.6 – Розрахунок зарядної і розрядної ємності АБ

Час	Заряд, що віддається СБ	Заряд, що приймається навантаженням	Зарядні і розрядні ємності АБ	Ємність АБ (фактична)
1	0	20	-20	201
2	0	21,7	-21,7	179
3	0	20	-20	159
4	0	21,7	-21,7	137
5	0	20	-20	117
6	0	27,1	-27,1	90

Продовження таблиці 3.6 – Розрахунок зарядної і розрядної ємності АБ

Час	Заряд, що віддається СБ	Заряд, що приймається навантаженням	Зарядні і розрядні ємності АБ	Ємність АБ (фактична)
7	40,8	16,7	24,1	24
8	61,7	44,2	17,5	42
9	83	29,2	53,8	96
10	105	39,6	65,4	161
11	127	29,2	97,8	259
12	142	146	-4	255
13	131	16,7	114,3	369
14	109	40,4	68,6	438
15	88	35,4	52,6	490
16	64,6	150	-85,4	405
17	42	16,7	25,3	430
18	0	24,2	-24,2	406
19	0	26,7	-26,7	379
20	0	35	-35	344
21	0	39,2	-39,2	305
22	0	30,8	-30,8	274
23	0	26,7	-26,7	248
24	0	26,7	-26,7	221

Розрахуємо цикльовану ємність при мінімальній ємності АБ – 24 А·год і максимальній ємності АБ – 490 А·год (табл. 3.6).

Отримуємо цикльовану ємність $Q_{\text{ц}}$

$$Q_{\text{ц}} = \Delta Q_{\text{АБ}} = Q_{\text{макс}} - Q_{\text{мін}} = 490 - 24 = 466 \approx 470 (\text{А} \cdot \text{год}).$$

Щоб забезпечити тривалий термін служби, звичайні акумулятори AGM повинні мати менше 30% від номінальної ємності АБ, а гелієві батареї дозволяють до 80% циклів заряду-розряду від номінальної потужності. У цьому проекті, щоб збільшити час роботи акумулятора, ми встановлюємо цикл заряду-розряду $Q_{\text{ц}} = 0,5 \cdot Q_{\text{н}} (\text{А} \cdot \text{год})$.

Обчислимо номінальну здатність АБ:

$$Q_n = 2 \cdot Q_u = 2 \cdot 470 = 940 \approx 1000 \text{ А} \cdot \text{год}. \quad (3.36)$$

Розрахована ємність $Q_n = 1000 \text{ А} \cdot \text{год}$ дозволяє збільшити термін служби акумулятора завдяки тому, що така ємність забезпечує до 50% циклів заряду-розряду, що показано на циклограмі ємності АБ (рис. 3.16), хоча за технічними параметрами ці батареї допускають до 80 % циклів заряду-розряду від номінальної ємності.

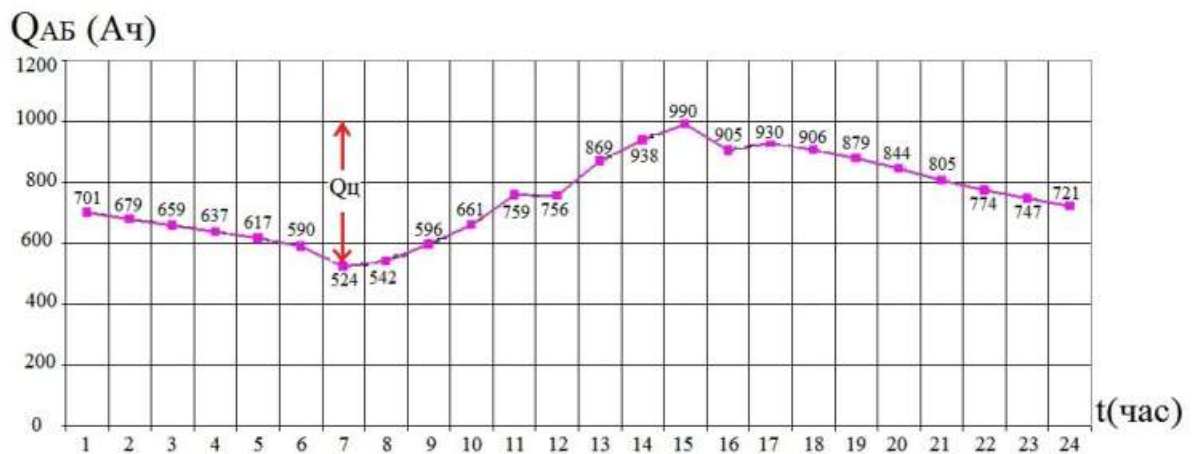


Рисунок 3.16 – Циклограма ємності АБ

Якщо використовується АБ марки DELTA (GX 12-200), у якої номінальна ємність $200 \text{ А} \cdot \text{год}$ і маса 65 кг , кількість паралельно з'єднаних АБ n_{AB} :

$$n_{AB} = \frac{Q_n}{200 \text{ А} \cdot \text{год}} = \frac{1000}{200} = 5.$$

Послідовно з'єднаних АБ немає, так як напруга акумулятора рівна номінальному $U_{AB} = 12 \text{ В}$. Загальна маса АБ: $m_{AB} = N_{AB} \cdot 65 \text{ кг} = 325 \text{ кг}$.

3.5.1 Розрахунок номінальної ємності акумуляторної батареї по її зарядному струму

Зарядну ємність у відповідності з зарядним струмом $I_{зарАБ}$:

$$I_{зарАБ} = 0,1Q_{зарАБ}. \quad (3.37)$$

Виходячи з цього рівняння $Q_{зарАБ} = I_{зарАБ} \cdot 10$, середній зарядний струм АБ за період освітленості (від 6 до 18 години) з табл. 3.6.

$$I_{зарАБ}(\text{середній}) = \frac{Q_{СБ} - Q_n}{T_{день}} = \frac{994 - 615}{12} = 31,6(A).$$

Зарядна ємність $Q_{зарАБ} = I_{зарАБ} (A \cdot год)$:

$$Q_{зарАБ} = I_{зарАБ}(\text{середній}) \cdot 10 = 32 \cdot 10 = 320(A \cdot год). \quad (3.38)$$

Припустимо, що номінальна ємність АБ дорівнює його максимальній ємності. Візьмемо АБ марки DELTA (GX 12-200) див. (П.1), яка має номінальну ємність 200 А·год і масу 65 кг. У цьому випадку кількість паралельно з'єднаних АБ $n_{АБ}$:

$$n_{АБ} = \frac{Q_n}{200 A \cdot год} = \frac{320}{200} = 1,6 \approx 2.$$

Послідовно з'єднаних АБ тут не буде, тому що напруга акумулятора дорівнює номінальному $U_{АБ} = 12B$. Загальна маса АБ $m_{АБ} = N_{АБ} \cdot 65кг = 130кг$.

3.5.2 Розрахунок номінальної ємності акумуляторної батареї по розрядному струму

Розрядний струм відповідно до обраної АБ $I_{розрядАБ}$:

$$I_{розрядАБ}(\text{допустимий}) = 0,1Q_n(\text{вибраної АБ}). \quad (3.39)$$

Візьмемо АБ марки DELTA (GX 12-200), яка має номінальну ємність 200 А·год і масу 65 кг. В даному випадку розрядний струм буде $I_{\text{розрядАБ}} = 20 \text{ А}$. З циклограми навантаження (табл. 3.6) впливає, що максимальний розрядний струм $I_{\text{розрядАБ}}(\text{максимальний}) = 85,4 \text{ А}$.

Кількість паралельно з'єднаних АБ $n_{\text{АБ}}$:

$$n_{\text{АБ}} = \frac{I_{\text{розрядАБ}}(\text{максимальний})_n}{I_{\text{розрядАБ}}} = \frac{85,4}{20} = 4,27 \approx 5.$$

Загальна маса АБ: $m_{\text{АБ}} = N_{\text{АБ}} \cdot 65 \text{ кг} = 325 \text{ кг}$.

Розрахунок зарядної ємності АБ існує у кількох випадках залежно від режиму експлуатації. Відповідно до рівнянь 3.36, 3.38 та 3.39 результати розрахунку параметрів АБ наведені в табл. 3.7: ємність, кількість паралельно об'єднаних АБ, сумарна маса АБ.

Таблиця 3.7 – Результати розрахунку ємності АБ по трьох методах

	Методи розрахунку ємності АБ	Розрахункова ємність АБ	Кількість паралельно з'єднаних АБ	Сумарна маса АБ
1	$Q_{\text{АБ}} = Q_{\text{СБ}} - Q_{\text{Н}}$	1000	5	325
2	$I_{\text{зарАБ}} = 0,1 Q_{\text{зарАБ}}$	320	2	130
3	$I_{\text{розрядАБ}}(\text{допустимий}) = 0,1 Q_{\text{н}}(\text{вибраної АБ})$	1000	5	325

Для забезпечення тривалого терміну служби АБ та скорочення діапазону зміни напруги АБ вибираємо максимальну ємність 1000 А·год, розраховану за рівнянням (3.36), щоб мінімальна глибина розряду ємності АБ. Це з тим, що, зазвичай, що більше максимальна глибина розряду ємності АБ, то менше термін служби АБ. Тому при моделюванні АБ у розділі SimPowerSystem для подальшого проектування ФЕУ з табл. 3.7 вибираємо найгірший варіант розрахунку номінальної ємності АБ $Q_{\text{АБ}} = 1000(\text{А} \cdot \text{год})$, тобто $n_{\text{АБ}} = 5$.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є обов'язковим елементом будь-якого підприємства. Задача охорони праці – звести до мінімуму вірогідність ураження чи захворювання працівника з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

На даному етапі розвитку суспільства питанням охорони праці та навколишнього середовища приділяється велика увага.

Приведені правові норми регламентують організацію роботи в галузі охорони праці на підприємствах (в установах), планування і фінансування заходів щодо охорони праці; визначають структуру служби по охороні праці; передбачають організацію нагляду і контролю за дотриманням правил охорони праці; регламентують порядок розслідування й обліку нещасливих випадків; компенсації матеріального збитку; відповідальності за порушення вимог охорони праці. У сучасних умовах рішення основних задач охорони праці тісно зв'язано з ефективністю діяльності підприємства.

В процесі трудової діяльності на людину впливають шкідливі та небезпечні виробничі фактори. Тому, виникла необхідність у глибокому вивченні біологічної, фізичної і хімічної сутності впливу шкідливих і небезпечних чинників, у прогнозуванні їх виникнення, щоб завчасно на підставі фундаментальних, технічних і медичних наук впроваджувати заходи захисту від них на стадії проектування, конструювання й виробничої експлуатації.

У даному розділі розглянуті питання охорони праці оперативного персоналу з обслуговування сонячних станцій з постійним чергуванням.

Обслуговування електроустановок здійснюється адміністративно-технічним, черговим, ремонтним або оперативно-ремонтним електротехнічним персоналом. У процесі експлуатації електроустановок виробляються роботи, передбачені графіками планово-попереджувального ремонту діючого встаткування, профілактичні випробування ізоляції

електромашин, трансформаторів, кабелів, релейного захисту й автоматики та ін.

На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який обслуговує електрообладнання сонячних станцій, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори, згідно ДСТУ 12.0.003-74:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена та понижена вологість повітря;
- підвищена та понижена іонізація повітря;
- підвищена та понижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- підвищена та понижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та понижена рухливість повітря;
- підвищений рівень статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- недостатня освітленість робочої зони.
- недостатність природного освітлення;
- небезпечний рівень напруги електричного кола, замикання якого може відбутися через тіло людини;

2. Психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпеки при проведенні дослідження.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Організація робочого місця під час дослідження технічного стану обладнання локальних електричних систем має відповідати вимогам НПАОП 0.00-1.28-10.

Приміщення, в якому проводяться дослідження, має площу 27 м², при висоті стелі 3,0 метри. У приміщенні є 2 вікна шириною 2,3 м і висотою 1,5 м і двері шириною 1,5 м. У приміщенні працює 4 особи. Тобто площа на одного працівника складає 6,75 м², що повністю відповідає встановленим нормам. Крім того, передбачається наявність таких побутових приміщень як роздягальня, кімната особистої гігієни, медпункт.

Конструкція робочого місця відповідає сучасним вимогам ергономіки і забезпечує оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури) і документів. Висота робочої поверхні столу становить 750 мм, а ширина - 1300 мм, глибина - 900 мм. Робочий стіл має простір для ніг заввишки 700 мм, завширшки – 950 мм, завглибшки (на рівні колін) 550 мм.

Робоче крісло є підйомно-поворотним, регульованим за висотою, з переднім заокругленим краєм. Висота поверхні сидіння регулюється в межах від 400 до 500 мм, а ширина і глибина становлять по 450 мм. Кут нахилу спинки регулюється в межах від 0° до 30° відносно вертикального положення. Для зниження статичного напруження м'язів верхніх кінцівок встановлені стаціонарні підлокітники завдовжки 250 мм. Поверхня сидіння відповідає усім вимогам.

Зручна робоча поза при роботі з комп'ютером забезпечується регулюванням висоти робочого столу, крісла та підставки для ніг. Рациональною робочою позою може вважатися таке положення, при якому ступні працівника розташовані горизонтально на підлозі або підставці для ніг, стегна зорієнтовані у горизонтальній площині, верхні частини рук - вертикальні.

Монітор комп'ютера розташовується на відстані 700 мм від очей користувача. Клавіатура розташована на поверхні столу на відстані 200 мм від краю, звернутого до працюючого. У конструкції клавіатури передбачений опорний пристрій, який дає змогу змінювати кут нахилу поверхні клавіатури у межах від 5 до 15. Таким чином, ергономічні параметри робочого місця відповідають вимогам до їх організації та конструкції та забезпечують підтримання оптимальної робочої пози під час праці.

Робоче місце розташоване на відстані не менше 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін на відстані 1м. Відносно вікон робоче місце доцільно розташовувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва. В даному випадку, перше робоче місце не відповідає зазначеній вимозі.

Екран дисплея дослідника розташований перпендикулярно до напрямку погляду. При роботі з текстовою інформацією (в режимі введення даних та редагування тексту, читання з екрану) найбільш фізіологічним правильним є зображення чорних знаків на світлому (чорному) фоні.

Періодично досліднику необхідно рухатися, вчасно змінювати положення тіла і робити перерви у роботі. При напруженій роботі за комп'ютером щогодини необхідно робити перерву на 15 хвилин через кожен годину і треба займатися іншою справою. Декілька разів на годину бажано виконувати серію легких вправ для розслаблення.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- увімкнути систему кондиціонування в приміщенні;
- перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі.

Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран - під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз, при цьому екран має бути трохи нахиленим, нижній його край ближче до оператора;

- перевірити загальний стан апаратури, перевірити справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана;

- відрегулювати освітленість робочого місця;

- відрегулювати та зафіксувати висоту крісла, зручний для користувача нахил його спинки;

- приєднати до системного блоку необхідну апаратуру. Усі кабелі, що з'єднують системний блок з іншими пристроями, слід вставляти та виймати при вимкненому комп'ютері;

- ввімкнути апаратуру комп'ютера вимикачами на корпусах в послідовності: монітор, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування);

- відрегулювати яскравість свічення монітора, фокусування, контрастність. Не слід робити зображення надто яскравим, щоб не втомлювати очей.

Оператор під час роботи зобов'язаний:

- виконувати тільки ту роботу, яку йому було доручено;
- підтримувати порядок і чистоту на робочому місці;
- тримати відкритими всі вентиляційні отвори обладнання;
- коректно закрити всі активні завдання у разі припинення роботи з комп'ютером;

- негайно відключити комп'ютером від електричної мережі у разі виникнення аварійної ситуації.

У ході виконання робіт оператор комп'ютера повинен:

- витримувати відстань від очей до екрана комп'ютером в межах 60 - 70см;

- дотримуватися внутрішньозмінного режиму праці та відпочинку, регламентованих перерв у роботі, а саме (при 8-годинній денній робочій зміні):

- для розробників програм - тривалістю 15 хвилин через кожну годину роботи;
- для інших категорій працівників - тривалістю 15 хвилин через кожні дві години роботи;
- для операторів комп'ютерного набору - тривалістю 10 хвилин, після кожної години роботи.

Під час регламентованих перерв рекомендується виконувати комплекси вправ для очей, рук, хребта, поліпшення мозкового кровообігу тощо. Про виявлення несправності обладнання або інших факторів, які створюють загрозу для життя або здоров'я працівників, необхідно негайно інформувати свого безпосереднього керівника.

Не допускається:

- виконання ремонту та налагодження комп'ютерної техніки безпосередньо на робочому місці оператора;
- зберігання біля комп'ютера паперу, дискет, інших носіїв інформації, запасних блоків, деталей тощо, якщо вони не використовуються для поточної роботи;
- відключення захисних пристроїв, самочинні зміни в конструкції комп'ютера;
- використання комп'ютерів, на екранах яких під час роботи з'являються нехарактерні сигнали, нестабільне зображення на екрані тощо;
- доторкання до задньої панелі системного блоку при включеному живленні;
- вимикання живлення під час виконання активного завдання;
- попадання вологи на поверхню системного блоку, монітора, клавіатури, дисководів, принтерів та інших пристроїв;
- приймання напоїв та їжі на робочому місці.

Після закінчення роботи з використанням необхідно дотримуватися такої послідовності вимикання обладнання:

- закрити всі активні завдання;

- переконатися у відсутності дискет та дисків у дисководах;
- використавши опцію "Завершення роботи" у меню "Пуск", вимкнути живлення системного блоку;
- вимкнути живлення всіх комп'ютерів;
- вимкнути блок аварійного живлення (за наявності);
- відключити комп'ютер від електромережі, при цьому забороняється тягнути штепсельну вилку за дріт.

У випадку виникнення аварійної ситуації оператор зобов'язаний:

- у всіх випадках виявлення пошкодження проводів електричного живлення, несправності заземлення та інших пошкодженнях електрообладнання, виникненні запаху гарі, диму - негайно вимкнути електричне живлення і повідомити про аварійну ситуацію свого безпосереднього керівника й чергового електрика;
- при попаданні людини під електричну напругу негайно звільнити її від дії струму шляхом вимкнення електричного живлення, до прибуття лікаря надати потерпілому долікарську медичну допомогу;
- при будь-яких випадках порушень роботи технічного обладнання або програмного забезпечення негайно викликати представника технічної служби з питань експлуатації обчислювальної техніки;
- у випадку виникнення різі в очах, різкого погіршення зору, виникнення головного болю, больових відчуттів у пальцях та кистях рук, посилення серцебиття - негайно припинити роботу з використанням ЕОМ, повідомити про те, що сталося, свого безпосереднього керівника й звернутися до медичної установи;
- при загорянні обладнання негайно відключити його від електромережі;
- про загорання повідомити свого безпосереднього керівника, оперативного чергового, пожежну службу; ужити заходів щодо ліквідації вогню за допомогою вуглекислотного або порошкового вогнегасника.

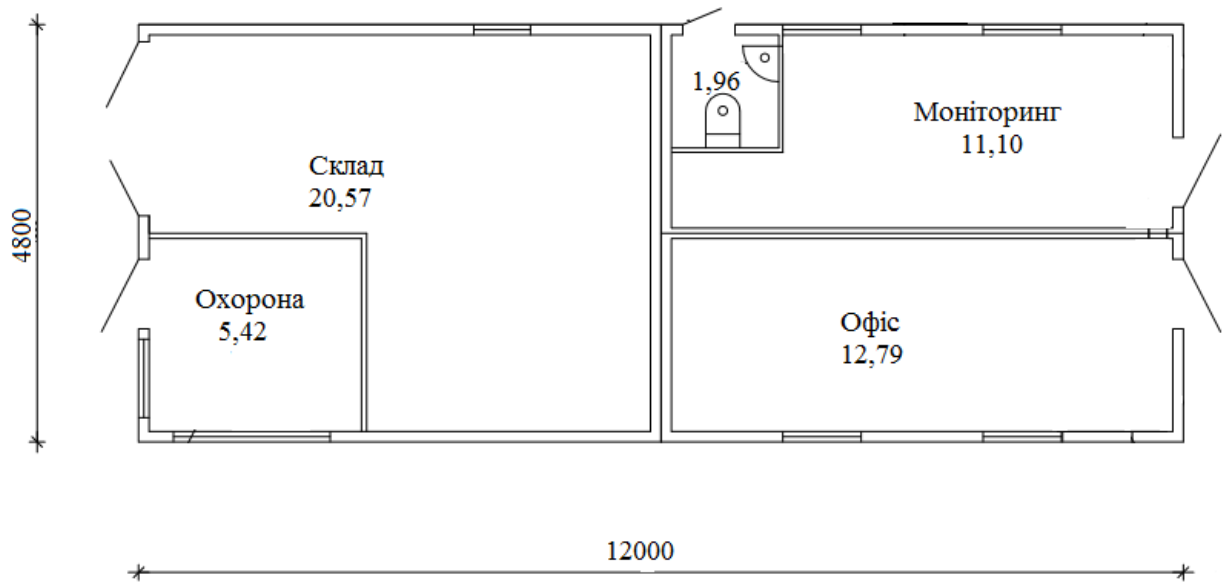


Рисунок 4.1 – Схема приміщення, де працює персонал

4.1.2 Електробезпека

Досліджуване приміщення, електрифіковано за відповідними нормами. Зокрема, в приміщенні використовується чотири провідна трифазна електромережа з заземленим нульовим проводом. Величина напруги цієї мережі становить 380 х 220В (фазна напруга (фаза – «0») – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов з небезпеки електротравматизму – без підвищеної небезпеки, оскільки чинники підвищеної небезпеки (підвищена температура повітря (більша за 35°C), вологість (більша 75%), струмопровідна підлога, струмопровідний пил, можливість одночасного дотику обслуговуючого персоналу до металевого корпусу споживача електроенергії та металоконструкцій, що мають зв'язок із землею) та особливої небезпеки (вологість повітря в приміщеннях близька до насичення, конденсація вологи на поверхні устаткування та будівельних конструкціях (100%); хімічно активне середовище, що призводить до руйнування ізоляції, чи біологічне середовище, що у вигляді плісняви утворюється на обладнанні та струмовідних елементах) відсутні.

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) технічні рішення із запобігання електротравм від контакту з нормально струмоведучими елементами електроустаткування – ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки;
- 3) підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

при живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Персонал, який обслуговує електроустановки СЕС, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. На СЕС використовуються ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками, діелектричні килимки і калоші або боти.

Як додаткові електрозахисні засоби використовуються переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

При роботі, яка зв'язана з доторканням до струмоведучих частин електрообладнання, необхідно на його пусковому пристрої або ключі керування повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ".

Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами. В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізолюваним проводом) повинні бути заземлені. Необхідність та можливість встановлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок та підключеного до них обладнання визначає працівник, який видає розпорядження.

Відповідно з ДСТУ 12.1.013-78 умови праці на СЕС за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочому приміщенні є струмопровідною.

Згідно із ДСТУ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ДСТУ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

Електропривід насосів, вентиляторів, іншого обладнання повинний бути виконаний відповідно до Правил устрою електричних установок.

Невідключені струмовідні частини, доступні для випадкового доторкання, мають бути на час роботи обгороджені.

Для тимчасового обгороджування струмовідних частин, що залишилися під напругою, можуть застосовуватися щити, ширми, екрани тощо, виготовлені з ізоляційних матеріалів.

Необхідність встановлення тимчасових огорож, їх вид, спосіб встановлення визначаються особою, яка виконує підготовку робочого місця.

На тимчасові огорожі слід написати «Стій! Напруга» або прикріпити відповідні плакати безпеки.

Допускається застосування спеціальних пересувних огорож - кліток, похилих щитів тощо, конструкція яких забезпечує безпечність їх встановлення, забезпечує стійкість і належне закріплення.

В електроустановках напругою до 10 кВ в тих випадках, коли неможливо обгородити струмовідні частини щитами, допускається застосування ізолювальних накладок, розміщених між вимкненими і тими, що перебувають під напругою, струмовідними частинами.

Ці ізолювальні накладки можуть торкатися струмовідних частин, що перебувають під напругою.

Встановлювати і знімати накладки мають два працівники з групою IV і III (один з них зі складу оперативних або оперативно-ремонтних), користуючись діелектричними рукавичками та ізолювальними штангами або кліщами з застосуванням захисних окулярів.

Після вмикання заземлювальних ножів або встановлення переносних заземлень вивішується плакат «Заземлено». На сітчастих або суцільних огородженнях комірок, сусідніх з місцем робіт і розташованих навпроти, мають бути вивішені плакати «Стій! Напруга».

Сусідні коміртки та коміртки, розташовані навпроти місця роботи, які не мають зазначених огорожень, а також проходи, куди працівникам не слід

заходити, мають бути огорожені переносними щитами (ширмами) з такими ж плакатами на них. Переносні щити слід встановлювати з таким розрахунком, щоб вони не перешкоджали виходу працівників з приміщення в разі виникнення небезпеки.

У ВРП під час робіт, що провадяться з землі, і на устаткуванні, встановленому на фундаментах і окремих конструкціях, робоче місце слід обгородити (з залишенням проходу) канатом, мотузкою чи шнуром з рослинних чи синтетичних волокон з вивішеними на них плакатами «Стій! Напруга», оберненими всередину огороженого простору.

Дозволяється користуватися для підвішування канату конструкціями, не включеними до зони робочого місця, за умови, що вони залишаються поза обгородженим простором.

В разі зняття напруги з усього ВРП, за винятком лінійних роз'єднувачів, останні мають бути обгороджені канатом з плакатами «Стій! Напруга», оберненими назовні обгородженого простору. У ВРП під час роботи, що виконується у вторинних колах за розпорядженням, обгороджувати робоче місце не вимагається.

У ВРП на ділянках конструкцій, по яких можна пройти від робочого місця до сусідніх ділянок, де є напруга, мають бути встановлені добре видимі плакати «Стій! Напруга». Ці плакати може встановлювати працівник з групою III з оперативно-ремонтників чи ремонтників під керівництвом допускача.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Інструменти, матеріали і органи управління повинні бути розташовані дугою навколо робочого місця і по можливості ближче до оператора, інструменти і матеріали повинні знаходитись на відповідних місцях, щоб виключити зайві рухи на їх пошук і вибір.

В процесі експлуатації енергетичного обладнання на СС з'являються ряд небезпечних і шкідливих факторів. До них належать і наявність поверхонь з

високою температурою, конвенційних і променевих теплових потоків, велике виділення вологи, застосування пожежонебезпечних матеріалів, наявність шуму і вібрації від трансформатора; вплив електромагнітних полів, які наводяться високою напругою. Досить значний вплив на організм людини мають електромагнітні поля, які наводяться високою напругою і діють, як фізіологічно так і електрично. Фізіологічна дія сприймається людиною з такими симптомами: відчуття поколювання відкритих частин тіла, загальна недуга, головні болі.

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничих приміщень – умови внутрішнього середовища цих приміщень, що впливають на тепловий обмін працюючих з оточенням шляхом конвекції, кондукції, теплового випромінювання та випаровування вологи. Ці умови визначаються поєднанням температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, температури оточуючих людину поверхонь та інтенсивністю теплового (інфрачервоного) опромінення. До параметрів мікроклімату, що нормуються відносяться температура ($t^{\circ}\text{C}$) і відносна вологість повітря ($W, \%$), швидкість його переміщення (м/с), потужність теплових випромінювань (Вт/м^2). Нормується мікроклімат на робочому місці дослідника згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [3].

Розробка засобів забезпечення дистанційного навчання за енерговитратами відноситься до категорії 1а [4].

Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	$t, ^{\circ}\text{C}$	$W, \%$	$V, \text{м/с}$
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено:

1. У холодний період року для обігріву будівлі використовується власна незалежна парова система опалення.

2. Забезпечення метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи припливно-витяжної вентиляції та регулярного провітрювання.

3. Вологе прибирання.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Повітряне середовище характеризується складом та метеорологічними умовами. Для створення нормальних умов виробничої діяльності потрібно забезпечити необхідну чистоту повітря. Внаслідок виробничої діяльності у повітряне середовище приміщень можуть потрапляти різноманітні шкідливі речовини у вигляді газу, пилу, рідин.

В приміщенні, де здійснюється розробка засобів забезпечення дистанційного навчання, можливими забруднювачами повітря може бути офісна техніка та пил, який потрапляє ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Середньо добова	Клас небезпечності
	Максимально разова		
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n ⁺	n ⁻
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи припливно-витяжної вентиляції, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

4.3 Виробниче освітлення

Одним із чинників, які визначають сприятливі умови праці, є раціональне освітлення робочої зони і робочих місць. Якщо освітлення виробничих приміщень правильно розраховане і виконане, очі працівника протягом тривалого часу зберігатимуть здатність добре розрізняти предмети і знаряддя праці, не втомлюючись. Це сприяє зниженню виробничого травматизму і професійного захворювання очей.

Раціональне освітлення – один з основних факторів створення сприятливих робочих умов праці. Недостатнє освітлення викликає передчасне стомлення працюючих, знижує продуктивність праці, може стати причиною нещасного випадку.

У приміщенні використовується штучне та природне освітлення.

Система природного освітлення – бокове, пояс світлового клімату для Хмельницької обл. – IV.

Система штучного освітлення – комбінована, оскільки поряд із загальним освітленням (тип джерела освітлення – лампи люмінесцентні) використовуються індивідуальні джерела світла (настільні світильники лампи із лампами розжарювання).

Прийняте роздільне нормування КПО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КПО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна. Нормовані значення КПО для будинків визначаються за формулою:

$$e_n = e_H \cdot m_n \quad (4.1)$$

де e_H - значення КПО для будинків;

m_n - коефіцієнт сонячності клімату - 0,9, вікна зорієнтовані на захід.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для IV пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні (характеристика зорової роботи – високої точності, розряд зорової роботи – III, підрозряд – г, контраст об'єкта з фоном – великий, характеристика фону – світлий) зазначені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість, лк		КПО, e_n , %	
						Штучне освітлення		Природне освітлення	Сумісне освітлення
						Комбіноване	Загальне		
Високі точності	Від 0,3 до 0,5	III	г	великий	світлий	800	300	$2 \cdot 0,9 = 1,8$	$1,2 \cdot 0,9 = 1,08$

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

1) Максимально можливе бічне природне освітлення (2 вікна розмірами 2,3х1,5 м.).

2) Штучне загальне освітлення здійснюється за допомогою люмінесцентних ламп. Світильники систематично очищуються від пилу, несправні лампи замінюються.

3) У разі недостатнього освітлення на робочому місці використовуються настільні світильники.

4.3.1 Виробничий шум

Одним з найшкідливіших факторів, притаманних нашій цивілізації, є шум. Виробничий шум — це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що виникають у повітряному середовищі і безпосередньо впливають на працездатність. Джерелами шуму в умовах, що розглядаються в проекті є: повітряні та масляні вимикачі, вода, трансформатори, генератори.

В останні роки шум став одним з небезпечних факторів зовнішнього середовища на виробництві. Це пов'язано з підвищенням потужності та продуктивності машин, їх повсюдним застосуванням на всіх ділянках і сферах виробництва.

В приміщенні знаходиться 4 робочих місця, обладнаних ПК, кожне з яких устатковане монітором, вінчестером в системному блоці, трьома вентиляторами системи охолодження ПК та клавіатурою. Крім того поряд працює периферійна техніка. Таким чином у приміщенні мають місце шуми широкосмугові із аперіодичним підсиленням при роботі принтерів.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [5]. Для умов виконання роботи (характер робіт і характер шуму) допустимі рівні звукового тиску повинні відповідати ГС, а рівні звуку L_A не повинні перевищувати 50 дБА - дивись таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму (поліпшення шумового клімату) в приміщенні доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням.

4.3.2 Виробничі випромінювання

Оскільки розробка засобів забезпечення дистанційного навчання проводилася із використанням ПК, то на робочому місці дослідника можливий підвищений рівень електромагнітного випромінювання.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Таким чином, умови праці під час розробки засобів забезпечення дистанційного навчання в цілому відповідають існуючим санітарно-гігієнічним нормам. Але у зв'язку з тим, що більшу частину часу дослідник займає сидячу позу і мало рухається, то доцільно виконувати п'ятихвилинну виробничу гімнастику, яку необхідно проводити після кожних 60 хвилин сидячої роботи, і яка буде спрямована на покращення фізичного стану працівника.

4.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

У разі виникнення надзвичайної ситуації на СЕС, суб'єкти електроенергетики зобов'язані діяти відповідно до стандартів операційної безпеки функціонування об'єднаної енергетичної системи України та виконувати оперативні команди та розпорядження суб'єкта господарської діяльності, що здійснює диспетчерське (оперативно – технологічне) управління об'єднаною енергетичною системою України. Електроенергетика є однією з базових галузей економіки України й одною з декількох природних монополій. Наявний виробничий потенціал повністю забезпечує тепловою й електричною енергією промислові підприємства й населення України.

Розглянемо безпеку роботи електричної частини сонячної електростанції в умовах дії іонізуючих випромінювань і електромагнітного імпульсу.

Серед потенційно небезпечних виробництв особливе місце посідають радіаційно-небезпечні об'єкти. Вони являють небезпеку для людей навколишнього природного середовища, ЕОМ, електрообладнання. Радіоактивне випромінювання діючи на матеріали і елементи сонячної станції приводить до суттєвих змін в роботі. Дія іонізуючих випромінювань залежить від виду випромінювання, дози радіації, природи опромінюваної речовини та умов навколишнього середовища.

Елементи сонячної електростанції (фотогальванічні панелі, інвертори, силові трансформатори, вимикачі, трансформатори струму і напруги, обмежувачі перенапруг, роз'єднувачі та запобіжники) по різному реагують на іонізуючі випромінювання. Найбільш чутливі до радіації метали, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Конструювання СЕС стійкої до іонізуючого опромінення, передбачає вибір матеріалів та елементної бази, а також конструктивних рішень, які зменшують вплив радіації. В елементах СЕС радіація викликає оборотні і необоротні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів СЕС, що призводить до пошкодження апаратури.

Електромагнітний імпульс діє на електронні прилади і являє собою велику небезпеку для електронної апаратури. Оскільки електричні установки сонячної електростанції включають в себе електронні прилади, релейний захист, систему сигналізації та ін., то електромагнітний імпульс безпосередньо є небезпечним для елементів СЕС. Слід пам'ятати про те, що захист електричних елементів станції від механічних пошкоджень не захищає від дії електромагнітного імпульсу. Дані елементи можуть вийти з ладу, знаходячись в надійно захищених спорудах, або на досить значній відстані.

4.4.1 Дослідження безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції при дії іонізуючих випромінювань

Критерієм оцінки безпеки роботи об'єкта в умовах дії іонізуючих випромінювань є максимальне значення експозиційної дози або потужності дози, що може викликати зміни параметрів елементної бази розподільчого пункту з порушенням роботи системи.

Експлуатаційний термін елементної бази $-1_k = 10 \text{ років} = 87600 \text{ год.}$

Елементи, від яких залежить функціонування СЕС є запобіжники, трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі, обмежувачі перенапруг, інвертори.

$D_{гр} = 10^4 \text{ Р}$ – доза гамма-випромінювання для обладнання СЕС (таблиця 4.7).

Максимально допустимий рівень радіації на об'єкті:

$$D_{\text{м}} = \frac{2 \cdot p_{1\text{max}} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{\text{осл}}}, [\text{P}] \quad (4.2)$$

$$P_{1\text{max}} = \frac{D_{\text{зр}} \cdot K_{\text{посл}}}{2 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}, [\text{P/год}] \quad (4.3)$$

$$P_{1\text{max}} = \frac{10^4 \cdot 3}{2 \cdot (\sqrt{86000} - \sqrt{1})} = 50,8, (\text{P/год}) \quad (4.4)$$

Визначаємо допустимий час роботи РЕА за наступною формулою

$$t_{\text{доп}} = \left(\frac{D_{\text{зр}} \cdot K_{\text{посл}} + 2 \cdot P_{1\text{max}} \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_{1\text{max}}} \right)^2, [\text{год}] \quad (4.5)$$

$$t_{\text{доп.пр}} = \left(\frac{10^4 \cdot 3 + 2 \cdot 50,8 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 50,8} \right)^2 = 87697574 (\text{год}).$$

Таблиця 4.7 – Граничні значення експозиційних доз.

№	ЕМ	Частини системи	Елементи	$D_{\text{зрi}}$	$D_{\text{зр}}$
1	Основна частина СЕС	Панелі	Фотогальванічна панель YINGHSOLAR YL	10^5	10^4
		Трансформаторні підстанції	Інвертор SMA ST1700TL	10^4	
			Силовий трансформатор 400 кВА	10^7	
			Силовий трансформатор 630 кВА	10^7	
2	Розподільчий пристрій	Ввідна комірka	Вимикач VD-4	10^6	10^5
			Обмежувач перенапруг ОПН-РТ/TEL	10^5	

Електрична частина сонячної електростанції буде працювати безпечно в умовах дії іонізуючого випромінювання при $P_1 < 50,8 \text{ P/год}$. Отже,

допустимий час стійкості роботи СЕС в заданих умовах становить 87697574 год.

4.4.2 Дослідження безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції в умовах дії електромагнітного імпульсу

У нашому випадку: напруга живлення: $U_{\text{ж}}=360\pm 5\%$ В та $U_{\text{ж}}=220\pm 5\%$ В, коефіцієнт безпеки для всіх дільниць : $K_{\text{бг}} = 40$.

В зв'язку з тим, що окремі елементи цих систем можуть мати різні значення коефіцієнтів безпеки, безпека роботи системи в цілому визначається мінімальним значенням коефіцієнта безпеки.

За критерієм безпеки роботи СЕС в цих умовах приймається коефіцієнт безпеки:

$$K_{\text{б}} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{дж}}}{U_{\text{вж}}} [\text{дБ}]; \quad (4.6)$$

де $U_{\text{д}}$ – допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{\text{В(Г)}}$ – напруги наведені у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних системах, В.

Оцінку безпеки роботи проводимо в наступній послідовності:

Максимальну довжину горизонтальних та вертикальних струмопровідних частинах: $I_{\text{с1}} = 3,6$ м, $I_{\text{с1}} = 5,4$ м, $I_{\text{с2}} = 3,2$ м, $I_{\text{с2}} = 5$ м.

Допустиме коливання напруги живлення дорівнює:

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N [\text{В}], \quad (4.7)$$

$$U_{\text{д1}} = 380 + \frac{380}{100} \cdot 5 = 399 (\text{В}).$$

$$U_{\text{д1}} = 220 + \frac{220}{100} \cdot 5 = 231 (\text{В}).$$

Визначаємо напругу наведену у вертикальних струмопровідних частинах:

$$K_{БГ} = 20 \cdot \lg \frac{U_{ДЖ}}{U_{ВЖ}}, [\partial Б]; \quad (4.8)$$

$$U_B = U_{Д}/10^{0,05 \cdot 40}, (B);$$

$$U_B = 399/10^{0,05 \cdot 40}, (B);$$

$$U_{B1} = 3,99 (B);$$

$$U_{B2} = 2,31 (B).$$

Визначимо горизонтальну складову напруженості електричного поля E_{Γ} з формулами:

$$U_B = E_{\Gamma} \cdot l_B [B] \quad (4.9)$$

де l_B – максимальна довжина струмоведучих частин, м.

Тоді:

$$E_{\epsilon 1} = \frac{U_{\epsilon 1}}{l_{\epsilon 1}} = \frac{3,99}{5,4} = 0,73 (B / м) ,$$

$$E_{\epsilon 2} = \frac{U_{\epsilon 2}}{l_{\epsilon 2}} = \frac{2,31}{5} = 0,462 (B / м) ,$$

Вертикальна складова напруженості електромагнітного поля E_B визначається з формули:

$$E_{\epsilon} = 10^{-3} \cdot E_{\epsilon} (B / м) , \quad (4.10)$$

Звідки

$$E_{\epsilon 1} = \frac{U_{\epsilon 1}}{10^{-3}} = \frac{0,73}{10^{-3}} = 730 (B / м) ,$$

$$E_{\epsilon 2} = \frac{U_{\epsilon 2}}{10^{-3}} = \frac{0,462}{10^{-3}} = 462 (B / м) ,$$

Обладнання буде стабільно працювати при умові, що вертикальна і горизонтальна складові напруженості електромагнітного поля для $U_{ж} = 380B$ не будуть перевищувати значень $E_{B1} = 730 B/м$ і $E_{\Gamma 1} = 0,73 B/м$, а для $U_{ж} = 220B$ - $E_{B1} = 462 B/м$ і $E_{\Gamma 1} = 0,462 B/м$.

Для підвищення стійкості необхідно використовувати екранування.

4.4.3 Розробка превентивних заходів по підвищенню безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції в умовах надзвичайних ситуацій

Для захисту апаратури від іонізуючих випромінювань застосовуються різної конструкції екрани і кожухи. Найважливіші вимоги до матеріалів, з яких виготовляють захисні пристрої такі, до складу матеріалів яких повинні входити елементи з великою атомною масою; захисні матеріали повинні включати легкі елементи.

Для підвищення безпеки роботи електрообладнання в умовах дії електромагнітних випромінювань застосовують: раціональне просторове розміщення вузлів і схем системи; вибір найбільш стійких до впливу ЕМІ функціональних елементів систем; створення стійких електронних схемних рішень.

Розрахуємо товщини захисних екранів:

$$t = \frac{A}{5,2\sqrt{15000}} \text{ [см]}; \quad (4.11)$$

$$t_1 = \frac{58,9}{5,2\sqrt{15000}} = 0,14 \text{ (см)}.$$

Отже, безпечна робота СЕС в умовах дії ЕМІ буде забезпечена, при $t \geq 1,14$ мм.

Елементи сонячної електростанції стійкі в умовах дії іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи в заданих умовах становить 87697574 год., при $P_1 < 50,8$ Р/год. Можлива доза опромінення елементів не перевищує допустиму, а отже знаходиться в межах норми. Для підвищення безпеки роботи електричної частини сонячної електростанції було використано екранування, з екраном не менше 1мм.

При оцінці роботи даної СЕС в умовах електромагнітного імпульсу було розглянуто два блоки: основна частина СЕС і розподільчий пристрій. Аналіз цих блоків полягав у визначенні їхніх коефіцієнтів безпеки, які і використовувалися як критерій стійкості. Провівши цей аналіз можна сказати, що для його захисту слід застосовувати екранування. В якості матеріалу для екранування було вибрано сталь, товщина стінки екрану становить не менше 0,1 см.

ВИСНОВКИ

Для вибору типу сонячної батареї (СБ) було використано розширені табличні характеристики, що дозволяють здійснити обґрунтований вибір на основі статистичного аналізу. Проведено аналіз вольт-амперних характеристик (ВАХ) двох типів сонячних елементів (СЕ): кремнієвих (C-Si) та арсеніду галію (AsGa), в умовах зміни температури у широкому діапазоні від -60 до +60 °C. Дослідження показало, що напруга на виході СБ типу AsGa є менш чутливою до підвищення температури (до +60 °C), ніж у C-Si. Ідеальним варіантом для використання в умовах нашого клімату є СБ типу AsGa, завдяки низькому температурному коефіцієнту напруги (uK). Проте їхня вартість удвічі вища за C-Si, а також вони малодоступні на ринку.

Для моделювання роботи сонячної електростанції запропоновано застосовувати універсальну модель сонячної батареї, яка сумісна з бібліотекою SimPowerSystems у середовищі Matlab. Це дає змогу моделювати електропостачальні системи з урахуванням змін сонячної радіації та температури навколишнього середовища.

У середовищі SimPowerSystems розроблено оригінальну модель СБ, ВАХ якої визначається за трьома контрольними точками. Використовуючи математичні рівняння, було створено ідеалізовану модель СБ для порівняння з оригінальною моделлю. Результати порівняння показали високу відповідність оригінальної моделі реальним ВАХ СБ. Отже, для подальших досліджень і моделювання рекомендовано використовувати саме розроблену оригінальну модель СБ.

Розрахована площа СБ на основі рівності середньої потужності навантаження та середньої питомої потужності СБ - $S_{CB} = 7,05 \text{ м}^2$, на основі ідеальної моделі - $S_{CB} = 7,34 \text{ м}^2$ і за характеристиками ринкового СЕ - $S_{CB} = 12 \text{ м}^2$. Це тим, що хоча теоретично ККД C-Si СЕ становить 24%, але найдоступніші ринку СБ мають ККД 15%. Враховуючи доступність на ринку

М'яни, де в основному продаються СБ з невеликим ККД, для проектування ФЕУ використовуємо СБ з ККД = 15%, тобто з площею $S_{CB} = 12\text{м}^2$.

Для вибору ємності АБ ми використовували 3 варіанти розрахунку: зарядним струмом, розрядним струмом і енергобалансом. Було обрано варіант з найбільшою номінальною ємністю АБ $Q_{AB} = 1000(A \cdot 200)$, тобто $n_{AB} = 5$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волошин О.Л. Механізми державного регулювання розвитку альтернативної енергетики в Україні : дис. канд. юрид. наук : спец. 25.00.02 / О.Л. Волошин. – Х., 2015. – 197 с.
2. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 194 с.
3. European Commission. (2023). *Photovoltaic status report 2023*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/87000>
4. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2024). *Photovoltaics Report*. Retrieved from <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>
5. Мартинюк, В. П., Базелюк, В. О., & Шостак, Л. Г. (2022). Особливості проектування систем сонячної енергетики для автономного енергозабезпечення. *Енергетика та електрифікація*, (1), 45–53.
6. Гладишев, В. В., & Прокопенко, О. В. (2023). Вибір сонячних модулів та оцінка їх ефективності у кліматичних умовах України. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (2), 27–33.
7. Solar Energy Industries Association (SEIA). (2024). *Solar Photovoltaic Technology Basics*. Retrieved from <https://www.seia.org/initiatives/photovoltaic-solar-technology>
8. IRENA. (2023). *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series – Solar Photovoltaics*. International Renewable Energy Agency. Retrieved from <https://www.irena.org/publications>
9. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph / O. Burykin, P. Lezhniuk, V. Kulyk and others. – Vinnytsia: VNTU, 2018. – 124 p. - ISBN 978-966-641-719-3.

10. Distributed energy sources in the local electrical systems / O. Burykin, P. Lezhniuk, Yu. Malogulko. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 148 p. - ISBN 978 613 737 951 6.
11. Стельбіцька, Н. Є. Загальна характеристика розвитку альтернативної енергетики на початку XXI-го століття [Текст] / Н. Є. Стельбіцька // Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії : монографія / О. М. Сохацька, О. М. Ляшенко, В. М. Олейко, Н. Є. Стральбіцька ; за заг. ред. О. М. Сохацької. – Тернопіль : ТНЕУ, 2012. – С. 7-25.
12. Режим доступу: <https://www.solar-battery.com.ua/karta-solnechnoy-aktivnosti-v-ukraine/>.
13. Атлас енергетичного потенціалу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні. — К., 2005. — 36 с.
14. Васько П. Ф. Напрями та рівні розвитку і використання нетрадиційних, відновлюваних та позабалансових джерел енергії (енергетична стратегія України до 2030 року): проект // Мат. IV Міжнародної конференції «Нетрадиционная энергетика в XXI веке», Крим, 2003. — С. 233 — 242.
15. Мхітарян Н. М. Аналіз стану та перспектив розвитку відновлюваної та вторинної енергетики в світі та в Україні / Н. М. Мхітарян, С. О. Кудря, Л. В. Яценко // Мат. IV Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика XXI століття», Крим, 2005. — С.
16. Komar, V., Lezhniuk, P., Lesko, V., Malogulko, Yu., Natrebskyi, V., Sikorska, O. (2022). Electricity consumption and renewable energy sources generation schedules coordination in electric networks for balance reliability increasing. Energy facilities: management and design and technological innovations. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 42–75. doi: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-63-3.ch2>.
17. Мхітарян Н. М. Аналіз стану та перспектив розвитку відновлюваної та вторинної енергетики в світі та в Україні / Н. М. Мхітарян, С. О. Кудря, Л. В. Яценко // Мат. IV Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика XXI століття», Крим, 2005. — С. 11—25.

18. СОУ-Н МЕВ 40.1 - 00100227 – 68:2012 "Стійкість енергосистем. Керівні вказівки".
19. Бондаренко Є. А. Методичні вказівки, захисні заходи електробезпеки та розрахунок занулення для самостійної роботи студентів всіх спеціальностей/ укладачі В. О. Дрончак – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 31 с.
20. Жидецький В. Ц. «Основи охорони праці» - Львів Афіша, 2002 - 320 с. Желібо Є. П. Заверуха Н.М., Зацарний В.В. Безпека життєдіяльності.
21. Навчальний посібник. / За ред. Желібо Є. П. 4-е видання. - К.; Каравела, 2004. -328 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Назва роботи: «Сонячна фотоелектрична система автономного електропостачання»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (вказати))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент, доцент кафедри ЕСС Малогулко Ю.В.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	62,1 %
Загальна схожість	37,9 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор 
(підпис)

Черешнюк Д.М.
(прізвище, ініціали)


(підпис)

Вищневський С.Г.
(прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

ДОДАТОК В
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

**СОНЯЧНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА
СИСТЕМА АВТОНОМНОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

ВИКОНАВ СТУДЕНТ ГР. ІЕ-21Б3
ДМИТРО ЧЕРЕШНЮК

КЕРІВНИК К.Т.Н., ДОЦЕНТ
ЮЛІЯ МАЛОГУЛКО

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проектування сонячної фотоелектричної системи автономного електропостачання споживачів є дуже важливим етапом, який впливає на ефективність, надійність і економічну доцільність системи. Ось декілька причин, чому проектування є важливим:

1. Відповідність потреб споживачів: Правильне проектування дозволяє врахувати специфічні потреби споживачів. Визначення необхідної потужності, розміру і типу сонячних панелей, акумуляторів та інверторів забезпечує надійність системи і забезпечує достатню електроенергію для споживачів.

2. Максимізація продуктивності: Правильне розташування сонячних панелей, їх орієнтація і кут нахилу впливають на ефективність збору сонячної енергії. Проектування повинно врахувати географічне розташування, кліматичні умови і тіньові фактори, щоб максимізувати виробництво електроенергії.

3. Безпека та надійність: Проектування включає в себе аналіз ризиків і забезпечення безпеки системи. Це означає врахування шкідливої електромагнітної, пожежої та перепадів та перемикачів, а також резервного живлення, яке може забезпечити неперервну функціонування системи.

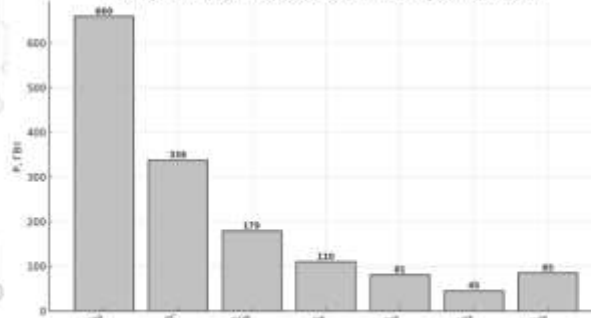
4. Ефективне використання ресурсів: Проектування допомагає оптимізувати використання ресурсів, зокрема сонячних панелей і акумуляторів. Правильний розрахунок необхідної потужності і розміру системи допомагає уникнути надмірного витрат і забезпечити оптимальне використання доступних ресурсів. Наприклад, розрахунок потужності сонячних панелей і типу оптимального розташування дозволяють мінімізувати використання сонячної енергії і забезпечити ефективну роботу системи. Також, правильний розмір акумуляторів дозволяє забезпечити достатню потужність для зберігання і використання електроенергії навіть в періоди обмеженого сонячного випромінювання.

5. Економічна доцільність: Проектування допомагає визначити економічну доцільність системи. Це включає розрахунок витрат на придбання та встановлення сонячної фотоелектричної системи, а також її очікувану користь, експлуатації і повернення інвестицій. Правильне проектування дозволяє забезпечити оптимальне співвідношення між витратами системи і очікуваним економічним поверненням, зокрема зменшення витрат на електроенергію.

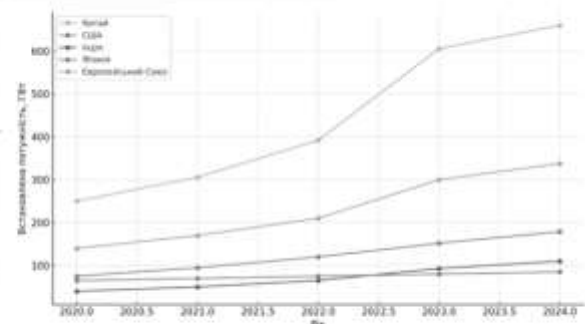
Узагальнюючи, проектування сонячної фотоелектричної системи автономного електропостачання споживачів є важливим етапом, що впливає на ефективність, надійність, безпеку та економічну доцільність системи. Врахування потреб споживачів, оптимізація ресурсів та максимізація продуктивності дозволяють створити ефективну та стабільну сонячну фотоелектричну систему, яка може надійно забезпечувати автономне електропостачання.

СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА У СВІТІ

Встановлена потужність сонячної енергетики у світі (2024 рік)

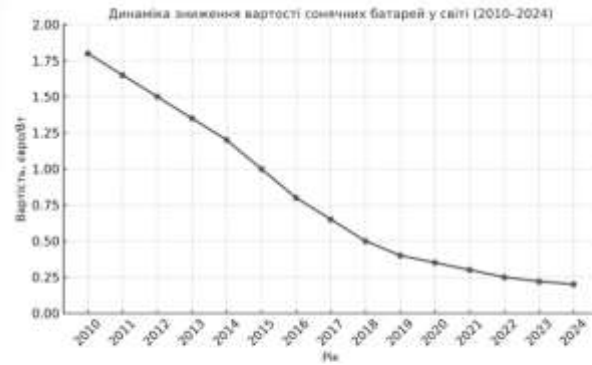


Встановлена потужність сонячної енергетики у світі (2024 рік)

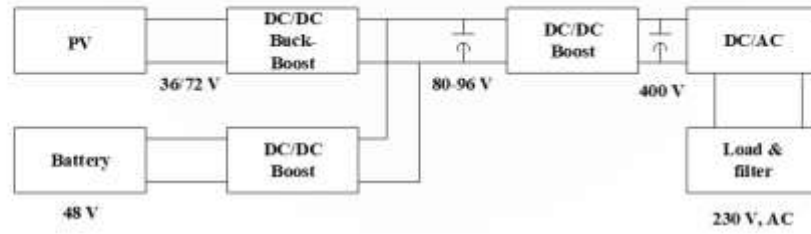


Динаміка росту встановленої потужності ФЕУ (ГВт) у провідних країнах світу у 2020–2024 роках

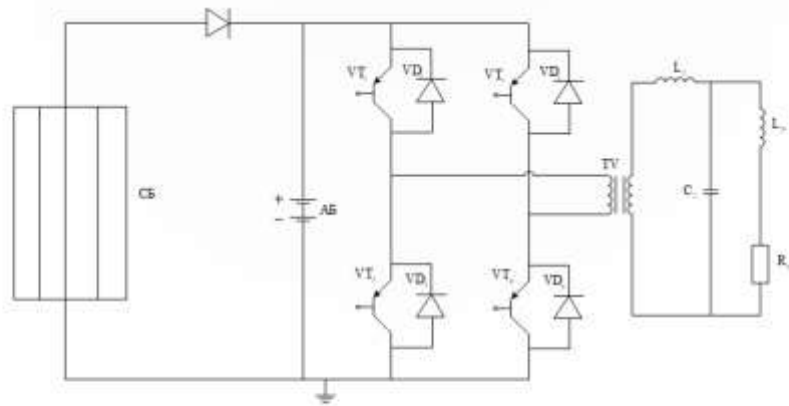
ДИНАМІКА ЗНИЖЕННЯ ВАРТОСТІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ
У СВІТІ В 2010–2024 РР., €/Вт ЗА ДАНИМИ IRENA,
SOLARPOWER EUROPE"



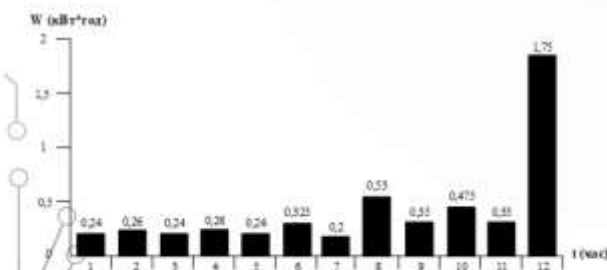
БЛОК – СХЕМА БАГАТОКАСКАДНОЇ ФЕУ



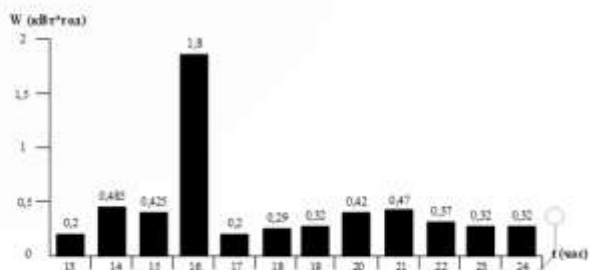
ОДНОСТУПЕНЕВА СХЕМА ФЕУ



ГРАФІК СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЖИТЛОВОМУ БУДИНКУ



Енергоспоживання за годину з 01:00 до 12:00



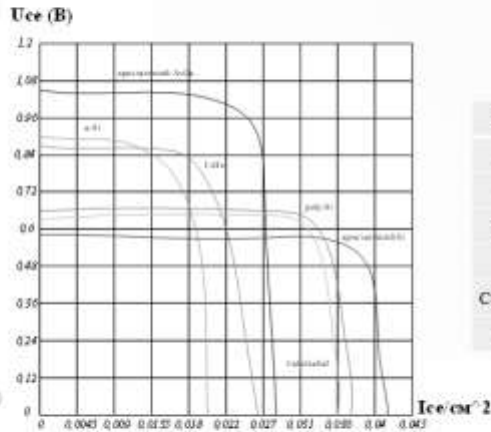
Енергоспоживання за годину з 13:00 до 24:00

ВИБІР ТИПУ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ І ЇЇ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ

Характеристики	Типи акумуляторних батарей						
	NiCD	NiMH	Свинцево-кислотна	Li-Ion	Li-Ion полімерна	Литій-титанатна	Гелієві
Енергетична густина, В·год	45-80	60-120	150	110-160	100-130	80	180
Внутрішній опір, мОм	100-20 (батарея на 6 В)	200-300 (батарея на 6 В)	менше 100 (батарея на 12 В)	150-250 (батарея на 7,2 В)	200-300 (батарея на 7,2 В)	200-2000 (батарея на 6 В)	менше 100 (батарея на 12 В)
Число циклів заряд/розряд до зменшення ємності на 80%	1500	300-500	200-300	500-1000	300-500	50 (при зм. тем. на 20 °C)	700
Час повного заряду, ч	1	2-4	8-16	2-4	2-4	2-3	3,5
Допустимий перезаряд	середній	низовий	високий	дуже низький	низовий	середній	низовий
Саморозряд за місяць при кімнатній температурі, %	20	30	5	10	10	0,3	3

Напруга на елементі, В	1,25	1,25	2	3,6	3,6	1,5 – 1,6	2
Середня номінальна відносна ємність (С) елемента, найбільш прийнятний	20С до 1с	5С до 0,5с	5С до 0,5с	> 2С до 1с	> 2С до 1с	5С до 0,2с	5С до 0,2с
Діапазон робочих температур, °C	-40/60	-20/60	-20/60	-20/60	0/60	0/65	-20/60
Обслуговування через	30-60 днів	60-90 днів	3-6 місяці	не регул.	не регул.	не регул.	не регул.
Початок виробництва	1950	1990	1970	1991	1999	1992	2000

ВИБІР ТИПУ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ



Тип СБ	I_{sc}	U_{oc}	I_{zm}	U_{zm}	P_{max}	η
C-Si	42,2	0,672	40,4	0,59	23,85	0,842
AsGa	28,2	1,034	27,422	0,942	25,826	0,886 ₅
Poly-Si	38,1	0,644	36,409	0,564	20,54	0,837
a-Si	19,4	0,723	18,619	0,64	11,916	0,85
CuInGaSe2	35,7	0,66	34,120	0,58	19,791	0,84
CdTe	25,9	0,726	24,882	0,643	15,995	0,851

Вольт-амперні характеристики для різних типів СБ

ВИСНОВОК

Застосовано розширені табличні характеристики СБ, що дозволяють обґрунтовано, на основі статистичного аналізу, вибрати типи СБ, що сходяться для тропічних умов. Були проаналізовані ВАХ двох типів СБ: C-Si та AsGa, при зміні температури в широкому діапазоні від -60 до +60°C. Дослідження показало, що напруга AsGa СБ при зміні плюсової температури до 60 С менше залежить від температури, ніж у C-Si. В ідеалі для наших кліматичних умов треба вибрати AsGa СБ, яка має менший температурний коефіцієнт по напрузі u_k , але вона майже в 2 рази дорожча, ніж C-Si і відсутня у вільній торгівлі.

Запропоновано використовувати універсальну модель сонячної батареї, сумісну з розділом SimPowerSystems у програмі Matlab, що дозволить моделювати систему електропостачання з урахуванням змін сонячної радіації, температури навколишнього середовища.

У розділі SimPowerSystem створена оригінальна модель СБ, ВАХ якої проходить за трьома точками. На основі відомих математичних рівнянь ми створили ідеальну модель СБ та порівняли з результатами оригінальної моделі. Результати показали, що оригінальна модель близька до реальної ВАХ СБ. Тому рекомендується для подальшого дослідження та моделювання використовувати оригінальну модель СБ.

Розрахована площа СБ на основі рівності середньої потужності навантаження та середньої пікової потужності СБ - $S_{CE} = 7,05 \text{ м}^2$, на основі ідеальної моделі - $S_{CE} = 7,34 \text{ м}^2$ і за характеристиками ринкового СБ - $S_{CE} = 12 \text{ м}^2$. Це тм, що хоча теоретично ККД C-Si СБ становить 24%, але найдоступніші ринку СБ мають ККД 15%. Враховуючи доступність на ринку М'яких, де в основному продаються СБ з невеликим ККД, для проектування ФЕУ використовуємо СБ з ККД = 15%, тобто з площею $S_{CE} = 12 \text{ м}^2$.

Для вибору ємності АБ ми використовували 3 варіанти розрахунку: зарядним струмом, розрядним струмом і енергобалансом. Було обрано варіант з найбільшою номінальною ємністю АБ $Q_{AB} = 1000(A \cdot год)$, тобто $n_{AB} = 5$.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

ДОДАТОК Б

Трансформаторна схема, що поєднує інверторну і конверторну частини ФЕУ

Принципова схема показано на рис Б.1. У цьому випадку потік потужності від СБ та акумуляторної батареї (АБ), що знаходяться під керуванням загальної шини постійного струму, передається у навантаження через високочастотний трансформатор, який забезпечує гальванічну ізоляцію між навантаженням та системою СБ та АБ та підвищення напруги від ланцюга постійного струму до навантаження.

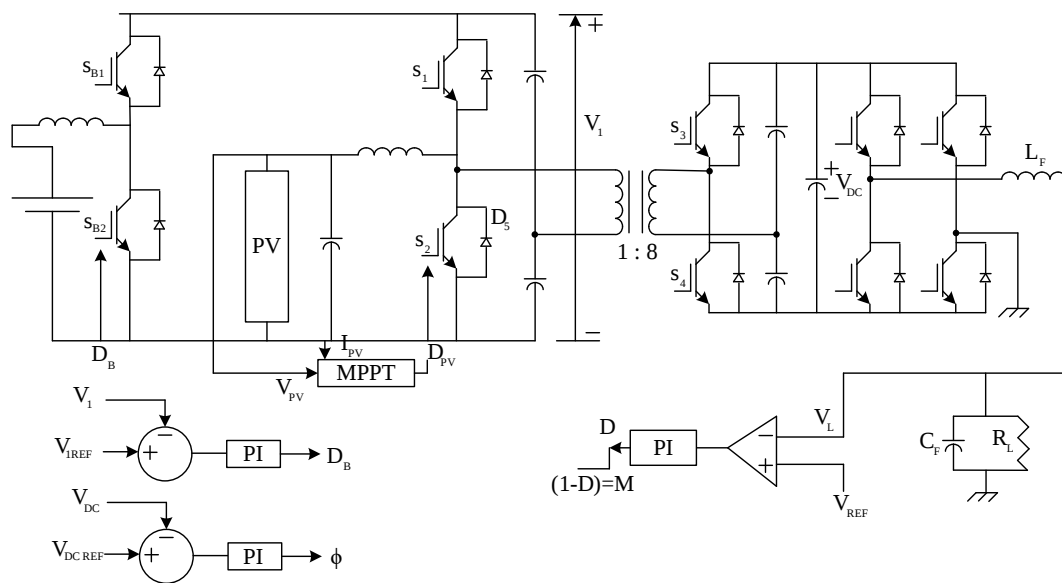


Рисунок Б.1 – Трансформаторна, інверторна і конверторна ФЕУ

Одноступенева система підвищення напруги та інвертування

Принципова схема перетворювача, що реалізує ці функції, наведена на рис. Б.2. У цьому випадку функція перетворювача постійного струму та інвертора виконується чотирма транзисторами $VT1 \div VT4$. Підвищують напругу транзистори $VT1, VT3$, що утворюють з дроселями $L1, L2$ пушпульні конвертори напруги. Підвищена напруга, що виникають на дроселях $L1, L2$ при комутації транзистори $VT1, VT3$ подається на вихідний конденсатор $C2$ через діоди $VD1, VD2$ і транзистори $VT2, VT4$. Позитивна напівхвиля вихідної напруги створюється діодом $VD1$ та транзистором $VT2$, а негативна

напівхвиля створюється діодом VD2 та транзистором VT4. Транзистори VT2, VT4 включені до половини періоду частоти 50 Гц. Дроселі L1,L2 виконують функцію накопичувачів енергії, що відбирається від СБ і передається через діоди транзистори VD1, VD2 та VT2, VT4 та конденсатор C2.

Конвертор напруги на транзисторах VT1, VT3 виконує функцію регулятора напруги на СБ, забезпечуючи роботу в точці максимальної потужності (операція MPPT).

Перетворювач за такою схемою має характеристики:

- 1) Вхідна напруга постійного струму: 40 В
- 2) Вихід інвертора напруги: 230 В 50 Гц
- 3) Потужність: 500 ВА

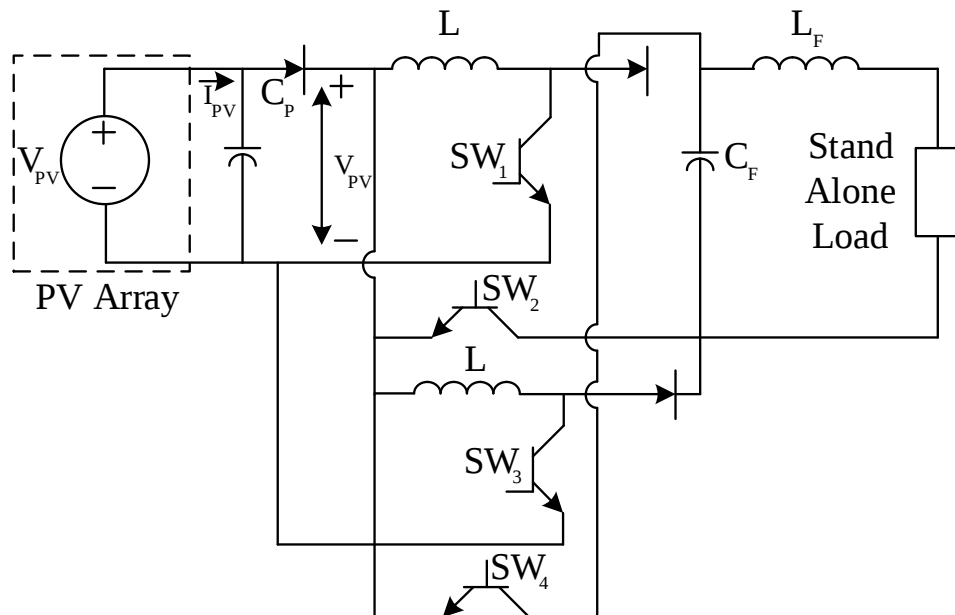


Рисунок Б.2 – Одноступеневий інвертор і конвертор

Схема управління ФЕУ виконує дві групи функцій: формування вихідної напруги з низьким коефіцієнтом гармонік та сервісні функції ФЕУ як нового елемента житлового будинку: робота з різним характером навантажень (хрест-фактор $1 \div 4$), захист персоналу та АБ від перенапруг та перерозряду, видача персоналу інформації про стан ФЕУ

У всіх відомих схемах інверторів управління силовими транзисторами здійснюється схемою управління, що містить сигнальний мікропроцесор, що

формує задану синусоїдальну напругу із заданою частотою, схему вимірювання миттєвого значення вихідної напруги інвертора, схему формування струмового коридору між заданим значенням синусоїдальної напруги і виміряним напругою виходу керуючих ШІМ імпульсів на високій частоті, що керують транзисторами інвертора. Недоліком цих схем (рис.1.5÷1.8) є наявність імпорتنих мікросхем, складність системи формування синусоїдальної ШІМ, інерційність вимірювального органу напруги, що призводить до появи паразитних стрибків напруг поблизу нульового значення, поява модуляції напруги на частоті 25 Гц, модуляції вхідного струму та струму навантаження за зміни номінального навантаження ($\cos\varphi = 0,4 \div 1$). Як правило ці системи третього порядку, що нестійкі, вимагають коригувальних механізмів, що підвищують швидкодію.

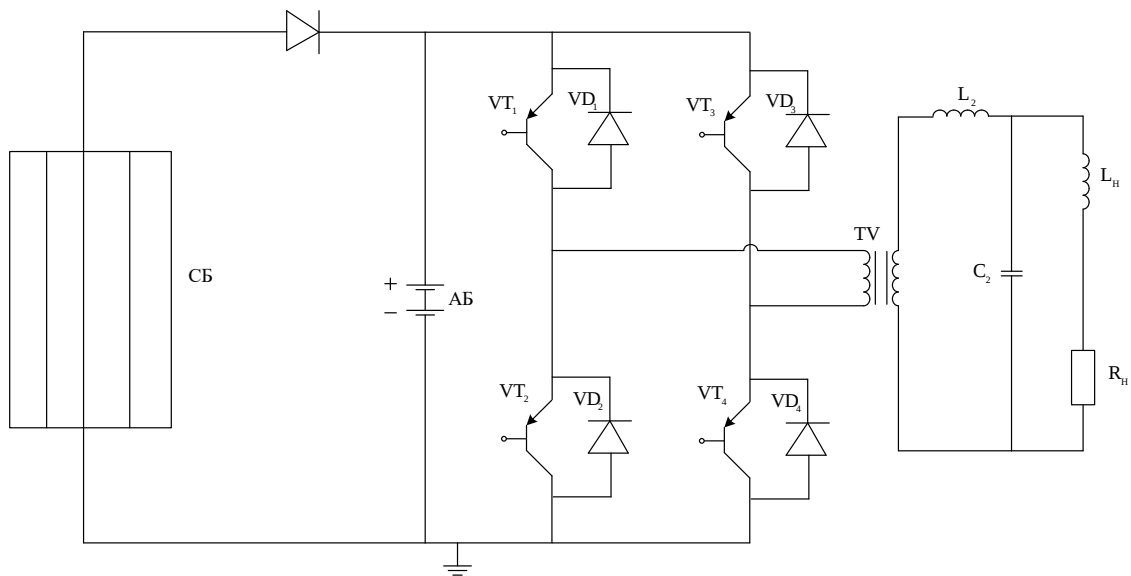


Рисунок Б.3 – Одноступенева схема ФЕУ

На основі аналізу схем та тенденцій розвитку ФЕУ з урахуванням вимог до кліматичних умов (вологість, низький $\cos$ навантаження і т.д.) у перспективі може бути використана схема показаної на рис. Б.3.