

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему

«Енергоефективна система електропостачання
критичних електроприймачів підприємства з
використанням джерел безперебійного
живлення та відновлювальних джерел енергії»

Виконав здобувач II (магістерського) рівня
освіти II курсу групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Ігор ТКАЧЕНКО
«__» _____ 2025 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, професор
_____ Анатолій ОРЛОВИЧ
«__» _____ 2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ткаченко Ігор Сергійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Енергоефективна система електропостачання критичних електроприймачів підприємства з використанням джерел безперебійного живлення та відновлювальних джерел енергії *Energy-efficient power supply system for critical electrical receivers of an enterprise using uninterruptible power supplies and renewable energy sources*

2. Керівник роботи (проекту) Орлович Анатолій Юхимович, канд. техн. наук., професор

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту _____

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) *Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розробка енергоефективної системи електроспоживання критичних електроприймачів із використанням джерел безперебійного живлення та відновлювальних джерел енергії, яка забезпечує безперервність живлення, підвищену надійність, оптимальне використання енергоресурсів та стійку роботу підприємства в умовах нестабільного електропостачання. Проведено оцінку принципу побудови та роботи систем безперебійного живлення; розглянуті їх основні типи, режими функціонування, ефективність та потенціал інтеграції з відновлювальними джерелами енергії; проаналізовано можливості застосування сонячних електростанцій і систем накопичення енергії у структурі живлення критично важливих навантажень.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ. Постановка задачі. Огляд літератури.</i>	<i>4.10.25</i>	
2	<i>Аналіз стану електропостачання критичних споживачів підприємств малого бізнесу в області.</i>	<i>14.10.25</i>	
3	<i>Огляд технічних засобів для забезпечення безперервного живлення споживачів підприємства</i>	<i>5.11.25</i>	
4	<i>Проектування енергоефективної системи електроспоживання критичних електроприймачів підприємства малого бізнесу</i>	<i>18.11.25</i>	
5	<i>Проектування енергоефективної системи електроспоживання критичних електроприймачів підприємства</i>	<i>21.11.25</i>	
6	<i>Питання охорони праці та експлуатаційної безпеки обладнання резервного живлення</i>	<i>25.11.25</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>28.11.25</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>1.12.2025</i>	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>3.12.2025</i>	

Дата видачі завдання

« ___ » _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Анатолій ОРЛОВИЧ

Завдання прийнято до виконання

« ___ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

Ігор ТКАЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 100 с.; 28 рис.; 12 табл.; 24 джерела

Ткаченко І. Енергоефективна система електропостачання критичних електроприймачів підприємства з використанням джерел. – Рукопис.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2025 р.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка енергоефективної системи електропостачання критичних електроприймачів із використанням джерел безперебійного живлення та відновлювальних джерел енергії, яка забезпечує безперервність живлення, підвищену надійність, оптимальне використання енергоресурсів та стійку роботу підприємства в умовах нестабільного електропостачання.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання: проаналізовано сучасний стан електропостачання в Україні, досліджено технічні характеристики критичних електроприймачів, а також сформовано вимоги до їх електроживлення та показників надійності; проведено оцінку принципу побудови та роботи систем безперебійного живлення; розглянуті їх основні типи, режими функціонування, ефективність та потенціал інтеграції з відновлювальними джерелами енергії; проаналізовано можливості застосування сонячних електростанцій і систем накопичення енергії у структурі живлення критично важливих навантажень.

Ключові слова: енергоефективність, джерела безперебійного живлення, акумуляторна батарея, сонячна панель

THE SUMMARY

Tkachenko I. Energy-efficient power supply system for critical electrical receivers of an enterprise using uninterruptible power supplies and renewable energy sources.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics".
– "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2025

The purpose of the qualification work is to develop an energy-efficient power supply system for critical electrical consumers using uninterruptible power supplies and renewable energy sources, which ensures continuity of power supply, increased reliability, optimal use of energy resources and stable operation of the enterprise in conditions of unstable power supply.

To achieve the set goal, the following tasks were solved: the current state of power supply in Ukraine was analyzed, the technical characteristics of critical electrical consumers were studied, and the requirements for their power supply and reliability indicators were formed; the principle of construction and operation of uninterruptible power supply systems was assessed; their main types, operating modes, efficiency and potential for integration with renewable energy sources were considered; the possibilities of using solar power plants and energy storage systems in the power supply structure of critical loads were analyzed.

Keywords: energy efficiency, uninterruptible power supplies, battery, solar panel

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КРИТИЧНИХ СПОЖИВАЧІВ ПІДПРИЄМСТВ МАЛОГО БІЗНЕСУ В ОБЛАСТІ.....	13
1.1 Сучасний стан електроенергетичної системи України в умовах нестабільності	
1.2 Огляд сучасних підходів до забезпечення безперебійного живлення критичних навантажень підприємств	19
1.3 Аналіз технічних засобів для забезпечення безперервного живлення споживачів підприємства.....	21
1.4 Аналіз технічних засобів для забезпечення автономного живлення споживачів підприємства.....	27
1.5 Переваги та обмеження інтеграції системи ДБЖ із сонячними панелями.....	31
1.6 Сучасні побутові UPS: порівняльний огляд українських і міжнародних пропозицій.....	32
 РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КРИТИЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ПІДПРИЄМСТВА МАЛОГО БІЗНЕСУ КІРОВОГРАДСЬКОЇ ОБЛАСТІ	
2.1 Розрахунок електричного навантаження приватного підприємства малого бізнесу Кіровоградської області.....	37
2.2 Визначення раціонального кута встановлення фотомодулів для Кіровоградської області (м. Кропивницький).....	42
2.3 Можливості використання систем накопичення енергії (LiFePO ₄ , AGM, GEL)	43
2.4 Вибір конструкції автономної фотоелектричної установки	48

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КРИТИЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ПІДПРИЄМСТВА 53

3.1 Вибір типу сонячної панелі для підприємства.....	53
3.2 Вплив температури на характеристики сонячних панелей	59
3.3 . Створення моделі сонячної батареї у середовищі Simulink з використанням розділу SimPowerSystems.....	63
3.4 Баланс енергії фотоелектричної установки.....	66
3.5 Визначення робочої циклограми ємності акумуляторної батареї.....	72

РОЗДІЛ 4. ПИТАННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ОБЛАДНАННЯ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ

4.1 Нормативно-правові положення та стандарти, що регулюють роботу джерел безперебійного живлення в Україні.....	71
4.2. Особливості вибору і комплектності технічних засобів	74
4.3 Правила встановлення й розміщення джерел безперебійного живлення	75
4.4 Регламент запуску та перевірки працездатності ДБЖ.....	76
4.5 Технічне обслуговування джерел резервного живлення.....	81
4.6 Правила безпечної роботи з сонячними панелями.....	86

ВИСНОВКИ.....96

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....99

ДОДАТОК А.1.....	101
ДОДАТОК А.2.....	102
ДОДАТОК А.3.....	103
ДОДАТОК А.4.....	104
ДОДАТОК А.5.....	105
ДОДАТОК А.6.....	107
ДОДАТОК А.7.....	108

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ

ДБЖ – джерело безперебійного живлення

UPS (Uninterruptible Power Supply) – джерело безперебійного живлення

АБ – акумуляторна батарея

LiFePO₄ – літій-залізо-фосфатна акумуляторна батарея

VRLA – свинцево-кислотна герметизована акумуляторна батарея

MVA – мегавольт-ампер

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ЕЕ – електрична енергія

ЕП – електропостачання

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПБЕЕ – правила безпечної експлуатації електроустановок

ПУЕ – правила улаштування електроустановок

ІЕС – Міжнародна електротехнічна комісія

EN – Європейський стандарт

ТНД – коефіцієнт гармонічних спотворень

ІТ-система – система електропостачання з ізольованою нейтраллю

TN-S / TN-C-S – системи заземлення

ЕПБ – експлуатаційна безпека обладнання

ОП – охорона праці

ППБ – правила пожежної безпеки

АСКЕ – автоматизована система контролю енергії

Моніторинг ДБЖ – комплекс заходів контролю параметрів роботи UPS

ВСТУП

Сучасний стан енергетичної системи України характеризується високим рівнем нестабільності, що зумовлено наслідками повномасштабної військової агресії та цілеспрямованими атаками на об'єкти критичної інфраструктури. Ураження електростанцій, підстанцій, магістральних ліній електропередач і розподільчих мереж призвели до суттєвого порушення балансу виробництва й споживання електричної енергії. Унаслідок цього в країні фактично відсутній режим прогнозованого та безперебійного електропостачання, а зовнішні ризики енергозабезпечення набули системного характеру. Для промислових підприємств, об'єктів цивільного призначення та технологічно чутливих виробництв це створює критично важливу потребу у впровадженні локальних систем енергозабезпечення, здатних забезпечувати безперервне живлення навіть у разі повного знеструмлення зовнішніх мереж.

Починаючи з 2022 року, український бізнес, промислові підприємства та установи вимушено позбуваються залежності від центрального енергопостачання до практичної реалізації принципів енергонезалежності та диверсифікації джерел живлення. За три роки війни сформувався новий тренд: підприємства інвестують у резервне електроживлення, системи управління енергоспоживанням та власну генерацію, зокрема на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). До найбільш поширених рішень належать джерела безперебійного живлення (ДБЖ), сонячні електростанції (СЕС), гібридні інвертори, системи накопичення енергії на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторів, а також дизельні чи газові генератори для тривалих аварійних режимів. У сукупності це формує новий тип енергоефективних інженерних систем, орієнтованих на стійкість, автономність та оптимізацію споживання електроенергії.

Особливої уваги потребують критичні електроприймачі – обладнання, безперебійна робота якого визначає безпечне функціонування об'єкта, технологічний цикл виробництва або збереження даних. До цієї категорії належать серверні комплекси, системи зв'язку, автоматизовані лінії виробництва,

контрольно-вимірювальні системи, вентиляційні та охоронні комплекси, медичне обладнання та інші технологічно значущі навантаження. Раптове знеструмлення таких електроприймачів може призвести не лише до матеріальних збитків, але й до зупинки виробництва, втрати продукції, корупції даних або навіть загроз техногенного характеру.

В умовах підвищеної нестабільності енергосистеми питання забезпечення критичних навантажень надійним та енергоефективним живленням стає одним із ключових напрямів розвитку сучасної електротехніки. Традиційні підходи, що базуються на однотипних системах резервування або використанні лише автономних генераторів, вже не забезпечують необхідного рівня адаптивності. Сучасні рішення повинні одночасно враховувати кілька факторів: енергетичну безпеку, економічну ефективність, можливість інтеграції відновлювальних джерел, оптимізацію режимів навантаження та забезпечення високих показників енергоефективності. Саме тому особливого поширення набули системи ДБЖ у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії та системами накопичення енергії, що дозволяють формувати автономні або квазіавтономні комплекси електроживлення.

Поєднання ДБЖ із сонячними електростанціями та акумуляторними системами створює нову архітектуру живлення: у штатних умовах критичні електроприймачі отримують енергію від мережі чи від ВДЕ, надлишок енергії накопичується в батареях, а в разі відключення мережі ДБЖ забезпечує безперервне живлення без втрати якості електроенергії. Це дозволяє не лише гарантувати безпеку роботи обладнання, але й знизити пікові навантаження, оптимізувати витрати на електроенергію та суттєво підвищити загальну енергоефективність підприємства.

Крім того, впровадження систем на базі відновлювальних джерел енергії відповідає стратегічним національним цілям декарбонізації, розвитку розподіленої генерації та підвищення енергетичної стійкості України. Децентралізоване виробництво енергії зменшує залежність від вразливої магістральної інфраструктури та забезпечує підприємствам можливість

самостійно формувати надійні сценарії електроживлення. У поєднанні з сучасними системами керування та моніторингу енергоспоживання, такі рішення дозволяють досягти високого коефіцієнта корисного використання енергії, знизити втрати, а також раціонально управляти режимами роботи обладнання.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки комплексного підходу до побудови енергоефективної системи електроспоживання критичних електроприймачів, яка забезпечує:

- безперервність живлення за умов частих і тривалих аварій;
- оптимізацію використання ДБЖ та акумуляторних батарей;
- інтеграцію сонячної генерації у структуру живлення критичних навантажень;
- можливість роботи у різних режимах – резервному, автономному чи гібридному;
- мінімізацію втрат електроенергії та експлуатаційних витрат;
- підвищення загальної енергетичної стійкості підприємства.

У цьому контексті важливим є не лише технічний аналіз параметрів обладнання, але й розробка методів моделювання, оцінки ефективності, вибору оптимальної конфігурації елементів системи та визначення їх впливу на надійність і стійкість електроспоживання.

Таким чином, тема магістерської роботи має високу практичну значущість та відповідає сучасним викликам енергетичної безпеки України. Результати роботи можуть бути застосовані для модернізації систем енергозабезпечення підприємств, розробки індивідуальних рішень для критичних споживачів, підвищення надійності технологічних процесів, а також для формування енергоефективних та автономних систем електроживлення в умовах нестабільної роботи об'єднаної енергетичної системи України.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розробка енергоефективної системи електроспоживання критичних електроприймачів із використанням джерел безперебійного живлення та відновлювальних джерел енергії, яка забезпечує безперервність живлення, підвищену надійність, оптимальне

використання енергоресурсів та стійку роботу підприємства в умовах нестабільного електропостачання. Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан електропостачання в країні та визначити чинники нестабільності, що впливають на роботу промислових підприємств.

2. Дослідити характеристики та класифікацію критичних електроприймачів, визначити вимоги до їх електроживлення та показників надійності.

3. Оцінити принципи побудови систем безперебійного живлення (ДБЖ), їх типи, режими роботи, ефективність і можливості інтеграції з відновлювальними джерелами енергії.

4. Проаналізувати можливості використання сонячних електростанцій та систем накопичення енергії у структурі живлення критичних навантажень.

5. Розробити концептуальну схему енергоефективної системи електроспоживання, що поєднує ДБЖ, відновлювальні джерела енергії та систему керування енергопотоками.

6. Провести техніко-економічне обґрунтування запропонованої системи, визначити очікувану економію електроенергії, рівень автономності та підвищення надійності.

7. Розробити рекомендації щодо впровадження системи на підприємствах, включаючи вибір обладнання, режимів роботи та алгоритмів керування.

Об'єктом дослідження є системи електроспоживання критичних електроприймачів промислових та технологічних об'єктів.

Предметом дослідження є процеси та технічні рішення щодо забезпечення безперервного та енергоефективного живлення критичних електроприймачів шляхом інтеграції джерел безперебійного живлення, відновлювальних джерел енергії та систем накопичення енергії.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КРИТИЧНИХ СПОЖИВАЧІВ ПІДПРИЄМСТВ МАЛОГО БІЗНЕСУ В ОБЛАСТІ

1.1 Сучасний стан електроенергетичної системи України в умовах нестабільності

Електроенергетична система України (ОЕС) в останні роки зазнала безпрецедентного навантаження та руйнувань, що суттєво вплинуло на її стабільність, пропускну здатність і здатність забезпечувати споживачів електричною енергією. Ключовим чинником стало цілеспрямоване ураження об'єктів критичної інфраструктури внаслідок повномасштабної військової агресії, у результаті чого електростанції, підстанції, трансформаторні вузли та магістральні лінії електропередач регулярно виходять з ладу або працюють у режимах, близьких до граничних. Це створило ситуацію, коли електропостачання країни фактично втратило прогнозованість, а дефіцит електроенергії став системним явищем.

Нижче наведемо опис стану енергосистеми за звітними даними і оприлюдненими даними на кінець 2024 року [1]. Після початку повномасштабного вторгнення енергетична система нашої держави зазнала масштабних втрат, що суттєво вплинули на її структуру та можливості покривати внутрішні потреби. Загалом зруйновано (або тимчасово окуповано) близько 42% генерувальних потужностей, що створило один із найбільших дефіцитів виробництва електроенергії за всю історію незалежності. Найпотужнішим втраченим об'єктом залишається Запорізька атомна електростанція із встановленою потужністю близько 6 ГВт, яка є однією з ключових ланок національної ядерної генерації. Водночас найбільших критичних руйнувань зазнав сектор теплової енергетики: понад 87% вугільних ТЕЦ було виведено з експлуатації або втрачено без подальшої можливості їх відновлення. Значних пошкоджень в країні зазнала також й гідроенергетика – знищено чи істотно

пошкоджено близько 2,3 ГВт гідрогенерації, що суттєво послаблює гнучкість енергосистеми.

Не оминула агресія і відновлювальні джерела енергії. Пошкодження та окупація торкнулися приблизно 3,9 ГВт потужностей сонячних та вітрових електростанцій, що уповільнило розвиток «зеленої» генерації до 2022 року включно та позбавило енергосистему важливого сегмента розподіленого виробництва. Водночас ситуація у секторі ВДЕ є неоднорідною. Вітрова генерація загалом зазнала менших прямих руйнувань – відомі поодинокі випадки пожеж на вітротурбінах у Донецькій та Запорізькій областях, ушкодження трансформаторної підстанції в одній з ВЕС Херсонщини та окремі випадки уражень лопатей вітрогенераторів уламками або дронами в районі Очакова. Натомість сонячна генерація виявилася значно вразливішою, оскільки модулі займають великі площі й легко пошкоджуються навіть стрілецьким озброєнням, не кажучи про ракетні удари.

Показовою є ситуація у Харківській області, де фактично повністю знищено наземні СЕС загальною потужністю близько 28 МВт, а більшість дахових промислових СЕС зазнали критичних руйнувань: приблизно 6,3 МВт уже не підлягають відновленню, і лише близько 1 МВт продовжують функціонувати. Додатково значна частина сонячних електростанцій – до 1,2 ГВт – опинилася на тимчасово окупованих територіях, що робить їх участь у формуванні енергобалансу неможливою.

Якщо розглядати просторовий розподіл втрат, то найбільш постраждали регіони, розташовані поблизу лінії фронту. До початку активних бойових дій ці території відігравали роль енергетично профіцитних зон і забезпечували суттєву частку генерації. Наразі ж вони перетворилися на регіони з критичним дефіцитом електроенергії через руйнування основних генерувальних потужностей. Разом із тим, противник завдає ударів і по об'єктах, які розташовані у відносно віддалених від фронту областях, зокрема на Прикарпатті та Поділлі, що свідчить про системний характер атак на енергетичну інфраструктуру незалежно від її географічного розташування.

довоєнних 6,64 ГВт·год до приблизно 2,17 ГВт·год, а в період низької водності – до 1,2 ГВт·год. Нажаль, на сьогоднішній день немає звітних даних про реальний стан гідро генерації, але їх постійні обстріли продовжуються.

Аналогічна ситуація спостерігається у секторі відновлюваної енергетики. Із 6,23 ГВт промислових сонячних електростанцій більшість – понад 60% – опинилися на тимчасово окупованих територіях, а ще понад 1 ГВт потужностей пошкоджено у прифронтових регіонах. У кращі періоди ці СЕС здатні забезпечити до 2,2 ГВт·год у мережу, проте в осінньо-зимовий сезон генерація скорочується до сотень мегават-годин.

Вітрова енергетика також зазнала масштабних втрат. Із 1,9 ГВт встановленої потужності понад дві третини вітротурбін нині недоступні через окупацію або руйнування інфраструктури. У роботі залишаються лише окремі ВЕС в Одеській та Львівській областях загальною потужністю близько 370 МВт. Більшість великих вітропарків Запорізької та Миколаївської областей зупинені через руйнування ліній електропередач і підстанцій. Загалом відомо щонайменше про одинадцять зруйнованих або серйозно пошкоджених турбін, включно з випадками прямого влучання боєприпасів у вітрогенератори.

Критичних пошкоджень зазнає й інфраструктура магістральних електромереж та підстанцій НЕК «Укренерго» [1]. Ремонтні роботи, розпочаті ще у 2022–2023 роках для відновлення транзитних підстанцій і ключових ліній живлення, тривають і нині, оскільки обстріли не припиняються. Особливо вразливими залишаються дві високовольтні лінії 330 і 750 кВ, через які забезпечується життєдіяльність енергетичного обладнання Запорізької АЕС. Ці мережі регулярно зазнають пошкоджень, що ускладнює стабільне електропостачання прилеглих регіонів та створює додаткові ризики для енергосистеми.

Через все вище зазначене ОЕС України працює в умовах дефіциту резервів потужності, обмеженої гнучкості та обмежених можливостей перетоку електроенергії між регіонами. Додатковим фактором є значне зростання нерівномірності навантаження, особливо у зимові та пікові періоди споживання.

Вимушені аварійні та стабілізаційні відключення стали невід'ємною частиною роботи енергосистеми, що негативно впливає на промислові підприємствам в тому числі підприємств малої потужності, які критично залежать від безперервності електроживлення. Розрив між гарантованою та фактичною доступністю електроенергії перетворився на один із головних інфраструктурних ризиків країни.

У результаті посиленої загрози для енергосистеми починаючи з 2022 року і до сьогодні в країні суттєво збільшився обсяг екстрених перетоків електроенергії з сусідніх країн. Хоча інтеграція до європейської енергомережі стала стратегічним здобутком, вона не здатна повністю компенсувати втрати внутрішньої генерації. Експорт-імпортні можливості мають обмеження щодо потужності, а комерційні перетоки підпорядковуються технічним та безпековим умовам роботи системи. Це означає, що загальна стійкість української енергосистеми залишається вразливою.

Так, сьогодні є постійні масовані удари по підстанціях НЕК «Укренерго» та відкритих розподільчих пристроях АЕС, що вже призвели до посилення дефіциту електроенергії, зазначимо що поки тимчасового, на період аварійних перемикань та ремонтно-відновлювальних робіт. Наступний крок - енергосистема може розпастися на окремі «енергетичні острови». На сьогодні прикладом є місто Харків, де генерація на рівні громади або області забезпечує лише мінімальні власні потреби, що часто спричиняє тривалі відключення електроенергії. Ще один приклад: у зимовий період місто Київ споживає близько 1,1 ГВт·год електроенергії вдень і до 1,5 ГВт·год у ранкові та вечірні години, тоді як фактично наявна генерація здатна забезпечити лише близько 0,7 ГВт·год. Це призводить до тривалих графіків відключень, що сягати 10 - 12 годин на добу і навіть більше.

Особливо критичною є ситуація для підприємств, де технологічний цикл не допускає раптових зупинок, а також для об'єктів, де перерви в живленні можуть спричинити порушення безпеки, втрату інформації, вихід з ладу електронного обладнання або псування продукції. Традиційні схеми резервування

електроживлення, що базуються лише на використанні дизельних генераторів або резервних ліній, виявилися недостатніми. Генератори потребують часу на запуск, мають обмежені ресурси роботи, залежать від наявності палива та не забезпечують стабільності електричних параметрів. Резервні лінії живлення, у свою чергу, не можуть гарантувати надійність у ситуації, коли вся регіональна мережа перебуває під загрозою.

Водночас в Україні відбувається прискорений розвиток розподіленої генерації, що дозволяє частково компенсувати втрати централізованої. Підприємства масово впроваджують сонячні електростанції, гібридні інвертори, системи накопичення енергії та комплекси джерел безперебійного живлення великої потужності. За кілька років війни сформувалася тенденція до автономізації енергетики промислових об'єктів – від малого бізнесу до великих виробничих майданчиків.

Це призвело до появи нової моделі електропостачання, у якій підприємства:

- зменшують залежність від зовнішньої мережі;
- оптимізують власне енергоспоживання;
- використовують інтелектуальні системи керування потужністю;
- інтегрують відновлювальні джерела з ДБЖ та акумуляторними станціями;
- формують гібридні архітектури живлення критичних електроприймачів.

За таких умов питання забезпечення стабільної роботи критично важливих навантажень – серверних, систем зв'язку, технологічних ліній, насосних станцій, систем охорони та автоматики – стає одним із ключових аспектів енергетичної безпеки підприємств. Адже для цих споживачів навіть короточасні коливання напруги або частоти можуть спричинити серйозні наслідки: вихід обладнання з ладу, збій технологічних процесів, втрату даних, аварійні ситуації.

З огляду на це, сучасні умови роботи ОЕС України формують об'єктивну потребу у переході від традиційних моделей електроживлення до енергоефективних та автономних систем, здатних забезпечити безперебійність, високу якість електроенергії та адаптивність до зовнішніх умов. Енергетична криза, розв'язана війною, стала каталізатором для розвитку нових підходів до

проектування систем електропостачання – з фокусом на відновлювані джерела енергії, системи накопичення, інтелектуальні системи керування та високотехнологічні ДБЖ, що забезпечують стабільну роботу критичних електроприймачів.

1.2. Огляд сучасних підходів до забезпечення безперебійного живлення критичних навантажень підприємств

Електричні мережі загального призначення України з номінальною напругою 0,4 кВ характеризуються низьким рівнем надійності та нестабільною якістю електроенергії. Типові прояви цього включають значні коливання та відхилення напруги від номінального значення, асиметрію трифазної мережі, несинусоїдність електричного сигналу, наявність гармонічних спотворень та імпульсних перешкод [2]. Такі особливості мереж створюють серйозні ризики для сучасного обладнання, що відрізняється високою чутливістю до параметрів електроживлення.

Підключення до зазначених мереж комп'ютерної техніки, серверного обладнання, телекомунікаційних пристроїв, систем автоматизації технологічних процесів, а також обладнання систем безпеки та зв'язку пов'язане з підвищеною ймовірністю їх виходу з ладу та втрати критично важливої інформації [2]. Для державних установ та приватних підприємств це часто означає суттєві матеріальні та організаційні збитки, втрату даних і порушення безперервності бізнес-процесів.

Щоб мінімізувати ці ризики, на об'єктах застосовуються системи безперебійного електропостачання (СБЕ). Основне призначення таких систем – забезпечення споживачів необхідною кількістю та якістю електроенергії протягом визначеного часу у разі аварійного відключення основного джерела живлення [3]. СБЕ дозволяють підтримувати стабільну роботу критично важливого обладнання та запобігають втратам даних, збоїв технологічних процесів та перебоям у роботі систем безпеки.

В основі таких систем лежать джерела безперебійного живлення (ДБЖ) або резервні енергетичні агрегати, які поділяються на три основні категорії:

1. Аварійні системи живлення – призначені для короткочасного забезпечення електроживлення споживачів у момент виходу з ладу основної мережі. Їх завдання полягає у підтриманні роботи обладнання протягом часу, достатнього для безпечного його відключення або запуску резервного джерела. Вони не забезпечують безперервної роботи при тривалих відключеннях.

2. Резервні системи живлення – забезпечують живлення споживачів протягом більш тривалого часу після відключення основного джерела. Як правило, вони включають дизель-генератори або автономні акумуляторні установки, які запускаються автоматично та підтримують критично важливі електроприймачі на час відновлення основного електропостачання.

3. Безперебійні системи живлення (UPS, on-line) – забезпечують нульовий або практично нульовий час перемикання на резервне джерело, що особливо важливо для високочутливого обладнання, такого як сервери, телекомунікаційні вузли, системи охорони та керування технологічними процесами. Такі системи здатні підтримувати необхідні параметри напруги, частоти та синусоїдності сигналу протягом тривалого часу, поки основне джерело електропостачання не відновить роботу.

Вибір конкретного типу системи безперебійного живлення визначається технологічними вимогами обладнання, критичністю електроприймачів, техніко-економічним обґрунтуванням і фінансовим можливостям окремого підприємства. Для підприємств малого бізнесу, де особливо важлива безперервність роботи серверів, мережевого обладнання, систем охорони та технологічних ліній, оптимальним рішенням є комбіноване використання UPS та резервних генераторів, також з додатковою генерацією відновлюваних джерел енергії.

Завдяки впровадженню таких систем, організації отримують можливість підтримувати стабільну роботу критично важливих процесів навіть у випадку аварійних відключень, зменшувати ризики втрати даних і обладнання та підвищувати загальну надійність електропостачання.

1.3. Аналіз технічних засобів для забезпечення безперервного живлення споживачів підприємства

У системах безперебійного електропостачання основним елементом є джерело безперебійного живлення (ДБЖ) або агрегати резервного живлення (АРЖ), які поділяються на три основні типи: аварійні, резервні та безперебійні [3].

Якщо розглядати аварійні джерела живлення, то вони мають автоматично підключитися до споживачів у момент зникнення напруги в основній мережі, призначені для забезпечення безпеки обладнання, запобігають масовим аварійним ситуаціям, захищаючи техніку від пошкоджень.

В свою чергу, резервні системи живлення вводяться в роботу з метою підтримки електропостачання споживачів протягом певного проміжку часу, забезпечуючи необхідну якість електроенергії до відновлення основної мережі.

Так, безперебійні системи живлення (UPS) гарантують неперервну подачу електроенергії для підключених пристроїв незалежно від стану зовнішньої мережі. Такі системи здатні підтримувати стабільну напругу та частоту, захищаючи високочутливе обладнання від перебоїв і коливань.

Агрегати резервного живлення можуть відрізнятися за потужністю, складом обладнання, способом підключення до мережі, часом автономної роботи та схемою роботи [3]. У сучасних СБЕ застосовуються агрегати як з обертовими, так і зі статичними перетворювачами [3,8].

Перевагою агрегатів з обертовими перетворювачами є безперервність живлення, що забезпечується інерцією роторів електричних машин. Під час зупинки мережі на вихідних клеммах генератора напруга зберігається. Однак такі системи мають значні недоліки: складність обслуговування, великі масо-габаритні характеристики, шум та вібрації. Через це вони вважаються морально і фізично застарілими [3].

Розвиток напівпровідникової елементної бази, сучасних матеріалів та схемотехніки сприяв появі статичних перетворювачів у СБЕ. Вони значно відрізняються від електромашинних агрегатів за експлуатаційними та проектними

характеристиками, що дозволяє: зменшити масо-габаритні показники; знизити рівень шуму та вібрацій; підвищити ККД до 85% за рахунок зменшення втрат; створити систему безперебійного живлення з гарячим резервуванням без застосування електромеханічних перемикачів [3]. Саме тому статичні перетворювачі набули широкого застосування в сучасних СБЕ. Слід зазначити і недолік: низький вхідний коефіцієнт потужності.

За потужністю агрегати резервного живлення (АРЖ) зі статичними перетворювачами поділяють на три категорії: ДБЖ малої потужності – від 0,25 до 3 кВт; ДБЖ середньої потужності – від 3 до 10 кВт; ДБЖ великої потужності – від 10 до 800 кВт і більше. Розглянемо їх детальніше нижче.

Джерела безперебійного живлення малої встановленої потужності, які здебільшого використовують для підтримки роботи персональних комп'ютерів та офісного обладнання, оснащені акумуляторними батареями з ресурсом автономності приблизно 5 – 15 хвилин. Цього часу зазвичай достатньо, щоб користувачі встигли коректно завершити роботу системи та зберегти важливі дані у разі раптового зникнення напруги у зовнішній мережі. Такі моделі, як правило, не передбачають розширення або нарощування потужності, оскільки конструктивно орієнтовані на роботу з одиничними пристроями та невеликим навантаженням.

ДБЖ середнього класу можуть мати як однофазне, так і трифазне підключення на вході та виході, завдяки чому здатні забезпечувати стабільне електроживлення цілих груп устаткування або невеликих будівель. У таких системах допускається масштабування: потужність можна підвищувати шляхом додавання додаткових силових модулів, а тривалість автономної роботи — встановленням зовнішніх батарейних шаф або модулів підвищеної ємності. Частина таких рішень включає власні зарядні пристрої, що дозволяє оптимізувати час відновлення заряду після роботи в автономному режимі.

Трифазні високопродуктивні ДБЖ, з номінальною потужністю до кількох сотень кВА, використовуються у складі ізольованих систем електроживлення там, де критично важливо підтримувати роботу інфраструктури без жодних перерв.

Наприклад, вони застосовуються для живлення систем охолодження на телевізійних передавальних центрах, відповідальних серверних або інших об'єктів, де навіть короточасні збої можуть призвести до значних технічних чи фінансових втрат.

Зі збільшенням сумарної потужності ДБЖ зростають вимоги до всієї системи електроживлення як єдиного комплексу. У таких випадках резервні джерела, стабілізатори напруги, системи автоматики, комутаційні пристрої, заземлювальні контури, захисні апарати, фільтри гармонік, елементи моніторингу та сама мережа живлення мають розглядатися як частини однієї структури. Комплексний підхід є критично важливим, оскільки кінцевий результат – надійне та якісне живлення критичних споживачів – залежить від узгодженості роботи всіх компонентів. Правильно спроектована система гарантує, що вкладені кошти та ресурси забезпечать очікуваний рівень безпеки й безперервності електропостачання, а не будуть витрачені марно.

Позглянемо нижче агрегати резервного живлення зі статичними перетворювачами (АРЖ), що набули найбільше поширення: резервні (off-line), лінійно-інтерактивні (line-interactive) і активні (on-line, друга назва – з подвійним перетворенням (double-conversion)).

Основна ідея роботи off-line ДБЖ полягає в тому, що споживач з самого початку отримує живлення безпосередньо від зовнішньої електромережі. На рис. 1.2 покажемо принципову схему такого підключення джерела.

У штатному режимі комутаційний елемент знаходиться в першому положенні, тому навантаження живиться напряму від зовнішньої мережі. У цей час зарядний модуль підтримує акумуляторну батарею в оптимальному стані, періодично підзаряджаючи її, тоді як інвертор вимкнений або працює без навантаження.

Якщо виникає аварія в мережі або напруга виходить за допустимі межі, перемикач автоматично переходить у друге положення. У такому разі живлення споживачів забезпечується інвертором, який перетворює енергію, попередньо накопичену в акумуляторі.

До слабких місць цієї архітектури належать обмежені можливості стабілізації вихідної напруги та наявність паузи при перемиканні. Під час переходу з мережевого живлення на батарейне та назад відбувається короткочасний розрив живлення тривалістю близько 5 – 10 мс. Для персональних комп'ютерів такий інтервал зазвичай не становить загрози, однак високочутливі серверні системи можуть реагувати на нього збоями.

Додатковою проблемою є часті цикли перемикання в умовах нестабільних мереж, що характерно для української енергосистеми в період військової агресії. Кожен перехід з мережі на батарею та назад створює додаткове навантаження на акумулятори, що значно пришвидшує їх зношування та скорочує ресурс служби. У результаті власнику доводиться проводити заміну батарей набагато частіше, ніж передбачено нормативним строком експлуатації. Потужність таких ДБЖ 250 – 2000 ВА і широко використовуються, бо мають приємну вартість.

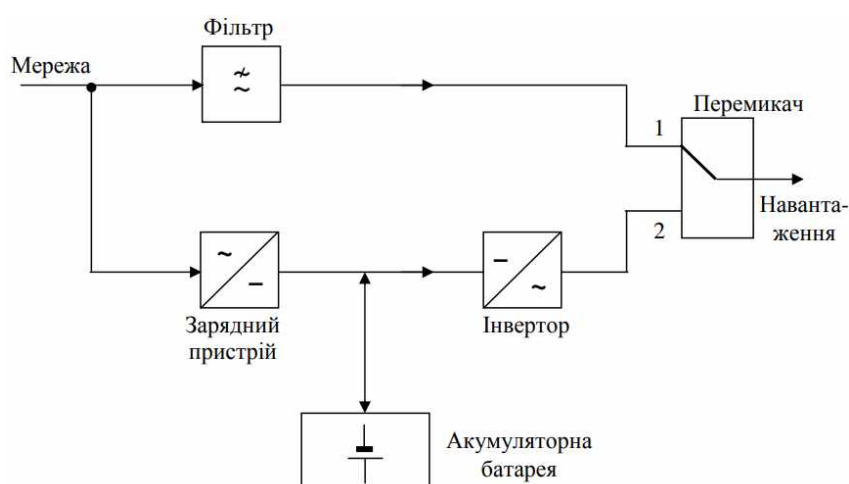


Рисунок 1.2 – Off-line ДБЖ структурна схема

Більш сучасною модифікацією off-line ДБЖ вважаються інтерактивні системи, у конструкцію яких додано стабілізатор вхідної напруги на базі автотрансформатора з перемиканням відпайок. Такий підхід дає змогу суттєво розширити діапазон робочих напруг, за яких пристрій не переходить на живлення від акумуляторів.

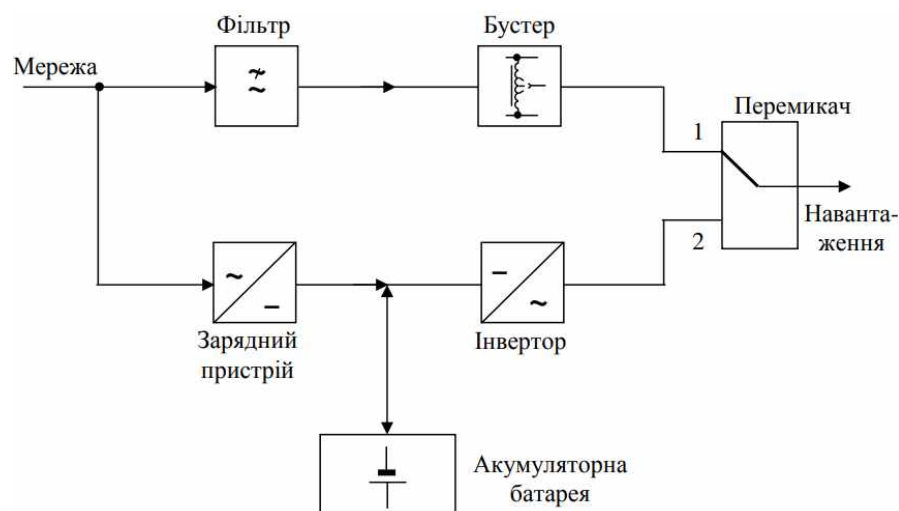


Рисунок 1.3 – Структурна схема line-interactive джерела безперебійного живлення

Принцип роботи таких line-interactive ДБЖ загалом подібний до off-line систем, однак ключовою відмінністю є наявність автотрансформаторного регулятора (бустера), який має автоматично підвищувати або знижувати напругу. Завдяки цьому пристрій може довше залишатися в мережевому режимі, не переходячи на акумуляторне живлення навіть за суттєвих коливань вхідної напруги. При повній втраті напруги в мережі такі ДБЖ, як і off-line моделі, переключаються на батареї. Проте вони зберігають базові недоліки попереднього класу – зокрема, наявність короткочасного розриву живлення під час перемикування між режимами.

Лінійно-інтерактивні системи потужністю 500 ВА – 5 кВА зазвичай використовуються в тих самих сферах, що й прості off-line ДБЖ, але менш чутливі до нестабільної напруги. Для них характерна ознака: допустимі відхилення частоти на вході та виході збігаються, що вказує на пряме живлення навантаження від мережі у штатному режимі.

Одним із варіантів line-interactive ДБЖ потужністю до 10 кВА є так звані гібридні джерела, які інколи також відносять до класу on-line. У цих системах вхідна змінна напруга спершу випрямляється до проміжного постійного рівня, після чого через інвертор подається на навантаження. Якщо живлення з мережі

зникає, інвертор автоматично переходить на роботу від акумуляторної батареї. Напруга батареї підвищується DC/DC-перетворювачем, який зазвичай знаходиться у стані постійної готовності («гарячому» резерві), і доводиться до необхідного рівня проміжної шини.

On-line ДБЖ, які також називають True on-line або «повністю подвійного перетворення», формують вихідну напругу самостійно, забезпечуючи її стабільність за частотою та рівнем (рис. 1.4). Робота таких систем ґрунтується на послідовному перетворенні енергії: мережевий змінний струм спочатку трансформується випрямлячем у постійний, що використовується для живлення інвертора та заряджання акумуляторів. Далі інвертор створює нову змінну напругу, яка й подається на навантаження, повністю ізолюючи його від коливань мережі.

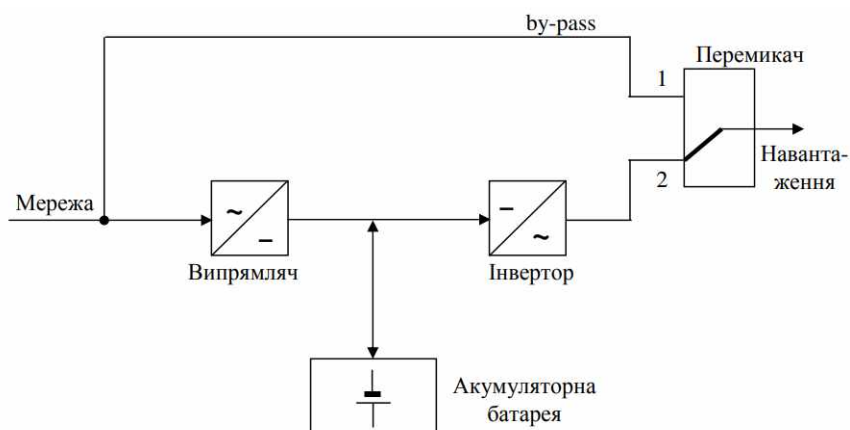


Рисунок 1.4 – On-line ДБЖ принципова схема

У штатному режимі роботи випрямляч забезпечує автоматичне підтримання заряду акумуляторної батареї. Коли мережна напруга зникає або виходить за допустимі межі, інвертор переходить на живлення від батареї, при цьому напруга на навантаженні залишається стабільною і не змінюється.

Сучасні схеми подвійного перетворення також передбачають режим обходу (by-pass). Він застосовується для подачі електроенергії безпосередньо від зовнішньої мережі у випадку виходу з ладу компонентів ДБЖ або перевантаження інвертора, що дозволяє уникнути перерв у живленні підключеного обладнання.

Номинальна потужність таких джерел коливається від кількох кВА до сотень кВА. У разі потреби on-line ДБЖ можуть працювати паралельно, що дозволяє збільшити загальну вихідну потужність або забезпечити резервування обладнання в межах системи.

В таблиця 1.1 нижче наведемо ДБЖ різних типів, де зазначимо різні ступені захисту для критичних електроспоживачів на прикладі комп'ютерної техніки.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця захистів ДБЖ за типами

<i>Можливі проблеми в мережі</i>	Типи ДБЖ		
	<i>Off-line</i>	<i>Line-interactive</i>	<i>on-line</i>
Зникла напруга мережі	Перебій в електропостачанні 5-10 мс	Перебій в електропостачанні 2-10 мс	Перебою немає
Сплески напруги	Не захищає	Частково захищає	Повністю захищає
Тривале підвищення (так же й тривале зниження) напруги	Не захищає	Повністю захищає	Повністю захищає
Нестабільна частота	Не захищає	Не захищає	Повністю захищає
Імпульсні перешкоди	Не захищає	Не захищає	Повністю захищає

1.4 Аналіз технічних засобів для забезпечення автономного живлення споживачів підприємства

Забезпечення безперервного живлення критично важливих електроприймачів є ключовою вимогою сучасних енергетичних систем, зокрема у промислових, адміністративних, медичних та ІТ-об'єктах. Традиційно резервування виконується за допомогою ДБЖ та акумуляторних батарей, однак зростання цін на електроенергію та актуальність декарбонізації стимулюють інтеграцію відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Одним із найбільш ефективних та поширених варіантів є застосування фотоелектричних модулів у поєднанні з інверторними системами та акумуляторними батареями (рис. 1.5).

Основні елементи такої станції зазначимо нижче. Фотоелектричні модулі перетворюють енергію сонячного випромінювання у постійний струм. Для забезпечення стабільного живлення споживачів і заряду АКБ вихід сонячних панелей підключається до інверторно-зарядного комплексу через контролер заряду. Отже: сонячні панелі (PV-модулі) – формують постійний струм залежно

від інсоляції; MPPT-контролер – оптимізує робочу точку панелей для максимальної генерації та керує зарядом акумуляторів; гібридний (або on-line інвертор) – забезпечує перетворення постійної напруги АКБ у стабільну змінну напругу для навантаження; акумуляторні батареї – гарантують резервування у разі зниження генерації або зникнення вхідної мережевої напруги; мережа (та/або генератора) – слугує джерелом живлення і у періоди недостатнього отримання сонячної енергії.

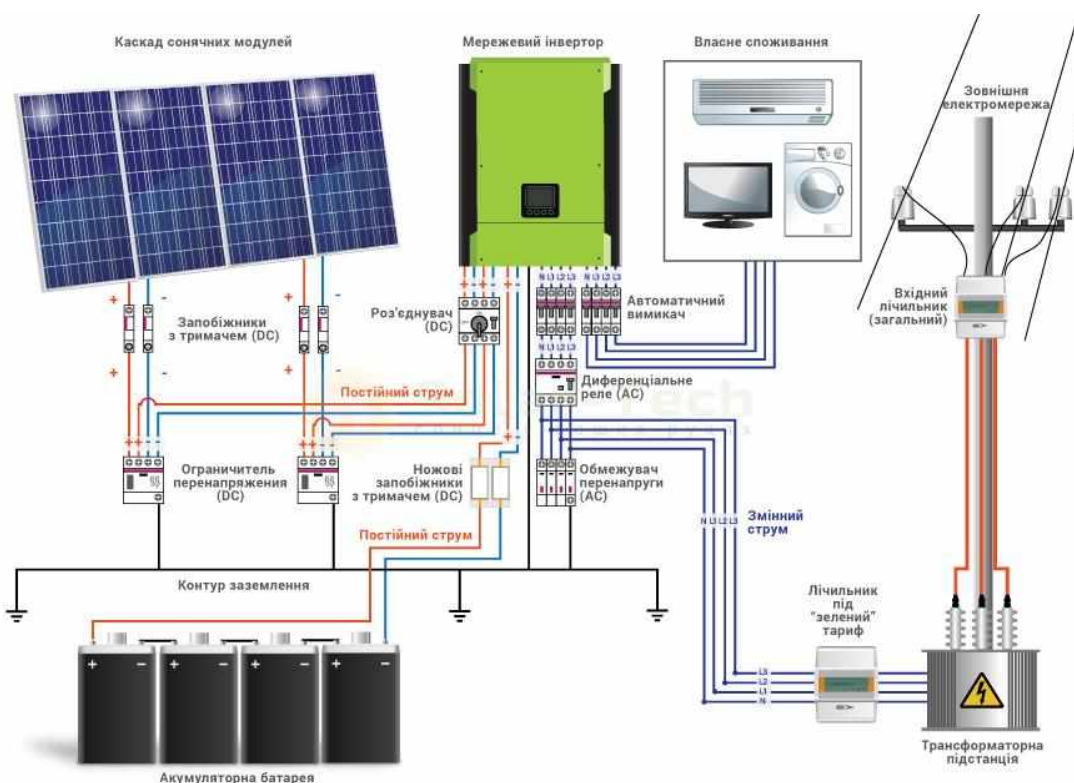


Рисунок 1.5 – Схема живлення підприємства на основі гібридної сонячної станції [5]

У нормальному режимі система працює наступним чином: при наявності сонячного випромінювання PV-модулі забезпечують живлення інвертора та одночасно заряджають АКБ через контролер. Навантаження живиться від інвертора, який формує напругу номінальної частоти та амплітуди. При недостатній потужності сонячних панелей – інвертор використовує комбіноване живлення (частина енергії надходить від панелей, решта – від акумуляторів або від зовнішньої мережі (в залежності від режиму роботи та пріоритетів)); при повній відсутності сонячного випромінювання – живлення критичних

електроприймачів переходить на акумулятори. При зниженні заряду до встановленого порогу система автоматично перемикається на зовнішню мережу або резервний генератор. І при зникненні напруги у мережі – гібридний (або on-line інвертор) миттєво переходить на живлення від АКБ, забезпечуючи нульовий час перемикавання, що особливо важливо для ІТ-обладнання, засобів автоматики та зв'язку.

За конструктивними особливостями та функціональним призначенням інверторні пристрої поділяють на кілька основних категорій: мережеві інвертори; автономні перетворювачі; гібридні системи та мережеві інвертори, інтегровані з накопичувачами енергії.

Найбільш поширеними в практичному застосуванні є саме мережеві моделі. Вони не передбачають підключення акумуляторних батарей і, відповідно, не здатні забезпечувати роботу споживачів у разі повного зникнення напруги в електромережі, наприклад під час аварійних ситуацій. Застосування таких інверторів доцільне там, де наявне стабільне централізоване електропостачання та планується підключення за «зеленим» тарифом або використання власної генерації для зменшення обсягу спожитої електроенергії. У випадках, коли обсяг виробленої фотоелектричної енергії перевищує потреби об'єкта, її надлишок автоматично передається в зовнішню мережу. ККД більшості мережевих інверторів сягає приблизно 96 %.

У разі підключення системи до «зеленого» тарифу надлишкова електроенергія, отримана від фотоелектричних модулів, автоматично передається до зовнішньої мережі. Якщо ж відбувається аварійне відключення централізованого живлення, інвертор цього типу переходить у режим автономної роботи й забезпечує живлення споживачів без участі мережі. Коефіцієнт корисної дії таких пристроїв зазвичай становить близько 95 %.

Нижче наведемо вимоги до інверторного обладнання, що використовується на виробничих об'єктах. Основні з них включають: відповідність потужності – інвертор має забезпечувати одночасне живлення всього технологічного та критичного обладнання, а також покривати пускові струми електродвигунів,

насосів і релейних пристроїв; має враховувати пускові і перевантажувальні режими, тобто повинен мати здатність короткочасно видавати потужність, що перевищує номінальну, забезпечуючи старт високоспоживчих агрегатів підприємства. Забезпечувати показники якості вихідної напруги – форма вихідної напруги має відповідати нормативним вимогам щодо мінімального рівня гармонічних спотворень, оскільки більшість електроприймачів є чутливими до параметрів сигналу. Інвертор повинен мати наскрізний нульовий провідник, тобто нульова шина навантаження повинна мати електричний зв'язок із нульовим виходом інвертора. Інвертор повинен має багаторівневий захист – обов'язковими є системи захисту від перенапруги, імпульсних стрибків та інших аномалій мережі. Повинен мати вбудовану систему стабілізації напруги – інвертор має утримувати стабільні 220 В, 50 Гц на виході незалежно від коливань напруги акумуляторних батарей, зокрема при її зниженні з номінальних 12 В до 10 В. Мінімальний час перемикання – перехід між живленням від мережі та акумуляторів повинен відбуватися за інтервал не більше ніж 5 мс.

Серед бажаних додаткових функцій варто виділити: інформативний дисплей, збільшену кількість вихідних розеток, програмований цифровий зарядний модуль з можливістю регулювання зарядного струму відповідно до ємності батарей. Також рекомендується наявність захисту від грозових імпульсів і системи обходу (байпасу) на випадок суттєвих коливань напруги в мережі.

То ж, застосування у системах критичного живлення сонячних панелей з інверторами, що можуть використовуватися для безперервного живлення наступних критичних електроспоживачів підприємства: серверних центрів та телекомунікацій; систем автоматизації та диспетчеризації; пожежної сигналізації та безпеки; життєво важливих споживачів адміністративних і виробничих будівель. Отже, комбінування PV-генерації з ДБЖ дозволяє створити енергонезалежну, надійну та гнучку систему живлення, що забезпечує стабільну роботу обладнання навіть за умов нестачі мережевої електроенергії.

1.5 Переваги та обмеження інтеграції системи ДБЖ із сонячними панелями

Стандартні джерела безперебійного живлення комплектуються акумуляторними батареями, що заряджаються від мережі та забезпечують резервне живлення під час аварій. У фотоенергетичних системах вироблена сонячними панелями електроенергія надходить спочатку на контролер заряду, а потім – на інвертор, який формує напругу, придатну для живлення електроспоживачів. Оскільки ДБЖ уже містить вбудований інвертор, його можна інтегрувати з ФЕУ без встановлення додаткового перетворювача, проте для коректної взаємодії необхідно передбачити низку додаткових компонентів. Першочерговим елементом є вибір фотоелектричних модулів. Більшість панелей розрахована на 12 – 24 В, однак їхня конфігурація повинна відповідати сумарному навантаженню та режимам роботи акумуляторної батареї. Для керування енергопотоками використовують контролери заряду, які оптимізують використання сонячної енергії, запобігають глибокому розряду й перезаряду АКБ. За умов значних споживчих навантажень доцільно застосовувати контролери типу МРРТ, здатні забезпечувати максимальний знімний струм із сонячних модулів.

Важливо також правильно підібрати кількість панелей – їх має бути достатньо як для заряджання акумуляторів та підтримання працездатності ДБЖ, так і для можливого резервного живлення частини будівлі.

Переваги поєднання ДБЖ із фотоелектричними панелями: хоча резервне живлення традиційно здійснюється від мережі, інтеграція ДБЖ з фотоенергетичною установкою дає низку переваг. Насамперед зменшуються витрати на електроенергію. Постійна підтримка заряду АКБ від мережі створює додаткові експлуатаційні витрати, тоді як після монтажу ФЕУ вироблена сонячна енергія практично не потребує коштів на одержання. Це забезпечує помітну економію протягом тривалого періоду експлуатації.

Сонячні панелі можуть забезпечувати додаткове живлення будівлі навіть за наявності мережевого електропостачання. Таким чином, зменшується

споживання електроенергії з мережі, а сам об'єкт скорочує власний вуглецевий слід за рахунок часткового переходу на відновлювальну генерацію.

У сучасних системах контролери заряду автоматично стежать за станом АКБ і забезпечують її постійний робочий ресурс, а надлишкову енергію спрямовують до навантаження. Це мінімізує втрати й підвищує загальну ефективність системи.

Отже, взаємодія ДБЖ із сонячними панелями дозволяє значно оптимізувати енергоспоживання, забезпечити екологічно сприятливе електроживлення та отримати фінансові переваги на довгостроковій основі.

Недоліки інтеграції ДБЖ із сонячною генерацією. Попри очевидні переваги, система має й певні обмеження. Найсуттєвішим недоліком є висока початкова вартість обладнання. Для повної інтеграції необхідно придбати сонячні модулі, контролер заряду та супутні компоненти, що потребує початкових інвестицій. Проте ці витрати частково компенсуються подальшим зменшенням платежів за електроенергію. Інше питання – потреба у виділенні площі для встановлення панелей. Фотоелектричні модулі займають значну частину покрівлі або території поряд із будівлею, а також вимагають окремого місця для розміщення АКБ. Це може бути критичним для об'єктів з обмеженою площею. Слід враховувати і те, що виробництво сонячних панелей супроводжується певним впливом на довкілля. Тому при виборі сонячної генерації як екологічної альтернативи важливо враховувати повний життєвий цикл обладнання.

1.6. Сучасні побутові UPS: порівняльний огляд українських і міжнародних пропозицій

Сучасні споживачі електроенергії потребують стабілізованої напруги промислової частоти, тому перетворення енергії від сонячних панелей та акумуляторних систем повинно забезпечувати стандартні параметри – мова про напругу 220 В та частоту 50 Гц. Вибір номінальної напруги для фотопанелей та акумуляторів здійснюється на основі низки технічних та експлуатаційних критеріїв. Один із ключових чинників – електрична безпека, яка погіршується зі

зростанням робочої напруги системи. Підвищення потенціалу в ланцюгах змінного або постійного струму збільшує вимоги до ізоляції, ускладнює конструкцію захисного обладнання, а також потребує застосування додаткових елементів контролю та діагностики.

Другий аспект стосується загальної надійності енергосистеми. У високовольтних схемах (особливо з робочими рівнями 150 – 220 В постійного струму) зростають вимоги до якості компонентів і одночасно зменшується довговічність окремих елементів через посилені електричні навантаження. Такі конфігурації стають більш чутливими до відмов інверторів, комутаційних пристроїв та силової електроніки.

Акумуляторні системи з великим числом послідовно з'єднаних елементів мають ще одну особливість: значний розкид напруги між осередками батареї. Навіть незначна різниця в характеристиках окремих елементів із часом призводить до неконтрольованого розбалансування, яке без системи активного балансування може спричинити прискорену деградацію або повну відмову батареї. Тому високовольтні АКБ потребують складних балансувальних контролерів, здатних працювати в широкому діапазоні температур та струмів.

У традиційних схемах з низьковольтними АКБ такі перетворювачі застосовують лише тоді, коли робочі параметри фотопанелі й акумулятора не збігаються або коли необхідно забезпечити максимальне відстеження точки максимальної потужності (MPPT). У разі близького співвідношення напруг застосування підвищувального контуру може бути недоцільним.

Подальший аналіз цієї структури передбачає порівняння декількох типів інверторних схем, оцінку їх енергетичної ефективності, визначення рівнів перехідних процесів, особливостей фільтрації та взаємодії з акумуляторними системами різних типів. Крім того, необхідно враховувати динаміку роботи АКБ при циклічних навантаженнях, особливості теплових режимів, поведінку батареї взимку та вплив температури на зарядно-розрядні характеристики.

У сумі ці параметри дозволяють сформувати оптимальну конфігурацію автономної фотоенергетичної установки, де баланс між безпекою,

енергоефективністю, складністю конструкції та вартістю матиме визначальне значення. Вибір номіналів напруг, типів силових елементів, контролерів та інверторів повинен ґрунтуватися на статистичних даних експлуатації, прогнозованому режимі навантаження, а також специфічних умовах встановлення.

У сучасних умовах зростаючої енергетичної нестабільності в Україні питання забезпечення безперебійного живлення для малого бізнесу набуло критичного значення. Постійні відключення електроенергії, обстріли енергетичної інфраструктури та загальна непередбачуваність роботи електромереж перетворили побутові джерела безперебійного живлення (UPS) із допоміжного обладнання на важливий інструмент виживання підприємств. Для малого бізнесу — торгових точок, майстерень, офісів послуг, невеликих виробничих ділянок — стабільність електроживлення означає можливість продовжувати роботу, зберігати продукцію, забезпечувати клієнтів і уникати економічних втрат. У цих умовах питання енергонезалежності стає важливішим, ніж розмір інвестицій, адже здатність підтримувати роботу бізнесу навіть кілька годин на добу часто визначає його життєздатність.

На ринку України представлені як локальні, так і міжнародні виробники, що пропонують широкий спектр побутових UPS — від бюджетних рішень для базового резервування до високотехнологічних гібридних систем із можливістю підключення сонячних панелей. Наявні моделі суттєво відрізняються за архітектурою перетворення енергії, типами акумуляторів, рівнем інтеграції з альтернативними джерелами живлення та масштабованістю. Українські бренди, зокрема LogicPower, пропонують доступні рішення, орієнтовані на простоту використання, ремонтпридатність та роботу зі свинцево-кислотними AGM/GEL акумуляторами. Такі системи є популярними серед підприємців завдяки мінімальній вартості впровадження та можливості швидкого розгортання у приміщеннях малого бізнесу.

Міжнародні виробники, такі як APC by Schneider Electric, Eaton, Powercom, Victron Energy, Huawei та MUST, зосереджуються на більш широкому спектрі

функцій: інтерактивна або подвійна схема перетворення, інтелектуальні алгоритми зарядження, можливість гарячої заміни батарей, гібридні режими роботи та віддалений моніторинг через хмарні сервіси. Для малого бізнесу це відкриває можливість більш гнучкого керування енергоспоживанням, оперативного реагування на проблеми та зменшення ризику простоїв.

Особливої уваги заслуговують гібридні UPS із підтримкою сонячних панелей (Victron EasySolar-II, MUST PH1100 PRO, Huawei SUN2000), які дозволяють частково або повністю компенсувати дефіцит електроенергії у денний час. За умов війни, коли відновлення інфраструктури може затягуватися, такі системи стають стратегічно важливими: вони забезпечують підприємцям автономність, знижують залежність від централізованої мережі та дають змогу скорочувати витрати на електроенергію.

Попит на енергонезалежність у малому бізнесі стимулює розвиток ринку UPS у напрямі модульності, масштабованості та підвищеної надійності. Підприємці дедалі частіше обирають моделі, що дають змогу нарощувати ємність батарейних блоків, підлаштовувати конфігурацію під потрібну тривалість резервування та оптимізувати роботу з нестабільними мережами. У цьому аспекті помітні переваги мають такі рішення, як Huawei LUNA2000 або Eaton 5P із можливістю гнучкого керування зарядом і оптимізованою роботою в широкому діапазоні вхідних напруг.

Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії. Пристрої на кшталт Victron EasySolar-II, MUST PH1100 PRO та Huawei SUN2000 оснащуються MPPT-трекерами, які забезпечують ефективне залучення фотогенерованої енергії. Завдяки цьому сонячні панелі можуть працювати одночасно як джерело живлення та як засіб заряджання акумуляторних модулів. Системи Victron і Huawei вирізняються високим рівнем синхронізації з сонячними масивами та здатністю автоматично оптимізувати розподіл виробленої енергії в режимі реального часу. Це сприяє зменшенню споживання з мережі та більш раціональному використанню наявних ресурсів.

Інтелектуальні засоби керування та віддалений моніторинг. Нове покоління ДБЖ, серед яких рішення Eaton 5P, Victron та Huawei, обладнане інформаційними дисплеями, мобільними застосунками і доступом до хмарних платформ. Подібна функціональність надає користувачу можливість оперативно відстежувати роботу системи, контролювати параметри енергоспоживання та отримувати сигнали про потенційні несправності. Це значно покращує експлуатаційні характеристики обладнання і підвищує загальну надійність енергопостачання.

Можливість гарячої заміни АКБ. У моделях APC, Eaton, Huawei та Powercom ONL передбачена підтримка зміни акумуляторних блоків без припинення подачі живлення. Така конструктивна особливість дозволяє проводити сервісні роботи без зупинки обладнання, що є критично важливим для об'єктів, де неприпустимі простої або втрата даних, особливо в умовах довготривалої нестабільності електромереж.

Захист від коливань у мережі. Вбудовані системи автоматичного регулювання напруги (AVR), реалізовані в пристроях Eaton, LogicPower та Powercom ONL, забезпечують стабільну роботу обладнання при значних перепадах вхідної напруги. Для українських умов, де електрична інфраструктура часто працює в режимі перенавантаження, така функція стає ключовою. Вона дозволяє гарантувати надійне живлення побутових та малих комерційних споживачів, мінімізуючи ризики виходу техніки з ладу через різкі стрибки напруги.

Таким чином, сучасний ринок побутових ДБЖ пропонує значну кількість технологічних рішень, що здатні підтримати роботу малого бізнесу в умовах тривалої енергетичної кризи. Головними факторами вибору стають автономність, надійність, сумісність із альтернативними джерелами та здатність пристрою забезпечити стабільне живлення за будь-яких обставин. В умовах війни UPS перестає бути елементом комфорту — це ключова інфраструктурна складова, яка дозволяє малим підприємствам продовжувати діяльність, зберігати конкурентоспроможність та робочі місця навіть у найскладніших ситуаціях.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КРИТИЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ПІДПРИЄМСТВА МАЛОГО БІЗНЕСУ КІРОВОГРАДСЬКОЇ ОБЛАСТІ

2.1 Розрахунок електричного навантаження приватного підприємства малого бізнесу Кіровоградської області

У даному дослідженні аналізується малий виставковий зал виробничого підприємства, що спеціалізується на випуску глазурованих шоколадних цукерок. Кондитерський сектор харчової галузі займає вагомє місце в економіці, оскільки забезпечує населення висококалорійною та добре засвоюваною продукцією. За останні п'ять–шість років спостерігається помітне розширення асортименту: збільшився обсяг виготовлення преміальних кондитерських виробів, таких як шоколадні вироби, різноманітні цукеркові групи, сухофрукти та горіхи в шоколадній глазури, грильяжні маси та сувенірні набори.

Функціонування досліджуваного цеху спрямоване на забезпечення міського населення різноманітною та якісною кондитерською продукцією. Електрозабезпечення здійснюється через міську трансформаторну підстанцію, до якої об'єкт під'єднаний кабельними лініями, прокладеними на відстані приблизно 600 м. Розташування підприємства за межами міської забудови має низку переваг. Серед них – зручна логістика доставки готової продукції, можливість поступового нарощування виробничих площ, забезпечення складів необхідною кількістю сировини та гнучкі умови для розвитку виробництва, можливість повної енергонезалежності. Водночас наявні й певні технічні обмеження: відсутність можливості збільшення виділеної електричної потужності, а також приєднання до централізованих систем газо- та теплопостачання. Для встановлення добового енергоспоживання цеху доцільно виокремити три основні групи навантажень: саме технологічне навантаження виробничої лінії; побутові споживачі; освітлювальні установки і сигналізація.

Подальший аналіз зосереджено на характеристиках технологічного обладнання, визначаємося з загальним навантаженням змінного струму за місяць, а також формуємо добовий баланс електроспоживання цеху.

Зазначимо детально лінію виробництва та вкажемо основне обладнання на підприємстві. Узагальнена лінія виробництва продукції цукеркової групи складається з етапів, рис. 2.1.

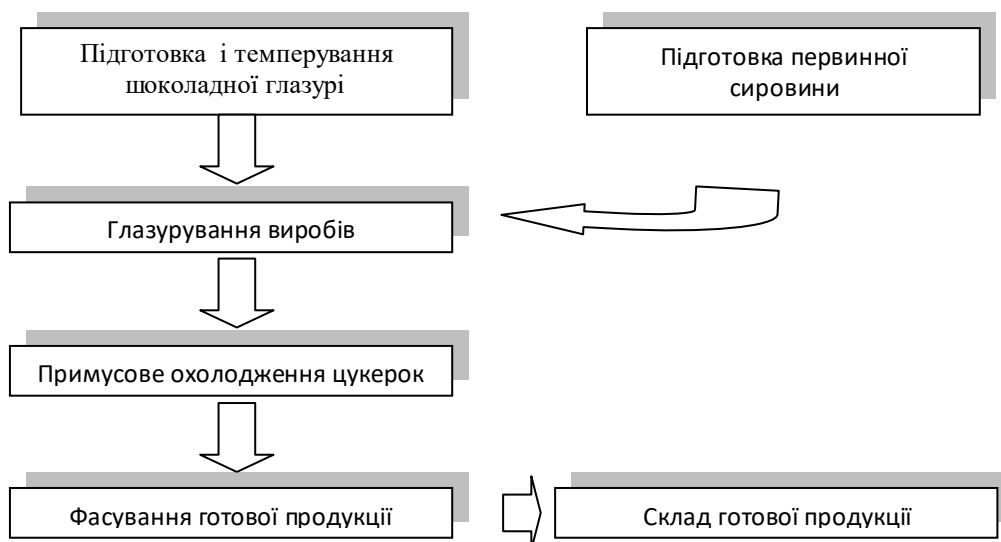


Рисунок 2.1 – Типова лінія виробництва цукерок та глазурованих виробів.

Одна виробнича лінія включає комплекс обладнання підвищеної енергетичної потужності. До її складу входить темперуюча машина типу ТМА-80, призначена для забезпечення безперервного циклу підготовки шоколадної маси, що включає плавлення, інтенсивне перемішування та подальше темперування глазури. Конструктивно апарат являє собою вертикальну камеру з водяною сорочкою та робочим органом, який здійснює безперервну механічну дію на шоколадну масу. Підігрів теплоносія у водяній оболонці здійснюється циркуляційним насосом, що забезпечує рівномірний температурний режим по всьому об'єму. У автоматизованому режимі матеріал проходить чотири послідовні стадії обробки: нагрівання вище температури плавлення різних фракцій кристалів (45 – 50 °С) з витримкою та рівномірним перемішуванням; різке зниження температури до 26 – 27 °С для ініціювання утворення стабільних

β-кристалів; подальше доведення маси до 28 – 29 °C із витримкою для розвитку правильної кристалічної структури; остаточний підігрів до 31 – 32 °C з метою усунення небажаних нестійких кристалічних форм. Такий режим забезпечує перехід какао-масла у стабільну модифікацію та попереджає виникнення характерного жирового нальоту на поверхні готової продукції.

До складу такої лінії ще входить обладнання для нанесення шоколадної глазури на різні види кондитерських виробів (горіхи, сухофрукти, карамелізовані суміші тощо). Підігрів маси у глазурувальному апараті здійснюється методом водяної бані. Робоча стрічка має ширину 800 мм, що дозволяє рівномірно розподіляти продукцію.

Ключовим елементом технологічної лінії є охолоджувальний тунель, який забезпечує стабілізацію глазури після нанесення покриття. Довжина тунелю становить 6,5 м, а транспортерна стрічка має ширину 800 мм. Охолодження виконується завдяки подачі холодного повітря, що циркулює у замкнутому контурі. Верхні модулі конструкції легко демонтуються для санітарного обслуговування.

Модифікована конструкція охолоджувального агрегата побудована на базі безперервних промислових систем, які функціонують без необхідності перерв на розморожування. Покращена система повітряної циркуляції в робочому відсіку забезпечує ефективність, співставну з тунелями довжиною 6 – 8 метрів. Агрегат містить дві окремі охолоджувальні секції, у яких застосовується двосторонній напрям примусових повітряних потоків. Зниження вологості у зоні охолодження сприяє оптимальній кристалізації шоколадного шару. Як холодоагент використовується фреон R-22.

У таблиці 2.1 наведено сумарне електроспоживання цеху за умови роботи чотирьох виробничих ліній. Розрахунки показують, що функціонування однієї лінії глазурування потребує 10,5 кВт встановленої потужності. Подальший аналіз деталізує структуру цього навантаження. І наведемо нижче добові графіки навантаження розглядаемого цеху, рис.2.2-2.4.

Таблиця 2.1 – Розрахунок сумарного електроспоживання цеху.

N	Найменування обладнання	P _н , кВт	N, шт	P, Вт	Q, вар	S, кВА	час, год /доб	W, кВт.год/ добу
Промислове навантаження цеху гразування								
	<i>Температор ТМА-80:</i>							
1	Потужність двигуна	0,37	4	1,48	0,37	1,53	4	5,92
2	Потужність електронагрівача	4,5	4	18	4,5	18,55	4	72
3	Глазурвальна машина	2,8	4	11,2	2,8	11,54	3	33,6
4	Охолоджувальний стіл	1	4	4	1	4,12	3	12
5	Насос	0,3	4	1,2	0,3	1,24	0,03	0,036
6	Бойлер	1,5	4	6	1,5	6,18	2	12
7	Всього	10,5		41,88	10,47	43,17	16,03	135,556
Побутове навантаження адміністрація								
1	Кавомашина	1	1	1	0,25	1,032	0,083	0,08
2	Холодильник	1,5	1	1,5	0,375	1,55	0,06	0,09
3	Комп'ютер	0,1	6	0,6	0,025	0,61	7	0,7
4	Вентилятор	0,15	1	0,15	0,038	0,16	5	0,75
5	Принтер+сканер	0,05	3	0,15	0,013	0,06	7	0,35
	Всього	2,8		2,8	0,7	2,89		1,97
Освітлювальне навантаження будівлі + сигналізація								
1.	Освітлення цеху	0,02	4	0,08	0,006	0,08	8	0,64
2.	Система сигналізації	0,012	2	0,024	0,006	0,02	1	0,024
3.	Освітлення адмінприміщення	0,012	2	0,024	0,006	0,02	0,02	0,0005
4.	Освітлення складу	0,012	2	0,024	0,110	0,11	0,02	0,0005
5.	Робоче освітлення цеху	0,024	20	0,48	0,132	0,50	8	3,84
6.	Аварійне освітлення цеху	0,096	6	0,576	0,278	0,64	12	6,912
	Всього освітл. нав.	0,176		1,208	0,54	1,38	29,04	11,42
	Всього по цеху	13,45		45,89		47,43	64,21	148,95

У режимі зниженого енергоспоживання функціонують лише ті інженерні системи, роботу яких неможливо замінити ручними операціями. До таких належать мережі сигналізації, насоси і обладнання для перекачування води, а також автоматизовані вузли систем опалення та холодного й гарячого водопостачання. Критична частина споживачів у цьому режимі може бути забезпечена енергією від сонячних панелей, акумуляторних станцій та джерел безперебійного живлення, що дозволить зменшити навантаження на основну електромережу та підвищити автономність об'єкта, не зупиняти виробничий процес і браку продукції.

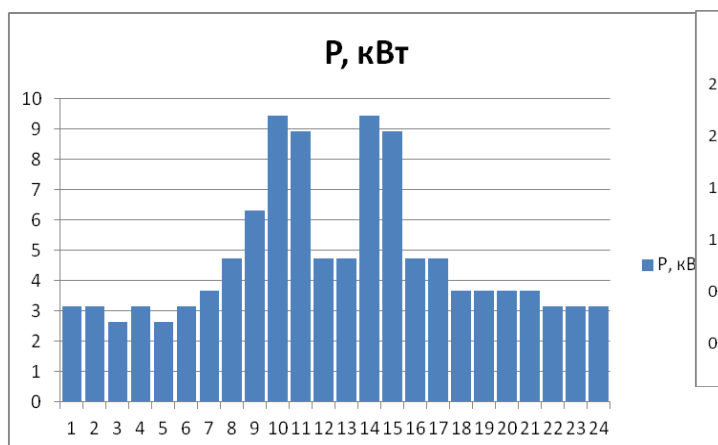


Рисунок 2.2 – Добовий графік електричного навантаження приватного кондитерського цеху в Кіровоградській області.

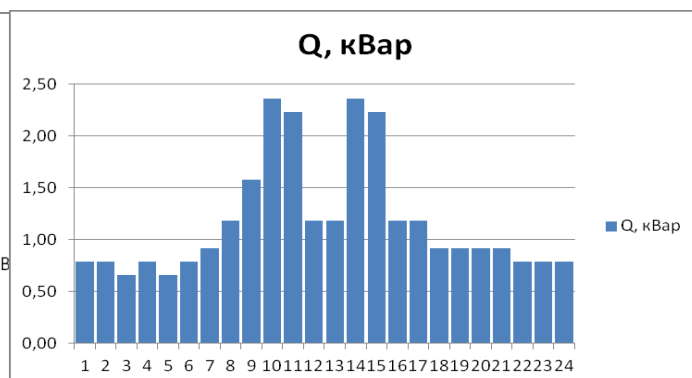


Рисунок 2.3 – Добовий графік реактивного навантаження приватного кондитерського цеху в Кіровоградській області.

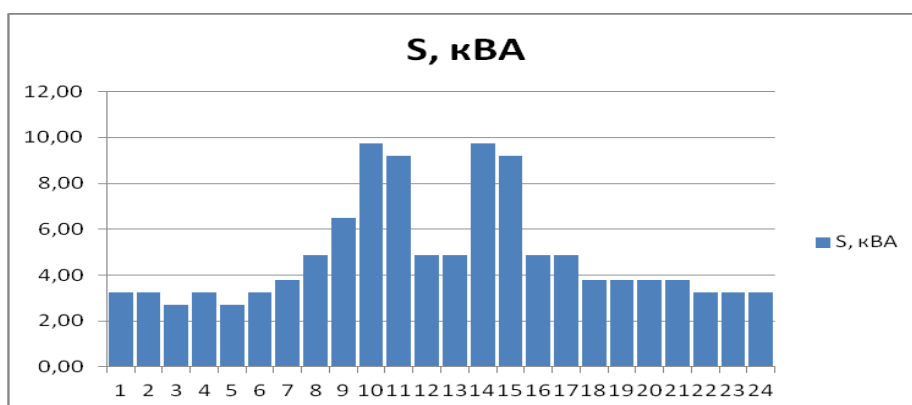


Рисунок 2.4 – Повне електричне навантаження приватного цеху глазурованих виробів.

На рисунках 2.2–2.4 подано добові криві активної, реактивної та повної електричної потужності для приватного виробництва глазурованих кондитерських виробів. Максимальні значення навантаження спостерігаються протягом двох годин у ранковий період (з 10:00 до 11:00) та у післяобідній час (з 14:00 до 15:00). Технологічний процес у цеху функціонує протягом усього календарного року без сезонних зупинок. Структура добового енергоспоживання в літній період практично ідентична зимовій. У вихідні дні виробнича діяльність не здійснюється.

Сумарна енергія в кіловат-годинах за нічні години: 3,8 кВт*год

Сумарна енергія в кіловат-годинах за день, відповідно 7,05 кВт*год

Сумарне електроспоживання за добу кондитерського цеху:

$$\sum W_{\text{доба}} = \sum W_{\text{день}} + \sum W_{\text{ніч}} = 7,05 + 3,8 = 10,85 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Середня потужність за ніч $P_{\text{сер.ніч}}$ кондитерського цеху:

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

Середня потужність за світловий день $P_{\text{сер.день}}$ кондитерського цеху:

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

2.2 Визначення раціонального кута встановлення фотомодулів для Кіровоградської області (м. Кропивницький)

Для забезпечення максимальної продуктивності фотоелектричних панелей необхідно орієнтувати їхню площину таким чином, щоб вона була якомога ближчою до перпендикулярної напрямку сонячного випромінювання. Оскільки положення Сонця змінюється протягом доби та року, кут падіння променів постійно варіюється. У роботі розглядається стаціонарна установка, змонтована на верхній частині будівлі, тому важливим є визначення такого постійного кута нахилу β , який забезпечуватиме найбільший річний енергетичний вихід для географічних координат міста Кропивницький (широта $48^{\circ}30.792' \text{ N}$, довгота $32^{\circ}15.582' \text{ E}$) [6]. На рис. 2.5 покажемо кут нахилу сонячного модуля, де СР – сонячна радіація.

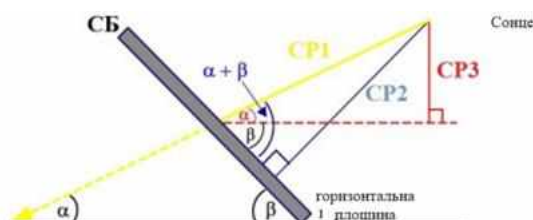


Рисунок 2.5 – Кут нахилу сонячного модуля.

При горизонтальному розміщенні модуля ($\beta = 0^\circ$) річний надходження сонячної енергії становитимуть $1861,7 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ [6]. Кут, що відповідає нахилу даху примыщення, дорівнює $\beta_{\text{кр}} = 40^\circ$, і за таких умов отримується $1906,01 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на рік. Такий ухил традиційно використовується як оптимальний з погляду захисту покрівлі від опадів. У випадку встановлення фотомодулів під кутом, близьким до широти місцевості ($\beta \approx 20,9^\circ$), річна інсоляція зростає до $1976 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Максимальне значення – $1978 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ – досягається при $\beta = 23^\circ$. Проте такий монтаж потребував би конструктивної зміни покрівлі, що зазвичай недоцільно. Водночас застосування кута $\beta = 40^\circ$ призводить до зменшення надходження сонячної енергії з березня по вересень приблизно на 3% порівняно з оптимальним значенням 23° . У літній період (травень – липень) відмічається додаткове падіння інсоляції на 19% через підвищену кількість опадів.

То ж, обґрунтовано доцільність встановлення сонячної електроустановки на покрівлі з існуючим кутом нахилу $\beta = 40^\circ$, що забезпечує річний енергетичний приріст у межах $1906,01 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ (рис.2.6).

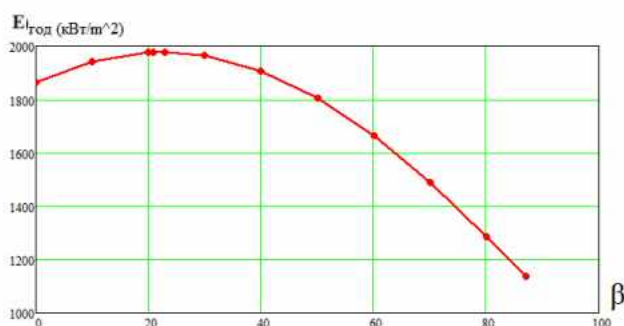


Рис. 2.6 – Сумарна річна енергія сонячної радіації в рік в залежності від кута нахилу на широті $48,30^\circ$.

2.3. Можливості використання систем накопичення енергії (LiFePO₄, AGM, GEL)

Акумуляторні батареї є ключовою складовою автономних та гібридних систем електроживлення, оскільки забезпечують накопичення енергії від фотоелектричних модулів та живлення критичних навантажень у періоди відсутності сонячної генерації або перебоїв мережі. Сучасна елементна база

дозволяє використовувати у СБЕ різні типи акумуляторів, кожен з яких має специфічні характеристики, експлуатаційні обмеження та область раціонального застосування.

Нижче розглянемо основні характеристики різних типів акумуляторних батарей у системах безперебійного живлення сонячних електростанцій.

Свинцево-кислотні акумулятори (Pb-Acid). Традиційні свинцево-кислотні батареї залишаються одним із найбільш доступних рішень для накопичення енергії завдяки низькій вартості та перевіреним технологіям. Вони демонструють стабільність при роботі у буферному режимі та здатні витримувати короткотривалі перевантаження, що робить їх сумісними з класичними ДБЖ. Водночас їх експлуатаційні характеристики істотно обмежують застосування у сучасних СЕС: ці акумулятори мають велику масу, займають значний простір і мають порівняно невеликий ресурс циклів, що призводить до швидкого зниження ємності при регулярних розрядах, характерних для сонячних систем. Крім того, глибокі цикли та коливання температури значно прискорюють деградацію пластин, що знижує загальну ефективність накопичення енергії.

Гелеві акумулятори (GEL, VRLA-GEL). Гелеві свинцево-кислотні акумулятори є модернізованою версією класичних Pb-Acid і відрізняються використанням загущеного електроліту, що забезпечує кращу стабільність роботи за тривалих циклів. Завдяки відсутності випаровування та мінімальному обслуговуванню вони добре пристосовані до використання у сонячних системах малого та середнього масштабу. Попри підвищену витривалість і кращу роботу в умовах частих циклів, їхній експлуатаційний ресурс все ж поступається літій-іонним технологіям. Для досягнення оптимального строку служби такі АКБ потребують точного дотримання параметрів зарядження від інвертора, а їхня вартість перевищує ціну традиційних свинцевих аналогів. Це обмежує їх застосування у великих автономних установках, хоча вони залишаються популярним рішенням у побутових СЕС.

Нікель-кадмієві акумулятори (NiCd). Нікель-кадмієві акумулятори характеризуються високою надійністю та стійкістю до глибоких розрядів, що дозволяє експлуатувати їх у складних температурних умовах, де інші типи швидко втрачають працездатність. Їхній життєвий цикл може сягати 15 – 20 років, що робить цю технологію придатною для критично важливих систем, де ключову роль відіграє безвідмовність.

Проте такі переваги супроводжуються низкою суттєвих обмежень: акумулятори мають виражений «ефект пам'яті», що знижує їхню корисну ємність при неповних циклах зарядження; вартість цієї технології досить висока; а також виникають екологічні ризики, пов'язані з токсичністю кадмію. Через це NiCd використовуються переважно у спеціалізованих промислових і військових об'єктах, а у побутових СЕС зустрічаються рідко.

Нікель-металгідридні акумулятори (NiMH). Нікель–металгідридні акумулятори стали екологічно безпечнішою альтернативою NiCd, адже не містять токсичних компонентів та демонструють вищу питому ємність. Вони менш схильні до “ефекту пам'яті” та можуть працювати у широкому діапазоні навантажень, однак висока швидкість саморозряду й чутливість до перегріву під час зарядження обмежують їх застосування у системах, що потребують великого енергоресурсу та тривалої автономності. Термін служби NiMH коротший порівняно з NiCd, а їх робота при інтенсивних циклах, властивих сонячній генерації, призводить до швидкого зношування. Тому такі АКБ майже не застосовуються в сучасних автономних енергетичних системах, хоча історично використовувалися у портативній техніці та ранніх гібридних автомобілях.

Літій-іонні акумулятори (Li-Ion, LiFePO₄, NMC). Літій-іонні технології є найбільш придатними для систем резервного та автономного живлення, що працюють із сонячними панелями. LiFePO₄ елементи демонструють значно більшу циклічну довговічність порівняно з традиційними свинцево-кислотними акумуляторами: ресурс таких батарей зазвичай перевищує 3000–6000 циклів при глибині розряду 80 %, що робить їх перспективним компонентом для систем безперебійного живлення, фотоелектричних установок та автономних об'єктів,

де надійність і стабільність мають ключове значення. Важливою перевагою є також високий ККД заряд–розряд, який у LiFePO_4 досягає 95 – 98 %, що сприяє підвищенню загальної ефективності ФЕУ. Крім того, LiFePO_4 –технологія характеризується підвищеною термічною стабільністю і низьким ризиком теплового розгону, завдяки чому такі батареї вважаються одним із найбезпечніших різновидів літєвих накопичувачів.

Такі акумулятори характеризуються малою масою, компактністю, стабільною напругою протягом розряду та здатністю швидко приймати заряд, що дозволяє ефективно накопичувати енергію в періоди пікової генерації СЕС.

Так, у сучасних гібридних та автономних системах електропостачання дедалі ширше застосовуються акумуляторні батареї на основі літій-залізо-фосфатної хімії (LiFePO_4). Їхня популярність зумовлена високою питомою енергетичною щільністю, збільшеним терміном служби та стабільними електротехнічними характеристиками в широкому діапазоні навантажень. Разом із тим, поряд з очевидними перевагами, LiFePO_4 –акумулятори мають і певні недоліки. Найвагомим фактором, що обмежує їх широке застосування у невеликих промислових установках, є висока вартість, яка суттєво перевищує ціну свинцево-кислотних аналогів. Також для роботи з такими батареями потрібна спеціалізована система керування BMS, що збільшує сумарну вартість і ускладнює інтеграцію в прості енергетичні схеми. З огляду на співвідношення «ціна/якість» для досліджуваного об'єкта доцільним є використання гелевої акумуляторної батареї, яка не потребує обслуговування, має достатню енергетичну щільність і забезпечує необхідну надійність при значно нижчих капітальних витратах. Попри вищу закупівельну вартість порівняно з іншими технологіями, загальна економічна доцільність літєвих АКБ є найвищою через довгий термін служби, мінімальні втрати енергії та відсутність необхідності у частій заміні. Єдиним критичним аспектом залишається вимога до наявності системи BMS, що захищає елементи від перевантаження, перегріву та глибокого розряду.

Таблиця 2.2 – Характеристики різних систем накопичення енергії

Тип батареї	Циклічний ресурс	Чутливість до температур	Ефективність	Обслуговування	Орієнтовна сфера застосування
Flooded Lead-Acid	низький–середній	висока	70–80%	потребує	резервні системи
AGM	середній	середня	80–90%	мінімальне	UPS, стартові навантаження
Gel	середній–високий	висока	85–90%	мінімальне	СЕС з щоденними циклами
NiCd	дуже високий	найкраща	65–80%	мінімальне	критичні об'єкти, екстремальні умови
NiMH	середній	чутлива	≈70%	низьке	автономна електроніка
Li-Ion	високий	середня	90–98%	не потребує	СЕС, промислові UPS
LiFePO ₄	дуже високий	висока	93–98%	не потребує	високоєфективні СБЕ

Як вище зазначено, у системах накопичення енергії для фотоелектричних установок найбільшого поширення набули свинцево-кислотні та гелеві акумуляторні батареї. З урахуванням режимів роботи об'єкта, первинної ціни капвкладень, а також вимог до безпеки, довговічності та стабільності параметрів, доцільним є використання саме гелевих АКБ. До їх характерних переваг належать підвищена циклічна стійкість, низький саморозряд, можливість тривалого зберігання в частково розрядженому стані, а також повна герметичність, що дозволяє розміщувати батареї практично в будь-якій орієнтації та у приміщеннях без спеціальних вентиляційних вимог. Гелеві акумулятори зберігають працездатність за глибоких розрядів, не потребують регулярного технічного обслуговування, не утворюють вибухонебезпечних газів та сумісні з чутливою електронною апаратурою. У сучасних умовах ця технологія широко застосовується в автономних системах живлення, електротранспорті та побутових ДБЖ, а її експлуатаційний ресурс перевищує 700 циклів зарядження-розрядження.

Попри вищу початкову вартість і більшу масу порівняно з традиційними свинцевими батареями, гелеві АКБ характеризуються економічно вигідним

співвідношенням вартості й ресурсу, забезпечують стабільні параметри у широкому температурному діапазоні та витримують високі струми зарядження без значної деградації. Обмеженням є необхідність точного контролю напруги зарядження, що вимагає використання інверторів і зарядних пристроїв з температурною компенсацією та функцією обмеження напруги (13,8–14,1 В при 20 °С).

Таким чином, гелевий акумулятор виступає економічно обґрунтованою альтернативою, яка дозволяє зменшити вартість ФЕУ без істотного погіршення експлуатаційних характеристик системи електропостачання. Отже, з огляду на сукупність експлуатаційних характеристик, надійність, простоту інтеграції та тривалий ресурс, у даній роботі для системи безперебійного живлення на базі сонячних панелей обрано гелеві акумуляторні батареї як оптимальний тип енергонакопичувача.

2.4 Вибір конструкції автономної фотоелектричної установки

Оскільки споживачам необхідне стандартне живлення 220 В із частотою 50 Гц, між акумуляторною батареєю та навантаженням застосовується інвертор – підвищувальний перетворювач напруги з вихідною напругою синусоїдальної форми. У нічний час він працює від заряду акумулятора, накопиченого вдень завдяки роботі сонячних панелей. Вибір робочої напруги фотоелектричних модулів та акумуляторної батареї визначається кількома ключовими факторами:

1. Електробезпека обладнання. Із підвищенням напруги збільшуються ризики пошкодження як АБ, так і СБ.
2. Забезпечення надійності системи. Високовольтні схеми на 220 В менш стійкі до відмов і вимагають більш складних захисних заходів.
3. Балансування елементів батареї. Акумуляторні збірки з великою напругою мають значний розкид параметрів між осередками й потребують складних схем вирівнювання.

4. Технологічна зрілість рішень. Найкраще вивченою та найбільш надійною конструкцією у низьковольтному діапазоні є герметизовані свинцеві батареї автомобільного типу (AGM або GEL) з робочим діапазоном напруги 10 – 14 В. Остаточний вибір напруги АБ і СБ буде уточнено після аналізу різних варіантів перетворення напруги від 10 до 220 В з формуванням синусоїдального вихідного сигналу.

На рис. 2.6 подано орієнтовну структурну схему фотоенергетичної установки, що включає еквівалентне джерело струму PV1 (модель сонячної панелі), акумуляторну батарею та інвертор із підвищувальним трансформатором TV. Заряд АБ розпочинається тоді, коли напруга фотоелементів, завдяки збільшенню освітленості, досягає рівня нижньої межі робочої напруги батареї (приблизно 10 – 12 В). Подальший розгляд схеми дозволяє встановити, чи є необхідність у застосуванні проміжного підвищувального перетворювача L2, VT3, VD6 між СБ та АБ.

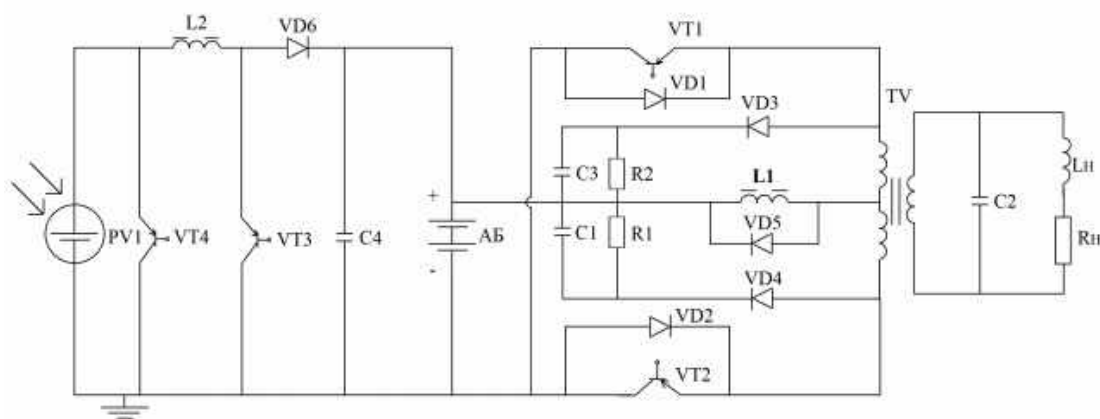


Рисунок 2.7 – Схема заміщення ФЕУ (СБ у вигляді керованого джерела струму PV1) і перетворювачем, що підвищує напругу сонячної батареї L2, VT3, VD6.

На рис. 2.7 показано, як енергетичні параметри компонентів ФЕУ можуть бути узгоджені з урахуванням зовнішніх умов для обраної місцевості. Тут представлені типові значення струму СБ $I_{СБ}$ (А), напруги СБ $U_{СБ}$ (В), коливань температури навколишнього середовища $T(^{\circ}\text{C})$, та потужності сонячного

випромінювання P_C ($\text{Вт} / \text{м}^2$) у залежності від часу доби [3]. Спостерігається, що нестача енергії від СБ виникає в ранкові години між 6 та 7, а також ввечері з 17 до 18, коли $U_{CB} < U_{AB}$. При цьому втрати енергії визначаються площею трикутників а та б на рис. 2.8.

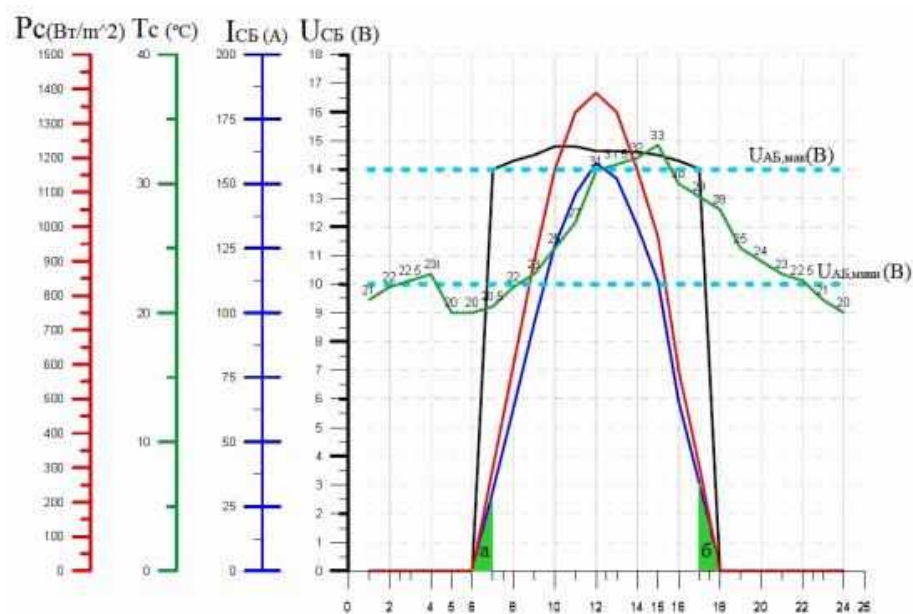


Рисунок 2.8 – Узгодження характеристик СБ з напругою АБ.

Максимальний заряд, що віддається СБ за час освітленості відповідно:

$$Q_{\max CB} = I_{cp, CB} \cdot t_c = 70 A \cdot 12 = 840 A \cdot \text{Год}$$

Розрахуємо втрати заряду Q_{Δ} , коли $U_{CB} < U_{AB}$, врахуємо за добу це відбувається два рази по одній годині.

$$\Delta Q_{\text{ранок}} = \frac{I_{\max, \Delta} \cdot t_{\Delta}}{2} = \frac{50 A \cdot 1 \text{ год}}{2} = 25 A \cdot \text{год} = \Delta Q_{\text{вечір}}$$

тут $I_{\max, \Delta}$ - максимальний струм СБ через 1 годину за початку освітлення, а

Δt - час, коли $U_{CB} < U_{AB}$.

Розрахуємо сумарну втрату заряду, із-за $U_{CB} < U_{AB}$:

$$\sum \Delta Q = \Delta Q_{\text{ранок}} + \Delta Q_{\text{вечір}} = 25 A \cdot \text{год} + 25 A \cdot \text{год} = 50 A \cdot \text{год}$$

Розрахуємо відносне значення втрати заряду без перетворювача

$$\zeta = \frac{\sum \Delta Q}{Q_{\text{макс.СБ}}} = \frac{50 A \cdot 200 \text{д}}{2472 A \cdot 200 \text{д}} = 0.02 = 2\%$$

де ζ - частка втрати ємності.

Через те, що втрати енергії складають лише близько 2 %, застосування підвищувального перетворювача не є доцільним. У подальших дослідженнях цей перетворювач не використовувався, оскільки розрахунки показали, що при ККД $\approx 0,8$ його наявність не забезпечує помітної економії енергії. Показано, що можливо створити ФЕУ без застосування перетворювача між СБ і АБ, що особливо актуально для досліджуваної місцевості.

Перетворювач на елементах L2, VT3, VD6 (рис. 2.6), призначений для підвищення напруги, має ККД близько 0,8. Його використання дозволяє підживлювати АБ у ранковий період з 6 до 7 годин та ввечері з 17 до 18 годин (рис. 2.7). Проте втрати в цьому перетворювачі порівнянні з додатковою енергією, що визначається площею трикутників а та б на рис. 2.7, тому обрано паралельне підключення СБ і АБ через діод VD6 з відмовою від L2 і VT3.

ФЕУ для невеликого промислового цеху, з урахуванням проведеного аналізу елементів, складається з первинного джерела – сонячної батареї (СБ) (рис. 2.9), розташованої на даху та орієнтованої на південь під кутом нахилу $\beta = 40^\circ$, акумулятора та системи керування і перетворення постійної напруги в змінну – інвертора. Метою дослідження було визначення оптимальних значень напруги АБ і СБ, а також типу перетворювача при фіксованих параметрах навантаження. Аналіз проводився для ФЕУ з напругою АБ і СБ у межах 14 – 220 В та інвертором, що формує змінну напругу 220 В із частотою 50 Гц. Захист АБ від перенапруги забезпечує окремий «блок захисту АБ».

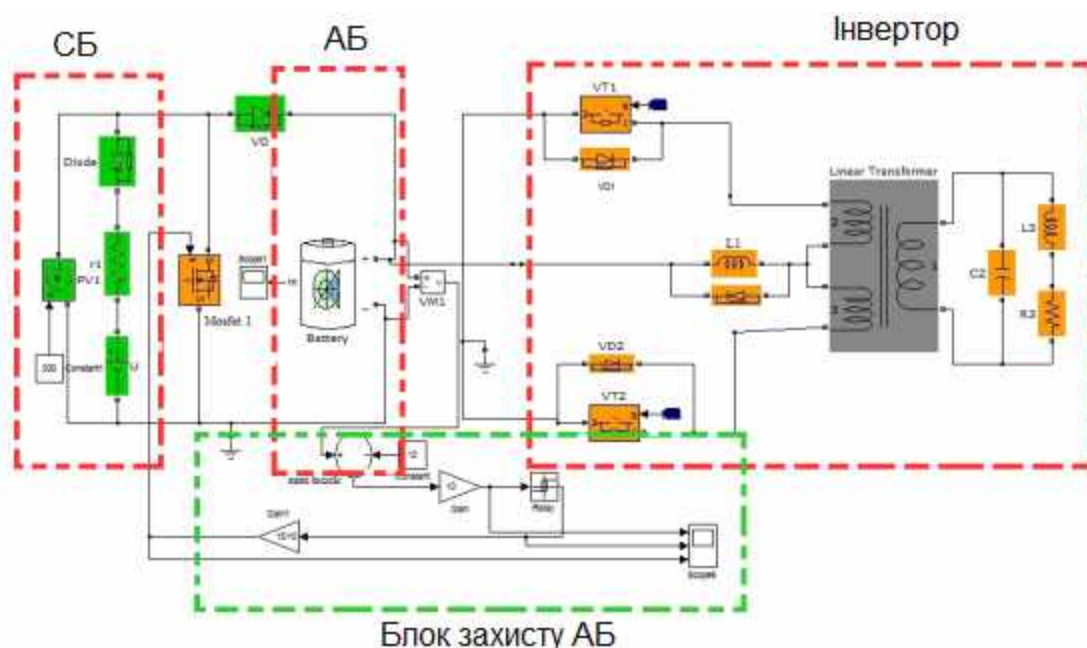


Рисунок 2.9 – Схема для дослідження ФЕУ в просторі Simulink.

Обрана конфігурація ФЕУ характеризується максимально простою схемою керування та захисту акумуляторної батареї без застосування підвищувального перетворювача між СБ та АБ. Хоча оптимальний кут нахилу СБ для максимальної річної генерації сонячної енергії становить $\beta = 23^\circ$, що забезпечує $1977 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на рік, на практиці батарея встановлена під кутом $\beta = 40^\circ$. Така орієнтація дозволяє отримати $1906 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на рік і додатково забезпечує захист панелей від атмосферних опадів. Показано, що функціонування ФЕУ без перетворювача напруги між СБ та АБ є технічно можливим та економічно обґрунтованим для досліджуваної місцевості.

На основі проведеного статистичного аналізу серед семи типів акумуляторів обрана гелева батарея, що не потребує обслуговування та має максимальну енергетичну щільність до $180 \text{ Вт}/\text{кг}$. Захист АБ від перенапруги реалізовано шляхом короткочасного замикання СБ, що забезпечує надійну експлуатацію системи та збереження ресурсів батареї без використання складних схем перетворення напруги.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КРИТИЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Вибір типу сонячної панелі для підприємства

Відповідно до даних [7], сформовано розширені табличні характеристики сонячних батарей, що дозволяють на основі статистичного аналізу здійснити обґрунтований вибір оптимальних типів фотомодулів для конкретних умов експлуатації. На підставі класифікаційних ознак усі фотоелектричні перетворювачі поділено на дві основні групи: перша включає кристалічні сонячні батареї, друга – тонкоплівкові модулі, що випускаються підприємствами України. Виробництво монокристалічних кремнієвих структур залишається технологічно складнішим та економічно затратнішим процесом, тому значна увага зосереджена на альтернативних напівпровідникових матеріалах, зокрема аморфному кремнію a-Si:H, арсеніді галію та полікристалічних сполуках.

Тонкоплівкові фотоелектричні елементи являють собою багат шарові структури, у яких активні шари мають товщину від кількох нанометрів до десятків мікрометрів. Залежно від технології виготовлення розрізняють декілька типів таких модулів: на основі кремнію (TF-Si), телуриду кадмію (CdTe), сполуки міді з індієм, галієм і селеном (CIGS/CuInGaSe₂), а також структур на базі діоксиду титану (TiO₂). Різноманітність матеріалів забезпечує широкий спектр електрофізичних параметрів, що дає можливість адаптувати СЕ під конкретні кліматичні та експлуатаційні умови.

Монокристалічний кремній (C-Si). Монокристалічні фотоелементи виготовляються на основі однорідної кремнієвої підкладки, що забезпечує високу рухливість носіїв заряду та одні з найкращих показників ККД серед комерційних технологій.

Вони демонструють високу стабільність параметрів та тривалий строк служби. Недоліками є відносно висока собівартість та помітне зменшення вихідної напруги при підвищенні температури.

Полікристалічний кремній (poly-Si). Полікристалічні модулі виготовляються з матеріалу, що містить багато взаємодіючих зерен кремнію. Їх ККД трохи нижчий, ніж у монокристалічних аналогів, проте технологія виробництва є дешевшою і менш енергомісткою. Полікристалічні панелі мають добрий баланс між ціною та продуктивністю, але гірше працюють при слабкому освітленні й високих температурах.

Аморфний кремній (a-Si / TF-Si). Аморфні тонкоплівкові елементи створюються шляхом нанесення дуже тонких шарів кремнію на скло, метал чи полімер. Вони мають низьку собівартість, краще працюють при дифузному освітленні та менше втрачають напругу при нагріванні. Проте їх ефективність значно нижча (6–10 %), а деградація параметрів у перші роки експлуатації є суттєвою (ефект Штеблера–Вронського).

Арсенід галію (GaAs / AsGa). Фотоелементи на основі арсеніду галію вирізняються надзвичайно високим ККД (до 29 %) та мінімальною залежністю параметрів від температури. Вони мають високу стійкість до радіації, тому широко застосовуються в аерокосмічних системах. Основний недолік — надзвичайно висока вартість та складна технологія виробництва, що обмежує використання у побутових ФЕУ.

CIGS (CuInGaSe₂). Сонячні елементи на основі сполуки міді, індію, галію та селену мають високий потенціал завдяки добрій роботі при слабкому освітленні та невеликій залежності від кута падіння променів. CIGS-модулі поєднують тонкоплівкову технологію з порівняно високим ККД (до 18 %). Недоліки — складний технологічний процес та дорожчі матеріали, ніж у CdTe.

Телурид кадмію (CdTe). CdTe-панелі є одними з найбільш економічних тонкоплівкових рішень, мають стабільні ВАХ, добру поведінку в умовах високих температур та найнижчу собівартість серед комерційних технологій. Їх ефективність нижча, ніж у кристалічних СЕ, проте вони демонструють кращі

характеристики при реальних умовах освітлення. Головний недолік — екологічні обмеження, пов'язані з використанням токсичного кадмію.

Нижче наведено узагальнену таблицю вольт-амперних характеристик (ВАХ) поширених типів сонячних панелей на рис. 3.1, подані в єдиному масштабі для порівняльного аналізу їх ефективності та працездатності. У вигляді табл. 3.1. представимо ці данні для різних типів сонячних панелей для окремих видів.

Таблиця 3.1. Вольт-амперні характеристики для різних типів СБ

Тип СЕ	Напруга холостого ходу U_{oc} , В	Струм короткого замикання I_{sc} , А	Робоча напруга U_{mp} , В	Робочий струм I_{mp} , А	ККД, %	Температурний коефіцієнт по U_{oc} , $\%/^{\circ}\text{C}$
Monocrystalline C-Si	0,60–0,65	8,0–9,5	0,50–0,55	7,5–9,0	18–22	–0,30...–0,35
Polycrystalline poly-Si	0,58–0,62	7,5–9,0	0,48–0,53	7,0–8,5	15–18	–0,35...–0,40
Amorphous a-Si (TF-Si)	0,85–0,90	1,2–1,6	0,70–0,75	1,0–1,3	6–10	–0,18...–0,20
Gallium Arsenide GaAs (AsGa)	1,00–1,10	0,3–0,6	0,85–0,95	0,25–0,55	25–29	–0,15...–0,18
CIGS (CuInGaSe ₂)	0,60–0,72	7,0–9,0	0,50–0,60	6,5–8,5	12–18	–0,28...–0,30
CdTe	0,80–0,88	4,5–5,5	0,65–0,70	4,0–5,0	10–13	–0,25...–0,28

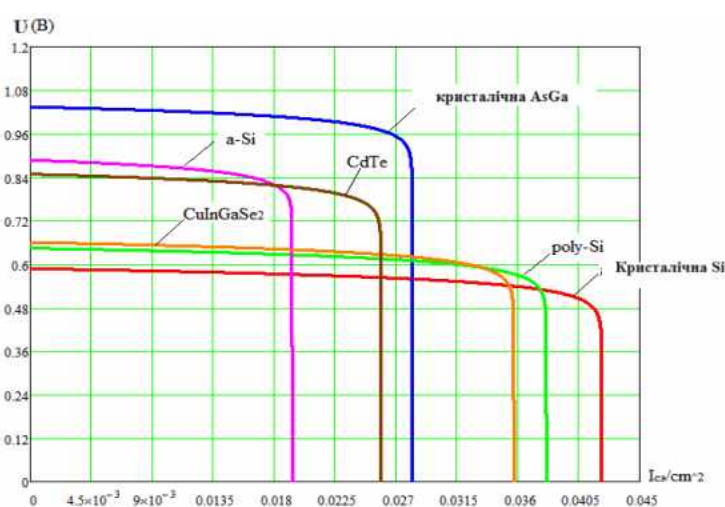


Рисунок 3.1 – Вольт-амперні характеристики для різних типів СБ.

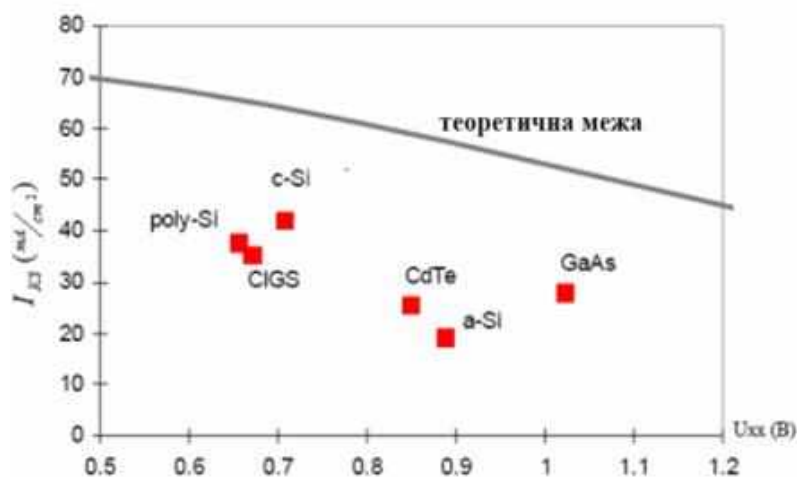


Рисунок 3.2 – Теоретична межа питомої КЗ сонячного елемента.

Аналіз числових даних, поданих у таблиці 3.1, свідчить, що найвищу енергетичну ефективність демонструють сонячні панелі на основі монокристалічного кремнію (C-Si) та арсеніду галію (AsGa). Хоча СЕ з арсеніду галію характеризуються кращими параметрами, їхнє промислове виготовлення є значно дорожчим і виконується переважно під індивідуальні потреби. З огляду на це, для розроблюваної фотоенергетичної установки раціональним є застосування кристалічних кремнієвих панелей типу C-Si як оптимального компромісу між ефективністю та вартістю.

Коефіцієнт заповнення (Fill Factor, FF) є важливим показником, що визначає якість фотоелектричного перетворювача. Він описує співвідношення максимальної електричної потужності до добутку струму короткого замикання та напруги холостого ходу. Високе значення FF відображає мінімальні втрати в елементі, зумовлені внутрішніми послідовними та паралельними опорами. Для сучасних комерційних СБ характерні значення FF понад 0,70, тоді як для панелей бюджетного класу цей показник зазвичай лежить у межах 0,40–0,70. Підвищений коефіцієнт заповнення безпосередньо свідчить про більш ефективне використання фотогенерованої енергії та покращену якість фотоелектричної структури.

На рисунку 3.3 наведені типові залежності вихідного струму та потужності сонячного елемента від прикладеної напруги, що дозволяє наочно оцінити робочу точку та особливості енергетичних характеристик СЕ різних типів.

На рис. 3.3 показана вольт-амперна характеристика потужності СЕ, де $P = I_{CE} \cdot U_{CE}$, що має генеруватись при зміні вихідної напруги від U_{xx} до 0. З цієї характеристики можемо отримати, що всього 1 точка С – максимальна генерована потужність з найбільшим значенням P_{max} . Це є оптимально робоча точка ВАХ СЕ, а напруга і струм в цій точці – відповідно оптимальна напруга і оптимальний струм. При початковому проектуванні кожної автономної ФЕУ маємо забезпечити роботу СБ в цій точці.

$$\zeta = \frac{I_{\text{ОПГ}} \cdot U_{\text{ОПГ}}}{I_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{XX}}} = k_i \cdot k_u \quad (3.1)$$

Для сонячних панелей на основі арсеніду галію (AsGa) характерні високі значення коефіцієнта заповнення, які зазвичай лежать у межах $\zeta = 0,75 - 0,89$. Для вибраних модулів з кристалічного кремнію (С-Si) цей показник становить $\zeta = 0,80 - 0,84$, і саме ці значення надалі враховуються під час розрахунків енергетичних параметрів.

Під ефективністю фотоелектричного перетворювача розуміють співвідношення між електричною потужністю, отриманою від сонячного елемента, та енергією сонячного випромінювання, що падає на його поверхню. На величину ККД суттєво впливають спектральний склад сонячного світла, його інтенсивність, а також робоча температура напівпровідникової структури. Для коректного порівняння різних типів сонячних елементів їх тестують за єдиними еталонними умовами. Наземні модулі оцінюють при стандарті повітряних мас АМ1.5 та температурі 25 °С, що відповідає середнім географічним широтам із кутом підняття Сонця приблизно 41°49'.

Слід зазначити, що реальна продуктивність сонячного модуля завжди дещо нижча за ефективність окремого фотоелемента. Це спричинено додатковими втратами, пов'язаними з відбиттям світла захисним склом, затіненням частини

поверхні струмознімними шинами, нагріванням панелі, а також впливом рамки та конструктивних елементів. Унаслідок цього ККД готової панелі зазвичай на 1–3% менший, ніж ефективність окремого СЕ.

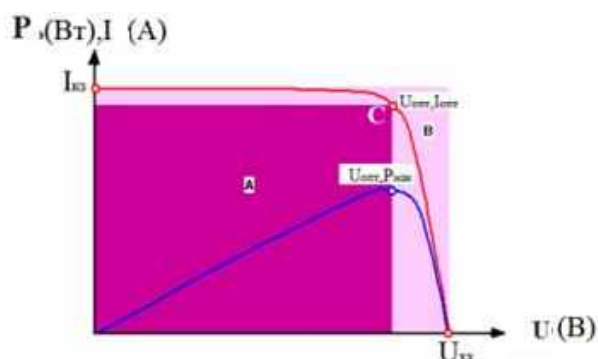


Рисунок 3.3 – Вольт-амперная характеристика сонячної панелі та її потужність

Значення коефіцієнта корисної дії для основних типів сонячних батарей подано у таблиці 3.2 [8]. Наявність широкого спектра конструкцій та технологій виготовлення фотоелектричних модулів дає змогу обґрунтовано обрати варіант, що найповніше відповідає умовам експлуатації. Під час вибору враховуються такі критерії, як вартість, тривалість експлуатації, енергетична ефективність та фактична доступність відповідних панелей на ринку.

Серед представлених технологій максимальний ККД забезпечують арсенід-галієві модулі AsGa, однак їхня надмірна вартість та обмежена доступність роблять їх менш придатними для наземних ФЕУ. Оптимальним рішенням для промислових та побутових систем вважаються монокристалічні С-Si панелі, які поєднують високу ефективність, надійну експлуатацію та економічну доцільність.

Тонкоплівкові модулі (a-Si, CIGS, CdTe) мають нижчий ККД, проте можуть бути корисними в умовах дифузного освітлення та при обмеженнях по вазі або форм-фактору. Полікристалічні модулі займають проміжне положення між ефективністю та вартістю.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнт корисної дії для різних типів СБ.

Тип СБ	Орієнтовний ККД, %	Характеристика
Монокристалічний кремній (C-Si)	18–22%	Висока ефективність, стабільність параметрів, тривалий ресурс, домінуюча технологія на ринку.
Полікристалічний кремній (poly-Si)	15–18%	Менш ефективні, але дешевші та технологічно простіші у виробництві.
Арсенід галію (AsGa)	24–30%	Один із найвищих ККД серед комерційних технологій; застосовується переважно в космічній техніці та потужних гібридних системах; дуже висока ціна.
Аморфний кремній (a-Si)	6–9%	Низький ККД, проте хороша робота при низькій освітленості та високій температурі; найдешевша технологія.
CIGS (CuInGaSe ₂)	13–16%	Тонкоплівкова технологія з відносно високим ККД і гнучкими форм-факторами.
CdTe (телурид кадмію)	10–12%	Дешева тонкоплівкова технологія з доброю роботою при розсіяному світлі, але екологічні обмеження щодо кадмію.

3.2. Вплив температури на характеристикисонячних панелей

Основна характеристика сонячного елемента (СЕ) у робочому режимі полягає в залежності його електричної потужності від зовнішніх умов, температури та інтенсивності фотоструму, струм I_{CE} елемента лінійно пропорційний інтенсивності світлового потоку:

$$I_{CE} = I_{\phi} - I_{\delta} (e^{\frac{qU_{CE}}{\kappa T}} - 1), \quad (3.2)$$

де I_{ϕ} - світловий струм, I_{δ} - струм насичення, q - заряд електрону $q = 1.60217646 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, κ - постійна Больцмана $k = 1.3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, T - абсолютна температура, К.

Згідно з [9], при кімнатній температурі $T = 293 \text{ K}$ напруга СЕ зростає логарифмічно зі збільшенням фотоструму. Вольт-амперну характеристику елемента можна визначити за формулою вище, яка показує залежність напруги від фотоструму, струму насичення та температури. Струм насичення визначається рекомбінацією носіїв заряду. Для високоякісних кремнієвих СЕ напруга холостого ходу досягає 730 мВ, а для полікристалічних елементів у

мультіпрозорому корпусі – близько 600 мВ. Ця величина використовується при моделюванні СЕ.

$$U_{CE} = \frac{\kappa \cdot T}{q} \ln\left(\frac{I_{\phi} - I_{c3}}{I_{\delta}}\right) + 1. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.4) відображає залежність напруги СЕ від фотоструму, струму насичення та температури. Для високоякісних кремнієвих СЕ напруга холостого ходу досягає 730 мВ, тоді як для стандартних полікристалічних елементів у мультіпрозорому корпусі вона становить близько 600 мВ. Деякі значення використовується далі при моделюванні СЕ. Фотострум залежить від температури та рівня освітленості:

$$I_{\phi} = (I_{\phi.n.} + K_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_n}, \quad (3.4)$$

де $\Delta T = T - T_n$, T – поточна температура, T_n – це номінальна температура 25⁰С. K_i – це температурний струмовий коефіцієнт, G – освітлення від Сонця, G_n – це номінальне освітлення $p_c = 1000 \text{ Bm}/\text{m}^2$. I_{ϕ} – номінальний фотострум при температурі 25⁰С і при G_n .

Згідно з [10] можна розрахувати діодний струм сонячної панелі I_{δ} при залежності від температури за наступним виразом:

$$I_{\delta} = I_{\delta.n.} \cdot \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left[\frac{q \cdot \Delta W}{a \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (3.5)$$

тут $\Delta W = 1$, $2e$ – енергія, що відповідає ширині забороненої зони, a – деякий параметр, що узгоджує з реальними характеристиками сонячної панелі і він рівний 1.3, а $I_{\delta.n.}$ – номінальний діодний струм. Значення цього струму:

$$I_{\delta.n.} = \frac{I_{к.з.СБ,н}}{\exp\left(\frac{U_{xxСБ,н}}{aV_{t,н}}\right) - 1}, \quad (3.6)$$

У формулі 3.6 U_{xx} – напруга xx за стандартних умовах $1000 \text{Вт} / \text{м}^2$ і 25°C , температурний потенціал $V_{t,n}$, $V_{t,n} = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q}$. N_s = кількість послідовно з'єднаних сонячних панелей в модуль. Напруга xx кремнієвого елемента лінійно залежить від температури відповідно до [10].

$$\Delta U_{xx} / \Delta T = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{В} / \text{C}. \quad (3.7)$$

Це відповідає зниженню напруги xx приблизно на 0,5 % при підвищенні температури на 1°C . Струм короткого замикання кремнієвого елемента змінюється меншою мірою, зростаючи на $(1,5 \div 3) \cdot 10^{-5} \text{А}$ при збільшенні температури на 1°C . Тому температурна залежність вихідної потужності переважно визначається зміною U_{xx} від температури.

Температурні коефіцієнти саме струму $K_i = \left(\frac{dI_{kз}}{dT}\right)$ і напруги xx $K_u = \left(\frac{dU_{xx}}{dT}\right)$ можуть залежати від багатьох факторів, а саме: від матеріалу, з якого виготовлені елементи сонячної панелі, від самої конструкції сонячного елемента і від технології виготовлення. Усереднені значення температурних коефіцієнтів згідно [10] є наступні:

для Si елементів СБ:

$$\begin{aligned} (dU_{xx} / dT) / U_{xx} (60^\circ \text{C}^0) &= -0.005 / \text{C}^0 \\ (dI_{kз} / dT) / I_{kз} (60^\circ \text{C}) &= 0.001 \div 0.002 / \text{C}^0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

для AsGa елементів СБ:

$$\begin{aligned} (dU_{xx} / dT) / U_{xx} (75^\circ \text{C}^0) &= -0.0019 / \text{C}^0 \\ (dI_{kз} / dT) / I_{kз} (60^\circ \text{C}) &= 0.0016 \text{C}^0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

На рис.3.4 та нижче в табл.3.3 представлені вольт-амперні характеристики для 2 типів сонячних панелей (C-Si, AsGa) від температури навколишнього середовища відповідно до вище зазначених рівнянь (3.8 і 3.9). Також побудовано вольт-амперні характеристики для різних температур від -60°C до $+60^\circ \text{C}$. Слід

значити, для Si елементів значення температури сильніше позначається на напрузі U_{xx} , ніж на струмі $I_{кз}$; а для AsGa елементів залежність температурних коефіцієнти приблизно рівні. На практиці часто використовується наступний математичний вираз [11]:

$$U_{xx,модуль} = K_i \left(\frac{B}{0^{\circ}C} \right) \cdot [T_n(^{\circ}C) - T(^{\circ}C)] + U_{xx,СБ,н}(B), \quad (3.10)$$

тут $U_{xx,СБ,н}(B)$ - напруга xx при певній температурі.

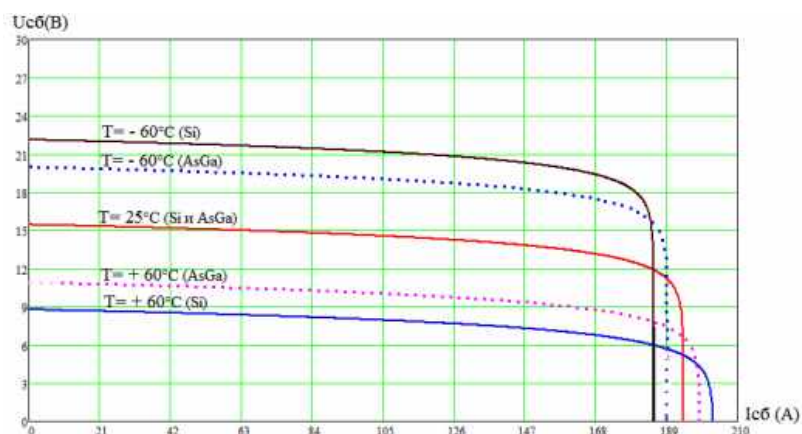


Рисунок 3.4 – Вплив температури на ВАХ СБ.

Таблиця 3.3 – Розрахунок параметрів сонячних панелей при зміні температури навколишнього середовища.

Тип СЕ	температураСБ (0С)	Напруга xx (В)	Струм КЗ (а)	Напруга в точці Мах потужності, (В)	Струм в точці мах потужності (А)	Потужність в опт. точках напруги і струму, Рсб мах (кВт)
Polycrystalline poly-Si	-60	22,2	184	19,3	175	3,39
Arsenide GaAs (AsGa)	-60	19,9	189	17,6	172	3,03
Polycrystalline poly-Si	25	15,4	193	13,5	184	2,47
Arsenide GaAs (AsGa)	25	15,4	193	13,5	184	2,47
Polycrystalline poly-Si	60	8,72	202	7,58	192	1,46
Arsenide GaAs (AsGa)	60	10,9	198	9,64	180	1,73

При зміні температури від $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ напруга кремнієвого C-Si елемента зростає в 2,54 раза, що призводить до збільшення його потужності в межах 1,75–2,3 раза. Вольт-амперні характеристики СЕ розраховуються за формулами (3.4–3.10).

3.3. Створення моделі сонячної батареї у середовищі Simulink з використанням розділу SimPowerSystems

Розроблено універсальну модель фотоелектричного модуля, сумісну з бібліотекою SimPowerSystems середовища *Matlab/Simulink*. Вона забезпечує відтворення роботи системи електроживлення з урахуванням змін сонячної інсоляції та температури навколишнього середовища.

Особливістю моделі є формування вольт-амперної характеристики на основі трьох ключових точок: напруги холостого ходу, струму короткого замикання та режиму максимальної потужності [11].

Структурно модель СБ включає джерело струму PV1 (рис. 3.5), що відповідає струму короткого замикання, джерело напруги U , опір резистора r та діода VD. Їх параметри визначаються за наведеними нижче співвідношеннями. Для отримання ВАХ, максимально наближеної до реальної, виконується розрахунок відповідних елементів схеми (рис. 3.5).

На холостому ході

$$U_{xx} = U + U_{VD} + I_{K3} \cdot r \quad (3.11)$$

Тоді, у точці макс. потужності

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

З рівнянь (3.11 і 3.12) знайдемо невідомі параметри U та r :

$$U = U_{xx} \frac{(K_i + K_u - 1)}{K_i} - U_{VD}, \quad (3.13)$$

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

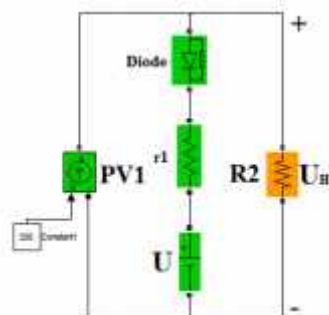


Рисунок 3.5 – Запропонована модель СБ.

Застосовано нові моделі фотоелектричних модулів, адаптовані для роботи в середовищі SimPowerSystem, що дає можливість аналізувати їх взаємодію з іншими джерелами енергії (рис. 3.5). У процесі моделювання значення напруги та струму в точці максимальної потужності узгоджуються з реальною вольт-амперною характеристикою. Напруга на навантаженні визначається напругою на резисторі R2, при цьому робоча напруга джерела U є меншою за U_n . На рис. 3.6 представлено спеціально створений блок PV solar cell3, який забезпечує формування точної ВАХ сонячної панелі під час моделювання (рис. 3.7).

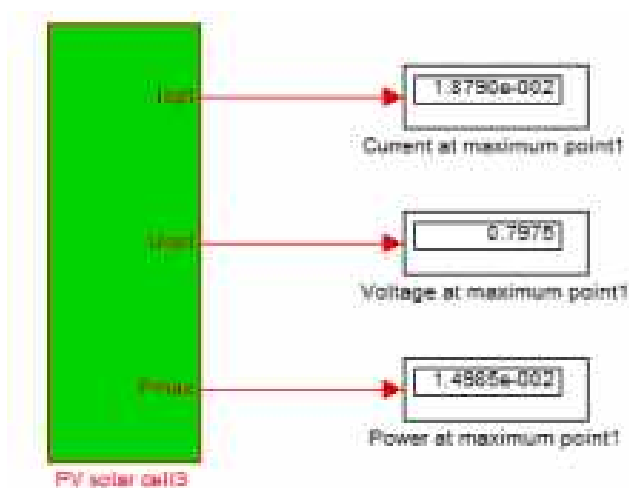


Рисунок 3.6 – Тривчкова модель СБ.

Блок PV solar cell 3 можна зробити в розділі SimPowerSystem, для цього його треба з'єднати з іншими джерелами. Моделювання ж самого сонячного

модуля показано і результати моделювання сонячного елемента – рис. 3.7. Інші параметри, такі як, коефіцієнт заповнення ζ , %, коефіцієнт корисної дії, температурний коефіцієнт напруги та температурний коефіцієнт струму побачимо в робочому полі Matlab в наступному 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

```

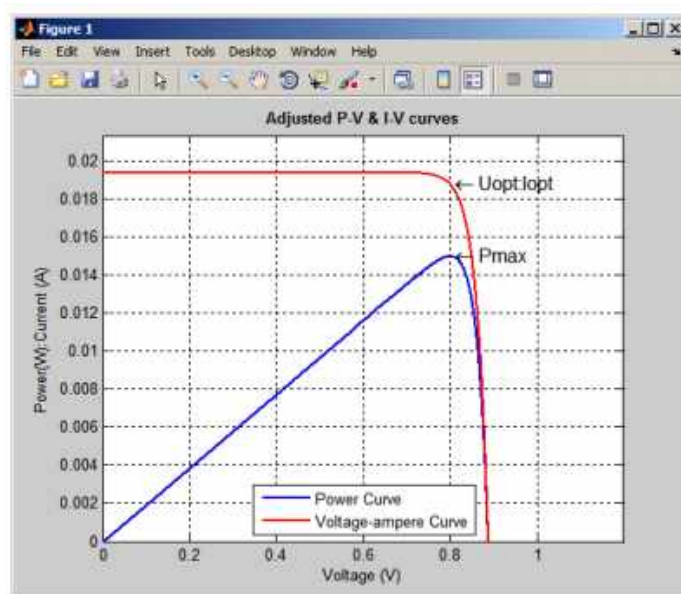


Рисунок 3.7 – Вікно параметрів ВАХ сонячної панелі

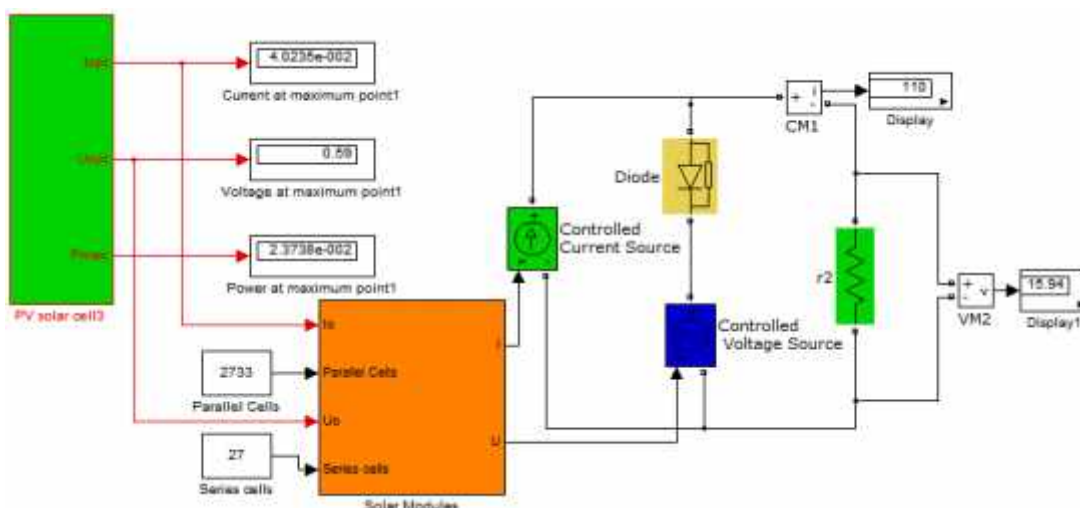


Рисунок 3.8 – Ввімкнення сонячного модуля "PV Solar cell3" в SimPowerSystem

Отже, вольт-амперна характеристика сонячного елемента (Рис. 3.9) позначається пунктиром, тут же суцільною лінією позначена ВАХ сонячного елемента.

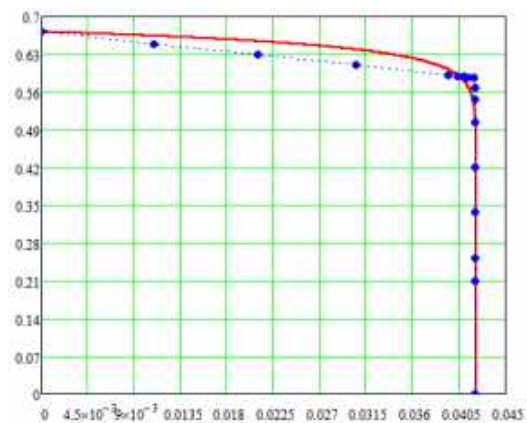


Рисунок 3.9 – Вольт-амперна характеристики моделі і СЕ

Розроблено модель фотоелектричного модуля, адаптовано для практичного використання. Оскільки у бібліотеці SimPowerSystem відсутня готова модель сонячного елемента, то створена власна схема, що забезпечує автоматичне формування вольт-амперної характеристики з вищою точністю і легко інтегрується з іншими компонентами SimPowerSystem. У подальших дослідженнях фотоелектричних установок доцільно застосовувати саме таку модель.

3.4. Баланс енергії фотоелектричної установки

Баланс енергії проведено для добового споживання згідно табл. 2.1 і 2.2. СБ починає заряджати АБ, коли освітленість зростає і стає більше $U_{AB, \text{мін}}$. В процесі заряду АБ робоча точка (рис. 3.14) переміщується з точки 2 в точку 1.

Енергетичний баланс визначено для добового споживання згідно з даними табл. 2.1. Заряд акумуляторної батареї розпочинається в момент, коли освітленість підвищується настільки, що напруга холостого ходу сонячної батареї $U_{\text{хх,СБ}}$, перевищує мінімальну напругу батареї акумулятора. У процесі заряджання робоча точка системи (рис. 3.10) зміщується з положення 2 до положення 1.

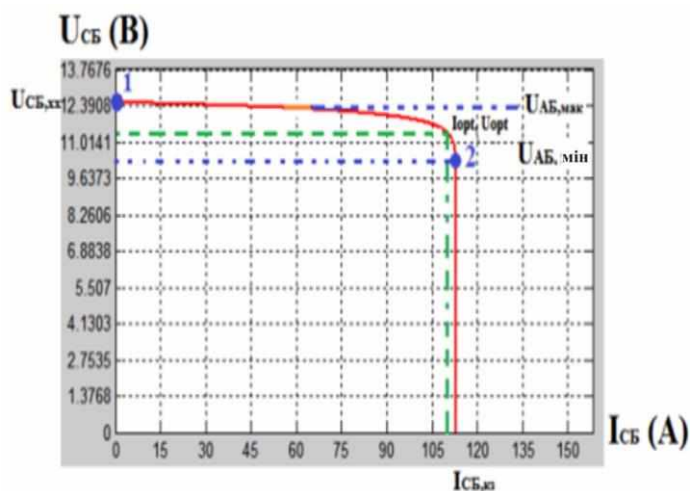


Рисунок 3.10 – Узгодження характеристик сонячної батареї та акумуляторної батареї

У процесі заряду струм акумуляторної батареї поступово спадає: спочатку значення $I_{кз}$ і до оптимального рівня $I_{опт}$, а потім наближається до нуля (значення у точці 1). У даній фотогальванічній установці заряд акумулятора відбувається за умов обмеження напруги АБ. За розрядної напруги $U_{АБ}=12$ В середній нічний струм розряду становитиме:

$$I_{сер.розр.ніч} = \frac{P_{сер.ніч}}{U_{АБ}} = \frac{0,3кВт}{12} = 25А, \quad (3.16)$$

А середній розрядний струм дорівнює:

Коефіцієнт корисної дії для свинцевих акумуляторних батарей 0,85. Розрядна ємність такої батареї для нічної експозиції $Q_{АБ,розр,ніч}$ з урахуванням ККД розряду і врахувавши $T_{ніч}=T_{день}=12$ год.

$$Q_{АБ,розр,ніч} = \frac{I_{сер.розр.ніч} \cdot T_{ніч}}{\eta_{розр}} = \frac{25А \cdot 12год}{0,85} = 352 А/год$$

$$I_{сер.розр.ніч} = \frac{P_{сер.ніч}}{U_{АБ}} = \frac{0,6Вт}{12} = 50А \quad (3.17)$$

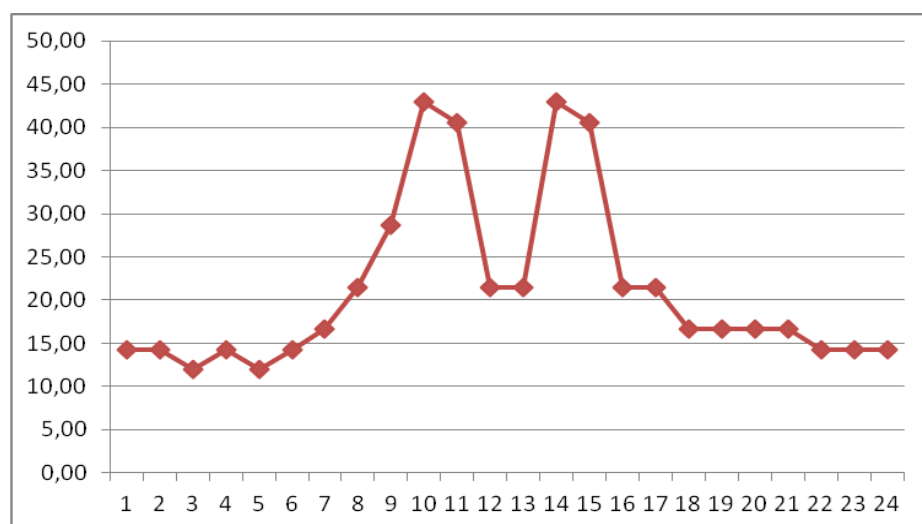


Рисунок 3.11 – Циклограма струму навантаження , А/год.

Так, розрядна ємність акумуляторної батареї на навантаженні вдень:

$$Q_{\text{АБ, розр.день}} = I_{\text{сер.розр.день}} \cdot T_{\text{день}} = 50 \cdot 12 = 600 \text{ А/год}$$

Тоді, покажимо сумарний заряд, що віддається сонячною батареєю вдень та заряд акумуляторної батареї живлення навантаження $\sum Q_{\text{СБ}}$, А·год:

$$\sum Q_{\text{СБ}} = Q_{\text{АБ, розр.ніч}} + Q_{\text{розр.день}} = 352 + 600 = 952 \text{ А/год}$$

Отже, середнє значення струму сонячної батареї:

$$I_{\text{серСБ}} = \frac{\sum Q_{\text{СБ}}}{T_{\text{день}}} = \frac{952}{12} = 79 \text{ А}$$

Зазначимо, що максимальне значення, яке віддається струму СБ і визначає габарити СБ. Для СБ середнє значення струму змінюється за синусоїдальним законом наступним чином, А:

$$\sum I_{\text{серСБ}} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{\text{макс.СБ}} = 0.64 I_{\text{максСБ}}$$

Як знехтувати втратами енергії при $U_{\text{СБ}} < U_{\text{АБ}}$, максимальний струм СБ матимемо:

$$I_{\text{макс}} = \frac{I_{\text{сер.СБ}}}{0,64} = \frac{79}{0,64} = 123 \text{ A}$$

Виконаємо розрахунок площі сонячної батареї. Максимальна питома потужність, яка віддається сонячною батареєю з C-Si $P_{\text{СБ}} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right)$:

$$P_{\text{СБ}} = P_c \cdot \eta = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot 0.24 = 240 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right)$$

Так, середня питома потужність СБ $P_{\text{серСБ}}$ буде дорівнювати:

$$P_{\text{серСБ}} = P_{\text{СБ}} \cdot \frac{t_{\text{день}}}{t_{\text{день}} + t_{\text{ніч}}} = 240 \cdot \frac{12}{12 + 12} = 120 \text{ Вт/м}^2$$

Середня потужність навантаження $P_{\text{номСЕР}}$ (Вт) за 24 години:

$$P_{\text{номСЕР}} = P_{\text{СЕР.ніч}} + P_{\text{СЕР.день}} = 0.3 + 0.6 = 0.9 \text{ кВт}$$

Отже, з рівності середньої потужності навантаження і середньої питомої потужності СБ знайдемо площу самої СБ:

$$S_{\text{СБ}} = \frac{P_{\text{ном.СЕР}}}{P_{\text{серСБ}}} = \frac{900 \text{ Вт}}{120 \text{ Вт/м}^2} = 7,5 \text{ м}^2.$$

У табл. 3.4 наведемо результати розрахунку параметрів ФЕП для вище зазначених 6 типів СЕ з використанням раніше розробленої моделі сонячного модуля. Отже, під час визначення площі кремнієвої C-Si сонячної батареї за моделлю отримано значення $S_{\text{СБ}} = 8,82 \text{ м}^2$ (табл. 3.4), тоді як площа на основі розрахунку енергобалансу на 2 % перевищує площу. Така різниця зумовлена уточненням внутрішніх параметрів сонячного елемента під час розрахунку. Із шести розглянутих типів фотоелектричних модулів найбільш поширеними на ринку є C-Si панелі, які застосовують у приватному і котеджному секторі, на малих підприємствах, а також у приватних санаторіях і медичних закладах.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку площі для різних типів СБ

Тип СБ	Арсенід галію (AsGa)	Монокристалічний кремній (C-Si)	Полікристалічний кремній (poly-Si)	Аморфний кремній (a-Si)	CIGS (CuInGaSe ₂)	CdTe (телурид кадмію)
Макс.потужн (W)	1670	1752	1734	1757	1718	1694
Напруга XX (V)	16,6	18,1	18	18,07	17,82	17,4
Струм КЗ	112	114	115	114,4	114,9	114,42
Напруга в точці макс потужності (V)	15,1	15,9	15,7	15,9	15,6	15,4
Струм в точці макс потужності (A)	109,9	109,8	110	109,9	110	109,7
Площа сонячного модуля	6,4	8,82	8,4	14,25	8,8	10,6
ККД СБ, (1000/W·м ²)	26	23	20	11,9	19,8	16
Температурний коефіцієнт струму, Кі	0,97	0,95	0,958	0,961	0,957	0,962
Температурний коефіцієнт напруги, Ки	0,91	0,87	0,874	0,885	0,887	0,884
Максимальна питома потужність, що віддається СБ $P_{CB} = P_{сер} \cdot \eta(\%), \frac{Вт}{м^2}$	260	230	205	119,1	197,7	160
Середня питома потужність СБ $P_{СЕР} = P_{CB} \cdot \frac{t_{день}}{t_{день}+t_{ніч}}, \frac{Вт}{м^2}$	130	115	102	60	98	80

Розроблення сонячного модуля на основі фотоелементів, доступних на вітчизняному ринку При проектуванні будемо використовувати сонячний елемент, електричні параметри котрого зазначимо в табл. 3.5. Тут, струм КЗ сонячного модуля $I_{СБ.КЗ}$ розраховується через коефіцієнт струму

$$K_I = \frac{I_P}{I_{КЗ}} = \frac{1,6}{1,9} = 0,842 \text{ (див.табл. 3.5) з урахуванням } I_{MAX\ СБ} :$$

$$I_{СБ.КЗ} = \frac{I_{MAX\ СБ}}{K_I} = \frac{123}{0.842} = 146A$$

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики сонячного елемента при наступних умовах (Освітленість-1000 Вт/м², температура - 25 °С, Спектр АМ 1.5.

Параметр	Значення
Розмір (ШхВ), мм	78x78
Напруга ХХ U_{xx} (В)	0,6
Робоча напруга U_p (В)	0,47
Струм КЗ $I_{кз}$ (А)	1,9
Робочий струм I_p (А)	2,6

Напруга ХХ сонячного модуля $U_{CB.xx}$, розраховується через коефіцієнт по напрузі $K_U = \frac{U_p}{U_{xx}} = \frac{0,47}{0,6} = 0,783$ (див. табл. 3.5) з урахуванням $U_{CB.опт} = 12В$:

$$U_{CB.xx} = \frac{U_{CB.опт}}{K_u} = \frac{12}{0,783} = 15,32В.$$

Так, кількість послідовно з'єднаних СЕ N_{CE} :

$$N_{CE} = \frac{U_{CB.опт}}{U_{CE}} = \frac{12}{0,47} = 25,5 \cong 26$$

Розрахуємо кількість паралельно з'єднаних СЕ M_{CE} (з табл. 3.5):

$$I_p = I_{CE.опт} \text{ та } I_{max.CB} = I_{CB.опт}$$

$$M_{CE} = \frac{I_{CB.опт}}{I_{CE.опт}} = \frac{123А}{1,6А} = 76,87 \cong 77.$$

Отже, сумарна кількість СЕ : $\Sigma_{CE} = N_{CE} \cdot M_{CE} = 26 \cdot 77 = 2002$ шт

Розраховуємо довжину сонячного модуля $l_{CB} = M_{CE} \cdot 78мм = 77 \cdot 78мм = 6м$,

Розраховуємо ширину сонячного модуля $b_{CB} = N_{CE} \cdot 78мм = 26 \cdot 78мм = 2м$,

Площина сонячного модуля: $S_{CB} = l_{CB} \cdot b_{CB} = 6м \cdot 2м = 12м^2$

Збільшення площі СБ з 7,5 м² до 12 м² пояснюється використанням ринкової СБ з низьким ККД.

3.5 Визначення робочої циклограми ємності акумуляторної батареї

Для того щоб побудувати циклограму ємності $Q_{ц}$, слід підрахувати зарядну і розрядну ємність: $AB Q +$ - заряд АБ, а $AB Q -$ - розряд (табл. 3.6), то ж покажемо за кожну годину приріст зарядної і розрядної ємності АБ:

$$Q_{AB} = (Q_{CB} - Q_{H}) A \cdot год$$

Таблиця 3.6 – Розрахунок зарядної і розрядної ємності акумуляторної батареї.

Час, год	Заряд СБ, що віддається, Q_{CB} , А·год	Заряд, що приймається навантаженням, Q_{H} , А·год	Зарядні і розрядні ємності АБ	Ємність АБ, Q_{AB} , А·год
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	21,7	-27,1	90
7	40,8	16,7	24,1	24
8	61,7	44,2	17,5	42
9	83,1	29,3	53,8	96
10	105	39,6	65,4	161
11	127	29,2	97,8	259
12	142	146	-4	255
13	131,1	16,7	114,3	369
14	109	40,3	68,6	438
15	88	35,4	522,6	490
16	64,6	150	-85,4	405
17	42	16,7	25,4	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 ємність $Q_{ц}$, що враховує мінімальну ємність AB_{\min} - $24A \cdot год$ і максимальну ємність AB_{\max} - $490 A \cdot год$ (табл. 3.6):

$$Q_{ц} = \Delta Q_{AB} = Q_{\max} - Q_{\min} = 490 - 24 = 466 \approx 470 \text{ А}\cdot\text{год}$$

Для подовження ресурсу роботи АГМ-акумуляторів глибина циклу заряд–розряд повинна становити не більше 30 % від їх номінальної ємності, тоді як гелеві батареї допускають до 80 % використання ємності [12]. В цій випускній кваліфікаційній роботі, з метою збільшення строку експлуатації акумуляторної батареї, прийнято глибину циклу заряд-розряд $Q_{ц}=0,5 \cdot Q_{н}$ (А·год).

Обчислена номінальна ємність $Q_{н}=1000$ А·год забезпечує подовження строку служби батареї, оскільки при такому значенні глибина циклу становить близько 50 %. Це підтверджується циклограмою зміни ємності (рис. 3.12). При цьому за технічними характеристиками акумулятори даного типу допускають експлуатацію з глибиною розряду до 80 % від номінального значення.

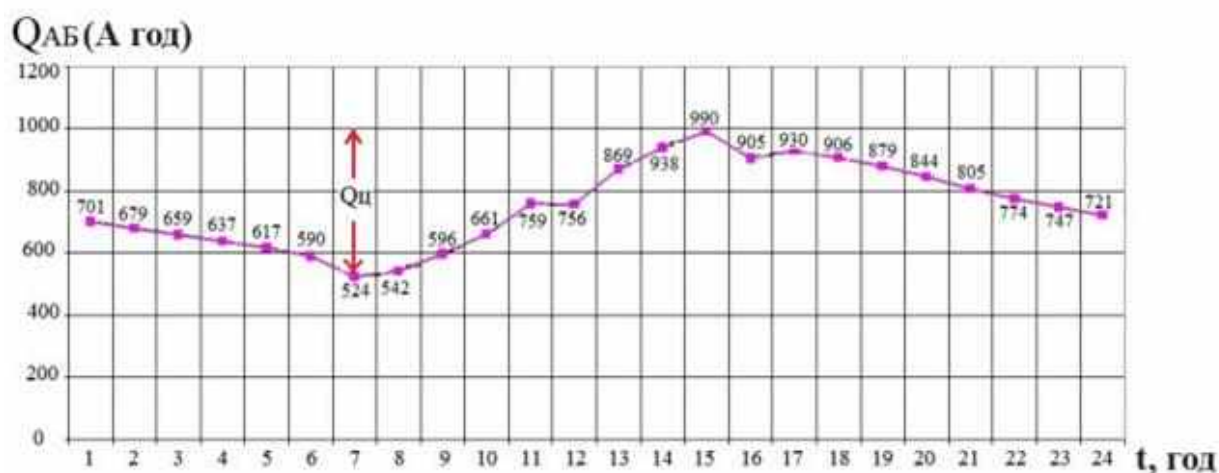


Рисунок 3.12 – Циклограма ємності акумуляторної батареї

Якщо використовується АБ марки DELTA (GX 12-200, див додаток.1), у якій номінальна ємність 200А·год і маса 65 кг, то кількість паралельно з'єднаних АБ n_{AB} :

$$N_{AB} = \frac{1000}{200 \text{ А}\cdot\text{год}} = 5$$

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

Визначення номінальної ємності акумуляторної батареї за струмом заряджання

Знайдемо зарядну ємність відповідно до зарядного струму:

$$I_{\text{заряд}} = 0.1 \cdot Q_{\text{заряд.АБ}}$$

Тож середній зарядний струм акумуляторної батареї за період світлого дня від 6 до 18 годин, згідно табл.3.6:

$$I_{\text{заряд(середн)}} = \frac{Q_{\text{СБ}} - Q_{\text{н}}}{T_{\text{день}}} = \frac{994 - 615}{12} = 31,7 \text{ А}$$

Зарядна ємність:

$$Q_{\text{заряд(середн)}} = I_{\text{заряд АБ}} \cdot 10 = 32 \cdot 10 = 320 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Припустимо, що номінальна ємність АБ дорівнює його максимальній місткості, так для акумуляторної батареї марки DELTA (GX 12-200), у якій номінальна ємність 200 А·год, а маса 65 кг. То ж кількість паралельно з'єднаних акумуляторних батарей складатиме $N_{\text{АБ}}$:

$$N_{\text{АБ}} = \frac{Q_{\text{заряд.АБ}}}{200 \text{ А} \cdot \text{год}} = \frac{320}{200} = 1,6 = 2$$

Послідовно з'єднаних АБ тут не буде, так як напруга акумулятора дорівнює номінальній $U_{\text{АБ}} = 12\text{В}$. Загальна маса АБ: $m_{\text{АБ}} = N_{\text{АБ}} \cdot 65\text{кг} = 130\text{кг}$.

То ж візьмемо допустимий розрядний струм буде $I_{\text{розрядАБ}} = 20 \text{ А}$, з поданої циклограми навантаження (див. табл. 3.6) отримаємо максимальний розрядний струм:

$$I_{\text{розряд.(максимальний)}} = 85,4 \text{ А}$$

А кількість паралельно з'єднаних таких АБ:

$$N_{\text{АБ}} = \frac{I_{\text{роб АБ макс}}}{I_{\text{hj,F<}}} = \frac{85,44}{20} = 4,27 \approx 5$$

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

Розрахунок зарядної ємності акумуляторної батареї виконується за різними методиками залежно від режиму її експлуатації. Згідно з наведеними вище

рівняннями, результати визначення основних параметрів АБ наведені в табл. 3.7: номінальна ємність, кількість паралельно з'єднаних батарей та загальна маса акумуляторної системи.

Таблиця 3.7 – Зведені результати розрахунку ємності акумуляторних батарей

№	Методи розрахунку ємності АБ	Розрахункова ємність АБ, $Q_{AB}(A \cdot год)$	Кіл. паралельно з'єднаних АБ, N_{AB}	Сумарна маса АБ, $m_{AB}(кг)$
1	$Q_{AB} = Q_{CB} - Q_n$	1000 А·год	5 шт	325 кг
2	$I_{заряд.АБ} = 0.1 \cdot Q_{заряд.АБ}$	320 А·год	2 шт	130 кг
3	$I_{заряд(допустимий)} = 0.1 \cdot Q_n(обраний)_{АБ}$	1000 А·год	5 шт	325 кг

Для забезпечення тривалого ресурсу роботи акумуляторної батареї та зменшення коливань її напруги обрано максимальну ємність 1000А·год, визначену за рівнянням (3.6), що забезпечує мінімальну глибину розряду. Це пояснюється тим, що більша глибина розряду скорочує строк служби батареї. Тому при моделюванні АБ у середовищі **SimPowerSystem** для подальшого проектування ФЕУ з табл. 3.7 обрано консервативний варіант розрахунку номінальної ємності $Q_{AB} = 1000$ (А·год), тобто $N_{AB}=5$ шт.

Можа зробити висновок, що розроблено розширені матричні характеристики СБ, що дозволяють обґрунтовано вибирати типи батарей на основі статистичного аналізу. В розділі проаналізовано ВАХ двох типів СЕ (С-Si та AsGa) при зміні температури від $-60^{\circ}C$ до $+60^{\circ}C$. Дослідження показало, що напруга AsGa СБ менш чутлива до підвищення температури, ніж у С-Si. Рекомендується AsGa СБ з низьким температурним коефіцієнтом K_u , проте її вартість майже вдвічі перевищує С-Si. Крім того, розроблено універсальну модель СБ, сумісну з SimPowerSystems Matlab, що дає змогу моделювати роботу фотоенергетичної установки з урахуванням інсоляції та температурних змін. Створена оригінальна модель, ВАХ якої побудована за трьома характерними точками, продемонструвала високу відповідність ідеалізованим розрахунковим залежностям, що підтверджує її придатність для подальших досліджень та проектних розрахунків.

РОЗДІЛ 4

ПИТАННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ОБЛАДНАННЯ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ

4.1. Нормативно-правові положення та стандарти, що регулюють роботу джерел безперебійного живлення в Україні

Безпека є ключовим чинником при проектуванні, виготовленні, монтажі та експлуатації джерел безперебійного живлення (ДБЖ). Українські нормативні акти та стандарти охоплюють загальні положення щодо електробезпеки, а також специфічні вимоги до ДБЖ і електромагнітної сумісності обладнання.

Основні положення щодо електробезпеки для всіх типів електротехнічних пристроїв визначаються стандартом ДСТУ 7237:2011 «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та класифікація видів захисту», який служить відправною точкою для забезпечення безпечного використання електроприладів [15].

ДСТУ EN 61140:2015 «Захист проти ураження електричним струмом. Загальні аспекти для установок та обладнання» (ідентичний ІЕС 61140:2001) уточнює принципи та методи захисту від електричного струму, що є базою для безпечної експлуатації ДБЖ та іншого електротехнічного обладнання [16]. Для електроустановок у будівлях застосовується ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом», який встановлює правила електробезпеки при проектуванні та монтажі електричних систем у житлових, адміністративних, громадських та промислових приміщеннях. Цей документ визначає ключові терміни, такі як «низька напруга» (до 1000 В змінного струму або 1500 В постійного), «висока напруга» та «надзвичайна напруга», що важливо для правильної інтеграції ДБЖ у загальну електромережу об'єкта [17].

Додатково, правила експлуатації засобів електрозахисту (НПАОП 40.1-1.07-01) та порядок опосвідчення електроустановок споживачів (НПАОП 0.00-6.15-99) визначають вимоги щодо безпечного користування електрообладнанням і відповідних захисних засобів [18]-[19].

Найбільш актуальним стандартом, що встановлює безпосередні вимоги безпеки для ДБЖ, є ДСТУ EN ІЕС 62040-1:2020 «Системи безперебійного живлення. Частина 1. Вимоги щодо безпеки» (ідентичний EN ІЕС 62040-1:2019 та ІЕС 62040-1:2017). Цей документ набрав чинності 01.06.2021 року за наказом ДП «УкрНДНЦ» від 25.11.2020 № 408 та включає внесені поправки і зміни (зокрема Поправка № 1:2022 і Зміна № 11:2022). Він замінив попередні редакції, такі як ДСТУ ІЕС 62040-1:2010 та ДСТУ EN 62040-1-1:2010, що підкреслює його сучасну актуальність і відповідність європейським нормам [20].

ДБЖ, які відповідають стандарту ДСТУ EN 60950-1 (стандарт безпеки ІТ-обладнання), відносяться до апаратури класу «І» щодо захисту від ураження електричним струмом [21].

Застосування як загальних стандартів електробезпеки (наприклад, ДСТУ EN 61140), так і спеціалізованих норм безпеки ДБЖ (ДСТУ EN ІЕС 62040-1) демонструє багаторівневий регуляторний підхід. Загальні стандарти формують базовий рівень безпеки для всіх типів електротехнічного обладнання, охоплюючи широкий спектр ризиків, зокрема ураження струмом. Специфічні норми додають вимоги з урахуванням особливостей конструкції, функцій та потенційних режимів відмови конкретного пристрою, такого як ДБЖ. Така послідовність забезпечує комплексний захист, одночасно дотримуючись фундаментальних принципів електробезпеки і враховуючи специфічні ризики, пов'язані з експлуатацією ДБЖ, наприклад поводження з акумуляторними батареями та перетворення енергії.

Технічний регламент з електромагнітної сумісності (ЕМС) обладнання є обов'язковим документом, що визначає вимоги до ЕМС для всіх електротехнічних пристроїв, що вводяться в обіг в Україні.

ДСТУ ІЕС 62040-2:2015 «Системи гарантованого електропостачання. Агрегати безперебійного живлення. Частина 2. Вимоги до електромагнітної сумісності» (ідентичний ІЕС 62040-2:2005) конкретизує вимоги ЕМС саме для ДБЖ. Стандарт охоплює різні категорії ДБЖ та умови їх експлуатації, а також методики випробувань на емісію і стійкість до завад, включаючи кондуктивні та випромінювані перешкоди, а також реакцію на провали напруги [22].

Крім цього, ДБЖ повинні відповідати загальним нормам ЕМС, зокрема ДСТУ EN 61000-3-2 (обмеження гармонік струму) та ДСТУ EN 61000-3-3 (обмеження коливань і змін напруги), що входять до серії стандартів з електромагнітної сумісності [23]-[24].

4.2. Особливості вибору і комплектності технічних засобів

Інструкції з експлуатації ДБЖ містять важливі вказівки щодо безпечного монтажу та користування. Забороняється встановлювати пристрої під прямим сонячним промінням, у присутності хімічно активних речовин, при підвищеній вологості або поблизу джерел тепла. Необхідно забезпечити ефективну вентиляцію, не закривати вентиляційні отвори та не накривати корпус ДБЖ, щоб уникнути перегріву.

При заміні акумуляторів ДБЖ має бути відключене від електромережі. Важливо використовувати справні інструменти з цілою ізоляцією та уникати контакту металевих предметів із батареєю. Для дотримання вимог ЕМС довжина вихідних кабелів не повинна перевищувати 10 метрів, а сам ДБЖ обов'язково підключається до контуру захисного заземлення приміщення для запобігання ураженню електричним струмом.

Наголос на правильній експлуатації демонструє, що безпека обладнання залежить не лише від конструкції, але й від практик користувача.

Невірний монтаж або обслуговування можуть звести нанівець захисні функції пристрою. Вказівки щодо місця встановлення, поводження з акумуляторами та заземлення підтверджують, що навіть сертифікований ДБЖ може стати небезпечним при порушенні правил користування, що підкреслює спільну відповідальність виробника та користувача.

Герметизовані акумулятори можуть експлуатуватися як у вертикальному, так і в горизонтальному положеннях, що дозволяє раціональніше використовувати площу для розміщення електроустаткування. При горизонтальному монтажі, за відсутності спеціальних вказівок виробника, електродні пакети всередині акумуляторів повинні зберігати вертикальне положення.

Розміщення акумуляторних установок можливе в спеціально виділених приміщеннях або їхніх ділянках для обладнання зв'язку, у батарейних шафах і контейнерах як всередині будівель, так і поза ними, а також у батарейних відсіках, інтегрованих до складу устаткування зв'язку.

Незалежно від обраного місця установки, слід дотримуватися загальних вимог: елементи мають бути доступні для поточного обслуговування та вимірювань, тому доцільно застосовувати акумулятори з торцевим розташуванням виводів; всі компоненти повинні бути захищені від проникнення сторонніх предметів, рідин і пилу; установка не повинна піддаватися впливу надмірно високих або низьких температур. Різниця температур елементів у процесі експлуатації не повинна перевищувати 5 °С, оскільки охолодження знижує діючу ємність, а перегрів може призвести до пошкодження батарей. Тривала неоднорідність температур прискорює безповоротну втрату ємності та скорочує термін служби акумуляторної установки.

Монтаж повинен виключати надмірні механічні навантаження на елементи, відповідно до технічної документації виробника, а також розміщення поблизу джерел вібрації або тряски. Для акумуляторів, розташованих у шафах та відсіках з електроустаткуванням, слід забезпечити

захист від ушкодження електролітом, виключити нагрівання елементів від суміжного обладнання та обладнати вентиляційні отвори для видалення газів, що виділяються з батарей. Вихідна потужність акумуляторної установки при заряді без примусової вентиляції не повинна перевищувати 3 кВт.

Чинні правила технічної експлуатації електроустановок не містять детальних норм щодо розміщення та вентиляції герметизованих акумуляторів, тому слід орієнтуватися на європейський стандарт EN50272-2:2001. Слід зазначити, що шафи і відсіки, що випускаються вітчизняними виробниками, часто не відповідають вимогам цього стандарту та потребують доопрацювання.

До комплекту поставки герметизованих акумуляторів входять міжелементні з'єднувачі, болти, шайби та захисні ковпачки на виводи. Для забезпечення належної вентиляції акумулятори слід розміщувати на стелажах або у відсіках із зазором, визначеним виробником та довжиною міжелементних з'єднувачів. Підтяжка болтів виводів повинна виконуватися із рекомендованим виробником зусиллям, без додаткового мастила. Якщо герметизовані акумулятори розташовані поряд з відкритими, місця з'єднання необхідно змащувати вазеліном і перевіряти щороку.

Максимальна кількість і переріз кінцевих кабелів (шин) для підключення до електроживильного устаткування не повинні перевищувати значень, рекомендованих виробником, щоб уникнути перевантаження виводів акумуляторів.

Для герметизованих акумуляторних установок передбачено кілька режимів заряду: підтримка стабілізованої підзарядної напруги, прискорений заряд при підвищеній напрузі та дозаряд під час зберігання.

Під час введення установки в експлуатацію заряд виконують при постійній підзарядній напрузі $U_{пз}$ за графіком U_1 (рис. 4.1), при цьому первісний зарядний струм обмежують на рівні $0,3 C_{10}$, якщо виробником не зазначено інше значення.

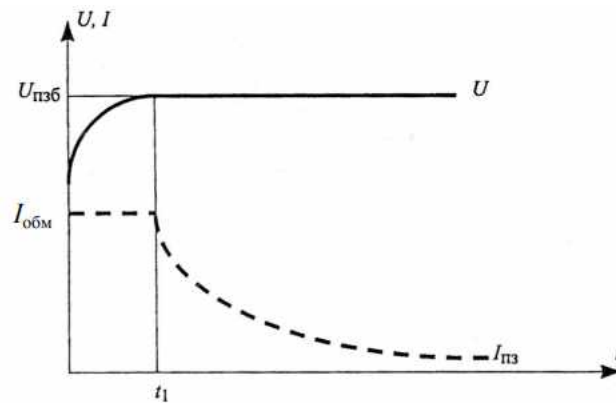


Рисунок 4.1 – Крива зарядження герметизованих акумуляторів.

Перед початком заряду установка повинна витримуватися щонайменше 6 годин для вирівнювання температури елементів з температурою навколишнього середовища (приміщення або шафи). Якщо температура повітря знаходиться в межах 18–25 °С, вихідна напруга зарядних пристроїв встановлюється на номінальному значенні підзарядної напруги $U_{пзб} = U_{пз} \cdot n$, тут $U_{пз}$ – напруга підзаряду, вказана виробником для конкретного типу акумуляторів. У разі відхилення температури від цього діапазону потрібна корекція підзарядної напруги відповідно до рекомендацій виробника. Точність підтримки підзарядної напруги під час заряду та підзаряду повинна складати не більше $\pm 1\%$.

Закінчення заряду в режимі стабілізації визначається зниженням зарядного струму до значення менше 1 мА на ампер-годину номінальної ємності елементів і його стабілізацією протягом останніх трьох годин процесу.

Для швидкого приведення акумуляторної установки у заряджений стан допустимо застосовувати зарядні пристрої з характеристикою ІU (рис. 4.2). Заряд у цьому режимі здійснюють у два етапи:

1. Первинний заряд струмом ($0,1-0,3 C_{10}$) до досягнення напруги на батареї $2,35 \text{ в} \cdot \text{В}$;
2. Дозаряд підтримкою напруги $U_{пзб}$ зарядних пристроїв.

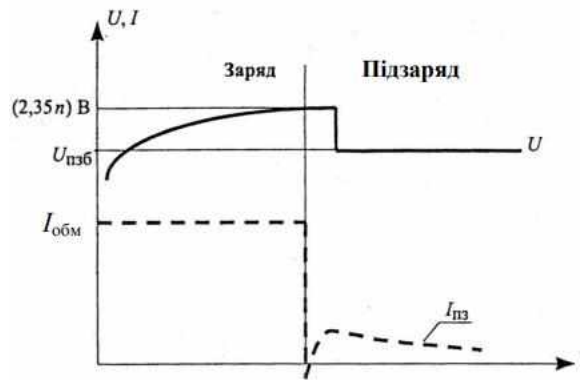


Рисунок 4.2 – Крива прискореного заряду

Інші параметри заряду аналогічні режиму стабілізації підзарядної напруги. Значення постійного струму тривалого підзаряду суттєво залежить від температури навколишнього середовища та повинно бути вказане виробником для конкретного типу акумуляторів.

Перед введенням установки в експлуатацію виконують контрольний розряд у 10-годинному режимі $0,1 C_{10}$ або іншим струмом, найбільш близьким до очікуваного навантаження, до кінцевої напруги розряду установки, яка визначається множенням кінцевої розрядної напруги окремого елемента на кількість елементів у складі батареї. Якщо виробник задає кінцеву розрядну напругу для кожного елемента, наприкінці розряду контролюють напругу всіх елементів. Фактично знята ємність C обчислюється як добуток струму розряду на тривалість процесу. Розряд припиняють, коли напруга установки досягла заданого кінцевого значення або з неї знята кількість електрики, що відповідає номінальній ємності.

Ємність установки C_a , визначена за результатами першого контрольного розряду, повинна становити не менше 95 % від номінального значення, вказаного виробником для даного режиму, а середня напруга елементів у кінці розряду має відповідати мінімальним параметрам, зазначеним виробником.

Після завершення контрольного розряду установку негайно заряджають одним із зазначених режимів. При появі ознак завершення заряду вимірюють напругу елементів або моноблоків.

Перед введенням у експлуатацію акумуляторну установку короткочасно (10–15 хв) піддають розряду струмом, максимально наближеним до очікуваного навантаження, при цьому перевіряють надійність усіх з'єднань за допустимим падінням напруги та рівнем нагрівання.

Для кожної введеної в дію установки ведеться акумуляторний журнал, куди фіксують дані початкового заряду, результати контрольного розряду та наступного заряду перед введенням у експлуатацію.

Тривалість служби акумуляторних установок залежить від якості застосованих акумуляторів, правильності вибору режимів заряду, дотримання встановлених виробником обмежень при експлуатаційних розрядах і зарядах, а також від своєчасності і якості технічного обслуговування і підтримання необхідних кліматичних умов, що забезпечують передбачений термін служби.

При підборі типу акумуляторів необхідно враховувати умови їхньої експлуатації. Вибір режимів заряду визначається такими факторами: якістю зовнішнього електропостачання об'єкта, величиною необхідного акумуляторного резерву та функціональними можливостями застосованого випростувального устаткування.

Якщо середня температура електроліту (або поверхні герметизованих акумуляторів) під час розряду відрізняється від опорної температури 20 °С, проводять приведення ємності до цієї температури за формулою:

$$C_{a*} = C_a \cdot (1 + z \cdot (t - 20)),$$

тут, t – середня температура елементів при розряді; z – температурний коефіцієнт ємності, який чисельно дорівнює 0,006 або 0,01 1/°С для режимів розряду тривалістю більше або менше 1 години відповідно, якщо не вказано іншого виробником.

За належної якості зовнішнього електропостачання оптимальним режимом заряду герметизованих акумуляторних установок є підтримка стабілізованої підзарядної напруги, оскільки цей режим мінімізує вплив на тривалість служби батарей. Якщо середня частота переривань електропостачання об'єкта перевищує один випадок на тиждень або спостерігаються тривалі (понад годину) відключення випрямних пристроїв із переходом навантаження на живлення від акумуляторної установки, доцільно застосовувати один із режимів прискореного заряду.

У таких умовах використання герметизованих акумуляторів не рекомендується, оскільки часті заряди підвищеною напругою призводять до значного скорочення їхнього терміну служби через безповоротну втрату води. Величина акумуляторного резерву (номінальна ємність установки) визначається з урахуванням категорійності електропостачання об'єкта та припустимого діапазону коливань температури навколишнього середовища у місцях розміщення установки під час експлуатації.

Випрямне устаткування, що входить до складу електроживильного устаткування (ЕЖУ), з урахуванням резерву повинно забезпечувати вихідну потужність, яка перевищує номінальне навантаження $R_{ном}$ на 10 – 25 %. Нестабільність вихідної напруги випрямних пристроїв повинна відповідати необхідним параметрам нестабільності підзарядної напруги, встановленим виробником для конкретного типу акумуляторів. Для більшості сучасних герметизованих батарей допустима нестабільність підзарядної напруги не перевищує $\pm 1\%$.

При використанні прискореного режиму заряду випрямні пристрої повинні мати автоматичне перемикання уставок підвищеної напруги заряду та напруги підзаряду, а також регулювання обмеження струму навантаження, яке забезпечує дотримання виробником встановленого обмеження зарядного струму при одночасному живленні обладнання електрозв'язку.

Для герметизованих акумуляторних установок, розташованих у виділених ділянках приміщень, у шафах або відсіках із

електроустаткуванням, випрямні пристрої, що використовуються для заряду, повинні мати захист, який запобігає самочинному підвищенню вихідної напруги понад значення постійного підзаряду установки.

4.3. Правила встановлення й розміщення джерел безперебійного живлення

Система технічного обслуговування має забезпечувати своєчасне виявлення будь-яких відхилень параметрів акумуляторної установки від значень, визначених виробником.

Серед кліматичних чинників найбільший вплив на довговічність установки має температура, оскільки швидкість електрохімічних процесів у свинцево-кислотних батареях значною мірою залежить від її величини. Це особливо критично для герметизованих акумуляторів: підвищення температури на 10 °C у процесі експлуатації здатне скоротити термін служби батареї приблизно вдвічі.

Виробником задається стандартний термін служби акумуляторів при температурі 20 °C (іноді 25 °C). У реальних умовах експлуатації температура навколишнього середовища часто відрізняється від стандартної і коливається залежно від сезону. Тому, при тривалому відхиленні температури від 20 °C, для мінімізації негативного впливу на ресурс герметизованих батарей необхідно налаштовувати напругу підзаряду на виході випрямних пристроїв відповідно до температурного коефіцієнта, визначеного виробником, і проводити її коригування не менше двох разів на рік.

При річних коливаннях температури в діапазоні від 10 до 35 °C (за даними виробника) допускається встановлювати підзарядну напругу відповідно до середньої робочої температури. Рекомендується застосовувати випрямні пристрої з функцією температурної компенсації напруги підзаряду. Водночас слід враховувати, що така компенсація лише частково зменшує негативні наслідки температурних стрибків і не виключає їх повністю.

Під час експлуатаційних розрядів забороняється віддавати з акумуляторної установки електроенергію понад її ємність для сталого режиму розряду, а також виконувати розряд після досягнення кінцевої напруги батарей. Для необслуговуваних об'єктів електрозв'язку зі струмом навантаження до 200 А слід застосовувати автоматичні пристрої, які відключають батарею при досягненні кінцевої напруги та підключають її до зарядки після відновлення роботи випрямних пристроїв. На об'єктах, що обслуговуються, а також при струмах розряду понад 200 А, доцільне використання пристроїв автоматичного відключення батареї наприкінці розряду, тоді як підключення її до зарядки здійснюється вручну.

4.4 Регламент запуску та перевірки працездатності ДБЖ

Процедура введення в експлуатацію та контролю працездатності джерел безперебійного живлення (ДБЖ) є обов'язковим етапом забезпечення надійного й безпечного функціонування систем електроживлення критичних споживачів. Регламент встановлює послідовність дій персоналу, вимоги до технічного стану обладнання та критерії оцінки його робочих характеристик.

Підготовчий етап. Перед запуском ДБЖ здійснюється комплекс попередніх перевірок: огляд зовнішнього стану обладнання, акумуляторних батарей та силових кабелів; перевірка наявності заземлення та цілісності мережі нульового проводу; переконання у відсутності механічних пошкоджень, слідів перегріву чи корозії; оцінка мікрокліматичних умов приміщення (температура, вологість, вентиляція) відповідно до вимог виробника; перевірка правильності підключення мережі живлення та навантаження.

Результати огляду фіксуються в журналі технічного обслуговування.

Первинний запуск ДБЖ. Перший запуск виконується згідно з інструкцією виробника та передбачає: подачу вхідної напруги на ДБЖ з подальшим плавним увімкненням обладнання; ініціалізацію системи самотестування, під час якої контролюються основні параметри: рівень

заряду АКБ, стан інвертора, температура внутрішніх модулів; перевірку режиму байпасу та роботи випрямляча; переведення ДБЖ у номінальний режим з подачею живлення на навантаження.

У разі виявлення аварійних сигналів або помилок запуск зупиняють, а несправності усуваються уповноваженим персоналом.

Перевірка працездатності. Після запуску здійснюються функціональні випробування, що включають: вимірювання вихідної напруги та частоти в режимі нормальної роботи; тестування роботи від акумуляторних батарей шляхом короткочасного відключення мережі; контроль струмів заряду АКБ, часу переходу на резервне живлення та стабільності вихідних параметрів; перевірку коректності роботи байпасної лінії та автоматичного повернення в основний режим.

Параметри пристрою звіряються з технічними характеристиками, а відхилення фіксуються й аналізуються.

Документування та оцінка результатів. Після завершення випробувань оформлюється акт приймання ДБЖ в експлуатацію, до якого вносять: дані про виконані перевірки; величини ключових електричних параметрів; інформацію про виявлені недоліки та способи їх усунення; висновок про готовність обладнання до роботи з критичним навантаженням.

Регламентований запуск і перевірка працездатності дозволяють мінімізувати ризики відмови, забезпечити відповідність системи вимогам охорони праці та гарантувати стабільне живлення важливих електроприймачів.

4.5 Технічне обслуговування джерел резервного живлення

Регулярні огляди герметизованих акумуляторів проводяться залежно від терміну їхньої експлуатації. На початковому етапі перевірок важливо переконатися, що напруга безперервного підзаряду відповідає рекомендаціям виробника з урахуванням стабільної температури приміщення, де встановлена батарея.

Температура герметизованих акумуляторних установок визначається шляхом вимірювання контрольних елементів або моноблоків за допомогою термометрів, які прикріплюють до середини широких стінок корпусів на час не менше 30 хвилин. Для установок, змонтованих у шафах або відсіках, перед зчитуванням показань необхідно переконатися, що лицьові панелі або двері шаф залишаються закритими протягом усього часу вимірювання.

Після 2–3 діб роботи установки в режимі тривалого підзаряду проводиться первинний огляд, під час якого фіксуються результати вимірювання напруги всіх елементів або моноблоків, загальна напруга акумуляторної установки, а також її температура. Особлива увага приділяється контролю відповідності напруги окремих елементів або моноблоків межах, визначеним виробником для першого року експлуатації. Подальші періодичні огляди герметизованих акумуляторних установок здійснюються у порядку та обсязі, зазначених у таблиці 5.1. Інспекторські огляди виконуються з обсягом перевірок, аналогічним піврічному контролю. Елементи або моноблоки, які виявилися непридатними до подальшої експлуатації, підлягають заміні.

Основними причинами заміни акумуляторів є: порушення цілісності корпусів (наявність тріщин, сколів або ушкоджень, що можуть призвести до витоку електроліту); зниження ємності окремих елементів або моноблоків нижче $0,8 C_n$ до закінчення заявленого терміну служби; наявність слідів витоку електроліту через стики корпусу та кришки або через кріплення виводів і запобіжних клапанів; значне здуття стінок корпусів; стійке підвищення напруги на елементі або моноблоці понад 2,4 В у режимі постійного підзаряду без тенденції до зниження, що може свідчити про порушення роботи або деградацію акумулятора.

Регулярний контроль температури та напруги дозволяє своєчасно виявляти відхилення параметрів установки і запобігати передчасному виходу з ладу батарей, що є ключовим елементом підтримки надійності електропостачання об'єкта.

Таблиця 5.1 – Періодичність і обсяг перевірок герметизованих акумуляторних установок.

Період контролю	Обсяг перевірок	Примітки
Щомісячний	Контроль напруги тривалого підзаряду установки та перевірка відповідності її температурі	Якщо параметри роботи ЕЖУ та установки залишаються в межах норми протягом півроку, дозволяється наступну перевірку виконувати раз на квартал
Щоквартальний	Контроль напруги тривалого підзаряду з урахуванням температури установки; вимір напруги всіх елементів або моноблоків	Якщо напруги елементів або моноблоків відповідають розкиду, зазначеному виробником, протягом півроку, наступну перевірку можна виконувати раз на півроку
Піврічний	Контроль напруги тривалого підзаряду з урахуванням температури; вимір напруги всіх елементів або моноблоків; перевірка моменту затягування болтів кріплення МСЗ; оцінка цілісності корпусів, відсутності здуття баків та витoku електроліту через стики кришок і кріплення виводів або запобіжних клапанів; очищення акумуляторів та відновлення антикорозійного змащення відкритих струмопровідних частин	Для установок із розрядним режимом більше 0,5 год перевірку затягування болтів МСЗ дозволяється виконувати раз на рік
Річний	Виконання робіт та перевірок у складі піврічного контролю; проведення контрольного розряду установки	Якщо розклад напруги елементів або моноблоків нормальний, контрольний розряд допускається проводити один раз на два роки

Герметизовані акумулятори, що вийшли з ладу, бажано замінювати елементами або моноблоками тієї ж серії виробництва, що пройшли аналогічні умови зберігання та експлуатації. Перед встановленням у батарею замінені акумулятори необхідно витримати на підзаряді протягом шести діб після завершення дозаряду. Підключення нових елементів до установки слід здійснити протягом 48 годин після підготовки.

Термін чергового дозаряду герметизованих акумуляторів під час зберігання визначається згідно з температурним режимом і типом електроліту (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Періодичність чергового заряду герметизованих акумуляторів під час зберігання.

Тип акумуляторів	Час до чергового заряду при 20 °С	Час до чергового заряду при 30 °С	Час до чергового заряду при 40 °С
З абсорбованим електролітом	6 місяців	4 місяці	2 місяці
Із загущеним (гелевим) електролітом	15 місяців	8 місяців	4 місяці

Монтаж і експлуатація високовольтних акумуляторних установок пов'язані з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Тому при роботах слід дотримуватися наступних заходів безпеки:

- При монтажі необхідно обмежити напругу шляхом поділу установки на секції з напругою до 110 В, з'єднання між якими підключаються останніми після перевірки правильності монтажу та ізоляції; ізоляційні кришки міжсекційних з'єднувачів (МСЗ) повинні мати відмінне маркування від захисних кришок інших МСЗ.

- Роботи з високовольтними акумуляторними батареями не дозволяється виконувати одному фахівцю.

- Використовуються лише інструменти з ізольованими ручками, діелектричні рукавички та килими (або калоші).

- Після монтажу на видному місці батареї наноситься напис: “Акумуляторна батарея високої напруги”.

Необхідно пам'ятати, що акумулятори мають дуже низький внутрішній опір, тому випадкове коротке замикання навіть одного елемента може спричинити великий струм розряду, що загрожує опіками персоналу, вибухом або виходом з ладу частини або всієї установки.

Під час експлуатації МСЗ зазвичай закривають штатними ізоляційними кришками. Вимірювальні контакти повинні здійснюватися через спеціальні отвори у кришках; при їх відсутності одночасно відкривати можна не більше двох МСЗ. Забороняється використання неізольованого

інструмента та носіння металевих предметів, включно з браслетами і каблучками, на робочому місці.

Усі роботи, що передбачають дотик до металевих струмопровідних частин установки високої напруги (крім вимірювання напруги), проводяться лише після відключення установки від навантаження і розбивки на безпечні секції з вилученням міжсекційних з'єднувачів.

Іскроутворювальні інструменти і прилади дозволяється використовувати на відстані не менше 0,5 м від вентиляційних пробок або запобіжних клапанів. Роботи, пов'язані зі зварюванням, пайкою, абразивними або іншими джерелами іскроутворення, виконуються лише після відключення установки від ЕЖУ та навантаження й обов'язкового провітрювання приміщення протягом однієї години.

Зберігання герметизованих акумуляторів повинно здійснюватися у сухих, добре провітрюваних приміщеннях при температурі, дозволеній для конкретного типу акумуляторів, без герметичної закупорки в транспортній або іншій тарі.

Системи герметизованих акумуляторів забезпечують надійне зберігання та використання електроенергії, проте їх експлуатація потребує суворого дотримання правил технічної безпеки та рекомендацій виробника.

Термін служби акумуляторних установок значною мірою залежить від температурних умов експлуатації. Кожне підвищення температури на 10 °C зменшує ресурс герметизованих елементів приблизно вдвічі. Тому важливо здійснювати температурну компенсацію підзарядної напруги та контролювати умови навколишнього середовища.

Технічне обслуговування має бути регулярним і включати контроль напруги, перевірку цілісності елементів, антикорозійне обслуговування та контроль температури. Рекомендується проводити огляди за встановленим графіком (щомісяця, щоквартально, піврічно, щорічно) із корекцією частоти перевірок залежно від стану установки.

Заміну елементів слід виконувати акуратно, використовуючи акумулятори тієї ж партії та дотримуючись інструкцій щодо попереднього дозаряду і підзаряду перед підключенням до установки.

Безпека при монтажі та експлуатації є критичною, особливо при роботі з високовольтними установками. Використання ізольованого інструмента, засобів захисту, страхувальних систем і дотримання правил роботи на висоті дозволяє запобігти травмам, коротким замиканням та пошкодженню обладнання.

Зберігання акумуляторів повинно здійснюватися у сухих, провітрюваних приміщеннях при контрольованій температурі, без герметичної закупорки, що забезпечує збереження ємності та довготривалу експлуатацію батарей.

Електрична безпека під час роботи з установками вимагає обмеження напруги, правильного підключення секцій, використання ізольованих МСЗ і дотримання дистанцій від потенційних джерел іскроутворення.

Загалом, дотримання встановлених правил експлуатації, технічного обслуговування, температурного контролю та безпеки персоналу дозволяє забезпечити довговічну та ефективну роботу герметизованих акумуляторних установок у різних умовах експлуатації.

4.6 Правила безпечної роботи з сонячними панелями

Фотоелектричні (фотогальванічні) системи перетворюють сонячне випромінювання у постійний електричний струм, який можна зберігати в електрохімічних батареях або подавати у домашню електромережу. При монтажі, технічному обслуговуванні та ремонті таких систем особливо важливо дотримуватися правил безпеки для запобігання травм, опіків та пошкоджень обладнання, а також для забезпечення ефективної експлуатації панелей і батарей.

Незалежно від того, чи підключаються панелі один до одного, чи виконується монтаж каркасу, недостатня увага до безпеки може призвести до

падіння з висоти, травмування пальців або пошкодження конструкційних елементів.

Оцінка робочого майданчика та ризику. Кожний будинок і комерційний об'єкт є унікальними, тому перед встановленням сонячних панелей фахівці повинні провести огляд місця монтажу. Під час цієї оцінки слід виконати: вибір інструментів, які забезпечують точність вимірювань і безпечне встановлення; визначення оптимального розташування панелей, інверторів та батарей для максимальної ефективності; оцінку орієнтації та доступу до сонячного світла, площі для монтажу та міцності конструкцій; ідентифікацію потенційних небезпек на території; складання плану розташування будівель, обладнання та інфраструктури; вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання і середньої температури для оцінки очікуваної продуктивності системи; визначення електроспоживання будівлі за рахунками та показаннями лічильників, а також консультації з власником.

Після отримання доступу сонячних панелей до сонячного світла вони можуть нагріватися, що створює ризик опіків. Тому слід дотримуватися таких правил: усі роботи з панелями виконуються мінімум удвох для запобігання травмам і пошкодженню обладнання; підйом панелей за допомогою сходів замінюють механізмами (кран, підйомник, лебідка); панелі покривають непрозорим матеріалом для запобігання нагріванню та опікам; використовують засоби індивідуального захисту: каски, рукавички та спецвзуття; при тривалому перебуванні на сонці рекомендується використовувати сонцезахисні креми.

Ризики падіння з висоти. Монтаж на даху потребує особливої уваги через високий ризик падіння. Небезпечними є також сходи та робочі майданчики на рівні землі. Щоб зменшити небезпеку: заздалегідь очистіть дах та майданчик від перешкод; перекрийте тимчасово будь-які отвори; для робіт на висоті понад 1,5 м встановлюють огороження та страхувальні пояси; натягують захисні сітки по периметру робочої зони.

Електрична безпека. Сонячні системи складаються з численних електричних компонентів, які при підключенні до навантаження здатні спричинити ураження струмом та опіки. Для безпечної роботи слід дотримуватися таких заходів: закривати панелі непрозорими матеріалами після розпакування; перед підключенням системи перевіряти відсутність напруги на об'єкті; не виконувати роботи під навантаженням; суворо дотримуватися інструкцій виробника щодо підключення та обслуговування.

Технічне обслуговування сонячних панелей. Регулярне технічне обслуговування фотогальванічних систем є критично важливим для забезпечення їхньої ефективності, довговічності та безпеки. Обслуговування включає перевірку механічної цілісності конструкцій, електричних з'єднань, стану панелей та акумуляторних батарей.

Основні заходи технічного обслуговування:

Перевірка механічних кріплень та каркасів: контролюють міцність монтажних кронштейнів та каркасів; перевіряють відсутність корозії, деформацій або тріщин; регулюють натяг кріпильних елементів відповідно до рекомендацій виробника.

Огляд та очищення панелей: очищають поверхню панелей від пилу, листя, снігу та інших забруднень; використовують м'які матеріали та спеціальні миючі засоби, що не пошкоджують покриття; уникають застосування абразивних матеріалів і сильних хімічних реагентів.

Перевірка електричних з'єднань і кабелів: оглядають на наявність пошкоджень, перегріву та окислення контактів; контролюють натяг кабелів, уникання їхнього провисання або тертя об конструкції; при виявленні

пошкоджених проводів проводять заміну або ремонт із дотриманням вимог безпеки.

Моніторинг продуктивності системи: перевіряють напругу та струм на вході й виході інверторів; контролюють рівень заряду акумуляторних батарей; оцінюють відповідність фактичної продуктивності очікуваним показникам з урахуванням сонячного випромінювання.

Обслуговування акумуляторних батарей: перевіряють стан клем та міжелементних з'єднань; контролюють температуру та напругу окремих елементів; при необхідності виконують дозаряд або балансування елементів відповідно до технічної документації; дотримуються правил безпеки при роботі з електролітом або герметизованими батареями.

Документування та журнал обслуговування: ведуть записи про дати перевірок, проведені роботи, виміряні параметри; фіксують будь-які відхилення від номінальних характеристик та виконані коригуючі дії; журнал обслуговування дозволяє відстежувати стан системи та прогнозувати строки заміни компонентів.

Заходи безпеки під час технічного обслуговування: виконувати роботи вдвох або в присутності колеги; перед початком перевірки відключати панелі від навантаження та контролювати відсутність напруги; використовувати засоби індивідуального захисту: рукавички, окуляри, каски та спецвзуття; не працювати під прямим сонцем без захисту шкіри та очей; забезпечити надійне страхування при роботі на висоті, використовуючи пояси безпеки та огорожувальні сітки.

Регулярне і систематичне технічне обслуговування підвищує надійність сонячних панелей, знижує ризик аварій і травм та продовжує термін служби всієї фотогальванічної системи.

ВИСНОВКИ

Сучасні умови функціонування енергетичної системи України, що характеризуються високим рівнем нестабільності та системними ризиками енергозабезпечення, зумовили необхідність глибокого переосмислення підходів до організації електроживлення промислових підприємств і критично важливих об'єктів. Проведене дослідження підтвердило, що традиційні централізовані схеми електропостачання більше не гарантують належної надійності, а забезпечення безперервної роботи технологічно чутливих електроприймачів потребує впровадження автономних та гібридних систем живлення.

У роботі встановлено, що ключем до підвищення енергетичної стійкості є застосування комплексного підходу, який поєднує джерела безперебійного живлення, відновлювані джерела енергії та сучасні системи накопичення енергії. Такий підхід забезпечує не лише підтримання роботи критичного обладнання у разі аварій у мережі, а й сприяє оптимізації енергоспоживання, зменшенню пікових навантажень і скороченню експлуатаційних витрат.

Проведений аналіз типів і характеристик ДБЖ показав, що ці системи відіграють ключову роль у забезпеченні високої якості електроживлення, стабілізації параметрів напруги та повному виключенні перерв у роботі обладнання. Дослідження можливостей інтеграції ДБЖ із сонячними електростанціями та літій-залізо-фосфатними системами накопичення підтвердило, що така комбінація формує ефективну інфраструктуру, здатну функціонувати як автономна або квазіавтономна система електроживлення.

Важливим результатом роботи є формування практичних рекомендацій щодо впровадження таких систем на промислових об'єктах, включаючи вибір типів ДБЖ, акумуляторних батарей, параметрів сонячної генерації та алгоритмів керування. Це дозволяє адаптувати рішення до конкретних умов експлуатації й забезпечити максимальну ефективність та стійкість електропостачання.

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження сучасних підходів до забезпечення безперебійного та енергоефективного

живлення критичних електроприймачів підприємств малого бізнесу в умовах нестабільної роботи електроенергетичної системи України. На основі проведених аналітичних, технічних та проєктних досліджень сформовано такі підсумкові висновки:

У першому розділі проаналізовано сучасний стан об'єднаної енергетичної системи України, яка характеризується підвищеною нестабільністю через пошкодження інфраструктури та нерівномірність генеруючих потужностей. Показано, що для підприємств малого бізнесу забезпечення надійного живлення критичних електроприймачів є ключовою умовою безперервності роботи. Проведено аналіз сучасних методів резервування, типів систем ДБЖ та технічних рішень автономного електроживлення, включаючи генератори, сонячні станції та системи накопичення енергії. Встановлено, що найбільш ефективним напрямом є впровадження комбінованих систем, у яких ДБЖ інтегрується з ВДЕ та акумуляторними батареями.

У другому розділі виконано розрахунок електричних навантажень підприємства малого бізнесу Кіровоградської області та визначено параметри критичних електроприймачів. Проведено аналіз сонячної інсоляції регіону та обрано оптимальний кут нахилу фотомодулів для максимізації річного виробітку електроенергії. Розглянуто можливості застосування різних типів систем накопичення енергії (LiFePO₄, AGM, GEL), що дозволило обґрунтувати вибір найефективнішої технології для забезпечення довговічності та високих показників безпеки. Обрано оптимальну конструкцію автономної фотоелектричної установки, адаптовану до умов експлуатації підприємства.

У третьому розділі розроблено енергоефективну систему електроспоживання критичних електроприймачів із використанням сонячних панелей, ДБЖ та акумуляторної батареї. Проведено вибір типу фотомодулів, розглянуто вплив температури на їхні енергетичні характеристики та побудовано математичну модель сонячної батареї у середовищі Simulink (SimPowerSystems). Виконано енергетичний баланс фотоелектричної установки та розраховано робочу циклограму заряду–розряду акумуляторної батареї, що дозволило

визначити оптимальні режими її роботи та обґрунтувати необхідну ємність для забезпечення автономності системи.

У четвертому розділі досліджено питання охорони праці та експлуатаційної безпеки обладнання резервного живлення. Узагальнено нормативні вимоги та стандарти щодо встановлення, вибору та використання ДБЖ в Україні. Розглянуто правила монтажу, вводу в експлуатацію та технічного обслуговування систем резервного електроживлення. Наведено рекомендації щодо безпечної роботи з сонячними панелями, акумуляторними системами та обладнанням високої напруги, що є необхідним для мінімізації технологічних ризиків.

На основі проведених досліджень доведено, що інтеграція джерел безперебійного живлення з фотоелектричними установками та системами накопичення енергії дозволяє суттєво підвищити рівень енергетичної автономності підприємства, зменшити вплив аварійних відключень та оптимізувати структуру електроспоживання. Запропонована система забезпечує високу надійність, адаптивність роботи в умовах змінної генерації та економічну ефективність завдяки зниженню витрат на електроенергію.

У кваліфікаційній роботі досягнуто поставленої мети – розроблено енергоефективну систему електроспоживання критичних електроприймачів малого підприємства, яка забезпечує безперервність живлення, оптимальне використання ДБЖ та акумуляторів, можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищення загальної енергетичної стійкості.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання розробленої системної концепції під час модернізації енергетичної інфраструктури підприємств малого та середнього бізнесу, впровадження резервного живлення для критичних споживачів та побудови автономних енергетичних рішень у регіонах зі складними умовами електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna_systema_ukrainy_stan_na_kinets_2024_roku_ta_stsenarii_na_2025
2. <https://mev.gov.ua/>
3. Романишен О. В. Підвищення надійності системи електропостачання / О. В. Романишен, Д. Р. Клименко, І. М. Сисак // Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. – Т. : ТНТУ, 2020. – Том 2. – С. 128. – Електротехніка та енергозбереження).
4. Андреев А.І., Банзак О.В. Джерела безперебійного живлення телекомунікаційних і комп'ютерних систем: навч. посіб. / А.І. Андреев, О.В. Банзак – Одеса, 2010. – 196 с.
5. <https://solar-tech.com.ua/>
6. <http://solargis.info/imaps/#loc=32.045333,35.266107&c=32.054645,399.759522&z=6>
solargis info
7. SolarGIS is a geographical information system designed to meet the needs of the solar energy industry. RENEWABLE ENERGY WORLD <http://new-renenergy.ru/geo/602-ispolzovanie-geotermalnoj-jenergii-dlja-vyrabotki.html>
8. Клименко В.В., Масри М. Применение суперконденсаторов для повышения энергоэффективности систем альтернативного энергоснабжения /С.37-38 : Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві”. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – 172 с.
9. Махмуд Масри. Анализ и усовершенствование систем энергоснабжения с использованием нетрадиционных и возобновляемых источников энергии /С. 234-236 // Збірник праць молодих науковців КНТУ.–Вип.4.– Кіровоград: КНТУ, 2015.– с.333.
10. Адаменко О., Височанський В., Лютко В. Під ред. Вінцентія Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії.- Івано-Франківськ.: Полум'я, 2000 – 256с.
11. Денисюк С.П. Принципи побудови автономних систем енергопостачання на базі нетрадиційних джерел енергії// Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії №2. – К.: Держ. Комітет з енергозбереж. Укр. НАН Укр, АТ „Укренергозбереження”. – 1999. – с.39 – 42.
12. Ковалко М. П., Денисюк С. П. Енергозбереження - пріоритетний напрямок державної політики України. – К.: Українські енциклопедичні знання, 1998. - 512с.
13. Кудря С. О. Системи акумулювання і перетворення енергії відновлюваних джерел: Дис. д – ра техн. Наук.: 05.14.08 / НАН Укр., Інститут електродинаміки. – К., 1996 - 549л.

14. Кузьмінський Є. В., Колбасов Г. Я., Тевтуль Я. Ю., Голуб Н. Б. Нетрадиційні електрохімічні системи перетворення енергії. – Київ.: Академперіодика, 2002. – 182с.

15. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. [Чинний від 2012-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 20 с.

16. ДСТУ EN 61140:2015. Захист проти ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання (IEC 61140:2001, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 39 с. 17. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017- 01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 61 с.

18. НПАОП 40.1-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. [Чинний від 2002-01-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство праці та соціальної політики України, 2001. 28 с.

19. НПАОП 0.00-6.15-99. Порядок проведення опосвідчення електроустановок споживачів. [Чинний від 2000-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держнаглядохоронпраці України, 1999. 16 с. 70

20. ДСТУ EN IEC 62040-1:2020. Системи безперебійного живлення. Частина 1. Вимоги щодо безпеки (EN IEC 62040-1:2019, IDT; IEC 62040-1:2017, IDT). На заміну ДСТУ IEC 62040-1:2010, ДСТУ EN 62040-1-1:2010 ; [Чинний від 2021-06-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 104 с.

21. ДСТУ EN 60950-1:2015. Обладнання технологій інформації. Безпека. Частина 1. Загальні вимоги (IEC 60950-1:2005, IDT). [Чинний від 2016-01- 01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 92 с.

22. ДСТУ IEC 62040-2:2015. Системи гарантованого електропостачання. Агрегати безперебійного живлення. Частина 2. Вимоги до електромагнітної сумісності (IEC 62040-2:2005, IDT). [Чинний від 2016- 01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 51 с.

23. ДСТУ EN 61000-3-2:2016. Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Обмеження. Обмеження емісії струмів вищих гармонік (для сили вхідного струму обладнання не більше 16 А на фазу) (IEC 61000-3-2:2014, IDT). [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 45 с.

24. ДСТУ EN 61000-3-3:2017. Електромагнітна сумісність. Частина 3-3. Обмеження. Обмеження змін напруги, флікера в низьковольтних електромережах (IEC 61000-3-3:2013, IDT). [Чинний від 2018-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 34 с.

Параметри діода, що використовується при проектуванні інвертора ФЕУ

122NQ030

Bulletin PD-2.274 rev. B 03/01



Voltage Ratings

Part number	122NQ030
V_R Max. DC Reverse Voltage (V)	30
V_{RRM} Max. Working Peak Reverse Voltage (V)	

Absolute Maximum Ratings

Parameters	122NQ	Units	Conditions
$I_{F(AV)}$ Max. Average Forward Current * See Fig. 5	120	A	50% duty cycle @ $T_C = 110^\circ\text{C}$, rectangular wave form
I_{FSM} Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current * See Fig. 7	22,500	A	Following any rated load condition and with rated V_{RRM} applied
	2400		
E_{AS} Non-Repetitive Avalanche Energy	54	mJ	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{AB} = 12\text{Amps}$, $L = 0.75\text{mH}$
I_{AR} Repetitive Avalanche Current	12	A	Current decaying linearly to zero in 1 μsec Frequency limited by T_J max. $V_A = 1.5 \times V_R$ typical

Electrical Specifications

Parameters	122NQ	Units	Conditions
V_{FM} Max. Forward Voltage Drop (1) * See Fig. 1	0.49	V	@ 120A
	0.59	V	@ 240A
	0.41	V	@ 120A
	0.54	V	@ 240A
I_{RM} Max. Reverse Leakage Current (1) * See Fig. 2	10	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$
	560	mA	$T_J = 125^\circ\text{C}$
C_T Max. Junction Capacitance	7400	pF	$V_R = 5V_{DC}$, (test signal range 100Khz to 1Mhz) 25°C
L_S Typical Series Inductance	7.0	nH	From top of terminal hole to mounting plane
dv/dt Max. Voltage Rate of Change (Rated V_R)	10,000	V/ μs	

[1] Pulse Width < 300 μs , Duty Cycle < 2%

Thermal-Mechanical Specifications

Parameters	122NQ	Units	Conditions	
T_J Max. Junction Temperature Range	-55 to 150	$^\circ\text{C}$		
T_{stg} Max. Storage Temperature Range	-55 to 150	$^\circ\text{C}$		
$R_{\theta JC}$ Max. Thermal Resistance Junction to Case	0.40	$^\circ\text{C/W}$	DC operation * See Fig. 4	
$R_{\theta CS}$ Typical Thermal Resistance, Case to Heatsink	0.15	$^\circ\text{C/W}$	Mounting surface, smooth and greased	
wt Approximate Weight	25.6(0.9)	g(oz.)		
T Mounting Torque	Min.	40(35)	Non-lubricated threads	
	Max.	58(50)		
	Terminal Torque	Min.		58(50)
		Max.		86(75)
Case Style	HALF PAK Module			

Параметри транзистора, що використовується при проектуванні ФЕУ

International
IOR Rectifier

PD - 97482

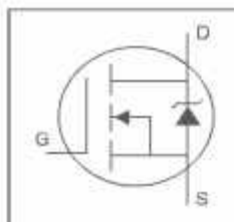
AUTOMOTIVE GRADE

AUIRF1324

HEXFET® Power MOSFET

Features

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Repetitive Avalanche Allowed up to T_{jmax}
- Lead-Free, RoHS Compliant
- Automotive Qualified *



V_{DS}		24V
$R_{DS(on)}$	typ.	1.2mΩ
	max.	1.5mΩ
I_D (Silicon Limited)		353A Ⓢ
I_D (Package Limited)		195A

Description

Specifically designed for Automotive applications, this HEXFET® Power MOSFET utilizes the latest processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. Additional features of this design are a 175°C junction operating temperature, fast switching speed and improved repetitive avalanche rating. These features combine to make this design an extremely efficient and reliable device for use in Automotive applications and a wide variety of other applications.



G	D	S
Gate	Drain	Source

Absolute Maximum Ratings

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other condition beyond those indicated in the specifications is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Ambient temperature (T_A) is 25°C, unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$ (Silicon Limited)	353 Ⓢ	A
I_D @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$ (Silicon Limited)	249 Ⓢ	
I_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$ (Package Limited)	195	
I_{DM}	Pulsed Drain Current Ⓢ	1412	
P_C @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	300	W
	Linear Derating Factor	2.0	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy (Thermally Limited) Ⓢ	270	mJ
I_{AR}	Avalanche Current Ⓢ	See Fig. 14, 15, 22a, 22b	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy Ⓢ		mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery Ⓢ	0.46	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds (1.6mm from case)		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw		
		10lb·in (1.1N·m)	

Thermal Resistance

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case Ⓢ	—	0.50	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

HEXFET® is a registered trademark of International Rectifier.

*Qualification standards can be found at <http://www.irf.com/>

Додаток А.3

Механічні параметри акумуляторної батареї, що використовується в даній ФЕУ



Характеристики та опис

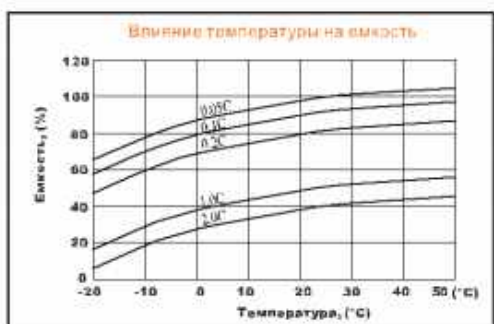
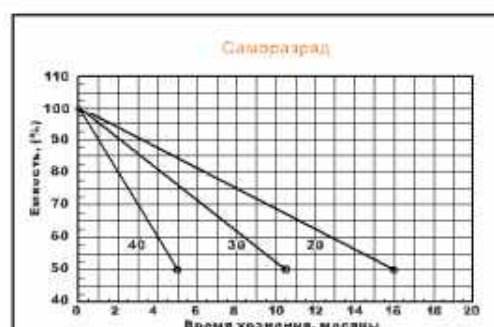
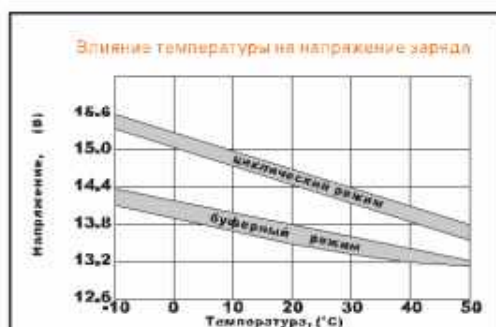
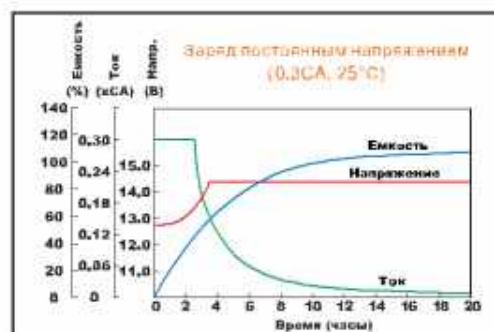
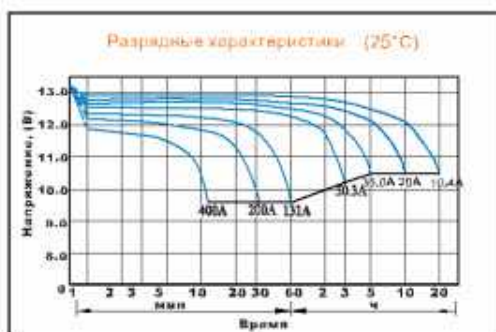
Виробник	Delta Battery
Країна виробник	Туреччина
Ємність акумулятору	100 А. г
Матеріал виготовлення корпусу	Пластик ABS
Напруга	12 В
Тип акумулятора	GEL
Тип струмовивіду	Кольцевий наконечник М8
Струм заряду	30 А

Герметизовані свинцево-кислотні акумулятори, що не обслуговуються, DELTA 12В 100 А·год серії GEL виготовлені за технологією AGM+GEL: combined AGM and GEL technology. Це сучасне технологічне рішення, що поєднує спеціалізовані AGM сепаратори, з частковим згущенням електроліту, для отримання подвійної переваги: високих розрядних характеристик, властивих AGM технології, і високої експлуатаційної стійкості, яка характерна для акумуляторів, виготовлених за технологією AGM+GEL. Акумулятори призначені для роботи як у буферному, так і циклічному режимах. Рекомендуються для застосування в автономних енергосистемах, а також разом із системами на базі альтернативних джерел енергії. Акумулятор оснащений LCD-дисплеєм, на якому відображається статус роботи АКБ: показники напруги, ємності та кількості днів в експлуатації. Конструкція батареї Полож. пластина: Діоксид свинцю Отриц. пластина: Свинець Корпус: ABS Кришка: ABS Клапан: Каучук Клеми: Мідь Сепаратор: Скловолокно Електроліт: Сірчана кислота Технічні характеристики Номінальна напруга 12 В Число елементів 6 Термін служби 10-12 років Номінальна ємність (25 ° C) 10 годинний розряд (10 А; 1.80 В/ел) 100 Ач 5 годинний розряд (17.2 А; 1.75 В/ел) 86 Ач 1 годинний розряд (65.1 А; 1.65 В/ел) 65.1 Аг Саморозряд 3% ємності на місяць за 20°C Внутрішній опір повністю зарядженої батареї (25 ° C) 4 мОм Особливості Технологія AGM+GEL; тривалий термін служби; Стійкість до глибоких розрядів; Температурна стабільність показників; Виключено витоку кислоти, гарантовано безпечну експлуатацію з іншим обладнанням; Відсутнє газовиділення, досить природна вентиляція; Немає необхідності у контролі рівня та доливі води; Корпус акумулятора виконаний із пластику ABS, що не підтримує горіння. Робочий діапазон температур

Розряд -20÷60 Заряд -10÷60 Зберігання -20÷60 Макс. розрядний струм (25 ° C) 900 А (5с) Циклічний режим (2.3÷2.35 В/ел) Макс.зарядний струм 30 А Температурна компенсація 30 мВ/°C Буферний режим (2.23÷2.27 В/ел) Температурна компенсація 20 мВ/°C Габарити (±1мм) Довжина, мм 333 Ширина, мм 173 Висота, мм 216 Повна висота, мм 222 Вага (±3%), кг 32.5

Додаток А.4

Електричні параметри сакумуляторної батареї, яка використовується для ФЕУ



Интернет-магазин RealSolar.ru
Тел.: (812) 921-52-96
E-mail: sale@realsolar.ru

Додаток А.5

Модельний опис сонячної батареї в програмі MatLab. Нижче наведений приклад розрахункового сценарію MatLab, що задає параметри моделюємої сонячної панелі. Після викликання сценарію в робочій області MatLab будуть зберігатись відповідні змінні, значення котрих будуть використовуватись в Simulink.

```

%Constants for volt-ampere characteristics
q=1.6*10^-19;T=300;k=1.38*10^-23;
%Input power density (W/m^2)
Pin=1000/10^4;
%Indeed to enter open circuit voltage
%and short circuit current of solar cell
Uoc=input('Enter open circuit voltage(B): ');
Ipv=input('Enter short circuit current(mA): ');
%Calculation of diode dark current
%Uoc=0.887;Ipv=19.4e-3;
Io=Ipv/(exp((q*Uoc)/(k*T))-1);
%Volt-ampere characteristic with the funcion
%of Is (0 to Ipv)
Is=0:0.0000001:Ipv;
U=(k*T/q)*log(((Ipv-Is)/Io)+1);
%Output power of solar cell
P=(U'.*Is');
%Finding at maximum power point (pmax),(iopt),u(opt)
Pmax=max(P);Iopt=Is(P==Pmax);Uopt=U(P==Pmax);
%Current coefficient and voltage coefficient
Ku=Uopt/Uoc;Ki=Iopt/Ipv;
%Calculation of fill factor (FF)
FF=(Iopt*Uopt)/(Ipv*Uoc);
%Calculation of coefficient(%)
coefficient=((Uoc*Ipv*FF)/Pin)*100;
%Calculation of three point
Uvd=0.1;
U3=Uoc-(Ipv/Iopt)*(Uoc-Uopt)-Uvd;
r3=(Uoc-Uopt)/Iopt;
% Display values
fprintf('Pmax(W) =%5.5f\n',Pmax);
fprintf('Uoc(V) =%5.5f\n',Uoc);
fprintf('Uopt(V) =%5.5f\n',Uopt);
fprintf('Ipv(A) =%5.5f\n',Ipv);
fprintf('Iopt(A) =%5.5f\n',Iopt);
fprintf('Current coefficient Ki=%5.3f\n',Ki);
fprintf('Voltage coefficient Ku=%5.3f\n',Ku);
fprintf('The value of FF=%5.3f\n',FF);
fprintf('Efficiency(1000(W/m^2))=%5.3f\n',coefficient);
fprintf('By algorithm U3=%5.3f\n',U3);
fprintf('By algorithm r3=%5.3f\n',r3);
fprintf('By algorithm Uvd=%5.3f\n',Uvd);
%Solar module
Urequire=input('Enter the amount of require voltage for solar module: ');
Irequire=input('Enter the amount of require current for solar module: ');
%Urequire=12;Irequire=5;
Nsm=fix(Urequire/Uopt);
Npm=fix(Irequire/Iopt);
Uocm=U.*Nsm;Ism=Is.*Npm;
Pm=Uocm.*Ism;

```

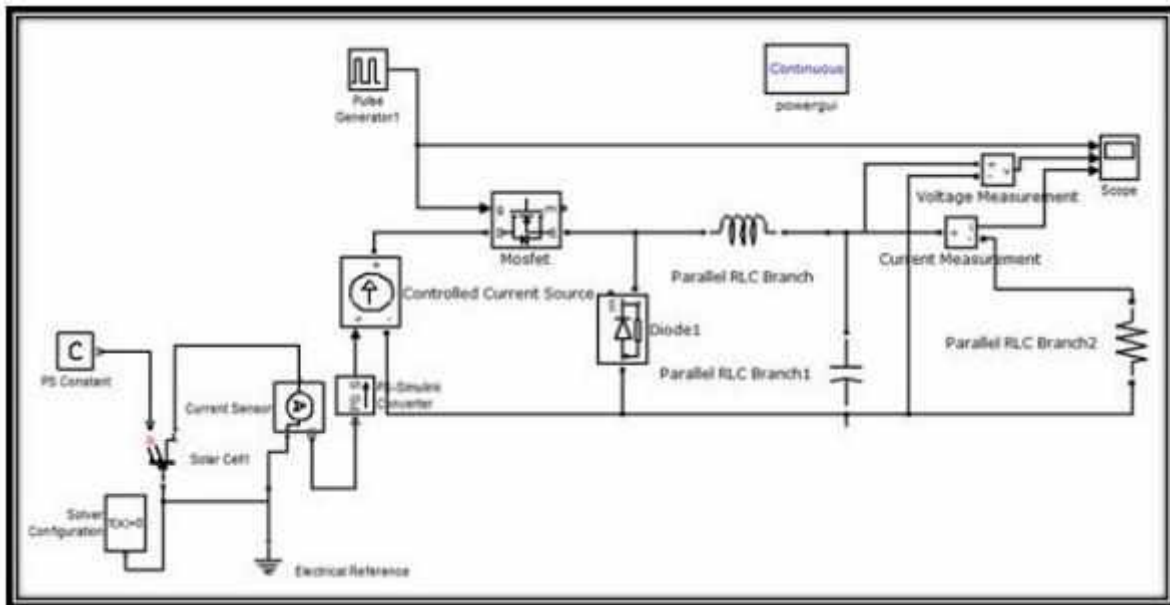
```

%Finding at maximum power point for solar modules (pmax),(iopt),u(opt)
Pmaxm=max(Pm);Ioptm=Ism(Pm==Pmaxm);Uoptm=Uocm(Pm==Pmaxm);
figure(1)
subplot(2,2,2);plot(Ism,Uocm,'r','LineWidth',1.5);grid;xlabel('Current
(A)');ylabel('Voltage (V)');
text(Ioptm,Uoptm,' \leftarrow Uoptm:Ioptm','FontSize',11);
title('Solar module I-V curves',...
'FontWeight','bold');
x2=max(Ism)*1.4;y2=max(Uocm)*1.1;set(gca,'xtick',0:(fix(x2/10)):x2);set(gca,'ytick',0
:(y2/10):y2);
xlim([0 max(Ism)*1.4]);ylim([0 max(Uocm)*1.1]);
subplot(2,2,4);plot(Uocm,Pm,'blue','LineWidth',1.5);grid;xlabel('Voltage
(V)');ylabel('Power (W)');
text(Uoptm,Pmaxm,' \leftarrow Poptm','FontSize',11);
title('Solar module P-V curves',...
'FontWeight','bold');
x3=max(Uocm)*1.3;y3=max(Pm)*1.1;set(gca,'xtick',0:(fix(x3/10)):x3);set(gca,'ytick',0:
(fix(y3/10)):y3);
xlim([0 max(Uocm)*1.3]);ylim([0 max(Pm)*1.1]);
%Plotting volt-ampere characteristics
subplot(2,2,[1 3]);hlines=plot(U,P,U,Is,'r','LineWidth',1.5);grid
text(Uopt,Pmax,' \leftarrow Pmax','FontSize',11);
text(Uopt,Iopt,' \leftarrow Uopt:Iopt','FontSize',11);
xlabel('Voltage (V)');ylabel('Power(W):Current (A)');
title('Adjusted P-V & I-V curves',...
'FontWeight','bold');
%x nae y nae axis twa ko a sate sate lot ya aung lot htar dar
xl=Uoc*1.1;yl=Ipv*1.1;set(gca,'xtick',0:(xl/10):xl);grid;set(gca,'ytick',0:(yl/10):yl
);grid

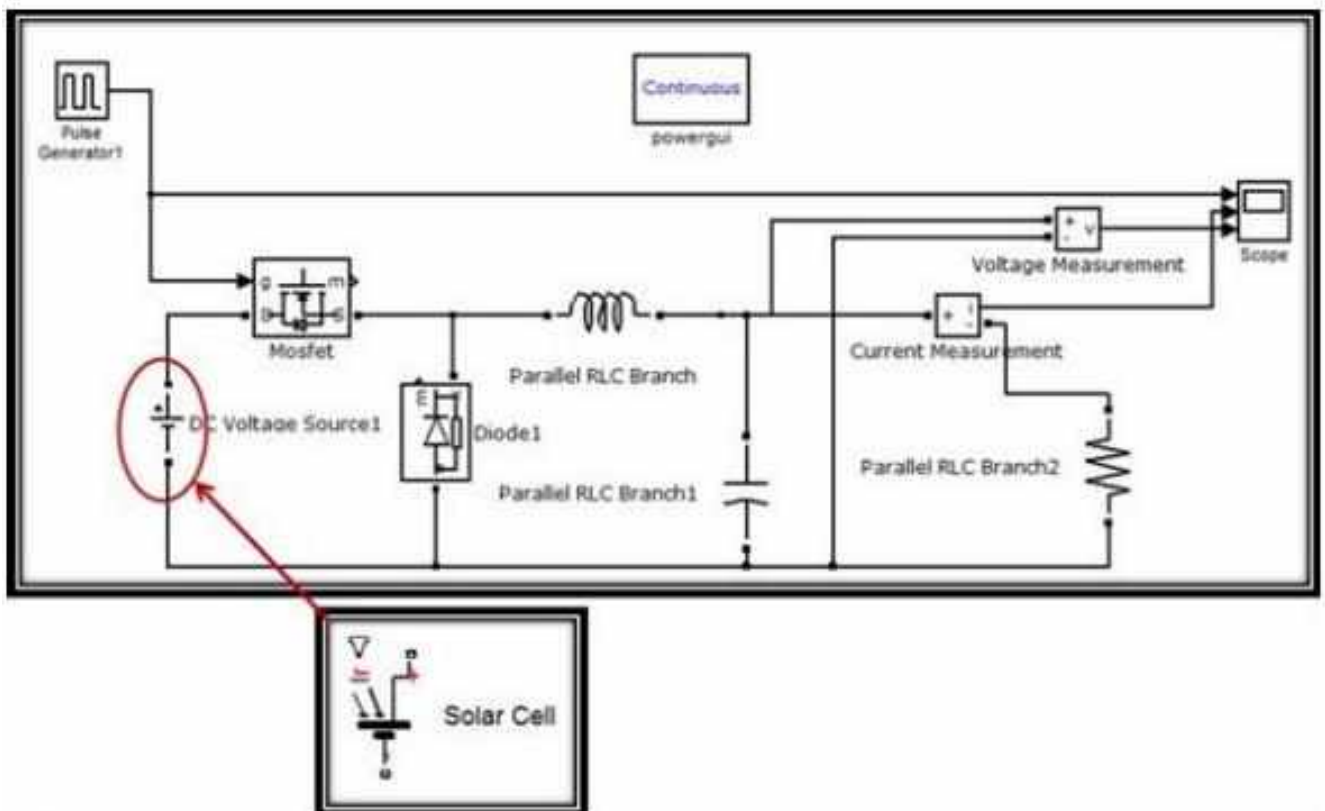
xlim([0 Uoc*1.1]);ylim([0 Ipv*1.1]);
% Set DisplayNames for the lines for use by the legend
set(hlines(1),'Displayname','Power Curve')
set(hlines(2),'Displayname','Voltage-ampere Curve')
% Center a legend at the top of the graph
legend('Location','South')
%Current coefficient and voltage coefficient for module
Kum=Uoptm/max(Uocm);Kim=Ioptm/max(Ism);
%Calculation of fill factor (FF) for module
FFm=(Ioptm*Uoptm)/(max(Ism)*max(Uocm));
%To calculate Pinm
totalcell=Nsm*Npm;
Pinm=totalcell*Pim;
%Calculation of coefficient(%) for module
coefficient_m=((max(Uocm)*(max(Ism))*FFm)/Pinm)*100;
%area of modules (m^2)
area=totalcell/10^4;
%Calculation of three point for module
Uvdm=0.1;
U3m=max(Uocm)-((max(Ism))/Ioptm)*(max(Uocm)-Uoptm)-Uvd;
r3m=(max(Uocm)-Uoptm)/Ioptm;
%to display results
fprintf('Pmax(W) =%5.5f\n',Pmaxm);
fprintf('Uocm(V) =%5.5f\n',max(Uocm));
fprintf('Uoptm(V) =%5.5f\n',Uoptm);
fprintf('Ipv(A) =%5.5f\n',max(Ism));
fprintf('Ioptm(A) =%5.5f\n',Ioptm);
fprintf('The amount of series cells Nsm=%5.0f\n',Nsm);
fprintf('The amount of parallel cells Npm=%5.0f\n',Npm);
fprintf('The amount of total cells Ntotal=%5.0f\n',totalcell);
fprintf('The area of modules area (m^2)=%5.2f\n',area);
fprintf('Current coefficient Ki=%5.3f\n',Kim);
fprintf('Voltage coefficient Ku=%5.3f\n',Kum);
fprintf('The value of FF_m=%5.3f\n',FFm);
fprintf('Efficiency(1000(W/m^2)) =%5.3f\n',coefficient_m);
fprintf('By algorithm U3_m=%5.3f\n',U3m);
fprintf('By algorithm r3_m=%5.3f\n',r3m);
fprintf('By algorithm Uvd_m=%5.3f\n',Uvdm);

```

Моделювання сонячних елементів в програмі Simulink



Моделювання СБ в SimPowerSystems



Моделювання СБ, з використанням постійного джерела живлення в якості сонячного елемента в SimPowerSystems

Додаток А.7

Характеристики інвертора для ФЕУ з потужністю 2000 Вт



MS Series Specifications

	MS2000	MS2012	MS2024	MS2812	MS4024
Inverter Specifications					
Input battery voltage range	9 - 17 VDC	9 - 17 VDC	18 - 34 VDC	9 - 17 VDC	18 - 34 VDC
Nominal AC output voltage	120 VAC ± 5%	120 VAC ± 5%	120 VAC ± 5%	120 VAC ± 5%	120 VAC ± 5%
Output frequency and accuracy	60 Hz ± 0.1 Hz	60 Hz ± 0.1 Hz	60 Hz ± 0.1 Hz	60 Hz ± 0.1 Hz	60 Hz ± 0.1 Hz
Total Harmonic Distortion (THD)	< 5%	< 5%	< 5%	< 5%	< 5%
1 msec surge current (amps AC)	50	50	75	70	120
100 msec surge current (amps AC)	33	33	37	40	72
5 sec surge power (real watts)	3300	3300	2650	3900	5800
30 sec surge power (real watts)	3100	3100	2750	3800	5400
5 min surge power (real watts)	2800	2800	2700	3200	4900
30 min surge power (real watts)	2200	2200	2200	3000	4500
Continuous power output at 25° C	2000 VA	2000 VA	2000 VA	2800 VA	4000 VA
Maximum continuous input current	266 ADC	266 ADC	133 ADC	373 ADC	266 ADC
Inverter efficiency (peak)	89%	89%	86%	88%	87%
Transfer time	16 msec	16 msec	16 msec	16 msec	16 msec
Search mode (typical)	5 watts	7 watts	7 watts	7 watts	7 watts
No load (120 VAC output, typical)	25 watts	25 watts	25 watts	30 watts	25 watts
Waveform	Pure Sine Wave	Pure Sine Wave	Pure Sine Wave	Pure Sine Wave	Pure Sine Wave
Charger Specifications					
Continuous output at 25° C	100 ADC	100 ADC	60 ADC	125 ADC	105 ADC
Charger efficiency	85%	85%	85%	85%	85%
Power factor	> .95	> .95	> .95	> .95	> .95
Input current at rated output (AC amps)	15	15	7.9	16	29
General Features and Capabilities					
Transfer relay capability	MS2000: 30 A single input MS2012, MS2812, MS4024: 2 legs at 30 A for 120 V/60 A or 240 V/60 A service				
Five stage charging capability	Bulk, Absorb, Float, Equalize (requires remote), and Battery Saver™				
Battery temperature compensation	Yes, 15 ft Battery Temp Sensor standard				
Internal cooling	0 to 120 cfm variable speed drive using dual 92mm brushless DC fans				
Overcurrent protection	Yes, with two overlapping circuits				
Overtemperature protection	Yes on transformer, MOSFETS, and battery				
Conformal coating on PCBs for corrosion protection	Yes				
Powder coated chassis & top for corrosion protection	Yes				
Stainless steel fasteners for corrosion protection	Yes				
Dual AC branch rated output breakers	Optional on the MS2000 and MS2012 - AC breakers in 15 or 20 amp ratings				
Listings	MS2000: ETL Listed to UL/cUL 458, CSA C22.2 #107.1-01, meets KKK-A-1822E standard / MS2012, MS2812, MS4024: ETL Listed to UL/cUL 458, UL 1741, CSA C22.2 #107.1-01, meets KKK-A-1822E standard / MS2024: NA				
Warranty	Three years (five years when installed on MMP or MP system)				
Environmental Specifications					
Operating temperature	-20° C to +60° C (-4° F to 140° F)				
Nonoperating temperature	-40° C to +70° C (-40° F to 158° F)				
Operating humidity	0 to 95% RH non condensing				
Physical Specifications					
Dimensions (l x w x h)	MS2000: 13.75" x 12.65" x 7.0" (34.9 cm x 32.1 cm x 17.8 cm) MS2012 / 2812 / 4024: 13.75" x 12.65" x 8.0" (34.9 cm x 32.1 cm x 20.3 cm)				
Mounting	Shelf (top or bottom up) or bulkhead (vents up)				
Weight	40 lb (18.1 kg)	42 lb (19.1 kg)	41 lb (18.6 kg)	55 lb (24.9 kg)	55 lb (24.9 kg)
Shipping weight	50 lb (22.7 kg)	50 lb (22.7 kg)	49 lb (22.3 kg)	63 lb (28.6 kg)	63 lb (28.6 kg)
Max operating altitude	15,000' (4570 m)				

Magnum Energy, Inc.

Phone:

Fax:

Web:

Testing for specifications at 25° C

Specifications subject to change without notice.

August 2012, Rev 1

Part #E4-0208

Authorized Magnum Dealer

The Powerful Difference